

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CRISTIANE ROSSATTO CANDIDO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ENTORNO URBANO NO DESEMPENHO TÉRMICO  
E ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÃO EM CURITIBA

CURITIBA

2020

CRISTIANE ROSSATTO CANDIDO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ENTORNO URBANO NO DESEMPENHO TÉRMICO  
E ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÃO EM CURITIBA

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Francine Aidie Rossi.

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

C217a Candido, Cristiane Rossatto  
Análise da influência do entorno urbano no desempenho térmico e energético de edificação em Curitiba/ Cristiane Rossatto Candido. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2020.

Orientadora: Francine Aidie Rossi.

1. Modelagem de informação da construção. 2. Climatologia urbana. I. Universidade Federal do Paraná. II. Rossi, Francine Aidie. III. Título.

CDD: 022.3

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **CRISTIANE ROSSATTO CANDIDO** intitulada: **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ENTORNO URBANO NO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÃO EM CURITIBA**, sob orientação da Profa. Dra. FRANCINE AIDIE ROSSI, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 16 de Novembro de 2020.

Assinatura Eletrônica

19/11/2020 11:38:02.0

FRANCINE AIDIE ROSSI

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

19/11/2020 16:14:11.0

LISANA KATIA SCHMITZ SANTOS

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

19/11/2020 14:04:01.0

LEANDRO CARLOS FERNANDES

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer, primeiramente a minha orientadora, Dr(a) Francine Aidie Rossi, pela paciência, orientação e amizade. Depois a minha família, minha mãe Marta, minha irmã Patricia e meu padrasto Iraci, principalmente pelo apoio financeiro e emocional, ao meu sobrinho João Pedro, por ter deixado muitos dos meus dias mais leves e cheio de amor. Ao meu noivo Marco, por ter acompanhado de perto essa etapa da minha vida e por ter dado todo o apoio possível e quase impossível. Gostaria de agradecer todos os meus amigos que acompanharam as dificuldades e crises existenciais desse momento, em especial, Sarah, Karyna, Emília, Luis, Julia, Camila, Nathalia e Maiz que contribuíram com seu conhecimento ou sabedoria para realização desse trabalho.

Além desses, agradeço aos órgãos públicos que forneceram dados necessários para realização dessa pesquisa, sendo eles: a Superintendência de Infraestrutura (Suinfra) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pela disponibilização dos projetos da edificação analisada nesse estudo e o sistema meteorológico do Paraná (SIMEPAR) pelo fornecimento de dados meteorológicos históricos. Gostaria de agradecer também ao apoio oferecido pela casa 4 da UFPR e ao psicólogo Luis, pelo atendimento em parte dessa jornada.

Agradeço ainda a arquiteta Juliana Lahoz pelo empréstimo da licença do programa Archicad, e a empresa GRAPHISOFT Brasil pelo fornecimento de uma licença do programa Archicad com o plug-in Eco Designer STAR, necessário para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Por fim, mas não menos importante, agradeço aos meus gatos Athena e Ragnar que tornaram essa jornada mais leve, mais alcançável e mais possível.

*"I'm so sick of running  
As fast as I can  
Wondering if I'd get there quicker  
If I was a man"*

Taylor Swift e Joe Little

## RESUMO

Diversos fatores influenciam na formação microclimática urbana, como ilhas de calor, fluxo de ventos, trocas de radiação em espaços urbanos, sendo que esses fatores são pouco considerados nas simulações térmicas e energéticas das edificações pelo processo de balanço de energia ou *Building energy modelling* (BEM). Dentro desse contexto, essa pesquisa teve o objetivo de explorar a influência do entorno urbano na temperatura do ar e como essa mudança influencia no comportamento térmico e no consumo de energia de uma edificação, na cidade de Curitiba-PR. Utilizou-se o algoritmo *Urban Weather Generator* (UWG), para gerar um arquivo climático epw, considerando o entorno urbano da estação meteorológica do SIMEPAR. Como base de dados, foi utilizado o arquivo climático epw referente a estação rural do Aeroporto Afonso Pena (SWERA 838400). O raio de análise utilizado foi de 350 metros, com o centro determinado na localização das duas estações meteorológicas. Foi utilizado um *plug in* para o QGIS denominado *Semi-Automatic Classification* para tirar os valores de taxa de vegetação, área construída e área pavimentada. Após a geração do arquivo climático, a partir do arquivo SWERA 838400, foi realizada simulação térmica e energética de uma edificação que está em construção no campus da UFPR, com o auxílio de uma ferramenta de *Building Information Modelling* (BIM). Os resultados indicam que as temperaturas do ar externas e internas sofrem alteração devido a influência do entorno urbano. A variação de temperatura interna, para o arquivo climático SWERA 838400 e o arquivo climático modificado, chegou a 3,3°C para os meses do inverno. Essa ainda foi a estação que mais teve variação, com aumento das temperaturas mínimas, máximas e médias. Para consumo de energia os resultados demonstraram que para o mês de agosto o consumo para refrigeração aumentou em 23% em relação a desconsideração do entorno urbano. Para consumo de energia anual, a edificação com o arquivo modificado pelo UWG teve aumento de consumo de quase 12%.

**Palavras-chave:** Urban Weather Generator; Desempenho térmico e energético de edificações; Entorno urbano

## ABSTRACT

Several factors influence the microclimate formation, such as heat islands, wind flow, radiation exchanges in urban spaces and these factors are not considered in the thermal and energetic simulations of buildings by the energy balance process or Building energy modeling (BEM). In this context, this research aimed to explore the influence of the urban environment on air temperature and its influence on thermal behavior and energy consumption of a building, in the city of Curitiba-PR. The Urban Weather Generator (UWG) algorithm was used to generate an epw climate file, considering the urban environment of the SIMEPAR meteorological station. As a database, was used the epw climate file for a rural station at the Afonso Pena Airport (SWERA 838400). To the analysis was used the influence radius of 350 meters, with the location of the two meteorological stations as the center. It was used a plug in for the QGIS called Semi-Automatic Classification to take the values of vegetation rate, built area and paved area. After the generation of the climatic file, from SWERA 838400, it was performed a thermal and energetic simulation of a building, that is under construction on the UFPR campus, using a Building Information Modeling (BIM) tool. The results indicated that the urban environment have influence in the outdoor and indoor air temperature. The indoor temperature presented a variation of 3.3% for wintertime, considering the SWERA 838400 file and the climatic file generated by UWG. Winter was the season that showed the greatest variation, registering an increase of minimum, average and maximum air temperature. Considering the energy consumption, the results showed that for August there was an increase in demand for cooling, about 23%, considering the influence of the urban environment. The annual consumption of energy also showed an increased about 12%, when considering the UWG climatic file.

**Keywords:** Urban Weather Generator; Building thermal and energetic performance; urban surroundings.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos e efeitos globais da mudança climática .....	16
Figura 2 - Variação das temperaturas de superfícies em função do acabamento.....	19
Figura 3 - Efeito regulador da vegetação nas radiações de onda longa .....	23
Figura 4 - Desenvolvimento da camada limite de velocidade sobre uma placa plana .....	29
Figura 5 - Carta bioclimática de Curitiba .....	31
Figura 6 - Mapa Mental .....	38
Figura 7 – Localização espacial do Estação Meteorológica do SIMEPAR e da edificação de laboratório estudada .....	41
Figura 8 – Mapa do entorno da (a) estação meteorológica do SIMEPAR e do (b) Aeroporto Afonso Pena.....	56
Figura 9 – Circunferência do entorno urbano do SIMEPAR.....	61
Figura 10 – Mapa do uso do solo no entorno da (a) estação meteorológica do Aeroporto Afonso Pena e da (b) estação meteorológica do SIMEPAR .....	64
Figura 11 – Média horária de temperatura de bulbo seco para o mês de fevereiro ..	66
Figura 12 – Média horária de temperatura de bulbo seco para o mês de junho .....	67
Figura 13 – Dados horários de temperatura de bulbo seco para um dia de fevereiro .....	67
Figura 14 – Dados horários de temperatura de bulbo seco para um dia de junho ....	68
Figura 15 – Diagrama do fluxo da análise da edificação .....	75
Figura 16 – Mapa de locação do edifício de laboratórios estudado .....	75
Figura 17 – Modelo 3D da edificação .....	76
Figura 18 – Temperaturas mensais dos blocos de laboratório do térreo para arquivo climático EPW SWERA.....	79
Figura 19 – Temperaturas mensais dos blocos de laboratório do térreo para arquivo climático EPW UWG .....	80
Figura 20 – Temperaturas mensais dos blocos de laboratório do 1º pavimento para arquivo climático EPW SWERA .....	80
Figura 21 – Temperaturas mensais dos blocos de laboratório do 1º pavimento para arquivo climático EPW UWG.....	81

Figura 22 – Consumo de energia mensal para refrigeração com os dois arquivos climáticos .....	82
Figura 23 – Comparativo do consumo de energia anual de carga para refrigeração a partir da simulação com os arquivos climáticos SWERA e UWG .....	83
Figura 24 – Criação de material no ArchiCAD.....	98
Figura 25 – Criação de novo material no ArchiCAD .....	99
Figura 26 – Classificação de novo material no ArchiCAD .....	99
Figura 27 – Parâmetros do novo material com valores retirados da norma ABNT/NBR 15220-2.....	100
Figura 28 – Caminho para criação de composições no ArchiCAD.....	101
Figura 29 – Diferentes composições de materiais no ArchiCAD .....	101
Figura 30 – Acesso as opções de simulação do EcoDesigner STAR no ArchiCAD	102
Figura 31 – Criação dos perfis de ocupação no EcoDesigner STAR .....	102
Figura 32 – Configurações dos perfis de ocupação no EcoDesigner STAR .....	103

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estudos de simulação clima urbano.....	25
Tabela 2 - Artigos sobre simulação termo energética das edificações.....	32
Tabela 3 - Bandas das imagens Sentinel-2.....	58
Tabela 4 – Correção da taxa de área construída .....	60
Tabela 5 – Altura média das edificações.....	61
Tabela 6 – Taxa de área de fachada.....	61
Tabela 7 – Parâmetros de entrada no UWG .....	62
Tabela 8 – Teste t para os dados SWERA e UWG .....	65
Tabela 9 - Propriedades térmicas do vidro.....	77
Tabela 10 - Propriedades Térmicas dos materiais da edificação .....	77

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 PROBLEMA .....	15
1.2 OBJETIVO.....	15
1.3 JUSTIFICATIVA .....	16
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>19</b>
2.1 CLIMATOLOGIA URBANA.....	19
2.1.1 Clima Urbano .....	20
2.1.2 <i>Urban Weather Generator</i> .....	24
2.1.3 Estudos de simulação computacional aplicadas a microclimatologia no Brasil	25
2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA EDIFICAÇÃO .....	28
2.3 A EDIFICAÇÃO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO .....	30
2.3.1 Carta Bioclimática .....	31
2.3.2 Estudos de simulação computacional aplicadas a melhoria do desempenho termo energético de edificações no Brasil.....	32
<b>3 MÉTODO</b> .....	<b>37</b>
3.1 PROCEDIMENTOS ADOTADOS NA PESQUISA .....	38
3.1.1 Etapa 1 – Comparação entre dados de temperatura de bulbo seco entre estações meteorológicas de Curitiba .....	39
3.1.2 Etapa 2 – Modificação do arquivo climático epw de Curitiba.....	39
3.1.3 Etapa 3 – Análise por simulação da edificação .....	40
3.2 CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE CURITIBA .....	41
<b>4 ANO CLIMÁTICO DE REFERÊNCIA PARA CURITIBA: COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DE DUAS ESTAÇÕES</b> .....	<b>43</b>
<b>5 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ENTORNO URBANO NA TEMPERATURA DO AR</b> <b>53</b>	
5.1 INTRODUÇÃO .....	53
5.2 OBJETIVO.....	55
5.3 MÉTODO.....	55
5.3.1 Caracterização climática .....	55
5.3.2 Área de estudo .....	55

5.3.3 Uso e Ocupação do Solo.....	57
Procedimento 1: Imagens de Satélite.....	57
Procedimento 2: <i>Semi-automatic Classification</i> Plug in .....	58
Procedimento 3: Correção da taxa de área construída, taxa da área de fachada e altura das edificações.....	59
5.3.4 Elaboração do arquivo de entrada no Urban Weather Generator (UWG) .....	61
5.3.5 Tratamento dos dados.....	63
5.3.6 Teste t .....	63
5.4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	63
5.4.1 Uso do solo .....	63
5.4.2 Teste t .....	65
5.4.3 Temperatura de bulbo seco.....	65
5.5 CONCLUSÃO.....	68
AGRADECIMENTOS .....	69
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>70</b>
<b>6 ANÁLISE TÉRMICA E ENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO: INFLUÊNCIA DO ENTORNO URBANO.....</b>	<b>72</b>
6.1 INTRODUÇÃO .....	72
6.2 OBJETIVO.....	74
6.3 MÉTODO.....	74
6.3.1 Caracterização da edificação analisada .....	75
6.3.2 Modelagem na ferramenta <i>Building Information Modelling</i> (BIM).....	77
6.3.3 Configurações de simulação no <i>EcoDesign</i> STAR .....	77
6.3.4 Tratamento dos dados.....	78
6.4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	79
6.4.1 Temperatura média do ar .....	79
6.4.2 Consumo de energia .....	81
6.5 CONCLUSÃO.....	83
AGRADECIMENTOS .....	84
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>85</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>87</b>

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>90</b>
<b>APÊNDICE A – MODELAGEM BIM PARA BEM .....</b>	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Devido ao aumento populacional nas cidades são verificadas mudanças no uso e ocupação do solo, sendo este um dos fatores que influenciam o efeito da ilha de calor, que acaba por aumentar as temperaturas no meio urbano (OKE, 1987). Esse aumento de temperatura pode levar a um acréscimo considerável no consumo de energia no edifício para resfriamento. Por isso, torna-se recomendável o uso de estratégias bioclimáticas que visem a atenuação do microclima e, conseqüentemente, do consumo de energia.

Uma forma de avaliar essas estratégias bioclimáticas é pelo uso de simulações termo energéticas de edificações. A maioria dos estudos nesse campo usam programas de simulação baseados em modelos de balanço de energia. Esses *softwares* apresentam resultados satisfatórios, porém não contemplam as peculiaridades do microclima urbano. Dentre esses efeitos está o aumento da temperatura do ar, resultado da densificação urbana, da diminuição de áreas verdes e permeáveis, entre outros.

Sendo assim, algumas alternativas para avaliar o efeito da microescala urbana no comportamento térmico e energético das edificações foram desenvolvidos. Um exemplo desses métodos é o uso de simulações baseada em dinâmica dos fluidos, do inglês, *Computational Fluid Dynamics* (CFD). As simulações CFD na área de ambiente construído começaram a ser utilizadas para avaliar o comportamento do microclima em função da morfologia urbana com modelos realistas (TOPALAR et al., 2017).

Outro exemplo de estudos que buscam aproximar o entorno urbano e as simulações de energia em edificações são relacionados ao algoritmo *Urban Weather Generator* (UWG). Esse algoritmo faz a alteração das variáveis de temperatura e umidade do ar de um arquivo climático, do tipo epw, utilizado em simulação de desempenho de edificações. As variações que o algoritmo sugere das variáveis climáticas são resultado das informações de entrada, em relação ao entorno urbano da edificação em análise ou de uma estação meteorológica urbana (SALVATI; CHIESA; CECERE, 2016; CHIESA; PALME, 2018).

Um benefício do UWG é que o modelo gera resultados que colaboram com as pesquisas com a técnica CFD, sem a necessidade de um computador com configurações de alto desempenho e demanda menos tempo de simulação que uma simulação computacional por CFD (SALVATI; CHIESA; CECERE, 2016).

O aprimoramento das análises termo energéticas de edificações, considerando o contexto urbano na qual ela será inserida, pode gerar dados que auxiliem a tomada de decisões projetuais e resultar em menor consumo de energia para climatização.

Partindo dessa motivação, essa pesquisa abordou fatores de desempenho térmico e consumo de energia na edificação, explorando como a envoltória se relaciona com o ambiente urbano, e este com o desempenho térmico de edificações.

## 1.1 PROBLEMA

A construção do espaço urbano altera significativamente o clima urbano, a partir da formação de ilhas de calor, aumento da poluição e alterações no balanço energético das cidades. Além disso, parte dos problemas discutidos por governos e organizações mundiais advêm da forma que a urbanização das cidades ocorreu.

Vários autores apontam que os fatores que alteram as variáveis climáticas no contexto urbano são: relações entre altura e largura dos cânions urbanos, taxa de sombreamento, comportamento dos ventos, densidade construtiva e albedo (LIMA; SCALCO; LAMBERTS, 2019; MACHADO, 2019; OKE, 1988; SALVATI; ROURA; CECERE, 2016; SALVATI et al., 2020; XU et al., 2020).

As alterações microclimáticas, em geral, não são consideradas nas simulações térmicas e energéticas da edificação. Isso porque, os arquivos climáticos utilizados na simulação são de dados provenientes de estações meteorológicas rurais e baseados em anos climáticos típicos (anos com condições climáticas médias). O que gera valores de cargas térmicas e de temperaturas do ar internas não tão precisas nos resultados de simulações, pois desconsidera os efeitos da paisagem urbana do entorno da edificação. Além disso, os dados de arquivos climáticos não são atualizados periodicamente, sendo assim, as mudanças climáticas que acontecem ao longo dos anos, acabam não sendo consideradas.

Xu et al (2020) verificaram que o aumento do albedo do pavimento reduz a temperatura média do ar e geralmente reduz as emissões de carbono e de consumo de energia para climatização em bairros de média e alta densidade construída. Enquanto Salvati et al. (2020) demonstram que os efeitos do microclima agem diretamente nas cargas térmicas das edificações.

Sendo assim, mostra-se necessária a consideração do entorno urbano em simulações de desempenho térmico e energético das edificações.

A proposta da utilização do *Urban Weather Generator* (UWG) é usar uma análise mais rápida, baseada na teoria de dossel urbano, camadas limites e balanço de energia, com a finalidade de atualizar arquivos climáticos baseados em estações rurais, levando em consideração o entorno urbano que ela se insere. Nesse contexto tem-se a seguinte pergunta de pesquisa: Qual o impacto do entorno urbano na temperatura do ar externo e no desempenho térmico e energético de uma edificação real, em Curitiba?

## 1.2 OBJETIVO

O objetivo geral dessa pesquisa é explorar a influência do entorno urbano na temperatura do ar, e no consumo de refrigeração de uma edificação pública, na cidade de Curitiba-PR.

Os objetivos específicos dessa pesquisa são:



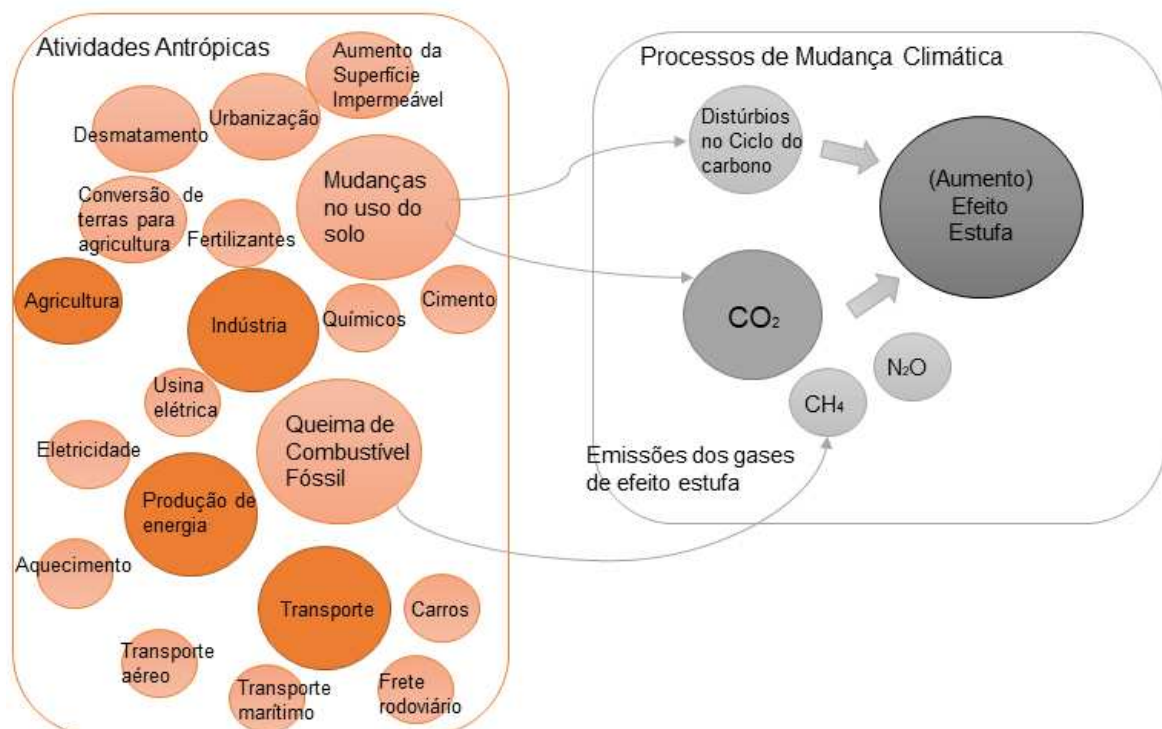
- Analisar alterações nas variáveis climática de temperatura do ar e umidade relativa do ar em Curitiba, entre uma estação meteorológica rural e uma urbana, a fim de atualizar o ano climático TRY;
- Explorar a influência do entorno urbano no comportamento da variável temperatura do ar;
- Analisar as diferenças nos valores de consumo de energia para refrigeração em uma edificação real, pertencente ao entorno urbano analisado, em relação ao arquivo climático padrão e o arquivo climático modificado pelo UWG.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

O consumo energético configura-se, desde o Relatório de Brundtland em 1987, passando pela Rio92, a Agenda 21 e o Protocolo de Kyoto de 2005, como um dos fatores de maior evidência nas discussões sobre mudanças climáticas. Um dos aspectos que influenciou essa discussão foi a crise do petróleo dos anos 1970, o fato desse produto não ser renovável instigou a consciência acerca do consumo de energia e a busca por novas fontes renováveis.

As atividades antrópicas, como a urbanização, que implica em mudanças no uso e ocupação do solo, como, também, aumento da superfície impermeável nas cidades, gera, juntamente com os processos da agricultura, do transporte de bens, da produção de energia e das indústrias, a emissão de gases do efeito estufa, causando distúrbios no ciclo do carbono e consequentemente aumento do efeito estufa. Esse processo pode ser verificado na Figura 1.

Figura 1 - Processos e efeitos globais da mudança climática



FONTE: Adaptado de PNUMA (2008, p. 8).

Pensando nesse contexto, foi instituído no Brasil, pelo decreto da Lei nº 12.187/2009, a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC). Essa lei define a adoção de ações de mitigação às emissões de gases do efeito estufa (GEE) que, até 2020, visa diminuir entre 36,1% e 38,9% a emissão desses gases. Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2014, p. 11), “a projeção de emissões de gases de efeito estufa para 2020 foi estimada em 3,236 Gt CO<sub>2eq</sub>. Dessa forma, a redução correspondente aos percentuais estabelecidos encontra-se entre 1,168 Gt CO<sub>2eq</sub> e 1,259 Gt CO<sub>2eq</sub>, respectivamente, para o ano em questão”.

Segundo o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), para os diferentes biomas do Brasil, indicadores demonstram aumento de temperatura, que variam de 2,5 °C a 6 °C, até o final do século XXI (PBMC, 2016). Ainda, segundo esse órgão, até 2050, a porcentagem de população urbana mundial aumentaria de 64% para 69% (PBMC, 2016). Dessa forma, o uso de informações climáticas que consideram o entorno, no qual a edificação está inserida, pode auxiliar na obtenção de resultados térmicos e energéticos mais fiéis à realidade, possibilitando a intervenção com medidas mais eficazes na diminuição do consumo de energia.

Além disso, o aumento do consumo de energia levanta a possibilidade de esgotamento dos recursos atualmente utilizados para a produção de energia. A forma mais comumente utilizada para conter a expansão do consumo é a eficiência, em vários setores, incluindo o da construção civil. Nesse aspecto, essa pesquisa possibilita a verificação mais precisa das reais necessidades da edificação e a influência que o entorno urbano tem na formação microclimática, que posteriormente afetará o consumo de energia e desempenho térmico da edificação, além do conforto térmico dos usuários.

As leis e programas que tratam de eficiência energética passaram a ter ênfase, no Brasil, a partir de 2001 com o racionamento de energia elétrica com a Lei nº 10.295/2001. A eficiência energética é entendida como o uso estratégico de energia para a realização de um serviço, visando consumir a menor taxa possível de energia.

Segundo o Balanço energético nacional (BEN), o consumo de energia elétrica do setor residencial, público e comercial, somados, contabilizam 42,8% (BRASIL, 2017). E apesar de o consumo de energia elétrica ter tido uma queda total de 0,9% - sendo o setor residencial o que mais economizou energia (1,4%) em relação ao balanço energético de 2016 - os setores comercial e público ainda apresentaram aumento de consumo de energia elétrica (BRASIL, 2017). Mesmo com a diminuição de consumo no total do balanço energético de 2017, o dispêndio de energia elétrica é alto.

Em geral, a simulação termo energética com programas padrão limita-se a estudar aspectos do edifício, usando um arquivo climático padrão e utilizando cálculos que representam os fenômenos físicos entre a edificação e o clima. Programas como *EnergyPlus* usam equações de balanço de energia para tanto.

Apesar de os resultados oferecidos por esse tipo de simulação serem relevantes e aceitos academicamente e comercialmente, existem fatores em microescala que podem alterar as condições de concepção e consumo energético do edifício

(ALLEGRIINI; DORER; CARMELIET, 2015; KOSUTOVA et al., 2019). São exemplos deles o efeito da ilha de calor urbano e a forma dos cânions. Para esses efeitos, estudos como o de Allegrini, Dorer e Carmeliet (2015), Blocken, Stathopoulos e Beeck (2016) e Kosutova et al. (2019) têm demonstrado que a dinâmica dos fluidos representa de forma mais assertiva e real os diferentes padrões de comportamento do microclima dentro de um ambiente urbano. Quando se trata de uma simulação ampla, que considere o ambiente em microescala no qual o edifício estará alocado, o uso de estratégias metodológicas ainda é um conhecimento em construção, necessitando de mais pesquisas.

A dissertação está dividida em sete capítulos, sendo que os resultados estão apresentados em formato de artigos:

Capítulo 1: apresenta o problema, justificativa e objetivos do estudo;

Capítulo 2: aborda os conceitos e revisão da literatura acerca dos estudos de microclima urbano e estudos de desempenho de edificações;

Capítulo 3: são indicadas as diretrizes metodologias abordadas na pesquisa, assim como uma visão geral do método dos artigos apresentados;

Capítulo 4: artigo científico que apresenta a atualização do ano climático de referência TRY com base de dados para duas estações meteorológicas em Curitiba, referente ao primeiro objetivo específico dessa pesquisa.

Capítulo 5: artigo científico que apresenta a atualização do arquivo climático SWERA levando em consideração o entorno urbano e os resultados referentes ao uso do algoritmo UWG, referente ao segundo objetivo específico dessa pesquisa.

Capítulo 6: artigo científico que apresenta o desenvolvimento de uma simulação térmica e energética em *Building Information Modelling* (BIM) para a mesma edificação, usando de comparação a edificação simulada com o arquivo climático SWERA e o arquivo climático obtido com o algoritmo UWG, referente ao terceiro objetivo específico dessa pesquisa.

Capítulo 7: apresenta as conclusões desse estudo.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

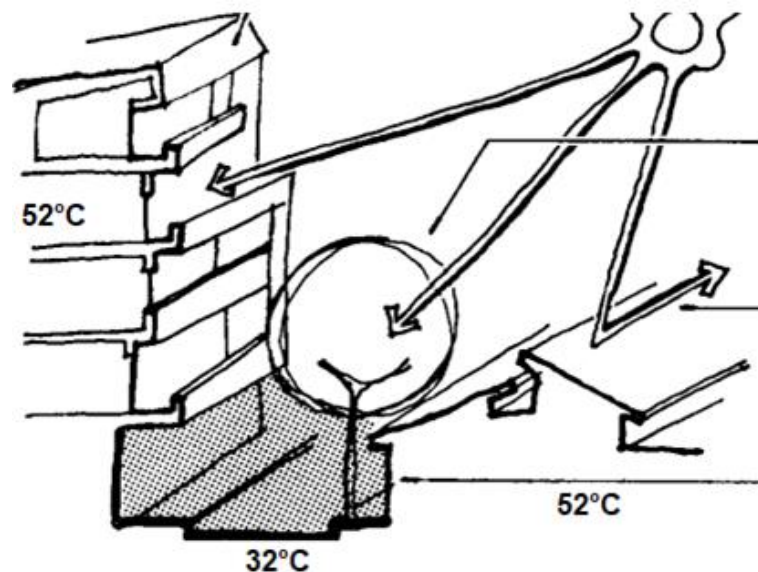
Neste capítulo serão abordados temas e conceitos que possibilitam o entendimento do estudo que será realizado. Primeiro, são discutidas temáticas relacionadas à climatologia urbana, desempenho energético de edificações e ao algoritmo *Urban Weather Generator* (UWG), e por fim uma revisão do que tem sido estudado no Brasil sobre simulação termo energética.

### 2.1 CLIMATOLOGIA URBANA

Os estudos do clima urbano e de mudanças climáticas são antigos, mas passaram a ter mais ênfase após o Relatório de Brundtland, em 1987, com a qual questões ambientais se tornaram mais evidentes para sociedade e o meio acadêmico. É importante entender o que necessariamente precisa ser controlado e planejado no ambiente microclimático para que este seja confortável, habitável e atenda às necessidades da sociedade. Entende-se por ambiente microclimático o conjunto de variáveis: temperatura do ar, umidade do ar, precipitação e direção e velocidade dos movimentos de ar, dentre outras.

Segundo Oke (1987), clima urbano é o resultado das alterações que são causadas no processo de urbanização como, uso e ocupação do solo, permeabilidade e até pelas propriedades térmicas dos materiais que compõe o tecido urbano, em determinada localidade. O balanço térmico dos meios urbanos é afetado por fatores como, aumento da absorção da radiação solar, de calor sensível liberado pelas estruturas urbanas e do calor antropogênico, pela redução da vegetação nas cidades e pela emissão crescente de radiação infravermelha. Oke (1988) afirma que dependendo da variedade do acabamento superficial, a temperatura do ar, em função da radiação incidente, pode ser maior ou menor. Isso é visualizado na Figura 2.

Figura 2 - Variação das temperaturas de superfícies em função do acabamento



FONTE: Adaptado de Romero (2000, p. 50).

Ainda, segundo Abreu (2008) é necessário entender o conceito de escala urbana, para compreender o comportamento dos elementos da superfície urbana com a atmosfera. Nesse processo, as escalas possuem unidades de balanço energético distintas, representadas e limitadas por vários fatores, como temperatura do ar, temperatura das diferentes superfícies de revestimento, velocidade e direção dos ventos, e que consideram a interação por advecção com as várias camadas da atmosfera (OKE, 1987).

A escala de estudo dessa pesquisa é a escala microclimática, na qual, é caracterizada por espaços horizontais que não ultrapassam 300 metros e espaços verticais que não ultrapassam a camada de rugosidade<sup>1</sup>, como indicado por Oke (2006). Ainda, Monteiro e Mendonça (2003), em seu quadro sobre categorias taxonômicas classificam estudos do tema pela unidade de superfície (quilômetros, metros), sendo o estudo representado nessa pesquisa parte do que os autores definem como espaço climático do microclima, com unidade de superfície em metros.

Na seção 2.1.1 será abordado o balanço energético superficial na área urbana, fator importante para compreender a relação entre a superfície urbana e as variáveis do microclima.

### 2.1.1 Clima Urbano

O balanço energético superficial é definido como um processo físico termodinâmico que inclui as relações da superfície urbana e das variáveis climáticas, definida por Oke (1987). Esse processo envolve interações termodinâmicas, relacionados com transferência de energia e de massa. Para compreender esse efeito, é importante perceber que a atmosfera opera como uma máquina térmica na qual o estado de energia depende do equilíbrio entre os diferentes fluxos das variáveis climáticas (VINET, 2000). Portanto, é necessário ter conhecimento sobre comportamento da temperatura do ar, da umidade do ar, da superfície, da dinâmica do fluxo de ar local e a profundidade da camada climática limite<sup>2</sup>(OKE, 1988).

A dificuldade em estimar o balanço energético urbano é em função da heterogeneidade desse meio. Além disso, a escala de análise, a forma, a composição e disposição dos elementos urbanos dificulta a estimativa de um modelo de superfície para fins meteorológicos.

Existem diversas abordagens utilizadas por estudiosos de clima urbano para desenvolver equações do balanço de energia, entretanto, em suma é adotado que o

---

<sup>1</sup> Rugosidade: “é uma medida da textura de uma superfície que é quantificada pelos desvios verticais de uma superfície real em relação ao seu formato ideal” (tradução nossa) (HANI, SATHYAMOORTHY, ASIRVADAM, 2011, p. 177).

<sup>2</sup> Camada climática limite: “A camada de ar no dossel urbano abaixo da altura média dos edifícios e árvores” (tradução livre). Disponível em: [https://glossary.ametsoc.org/wiki/Urban\\_canopy\\_layer#:~:text=The%20layer%20of%20air%20in,of%20the%20buildings%20and%20trees.&text=It%20is%20a%20zone%20of,especially%20in%20the%20urban%20canyons](https://glossary.ametsoc.org/wiki/Urban_canopy_layer#:~:text=The%20layer%20of%20air%20in,of%20the%20buildings%20and%20trees.&text=It%20is%20a%20zone%20of,especially%20in%20the%20urban%20canyons).

balanço de energia de um sistema é resultado da soma algébrica dos fluxos de energia que ele troca com o ambiente. Oke (1988) utilizou a lei da conservação das massas (primeira lei da termodinâmica) para equacionar o balanço energético superficial de uma área urbana.

Contudo, nas áreas urbanas as alterações vão além do balanço energético. Modificações também são observadas no armazenamento de radiação solar incidente (ondas curtas) que acaba sendo retido por mais tempo, devido a superfície desse meio apresentar alta capacidade térmica (CALLEJAS et al., 2016). Já nos cânions urbanos, o efeito de múltiplas reflexões das ondas longas de calor, contribui para aprisionar a energia dentro do dossel urbano. Além disso, Landsberg (1970) verificou que cidades médias (com população média de um milhão de habitantes) recebem menos radiação de ondas curtas do que os seus arredores, isso devido a poluição presente no dossel urbano<sup>3</sup>.

Apesar do menor recebimento de radiação de onda curta, a temperatura da área urbana é maior, ocorrendo a formação de ilhas de calor. O efeito da ilha de calor nas cidades ocorre devido à redução da evaporação, aumento da rugosidade e às propriedades térmicas dos edifícios e dos materiais pavimentados. A ilha de calor urbano (ICU) pode ser definida como o acúmulo de calor em áreas urbanas específicas, resultando em um aumento da temperatura do ar em relação as áreas próximas, como áreas com menor densidade construtiva ou rurais (AKBARI; KOLOKOTSA, 2016; NAKATA-OSAKI et al., 2016; OKE, 1987).

A presença de uma matriz densa de edifícios promove a criação de ICU através de uma variedade de processos, como por exemplo: (1) aprisionamento da energia solar devido à reflexão múltipla e absorção dentro de cânions, (2) o fator de visão de céu restrito de cânions profundos ou estreitos e (3) redução de velocidade do vento perto do solo. Como resultados no clima urbano, o adensamento das cidades está ligado em princípio com a obstrução da visão do céu, o que causa o retardamento do resfriamento das superfícies no período noturno com céu claro e calmaria, que são as condições ideais para a formação da ilha de calor noturna (OKE, 1981).

O fenômeno de ilha de calor urbana possui algumas particularidades que variam conforme as características climáticas do local estudado, como afirma Liu, Liu e Lin (2016) durante as estações mais quentes e mais frias existem diferenças na configuração da ilha de calor urbana. A grande diferença encontrada pelos autores se dá pelo uso ou não do condicionamento artificial das edificações, como também pela presença ou não de vegetação e pela emissão de calor do tráfego. Durante as estações mais quentes, a temperatura do ar decresce mais rápido durante a noite em áreas que possuem vegetação. Já as condições de tráfego e o condicionamento artificial dos edifícios contribuem para o aumento das temperaturas. Por outro lado, nas estações frias, a temperatura do ar é mais amena durante o período noturno e, segundo os autores, a mudança de atividades humanas e principalmente a

---

<sup>3</sup> Dossel Urbano: "O conjunto de edifícios, árvores e outros objetos que compõem uma cidade ou a cidade e os espaços que existem nela" (tradução livre). Disponível em: [http://glossary.ametsoc.org/wiki/Urban\\_canopy](http://glossary.ametsoc.org/wiki/Urban_canopy). Acesso em: 12/05/2019

inexistência de condicionamento artificial dos edifícios faz com que a variação da ilha de calor seja mais baixa que na estação quente.

Isso prova a complexidade de estudar a formação e evolução das ilhas de calor, pois além de características climáticas, topográficas e identificação dos fatores de maior influência na formação do microclima urbano local, deve-se considerar características sociais e de comportamento humano para avaliação deste tema. Além disso, estudos como o de Roth (2007) afirmam que as cidades ao produzirem seu próprio microclima, por serem conectadas a climas regionais e globais, geram efeitos atmosféricos no balanço de radiação e emissão de gases do efeito estufa.

Um fator importante, quando se trata de ilha de calor urbano é a dinâmica dos ventos no meio urbano. O fluxo de ventos está relacionado, além da formação do microclima, com a orientação das ruas, com a densidade construída, com a permeabilidade nos cânions urbanos e nas edificações (MINELLA, 2009). Além disso, nessa escala, o vento em geral é descrito horizontalmente pela direção de incidência (rosa dos ventos) e verticalmente por um perfil que é definido por funções logarítmicas (BOUYER, 2009). O que tange a dificuldade de simular o fluxo dos ventos em estudos urbanos.

A circulação dos ventos nas cidades pode sofrer alterações de direção, em consequência de possíveis turbulências criadas pelas edificações e pelo traçado viário. Brisas ainda podem ser formadas a partir das diferenças de temperatura do ar entre setores dentro da própria área da cidade.

O que estudos sobre fluxo dos ventos tem demonstrado é o uso desse artifício como estratégia para ventilação urbana, determinando melhores arranjos construtivos (BARROS; BATISTA, 2016; BOZONNET et al., 2006; KOSUTOVA et al., 2019; NUNES et al., 2018; SANTOS; SANCHES, 2013).

Já em questão da ilha de calor urbana algumas pesquisas foram realizadas para Curitiba. Leal (2012) distribuiu 44 pontos de monitoramento meteorológico pela cidade e mapeou a ilha de calor urbano. Como esperado a ICU resultou em curva semelhante ao que é descrito na literatura. As regiões que apresentaram maiores temperaturas foram: área central, região centro-sul e os bairros Tarumã, Cidade Industrial de Curitiba e Sítio Cercado. Essas são regiões com maior índice de ocupação e atividades antrópicas. Nesse estudo Leal (2012) também verificou a presença de ilhas de frescor, próximo às áreas de reserva e parques urbanos como o Parque Barigui e São Lourenço.

Krüger e Rossi (2015) realizaram monitoramento microclimático a fim de avaliar de calor urbano de Curitiba. Nessa análise, foi levantado que apesar desse efeito ser até certo ponto benéfico na estação de inverno, para o verão ocorre aumento do desconforto para calor, principalmente dentro das edificações. Os autores ainda justificaram a intensificação da ilha de calor da cidade devido ao intenso processo de verticalização, que ocorreu a partir da década de 1960, e pelo adensamento de municípios da região metropolitana.

Já Scroccaro, Tavares e Lima (2015) analisaram a influência do revestimento dos pavimentos nas vias de transporte coletivo de Curitiba e verificaram que a maior

parte das vias de transporte público possui revestimento asfáltico, que é conhecido por acentuar o efeito das ICU devido à maior absorção de ondas de calor. O estudo fez um paralelo com pavimentos de revestimento de concreto e foi observado que as propriedades térmicas do concreto, como emissividade térmica e refletância, fazem desse material, menos prejudicial ao aumento da ICU.

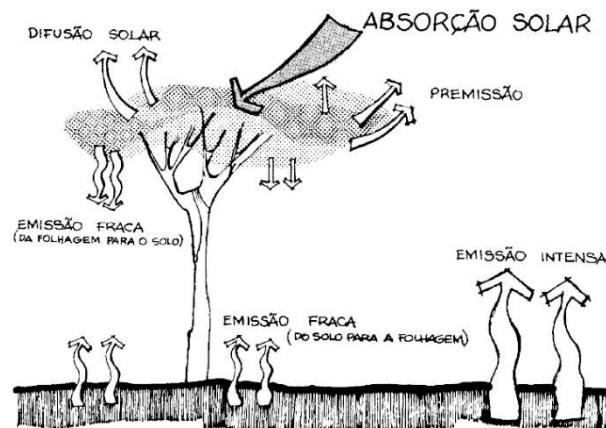
Considerando a existência de ilha de calor em Curitiba, um dos objetivos específicos pretende verificar a influência dessa alteração microclimática, no que diz respeito ao aumento da temperatura do ar, no desempenho térmico e energético de edificações.

Uma estratégia que ajuda a diminuir ou mitigar o impacto ambiental gerado pela formação do ambiente construído é a utilização de vegetação. Nesse contexto, a partir de estudos que tem sido realizado ao longo da última década na academia, mostrou-se a importância do uso da vegetação na porção urbana, como também, buscou-se quantificar e qualificar o verde nas cidades (BOUYER, 2009; DUARTE, 2015; DURANTE, 2012; LEAL, 2012; MORILLE; MUSY; MALYS, 2016; MUSY; MALYS; MORILLE, 2014; RENDON, 2017) .

Os estudos que relacionam vegetação, clima urbano e ambiente construído, têm aplicabilidades variadas, buscam, de alguma forma, que as interações entre o ambiente construído e a o microclima tornem os ambientes mais confortáveis ao usuário (BROWN; GILLESPIE, 1995). Segundo Duarte (2015) se o espaço não oferece condições de conforto, não atrai pessoas, elas sempre estarão em busca de um ambiente mais confortável de acordo com suas percepções.

A estratégia de implantar vegetação no meio urbano, deve-se a alguns fatores, como: (1) a capacidade de as folhas das árvores absorverem radiação solar, (2) diminuição das temperaturas de superfície pelo sombreamento e a (3) diminuição da temperatura pelo processo de evapotranspiração (DURANTE, 2012) assim como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Efeito regulador da vegetação nas radiações de onda longa



FONTE: Romero (2000, p. 13).

O efeito da vegetação nas edificações é o resfriamento passivo, como afirma Olgay (1963), e ele ocorre por dois meios, um deles é o sombreamento direto da



edificação pela vegetação, na qual, reduz a conversão da energia radiante em calor sensível reduzindo potencialmente a temperatura superficial da envoltória. O outro meio apontado por Olgay (1963) é a evapotranspiração foliar, na qual, o resfriamento da folha acaba por resfriar o ar adjacente devido à troca de calor latente.

A vegetação rasteira, além de proteger o solo da impermeabilização, facilita a infiltração de água no solo, fazendo assim, com que o escoamento superficial diminua. Outras possibilidades com o uso da vegetação no espaço urbano é o controle da poluição do ar, pois as áreas verdes absorvem carbono, e a estabilização microclimática, reduzindo extremos de temperatura (ALBUQUERQUE; LOPES, 2016). Por outro lado, a redução das áreas vegetadas provoca a perda de energia devido ao efeito da evapotranspiração. Além disso, a concentração de edifícios, carros e indústrias altera a circulação do ar no interior das cidades, aumentando a produção de calor, resultando na formação de ilhas de calor.

A vegetação arbórea apresenta efeito positivo na diminuição da temperatura do ar e, conseqüentemente, no consumo de energia dos edifícios (MORILLE; MUSY; MALYS, 2016; MUSY; MALYS; MORILLE, 2014; YANG et al., 2012), devido ao seu comportamento em relação aos raios solares (funciona como um filtro) e vento (possibilitando a formação de fluxo de ar). Porém, segundo Bouyer (2009) é importante conhecer as necessidades do local, pois, a vegetação pode acabar aumentando a carga latente dos sistemas de ar condicionado, devido ao aumento de umidade.

O efeito da vegetação no cenário urbano pode ser avaliado por meio de simulação computacional. Uma das ferramentas de modelagem do clima urbano foi desenvolvida por Bueno (2010), denominado *Urban Weather Generator* (UWG). O UWG é um programa de simulação urbana escrita em Matlab, sendo detalhado no próximo tópico.

### 2.1.2 *Urban Weather Generator*

O *Urban Weather Generator* (UWG) é um programa desenvolvido por Bueno (2010), que a partir de dados climáticos de estações meteorológicas (epw), gera dados climáticos considerando às condições climáticas de um entorno urbano específico (BUENO, 2010; YANG, 2016). Para desenvolvimento desse estudo foi utilizada a versão V4 do programa, sem interface gráfica.

O algoritmo do UWG é baseado na teoria de modelos de dossel urbano e balanço de energia de edificações (BUENO, 2010; MACHADO, 2019; SALVATI et al., 2020). O modelo consiste em quatro diferentes componentes de cálculo, sendo: (1) Modelo da estação rural; (2) modelo de difusão vertical, (3) modelo da camada limite e; (4) modelo de dossel urbano e de balanço de energia de edificações (SALVATI; ROURA; CECERE, 2016).

O programa exige a entrada de dados em linguagem de programação xml. Esses inputs são referentes ao entorno urbano analisado, levando em consideração, as edificações, cobertura do solo, cores e vegetação arbórea. Os principais dados a

serem configurados são: albedo e absorvância solar de todas as superfícies do entorno, taxa de área vegetada com árvores e vegetação rasteira, taxa de solo impermeável, taxa de área construída, informações térmicas das edificações do entorno e taxa de área de fachada.

O UWG gera um arquivo climático epw, levando em consideração o entorno urbano, a partir de um arquivo climático existente, em geral, um arquivo climático proveniente de uma estação rural. Bueno (2010) explica que na primeira etapa o algoritmo aplica o módulo de vegetação para gerar as variáveis meteorológicas medidas de um arquivo epw em condições meteorológicas para dada altura acima da estação meteorológica de base. Essa altura varia conforme o meio urbano e recomenda-se utilizar a altura da camada limite de duas vezes a altura média das edificações do entorno.

Já na segunda etapa Bueno (2010) afirma que é realizada uma transformação horizontal que leva em consideração o efeito ilha de calor urbano dentro da área analisada. E na terceira etapa ocorre um processo iterativo entre o dossel urbano e a edificação que é centro de análise, ocorre então uma parametrização dos dados, e é gerado o novo arquivo climático.

A fim de entender como esses processos do microclima são estudados no Brasil, realizou-se uma revisão sobre o que foi desenvolvido nos últimos sete anos no país em relação à estudos de clima urbano utilizando ferramentas de simulação. Na próxima seção apresenta-se o panorama das pesquisas nacionais.

### 2.1.3 Estudos de simulação computacional aplicadas a microclimatologia no Brasil

Os estudos sobre simulação urbana aqui mencionados foram buscados em revistas e anais de congressos nacionais que em geral publicam sobre eficiência energética, conforto térmico e luminoso, tendo período de análise do ano de 2012 a 2018. Os estudos avaliados são, em sua maioria, direcionados a atender assuntos relacionados à conforto térmico dos pedestres, como pode ser observado no resumo apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Estudos de simulação clima urbano

(continua)

<b>Autores</b>	<b>Software</b>	<b>Cidade/local de estudo</b>	<b>Parâmetros analisados</b>	<b>Período do ano</b>	<b>Número de cenários</b>	<b>Levantamento de dados em campo</b>
Abreu-Harbich <i>et al.</i> (2014)	RayMan Pro	Campinas-SP	PET, relação H/W	Verão	2	Sim
Coutinho <i>et al.</i> (2012)	RayMan Pro	Campinas-SP	VME, PET, índice de cobertura vegetal	Inverno	1	Sim

Tabela 1 - Estudos de simulação clima urbano

(conclusão)

<b>Autores</b>	<b>Software</b>	<b>Cidade/local de estudo</b>	<b>Parâmetros analisados</b>	<b>Período do ano</b>	<b>Número de cenários</b>	<b>Levantamento de dados em campo</b>
Krüger e Gonzales (2016)	CAT	8 Zonas Bioclimáticas brasileiras	ITS	Verão e Inverno	8	Não
Minella <i>et al.</i> (2012)	ENVI-met	Genebra	UTCI	Verão	3	Sim
Minella, Honjo e Krüger (2012)	ENVI-met	São Paulo-SP	Fração vegetada e PET	Verão	2	Sim
Minella e Krüger (2017)	ENVI-met	Curitiba-PR	Índice cobertura vegetal, UTCI	Verão	2	Sim
Muniz-Gäal <i>et al.</i> (2018)	ENVI-met	Campinas-SP	Relação H/W e PET	Verão e Inverno	48	Sim
Muniz e Pezzuto (2016)	ENVI-met	Campinas-SP	Relação H/W, orientação solar	Inverno (agosto)	4	
Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues (2016)	ArcGIS 10	Bauru e São José do Rio Preto -SP	Relação H/W, ICU, rugosidade	Inverno e primavera	12	Sim
Rosseti <i>et al.</i> (2014)	ENVI-met	Cuiabá-MT	Índice cobertura vegetal, PMV	Verão (quente úmido), inverno (quente seco)	4	Sim
Shinzato e Duarte (2018)	ENVI-met	São Paulo-SP	IAF, TEP	Primavera (novembro)	5	Sim
Sousa <i>et al.</i> (2014)	PHOENICS VR 3.6.1	Recife-PE	Fluxo de ventos por CFD	Verão e Inverno	2	

FONTE: A autora (2019).

Esses trabalhos relacionam vários índices do espaço físico urbano com índices de conforto térmico, a fim de avaliar a sensação do pedestre. Os índices de conforto térmico utilizados são: Temperatura fisiológica equivalente (PET), Índice universal de conforto térmico (UTCI), Índice de estresse térmico (ITS) e Voto médio estimado (PMV). Sendo o PET o mais utilizado. Existem diferentes programas que podem ser utilizados para avaliar e também simular as interações superfície-vegetação-atmosfera no ambiente urbano, entre os mais conhecidos e utilizados está o *ENVI-met*, *software* que trabalha com base nas leis fundamentais da dinâmica dos fluidos e da termodinâmica (MINELLA; KRÜGER, 2017; SHINZATO; DUARTE, 2018).

Assim, essas ferramentas permitem ao pesquisador analisar, em perspectiva de microescala, interações entre o solo, a atmosfera e a geometria urbana. Entre as possibilidades de simulação do *ENVI-met* estão a troca de calor e vapor de água na superfície na superfície do piso e fachadas, fluxo do ar em volta e entre os edifícios, parâmetros de troca de calor com a vegetação, dispersão de partículas poluentes e turbulência local e sua taxa de dissipação.

Outro *software* utilizado é o *Rayman Pro* que permite a modelagem do ambiente urbano e posterior cálculo do índice de conforto PET e o PMV, para diferentes pontos, funcionando a partir de dados de entrada como: umidade do ar, velocidade do vento, radiação solar e temperatura do ar (ABREU-HARBICH et al., 2014).

Para otimizar o espaço urbano, e como resultado melhorar o conforto térmico do usuário, são avaliados diferentes parâmetros nos estudos, como é o caso da relação altura e largura (H/W) do cânion urbano. Pesquisas como as de Abreu-Harbich et al. (2014), Muniz-Gäal et al. (2018), Muniz e Pezzuto (2016), Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues (2016) utilizaram essa relação para avaliar a geometria urbana e como essa se comporta. Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues (2016) por exemplo estudaram como a geometria urbana influencia no efeito da ilha de calor noturna para Bauru e São José do Rio Preto. Para tanto, os autores utilizaram uma plataforma SIG, na qual incorporaram aos valores de geometria da relação H/W de Oke com o comprimento de rugosidade. Foram simulados alguns cenários hipotéticos e os resultados encontrados mostraram que cânions urbanos de maior rugosidade aumentam a intensidade de ilhas de calor urbano noturna, se relacionado ao cânion com mesma relação H/W e menor rugosidade.

Outros trabalhos estudam a interação do meio urbano com a vegetação e como essa pode ser um elemento atenuador do microclima, pois o sombreamento do ambiente construído por vegetação pode melhorar o conforto térmico. Em estudo de Abreu-Harbich et al. (2014) foi utilizada a simulação do espaço urbano para avaliar o conforto térmico em cânions urbanos para a cidade de Campinas, usando diferentes razões de altura e largura (H/W), orientação das ruas e espécies de vegetação. Foi utilizado o *software Rayman Pro* para a simulação dos cânions urbanos vegetados a fim de verificar qual a melhor espécie arbórea para aumentar o conforto térmico externo nas ruas da cidade, chegando à conclusão de que a árvore da espécie Sibipiruna (*Caesalpinia pluviosa F.*) é a mais adequada para a localidade.

Minella e Krüger (2017) também estudaram a influência da vegetação na diminuição do estresse térmico do pedestre, para cidade de Curitiba, usando o índice de conforto UTCI e o *software* de simulação *ENVI-met*. Os resultados encontrados, demonstraram que para as avenidas estudadas deve-se aumentar em 70% a cobertura vegetal para que haja redução de 1°C na temperatura média do ambiente.

O estudo de Krüger e Gonzales (2016) verificou a relação do albedo e o conforto no espaço urbano. Para tanto foi utilizado o modelo preditivo *canyon air temperature* (CAT) em conjunto com o índice de conforto térmico ITS. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que o impacto do aumento do valor do albedo das superfícies urbanas sobre a temperatura do ar é pequeno e que, de forma geral, o

aumento do albedo superficial tende a piorar os níveis de conforto térmico para o pedestre. Dessa forma, não é recomendado o uso de albedos altos para qualquer cânion urbano. É mais adequado levar em consideração condições locais a fim de identificar as superfícies em que haja suficiente exposição solar para que o de diferentes tipos de materiais seja efetivo, a fim de gerar um albedo que seja positivo para o conforto térmico do pedestre.

Outros estudos que são realizados em relação a simulação do clima urbano são os de velocidade e direção dos ventos relacionados ao conforto térmico. Nessa área cita-se o artigo de Sousa et al. (2014). Foram estudados dois cenários com duas variações cada, no primeiro cenário foram modelados 31 blocos distribuídos no recorte, formando um perfil verticalizado, já o segundo cenário é semelhante ao primeiro, possuindo a mesma área de implantação, mas com a implementação de pavimentos vazados e presença de pilotis em alguns edifícios. A variação de análise nesses cenários é a direção de incidência dos ventos, sendo sudeste e sul. Os autores pretenderam avaliar o conforto térmico dos pedestres e concluíram que o modelo com edifícios mais altos e porosos é o que proporciona maior conforto.

Em suma, a maioria dos artigos avaliados tem o seu período de estudo definido nas estações de inverno e verão, isso demonstra que, em geral, estão avaliando as situações mais extremas que podem ocorrer durante o ano (frio e calor). Evidencia-se ainda, que o verão é o período de estudo mais recorrente, devido ao Brasil estar em uma zona de clima majoritariamente tropical, sendo o verão a estação de maior desconforto (calor).

Na próxima seção explica-se sobre os processos físicos que envolvem a troca de calor na edificação.

## 2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA EDIFICAÇÃO

A transferência de calor na edificação pode ocorrer de diferentes formas. O entendimento desse processo, tanto na envoltória quanto no interior da edificação, por climatização artificial ou passiva é importante para entender o comportamento térmico e energético da edificação.

O termo radiação é caracterizado para designar a transferência de energia sem a necessidade de um meio material. Como ela é a única que pode se propagar em espaços vazios, essa é a principal fonte de recebimento de energia solar. Segundo Varejão-Silva (2006), para fins de climatologia, o aspecto ondulatório da transferência de calor por radiação é o mais relevante.

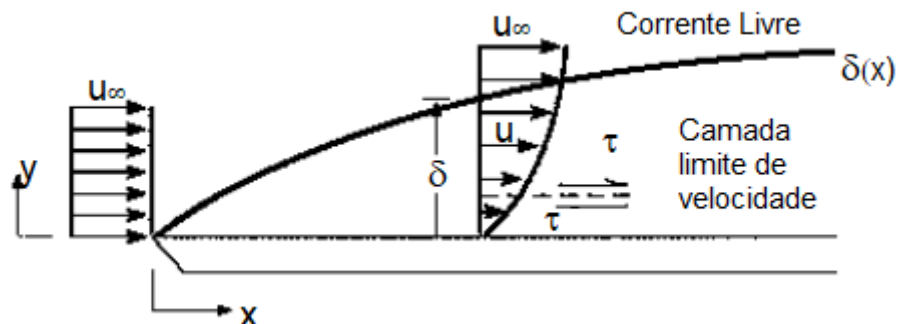
Em meio as grandezas radiativas, os fluxos de radiação, irradiância e emitância são fatores importantes para compreensão do comportamento da radiação. O fluxo de radiação é definido como a quantidade de energia radiante recebida, transmitida ou emitida por unidade de tempo. Quando se analisa esse fluxo em unidades de área são utilizados os termos emitância e irradiância.

A irradiância é a taxa de energia que incide sobre uma superfície real ou imaginária por unidade de área. Já a emitância é definida como a taxa de energia ou fluxo de energia emitida por unidade de área.

Usa-se o termo convecção para definir a transferência de energia entre uma superfície e um fluido em movimento. Segundo Incropera et al. (2008) esse fenômeno abrange a transferência de energia pelo movimento global do fluido (advecção) e pelo movimento aleatório das moléculas do fluido (difusão ou condução).

Para entender a transferência de calor por convecção deve-se compreender o conceito de camadas limites. A Figura 4, retirada de Incropera et al. (2008), auxilia no entendimento desse fenômeno, nela, é representado o escoamento de um fluido sobre uma placa. A partir do momento em que as partículas do fluido entram em contato com a superfície, a sua velocidade reduz de tal forma que chega a zero. Nesse momento, as partículas do fluido trabalham diminuindo o movimento das partículas próximas a superfície da placa, e assim, paralelamente atingindo as diversas camadas da placa. Devido ao aumento da distância  $y$  da superfície, o componente  $x$ , representando a velocidade do fluido, acaba por aumentar, até atingir o valor da corrente livre.

Figura 4 - Desenvolvimento da camada limite de velocidade sobre uma placa plana



FONTE: Adaptado de Incropera et al. (2008, p. 221).

Assim como demonstrado na Figura 4, quando se trata da camada limite térmica, com o escoamento do fluido sobre uma superfície, forma-se uma camada limite, nesse caso, térmica. Esse processo ocorre devido a um gradiente de temperatura entre o fluido de corrente livre e da superfície. Segundo Incropera et al. (2008) é nesse gradiente de temperatura que está alocada a camada limite térmica.

A transferência de calor por condução refere-se ao transporte de energia em um meio devido a um gradiente de temperatura, sendo relacionado a atividade física dos átomos ou moléculas. A condutividade térmica de um material mostra sua capacidade de transferência de calor, como também, o inverso desse parâmetro representa a capacidade do material de resistir à transferência de calor, em processo denominado resistividade térmica (INCROPERA et al., 2008).

Esse parâmetro mede a capacidade do material em conduzir energia térmica em relação com a sua capacidade em armazená-la (INCROPERA et al., 2008). Os materiais com valores  $\alpha$  maiores, responderão de forma mais rápida às alterações nas

condições térmicas impostas a eles, já os com  $\alpha$  de valor baixo, acabam por demorar mais tempo para responder essas mudanças. Dessa forma, os com difusividade térmica menor, demoram mais para atingir equilíbrio.

Como existe uma composição de diferentes materiais nas paredes, as transferências de calor nas camadas de materiais se propagam de formas variadas.

Conhecendo-se os efeitos físicos da transferência de calor na edificação, foram desenvolvidos estudos acerca da edificação no ambiente construído, sendo relacionado com o meio externo e o clima urbano. No próximo tópico são abordados conteúdos referentes a interação da edificação com o meio em que está inserida e como isso é abordado em pesquisa.

### 2.3 A EDIFICAÇÃO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

A necessidade de criação de abrigos para se proteger de predadores e das mudanças do clima deu origem as primeiras edificações, sendo estas construídas com os materiais disponíveis localmente. Posteriormente, com o desenvolvimento da sociedade foram padronizados alguns estilos construtivos, como exemplo, construções com concreto e madeira.

Por volta dos anos 1960, estudos como dos irmãos Olgay passaram a alertar sobre a importância de estratégias construtivas diferenciadas, adequando a edificação a climatologia e as necessidades locais, dando enfoque para a arquitetura bioclimática.

No 11º Objetivo do Desenvolvimento Sustentável (ODS) descrito na agenda 2030 da Organização da Nações Unidas (ONU) evidencia alguns dos objetivos estabelecidos: (1) aumento da urbanização com premissa inclusiva e sustentável, assim como planejar adequadamente os assentamentos urbanos; (2) diminuir tanto quanto possível os impactos negativos per capita nas cidades, com atenção especial a gestão de resíduos, qualidade da água e do ar (IPEA, 2019).

Em contrapartida do exposto, o desenvolvimento das atividades em uma cidade consome cada vez mais recursos (MENDES, 2019), além de gerar poluição do ar, águas e mudanças climáticas. Sendo a edificação parte dessa malha, essa também sofre interferência dos pontos evidenciados anteriormente.

Dessa forma, é importante cada vez mais avaliar o desempenho térmico e energético da edificação no contexto em que ela será alocada. Sendo assim, as estratégias utilizadas pelos projetistas, para melhoramento do desempenho, podem ser mais assertivas.

Uma forma de pré-avaliação das necessidades que uma edificação, em relação ao clima da região, é o uso da carta bioclimática, que será abordada no próximo tópico.

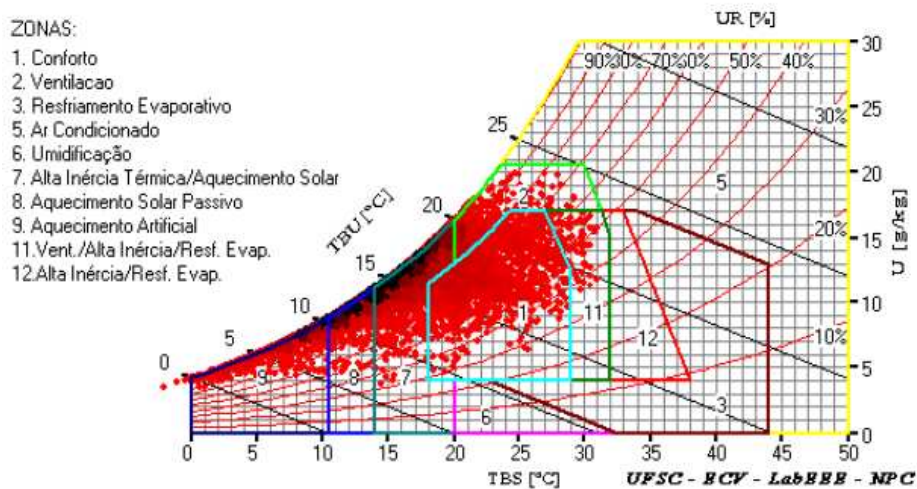
### 2.3.1 Carta Bioclimática

Foram os irmãos Olgay, que em 1960, começaram a estudar e definir o tema da arquitetura bioclimática. Esses primeiros estudos tiveram como objetivo alcançar o conforto hidrotérmico e a diminuição do consumo de energia das edificações, usando de forma mais eficiente os elementos arquitetônicos existentes.

Segundo Bogo et al. (1994) para definir os índices de conforto são utilizadas escalas de conforto térmico, que podem ser numéricas ou semânticas. Essas relacionam as sensações subjetivas graduadas por conforto e desconforto, com os parâmetros físicos de estímulo.

Posteriormente definem-se as zonas de conforto térmico, com base nos índices (psicofisiológicos, subjetivos, fisiológicos, meteorológicos e biofísicos), e segundo Bogo et al. (1994) delimitadas graficamente por nomogramas ou por cartas e diagramas. Finalmente, com base nas zonas de conforto térmico, são determinadas as cartas bioclimáticas. As cartas bioclimáticas têm como função prever diretrizes de projeto para melhorar o desempenho térmico de edificações. Na Figura 5 pode ser observada a carta bioclimática da cidade de Curitiba-PR.

Figura 5 - Carta bioclimática de Curitiba



FONTE: Terassi & Krüger (2014, p. 86).

A carta bioclimática de Curitiba apresentada por Terassi e Krüger (2014), utilizou dados referentes às normais climatológicas de 1961-1990. A análise da carta indica que as estratégias a serem utilizadas na cidade, para aquecimento que representa 73,1% do desconforto, são: massa térmica para aquecimento e aquecimento solar (42,4%), aquecimento solar (18,8%), aquecimento artificial (11,7%). Já as estratégias para resfriamento, que representa 5,9% do desconforto, são: ventilação (5,1%) e resfriamento evaporativo (0,7%).

Várias pesquisas têm sido realizadas no Brasil a fim de avaliar e propor estratégias para o desempenho térmico e energético de edificações.



### 2.3.2 Estudos de simulação computacional aplicadas a melhoria do desempenho termo energético de edificações no Brasil

A fim de estudar melhorias na eficiência energética de edificações, é comum utilizar-se de simulações. Estas, em geral avaliam o desempenho da envoltória e diminuição do consumo de energia. Para tanto, os programas mais comumente utilizados no contexto estudado são o *EnergyPlus* e o *Design Builder*. Os dois são similares, pois o *Design Builder* usa do regime de cálculo do *EnergyPlus* para a realização da simulação, mas possui uma interface mais amigável. O *EnergyPlus* é usado para simulação do consumo de energia da edificação, para aquecimento, resfriamento, ventilação, iluminação, a partir de informações climáticas horárias da região, de um arquivo climático padrão.

Os estudos representados na Tabela 2, representam um recorte do que tem sido pesquisado e publicado no Brasil. Esses foram buscados em revistas e anais de congressos nacionais que publicam sobre eficiência energética, conforto térmico e luminoso, tendo como recorte os anos de 2012 a início de 2018.

Nesses estudos, diferentes parâmetros são adotados a fim de nortear o processo de simulação, ressaltando-se que muitos dos estudos avaliam a edificação conforme as normas e regulamentos vigentes no Brasil, ou em seu devido país de origem, como é o caso de Diulio et al. (2016), que usa o IRAM 11603, norma argentina sobre condicionamento térmico de edifícios e classificação ambiental, e Martinez e Kelly (2015) que usaram a norma de certificação energética do Chile (CE).

Tabela 2 - Artigos sobre simulação termo energética das edificações

(continua)

<b>Autores</b>	<b>Software</b>	<b>Cidade/local de estudo</b>	<b>Conceito</b>	<b>Parâmetros de Simulação</b>	<b>Economia de Energia</b>
Alvim <i>et al.</i> (2014)	EnergyPlus	Formiga-MG	Residência unifamiliar	NBR 15575	-
Amorim, Baffi e Silva (2016)	DesignBuilder	Brasília-DF	<i>Retrofit</i> comercial	RTQ-C	18%
Amorim <i>et al.</i> (2012)	DesignBuilder	Brasília-DF	<i>Retrofit</i> comercial	RTQ-C	-
Andreis, Besen e Westphal (2014)	EnergyPlus	Curitiba, Recife, São Paulo, Brasília, Porto Alegre, Salvador e Rio de Janeiro.	Edifícios de escritórios	(WWR), tipos de vidro, configurações de fachada e uso de isolante térmico	-
Cechinel, Hackenberg e Tondo (2016)	EnergyPlus	Joinville-SC	Unidade habitacional	NBR 15.220-3	-
Dalbem <i>et al.</i> (2017)	EnergyPlus	Zona Bioclimática 2	nZEB	RTQ-R	56,63% comparando MVHR e condicionador de ar comum

Tabela 2 - Artigos sobre simulação termo energética das edificações

(continuação)

<b>Autores</b>	<b>Software</b>	<b>Cidade/local de estudo</b>	<b>Conceito</b>	<b>Parâmetros de Simulação</b>	<b>Economia de Energia</b>
Didoné, Wagner e Pereira (2014)	EnergyPlus e Daysim	Fortaleza - CE e Florianópolis - SC	EEZ	RTQ-C	50%
Diulio <i>et al.</i> (2016)	CEEMACON	La Plata - Argentina	<i>Retrofit</i>	IRAM 11603	12% para aquecimento com aumento de resistência térmica da alvenaria e telhado
Doerfler e Krüger (2014)	EnergyPlus	Curitiba-PR	PMCMV	Mudança de orientação solar	Redução de até 2,6% para aquecimento
Invidiata <i>et al.</i> (2016)	EnergyPlus	Zonas Bioclimáticas 1, 3 e 8	Habitação unifamiliar de interesse social	RTQ-R	Alcance do Nível A de eficiência
Krüger e Mori (2012)	EnergyPlus	8 Zonas bioclimáticas brasileira	AVS, AHS e FS	RTQ-C	26% para Curitiba e 30,5% para Brasília
Martinez e Kelly (2015)	Design Builder	Hualpén - Chile	Diagnóstico pós-ocupacional	Certificação Energética do Chile	80% de economia para aquecimento
Nico-Rodrigues <i>et al.</i> (2015)	Design Builder	Vitória - ES	Avaliação de diferentes janelas	FDT, GhDT	-
Rocha <i>et al.</i> (2016)	EnergyPlus	São Paulo - SP	Edificação habitacional de múltiplos pavimentos	NBR 15575-1:2013	-
Rupp e Ghisi (2013a)	EnergyPlus e Daysim	Florianópolis - SC	Luz natural e ventilação híbrida em edifícios comerciais	-	Potencial de economia de energia elétrica de até 64,9%
Rupp e Ghisi (2013b)	EnergyPlus	Florianópolis - SC	Ventilação híbrida em edifícios comerciais	<i>Airflow Network</i>	Redução de consumo total de energia de até 31,9% para edifícios com ventilação híbrida
Ruzicki <i>et al.</i> (2016)	DesignBuilder	Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3	Carga interna de edificações de escritório	RTQ-C	Dependendo da zona bioclimática: com DCI e fator de forma máximo e paredes e coberturas menos isoladas, o consumo energético é menor do que em edificações com envoltória de maior resistência térmica

Tabela 2 - Artigos sobre simulação termo energética das edificações

(conclusão)

Autores	Software	Cidade/local de estudo	Conceito	Parâmetros de Simulação	Economia de Energia
Silva e Ghisi (2014)	EnergyPlus	Florianópolis - SC	Desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial	RTQ-R e NBR 15575-1	-
Silva e Ghisi (2013)	EnergyPlus	Florianópolis - SC	Edificação residencial	RTQ-R	-

FONTE: A autora (2019).

As normas vigentes e utilizada na maioria dos trabalhos no Brasil são a NBR 15575 (Edificações habitacionais – Desempenho) parte 1 que contempla os requisitos gerais de desempenho, a NBR 15220 (Desempenho térmico de edificações) parte 3, que trata do Zoneamento Bioclimático Brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, assim como os Regulamentos Técnicos da Qualidade (RTQ) para o nível de eficiência energética tanto para edificações comerciais e de serviço (RTQ-C), quanto para edificações residenciais (RTQ-R).

Esses estudos foram pré-selecionados objetivando relatar principalmente aqueles que focassem no desempenho da edificação e na sua relação com o consumo de energia elétrica. Amorim, Baffi e Silva (2016) e Amorim et al. (2012) estudaram *retrofit* em edifícios em Brasília, os dois buscaram formular diretrizes para reabilitação de edificações existentes, com uso do método prescritivo do RTQ-C e comparam o resultado com a simulação no programa *Design Builder*. Segundo os autores, foi verificada economia de energia de até 18% com a prescrição de diretrizes de *retrofit* na edificação.

Outro estudo baseado no RTQ, mas dessa vez para edificações residenciais, é o de Dalbem et al. (2017) que analisou o nível de eficiência energética da envoltória de uma edificação residencial projetada segundo requisitos da norma alemã para *Passive Houses*, na zona bioclimática brasileira 2, representado pela cidade de Pelotas, Brasil, com auxílio do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). Para isso, eles utilizaram o sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor (MVHR). Nesse trabalho também foi utilizado o software *EnergyPlus*, para a simulação segundo o RTQ-R. Nos resultados, foi verificado que, para o verão a ventilação natural é suficiente para garantir conforto, porém, no inverno existe a necessidade de climatização mecânica. Uma alternativa indicada é o uso de sistema de ventilação com recuperador de calor já que esse sistema diminui o consumo de energia para aquecimento e mantém as trocas de ar necessárias para garantir qualidade no ambiente.

Algumas pesquisas estudam outros parâmetros como é o caso de Rupp e Ghisi (2013a) e Rupp e Ghisi (2013b) que estudaram tanto a ventilação híbrida sozinha (RUPP; GHISI, 2013b), quanto a associação de ventilação híbrida com iluminação natural (RUPP; GHISI, 2013a), a fim de mensurar a demanda de energia

requerida para edificações comerciais. No primeiro caso (RUPP; GHISI, 2013b) foi obtida, com uso de simulação, redução de até 31,9% no consumo de energia e no segundo (RUPP; GHISI, 2013a), até 64,9%. Os diferentes valores de redução de consumo de energia podem ser verificados na Tabela 2 e varia muito de estudo para estudo, devido às diferentes formas com que os autores avaliaram a edificação, e devido ao padrão, modelo, local em que as edificações serão alocadas, ser diferente.

Além disso, alguns estudos verificam a utilização de diferentes materiais para diminuição da demanda de energia, como é o caso de Andreis, Besen e Westphal (2014), que analisaram diferentes tipos de vidros, além de fatores físicos da edificação como percentual de abertura de fachada (WWR), uso de isolante térmico e exposição das fachadas. Segundo os resultados obtidos pelos autores, o desempenho termo energético da edificação com grandes áreas envidraçadas, é relacionado WWR e pelo tipo de vidro nas aberturas.

Ainda, entre os artigos encontrados para essa revisão, existe aqueles que estudam se a análise de eficiência energética feita previamente, na fase de projeto, é mais vantajosa do que em *retrofits*, devido à dificuldade de intervenções. Rodrigues e Pedrini (2017) estudaram casos entre estudos preliminares e *retrofits*, identificando que no processo de *retrofits* a simulação termo energética tem menos significado, sendo adequado utilizar diretrizes baseadas em experiências precedentes. Já para casos em estudo preliminar a simulação refina as escolhas do projetista, podendo fazer com que a proposta de intervenção seja mais eficiente.

Há, ainda, aqueles que estão estudando a sistematização do processo de simulação termo energética, como é o caso de Almeida et al. (2014), que usou algoritmos entre os softwares *EnergyPlus*, *Design Builder*, *MATLAB* e *Building Controls Virtual Test Bed* (BCVTB), para criar uma linha de comunicação entre os mesmos e facilitar o processo de simulação. Dessa forma, foi possível realizar 576 configurações diferentes, sem a necessidade de análise individual prévia.

Entretanto, apesar do grande volume de estudos sobre simulação termo energética de edificações, poucos falam sobre o grau de incerteza nas simulações. Em pesquisa de Silva, Almeida e Ghisi (2017), foram estudadas as incertezas físicas em simulações computacionais para edificações residenciais, a fim de avaliar o desempenho térmico da edificação com maior confiabilidade. Para essa pesquisa foi usado o software *EnergyPlus*. Os autores traçaram um perfil de uso da edificação estudada para verão e para inverno e usaram o critério de graus-hora de desconforto, de acordo com a norma *Standard 55*, para edificações naturalmente ventiladas. Nas atribuições de variáveis de entrada a amplitude de incertezas foram definidas pela distribuição de probabilidades para cada uma das variáveis, baseados em pesquisa bibliográfica. Foi utilizado o método de Monte Carlo e amostragem com o Hipercubo Latino. Como resultado foi verificado que para o desconforto por calor as incertezas físicas são maiores do que para o frio, evidenciando que a variável física que mais influencia a incerteza nos resultados para desconforto por calor é a absorvância solar de materiais na cobertura, seguida do calor específico da argamassa das paredes e da condutividade térmica do concreto do piso. Para o desconforto por frio as incertezas físicas dos materiais das paredes demonstraram maior influência. Ainda, foi

evidenciado que a temperatura do solo tem importância tanto para critérios de calor e frio.

No próximo capítulo estão apresentadas as diretrizes metodológicas gerais que foram adotadas para realizar essa pesquisa. Diferentes variáveis foram utilizadas para realização do estudo como variáveis da morfologia urbana, como taxa de vegetação e densidade construtiva e de simulação térmica de edificações, como consumo de energia e temperatura média do ar, assim como estratégias de análise com inserção de ventilação natural e condicionamento do ar em edificações.

### 3 MÉTODO

O objetivo geral dessa pesquisa é explorar a influência do entorno urbano na temperatura do ar e no consumo de refrigeração de uma edificação pública, na cidade de Curitiba-PR. A abordagem é exploratória do tipo quantitativa. Foram analisados dados de temperatura do ar a partir de duas estações meteorológicas e a variação de temperatura interna e o consumo de energia, para uma edificação pública (uso educacional), considerando a influência do entorno urbano no microclima.

Para tal, foram analisados dados climáticos de temperatura do ar para o período de 2000 a 2018. Os dados são da estação meteorológica do SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná) e da estação meteorológica do Aeroporto Afonso Pena. Essa avaliação resultou na atualização do ano climático de referência (TRY) para Curitiba.

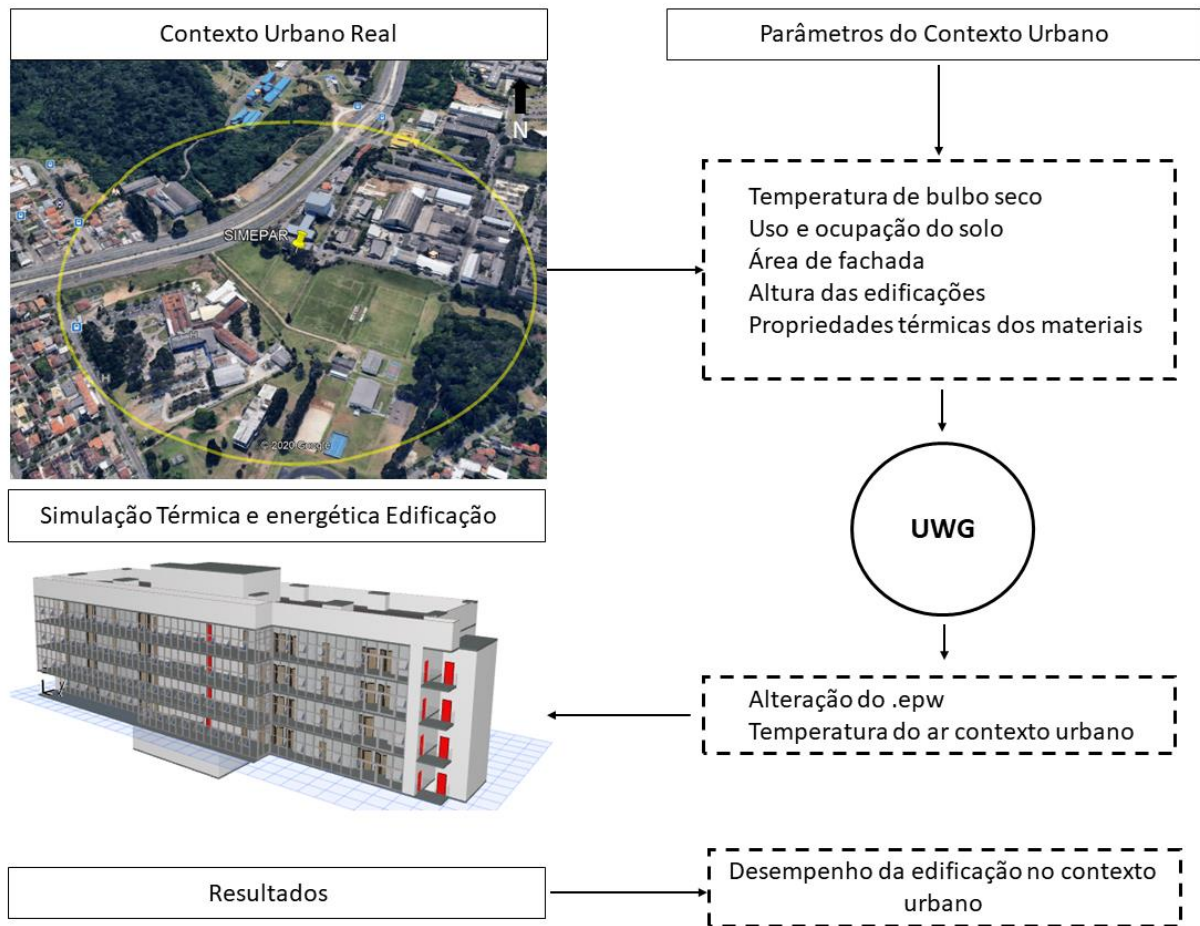
Para a análise da influência do entorno urbano, foi selecionado o recorte espacial referente à estação meteorológica do SIMEPAR, localizada no Centro Politécnico da UFPR. A estação meteorológica do SIMEPAR foi utilizada como referência de dados para comparação com os valores gerados pelo programa UWG.

Para avaliação da temperatura interna da edificação e do consumo energético selecionou-se o edifício de consórcio de laboratórios, que está em construção no Centro Politécnico da UFPR.

A relação entre microclima e morfologia urbana, assim como desempenho térmico e energético da edificação, são de certa forma, únicos para cada objeto de pesquisa. Nesse caso, a pesquisa está limitada ao estudo de características de um modelo estudado, baseado em características climáticas de Curitiba. Os resultados gerados refletem as características do entorno e do edifício avaliados. Dessa forma, os resultados têm caráter exploratório e não a intenção de explicar ou generalizar a relação entre as variáveis consideradas acerca da influência do entorno urbano no desempenho térmico e energético, em edificações, para Curitiba.

No mapa mental da Figura 6 são apresentados o contexto analisado e os parâmetros utilizados.

Figura 6 - Mapa Mental



Fonte: A autora (2020).

### 3.1 PROCEDIMENTOS ADOTADOS NA PESQUISA

Os resultados da pesquisa serão apresentados em forma de artigo, contendo o referencial teórico pertinente a cada etapa, a descrição do método, e a discussão e apresentação dos resultados.

A pesquisa está dividida em 3 etapas, descritas a seguir:

1 - Análise comparativa da temperatura de bulbo seco entre uma estação meteorológica urbana (SIMEPAR) e uma rural (Aeroporto Afonso Pena). Apresentada no capítulo 4;

2 - Desenvolvimento do arquivo climático utilizando o *Urban Weather Generator* (UWG). Apresentado no capítulo 5;

3 - Simulação de desempenho térmico e energético da edificação, para dois cenários: o cenário 01 considera o arquivo climático oficial) e o cenário 02 considera arquivo climático modificado pelo UWG (considerando o contexto urbano). Apresentado no capítulo 6.

Nos próximos tópicos estão descritos, de modo geral, os métodos adotados em cada uma das três etapas

### 3.1.1 Etapa 1 – Comparação entre dados de temperatura de bulbo seco entre estações meteorológicas de Curitiba

O método da primeira fase dessa pesquisa está subdividido em três etapas. Primeiro, foram determinados os anos de referências (TRY) atualizados para Curitiba, com dados das estações meteorológicas do SIMEPAR e do Aeroporto Afonso Pena. Na segunda etapa foram realizadas três comparações: (1) TRY obtido por Rossi, Dumke e Krüger (2009) com o TRY atualizado a partir dos dados da estação do SIMEPAR; (2) TRY obtido por Goulart (1998) e atualizados por RORIZ (2012) com o TRY atualizado a partir dos dados da estação do Aeroporto Afonso Pena e (3) TRY obtidos a partir estações SIMEPAR e Aeroporto para o período de 2002 a 2016. A terceira etapa consiste em comparar as estratégias bioclimáticas para os TRY obtidos com dados da estação meteorológica do SIMEPAR. Os detalhes dos procedimentos metodológicos estão descritos no capítulo 4 dessa dissertação. O artigo apresentado no capítulo 4 foi publicado nos anais do XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC), realizado em 2019.

### 3.1.2 Etapa 2 – Modificação do arquivo climático epw de Curitiba

Na etapa dois da pesquisa foi realizada a alteração do arquivo climático epw de Curitiba com o auxílio do *software Urban Weather Generator (UWG)*. O objetivo dessa etapa foi verificar a influência do entorno urbano na variável de temperatura de bulbo seco. O UWG lê um arquivo de entrada em linguagem xml com informações da faixa urbana analisada, e do entorno da estação meteorológica do arquivo climático que está sendo utilizado de base para alteração.

Os dados de entrada necessários são denominados dados de referência e compreende os seguintes dados: classificação do solo, porcentagem da área de fachada, porcentagem da projeção da área construída (taxa de ocupação), altura das edificações e características térmicas dos materiais naturais e construtivos (BUENO, 2010; LIMA; SCALCO; LAMBERTS, 2020; SALVATI; ROURA; CECERE, 2016; YANG, 2016).

A classificação do solo, foi realizada com auxílio do programa de Sistema de Informações Geográficas (SIG) QGIS e um *plug in* de classificação do solo denominado *Semi-Automatic Classification Plug-in (SCP)*. As porcentagens de área de ambiente construído (edificações), foram obtidos por meio dos mapas 3D disponibilizados no site <<https://cadmapper.com/>>. Esse aplicativo *online* transforma dados geográficos provenientes de fontes públicas como *OpenStreetMap* e NASA, em arquivos CAD e de programas 3D como *SketchUp*.

Os valores referentes às características térmicas dos materiais e das edificações foram retirados de normas, artigos científicos, e estão apresentados no capítulo 5. Com os dados de entrada foi possível desenvolver o arquivo xml, com as informações do entorno urbano da estação meteorológica do SIMEPAR e do entorno da estação meteorológica do Aeroporto Afonso Pena.



Assim, foi possível rodar a simulação pelo software UWG, com o arquivo epw referente a estação do Aeroporto Afonso Pena, SWERA 838400, e o arquivo xml com os inputs do entorno urbano analisado. Foram realizadas análises com as médias de temperatura de bulbo seco para os meses mais críticos (verão e inverno), que possuíram as médias mais altas e mais baixas, sendo respectivamente o mês de fevereiro e o mês de junho. Além disso, os dados dos dois arquivos climáticos (SWERA 838400 e o modificado pelo UWG) foram comparados com os dados do ano TRY com base na estação meteorológica do SIMEPAR.

Os detalhes metodológicos dessa etapa estão descritos no capítulo 5 dessa dissertação.

### 3.1.3 Etapa 3 – Análise por simulação da edificação

Para a modelagem da edificação foi utilizado o software *ArchiCAD*. Esse foi utilizado a fim de facilitar a modelagem do modelo de energia, necessário para a avaliação da eficiência energética e desempenho da edificação. A princípio a intenção era exportar o modelo desenhado no *ArchiCAD* para o *EnergyPlus*, com o uso do *OpenStudio*. A interoperabilidade entre os modelos *Building Information Modelling* (BIM) e os modelos *Building Energy Modelling* (BEM) se dá com a geração de arquivos gbxml. Esse processo é possível de ser realizado em modelos de construção quando a exportação do gbxml no software BIM, possui opções de definição desse arquivo a ser exportado, como pode ser visto em (AZEVEDO e TAVARES, 2020).

No *ArchiCAD* não existem opções de configuração do arquivo de exportação gbxml. Dessa forma, o arquivo que sai do programa tem nível de detalhamento da edificação que o BEM não processa. Por exemplo, as espessuras de parede em modelos de energia não são visualmente modeladas, nesse tipo de modelo as configurações de espessura de parede são inputs de materiais construtivos no programa de simulação. Por isso, foi verificada a necessidade de utilizar o próprio *ArchiCAD* para simular a edificação.

Para fazer essa tipologia de análise é necessário o uso de um *plug in*, da própria empresa do *ArchiCAD*, denominado, *EcoDesign STAR*. Esse *plug in* foi originalmente concebido para análise de energia embutida, mas com atualizações passou a possuir os parâmetros necessários para simulação de desempenho térmico e energético de edificações.

A construção analisada é um edifício em construção, que servirá, em sua maioria, para laboratórios, no campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (Figura 7).

Figura 7 – Localização espacial do Estação Meteorológica do SIMEPAR e da edificação de laboratório estudada



Fonte: A autora (2020).

Foram realizadas quatro simulações, duas para ventilação natural e duas para a edificação condicionada artificialmente. A fim de comparar os resultados do arquivo climático padrão SWERA e o arquivo modificado pelo UWG, foram comparados os dados entre simulação naturalmente ventilada para os dois arquivos climáticos (padrão e modificado) e posteriormente foram comparados os dados, resultados da simulação, para a edificação condicionada artificialmente, entre arquivo climático padrão e arquivo climático modificado.

Os detalhes metodológicos dessa etapa estão descritos no capítulo 6 dessa dissertação.

### 3.2 CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE CURITIBA

A área de estudo dessa pesquisa é a cidade de Curitiba. Localizada abaixo do Trópico de Capricórnio, na latitude  $25^{\circ} 18' 40''$  sul e longitude  $48^{\circ} 24' 37''$  Oeste e com altitude de 917 metros. Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger Curitiba possui clima temperado marítimo úmido (Cfb) (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007), caracterizado por alta pluviosidade e por temperaturas amenas. A temperatura média anual é  $19,7^{\circ}\text{C}$  e os meses mais quentes variam entre janeiro e fevereiro e os mais frios entre junho e julho. A taxa de pluviosidade é alta ao longo do ano inteiro, caracterizando essa como uma das regiões mais úmidas do país (ROSSI, 2004). Mendonça e Danni-Oliveira (2007) salientam que uma das características da região, devido a latitude, é dias mais longos no verão e dias mais curtos no inverno.

Além disso, é uma região que possui alta variação de temperatura durante o período do dia.

Ao que tange o comportamento das dinâmicas atmosféricas, na América do Sul, sete centros de ação exercem interações, influenciando a formação das massas de ar e conseqüentemente do clima local. Segundo Mendonça e Danni-Oliveira (2007) são elas: (1) Anticiclone dos Açores; (2) Anticiclone da Amazônia ou Doldrums; (3) Anticiclone Semifixo do Atlântico Sul; (4) Anticiclone Semifixo do Pacífico; (5) Anticiclone Migratório Polar; (6) Depressão do Chaco; e, (7) Depressão dos 60° de Latitude Sul. É importante entender o comportamento desses sistemas de circulação atmosférica, a fim de compreender o clima da região (ROSSI, 2004).

No próximo capítulo será abordado a atualização do ano TRY, com base em dados de duas estações meteorológicas, para a cidade de Curitiba.



**XV ENCAC** Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído

**XI ELACAC** Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído

JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

## **ANO CLIMÁTICO DE REFERÊNCIA PARA CURITIBA: COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DE DUAS ESTAÇÕES**

**Cristiane Rossatto Candido (1); Francine Aidie Rossi (2)**

(1) Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, engenheira civil, rossattoc@gmail.com, Universidade Federal do Paraná.

(2) Doutora em Tecnologia, arquiteta, rossi@ufpr.br, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, UFPR. Rua Cel. Francisco H. dos Santos, 100, Centro Politécnico, Jardim das Américas, Curitiba, Paraná, Tel.: (41) 3361-3462

### **RESUMO**

A urbanização causou diversas alterações na paisagem natural, afetando muitos aspectos, sendo um deles o climático. Esse estudo tem por objetivo analisar dados meteorológicos de duas estações (SIMEPAR e Aeroporto Internacional Afonso Pena) a fim de atualizar o ano climático de referência (TRY) para Curitiba, além de verificar alterações nas condições climáticas para os TRY gerados e os TRY determinados anteriormente. Com a observação dos dados foi possível verificar que a locação das estações meteorológicas tem papel fundamental na determinação de arquivos climáticos fiéis a realidade do local estudado. A diferença entre os dados da temperatura do ar média do TRY das duas estações estudadas chegou a 4,0 °C. Analisando as estratégias bioclimáticas para os arquivos climáticos gerados por estudos anteriores e os atuais, observou-se aumento do período de conforto e diminuição do desconforto por frio.

Palavras-chave: ano climático de referência, arquivo climático, dados meteorológicos.

### **ABSTRACT**

Urbanization caused several changes in the natural landscape, affecting many aspects, one of them is the climate. The aim of this study was to analyze meteorological data from two stations (SIMEPAR and Afonso Pena International Airport) in order to update the climatic reference year (TRY) for Curitiba, as well as to verify changes in the climatic conditions for previously generated TRY. It was possible to verify that the location of the meteorological stations plays a fundamental role in the determination of climatic files faithful to the reality of the place studied. The difference between the average air temperature data of the TRY of the two stations studied reached 4.0 °C. Analyzing the bioclimatic strategies for the climatic files generated by previous and current studies, it was observed an increase of the comfort period and decrease of the cold discomfort.

Keywords: climate reference year, climate files, meteorological data.

## 1 INTRODUÇÃO

A construção do espaço urbano altera significativamente o meio ambiente e causa implicações como formação de ilhas de calor, aumento da poluição e alterações no balanço energético. Além disso, parte dos problemas discutidos por governos e organizações mundiais que visam a sustentabilidade, é advinda da forma como ocorreu a urbanização das cidades.

Nesse contexto, um dos fatores mais afetado pela ação humana é o clima e conseqüentemente o clima urbano. Segundo o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas – PBMC, para os diferentes biomas do Brasil, indicadores demonstram aumento de temperatura, que vai de 2,5 °C a 6 °C, até o final do século XXI (PBMC, 2016). Ainda, segundo esse órgão, até 2050, a porcentagem de população urbana mundial aumentará de 64% para 69% (PBMC, 2016). Estima-se que a produção de produtos para garantir a sobrevivência e a cultura de consumo nas cidades, por si só, já resultará na metade de emissão de gases do efeito estufa permitidas. Dessa forma, o uso de estratégias bioclimáticas que remontem à uma arquitetura mais natural e vernacular é imprescindível para tentar minimizar os efeitos nocivos ao planeta no processo de construção.

Para adotar estratégias bioclimáticas adequadas é recomendado que os dados climáticos utilizados sejam provindos de estações meteorológicas o mais próximo possível do local que será construída a edificação (ROSSI, DUMKE e KRÜGER, 2009). Além disso, faz-se necessário a atualização desses dados (HERRERA et al., 2017), devido as mudanças climáticas e as alterações no meio urbano. Os arquivos geralmente utilizados para avaliação do desempenho energético e térmico das edificações são provindos de metodologias específicas, como o *Test Reference Year* (TRY) e o *Typical Meteorological Year* (TMY). Essas cadeias de dados são obtidas por análises estatísticas e usam dados de no mínimo 10 anos (LUZ et al., 2018; PEREIRA et al., 2004; ROSSI, DUMKE E KRÜGER, 2009). Os arquivos climáticos disponíveis no Brasil foram gerados primeiramente em estudo de Goulart (1998) (disponível em [www.labee.com.br](http://www.labee.com.br)), posteriormente houveram revisões de Roriz (2012) e do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em 2018, no qual foram corrigidos dados de nebulosidade.

Portanto, é proposto nessa pesquisa atualizar o ano climático de referência para cidade de Curitiba, comparando-se dados de duas estações meteorológicas diferentes (SIMEPAR e Aeroporto Internacional Afonso Pena), além de comparar possíveis alterações ocorridas entre os resultados obtidos para os TRY gerados por Goulart et al. (1998) e Rossi, Dumke e Krüger (2009).

## 2 OBJETIVO

O objetivo desse estudo é atualizar o ano climático de referência (TRY) para Curitiba, analisando-se dados de temperatura do ar ( $T_a$ ) de 2002 a 2016. Para tanto, são usados dados de  $T_a$  de duas estações meteorológicas distintas, a fim de comparar mudanças que podem vir a ocorrer com o uso de dados de diferentes procedências.

## 3 MÉTODO

O método dessa pesquisa está dividido em três etapas. Primeiro, foram determinados os TRY atualizados para Curitiba, com dados das duas estações mencionadas. Na segunda etapa foram realizadas três comparações: (1) TRY obtido por Rossi, Dumke e Krüger (2009) com o TRY atualizado a partir dos dados da estação do SIMEPAR; (2) TRY obtido por Goulart (1998) e atualizados por RORIZ (2012) com o TRY atualizado a partir dos dados da estação do Aeroporto Afonso Pena e (3) TRY obtidos a partir estações SIMEPAR e Aeroporto para o período de 2002 a 2016. A terceira etapa consiste em comparar as estratégias bioclimáticas para os TRY obtidos com dados da estação meteorológica do SIMEPAR.

### 3.1 Caracterização do clima de Curitiba

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger Curitiba possui clima temperado marítimo úmido (Cfb) (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007), caracterizado por alta pluviosidade e por temperaturas amenas. Além disso, segundo o zoneamento bioclimático brasileiro a cidade se enquadra na Zona Bioclimática 1 (ABNT, 2003). A temperatura média anual é 19,7 °C e os meses mais quentes variam entre janeiro e fevereiro e os mais frios entre junho e julho.

### 3.2 Determinação do TRY

#### 3.2.1 Dados meteorológicos utilizados

Os dados de  $T_a$  utilizados para elaboração do anos climáticos dessa pesquisa são provenientes de estações do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) alocado no campus Centro Politécnico na UFPR, representado na Figura 1 pelo ponto A e do Aeroporto Internacional Afonso Pena, representado na Figura 2 pelo ponto B, essas distam 10,8 km uma da outra. O período de análise para as duas estações foi de 15 anos (2002 a 2016).



Figura 1 – Localização das estações (AUTORAS, 2019).

#### 3.2.2 Procedimento para obtenção do TRY

O TRY corresponde ao conjunto de dados climatológicos de um ano de uma localidade<sup>1</sup>. Para a obtenção do TRY é necessário no mínimo 10 anos de dados. Para desenvolvimento desse estudo foi utilizada a metodologia apresentada pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE, 2009) e descrita em Goulart (1998) e Rossi, Dumke e Krüger (2009).

Segundo a metodologia da ASHRAE, o primeiro passo para o tratamento dos dados é o cálculo das médias mensais de temperatura do ar ( $T_a$ , em °C). Na Tabela 1 apresenta-se os valores obtidos a partir dos dados do SIMEPAR.

Posteriormente, são excluído os anos com meses de temperaturas extremas (tanto para calor, como para frio), seguindo uma ordem de prioridade, como pode ser observado na Tabela 2, para os dados do SIMEPAR. Com isso, são obtidos os anos que tem os meses com temperaturas extremas (segunda coluna na Tabela 2).

A sequência de doze meses do ano é repetida (terceira coluna), a fim de eliminar anos que tiveram meses muito atípicos. Nesse processo, os anos que vão aparecendo na Tabela 2 são gradativamente eliminados e o TRY é o ano que não aparece listado ou o último ano que aparece.

<sup>1</sup> Ressalta-se que o objetivo é definir o ano climático para o período analisado, e não o arquivo climático completo com todas as variáveis climáticas. A fim de mostrar que as alterações microclimáticas podem impactar a definição das estratégias bioclimáticas.

Tabela 1 - Temperaturas médias mensais obtidos com dados da estação meteorológica do SIMEPAR.

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2002	21,2	20,5	22,7	20,6	17,2	16,6	13,6	17	15,1	20	19,7	21
2003	21,4	23,2	20,6	18,9	15	16,3	14,9	13,3	15,7	17,2	18,8	19,9
2004	19,9	20,3	19,4	19	14,1	14,4	13,3	15,1	18,1	16,6	18,5	19,5
2005	20,5	20,7	20,8	19,8	17,2	16,5	14	16,4	14,1	17,8	18,6	19,5
2006	22,2	21,7	21,2	18,1	14,4	15,2	16,2	16,3	15,1	17,8	19	21,4
2007	21,5	21,9	23	19,8	15,6	16,5	13,8	15,7	18,2	18,8	19	21,3
2008	20	21,2	20,4	18,4	15,6	14,3	16	16,4	15,2	18,1	18,5	20
2009	20,5	21,4	21,3	18,4	16,3	12,5	13,1	15,3	16,2	17	22,2	21
2010	21,2	22,7	20,5	17,8	15,2	14,1	15,1	14,2	16,5	16	18,8	19,8
2011	21,8	21,6	18,9	18,7	14,9	12,9	14,3	14,6	14,8	17,3	17,6	19,7
2012	20,1	22,1	20,3	18,2	15,2	14	13,8	16,2	16,8	19	18,9	22,3
2013	19,8	21	19,3	17,7	16,1	14,8	13	14,3	15,8	17,3	18,7	21
2014	22,8	22,6	20,4	18,2	16	15,3	14,1	15,8	17,1	18,9	19,3	20,9
2015	22,6	21,1	19,9	18,1	15,5	14,4	14,5	17,2	17,9	17,8	18,5	21,1
2016	20,8	21,8	20,2	20,8	14,5	11,3	13,7	14,2	15,1	16,4	18	20,4

Tabela 2 – Seleção dos meses para obtenção do TRY com dados da estação meteorológica do SIMEPAR.

CONDIÇÃO	ANO	CONDIÇÃO	ANO
fevereiro mais quente	2003	fevereiro mais frio	2004
junho mais frio	2016	junho mais quente	2002
março mais quente	2007	março mais frio	2011
julho mais frio	2013	julho mais quente	2006
janeiro mais quente	2014	janeiro mais frio	2013
agosto mais frio	2003	agosto mais quente	2015
dezembro mais quente	2012	dezembro mais frio	2005
setembro mais frio	2005	setembro mais quente	2007
novembro mais quente	2009	novembro mais frio	2011
maio mais frio	2004	maio mais quente	2005
abril mais quente	2016	abril mais frio	2013
outubro mais frio	2010	outubro mais quente	2002

### 3.3 Comparação dos TRY

Após obtenção dos TRY atualizados, tanto para a estação do SIMEPAR quanto para a do Aeroporto, comparou-se os resultados obtidos entre si, a fim de verificar se o ano climático TRY seria alterado devido à localização das estações dentro da malha urbana. Além disso, os TRY atualizados foram comparados com os atualizados por RORIZ (2012) a partir de Goulart (1998) que foi 1969 (Aeroporto) e por Rossi, Dumke e Krüger (2009) que foi 2001 (SIMEPAR).

### 3.4 Estratégias bioclimáticas para os TRY de 1969 e 2008

A partir dos dados horários de Ta e UR (umidade relativa) dos anos climáticos de referência de 1969 e 2008, obtidos a partir dos dados climáticos do Aeroporto e SIMEPAR, respectivamente, foram obtidas as estratégias bioclimáticas. Com o programa AnalysisBio (disponível em [www.labee.com.br](http://www.labee.com.br)) foram gerados arquivos no formato try e a partir desses as estratégias bioclimáticas.

## 4 RESULTADOS

Os resultados estão divididos em três partes. A primeira é a análise dos anos climáticos de referência atualizados, obtidos pelas duas estações (Aeroporto e SIMEPAR). Já a segunda parte é a comparação do ano climático atualizados por RORIZ (2012) a partir de Goulart (1998) e por Rossi, Dumke e Krüger (2009). Por

fim, é apresentado os resultados das estratégias bioclimáticas entre o TRY atualizados por RORIZ (2012) a partir de Goulart (1998) e o resultante dessa pesquisa.

#### 4.1 TRY atualizados

##### 4.1.1 Estação meteorológica Aeroporto Internacional Afonso Pena

A partir dos dados de temperatura do ar da estação do Aeroporto o ano climático de referência não foi encontrado com a primeira análise de meses com temperaturas extremas, foi necessária uma segunda avaliação seguindo o que foi descrito em Pereira et al. (2004), com a classificação dos segundos meses com temperaturas extremas, e ao fim da análise obteve-se o ano de 2013 como o ano climático de referência. Como esperado as médias de temperatura mais altas ficaram entre os meses de dezembro a fevereiro, tendo o último a maior média, de 20,9 °C. Já as mínimas apareceram entre os meses de junho a agosto, com julho tendo a menor média, de 12 °C.

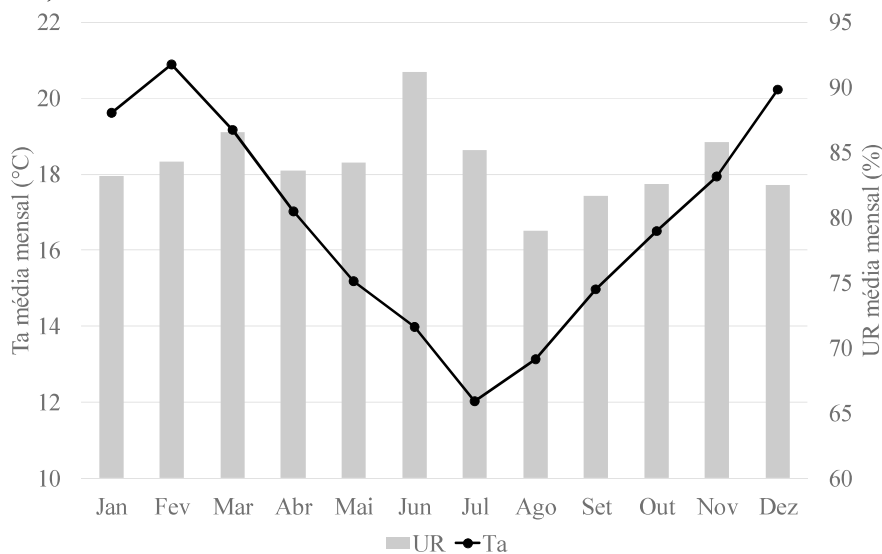


Figura A Figura 2 apresenta as médias mensais de Ta e UR do ano de 2013 definido como TRY, a partir dos dados da estação meteorológica do Aeroporto. Verifica-se que os meses de julho e agosto apresentaram as menores médias mensais, enquanto os meses mais quentes foram fevereiro e dezembro. Em relação a UR, o mês de junho registrou o maior valor médio (91%) e agosto o menor valor médio (79%).

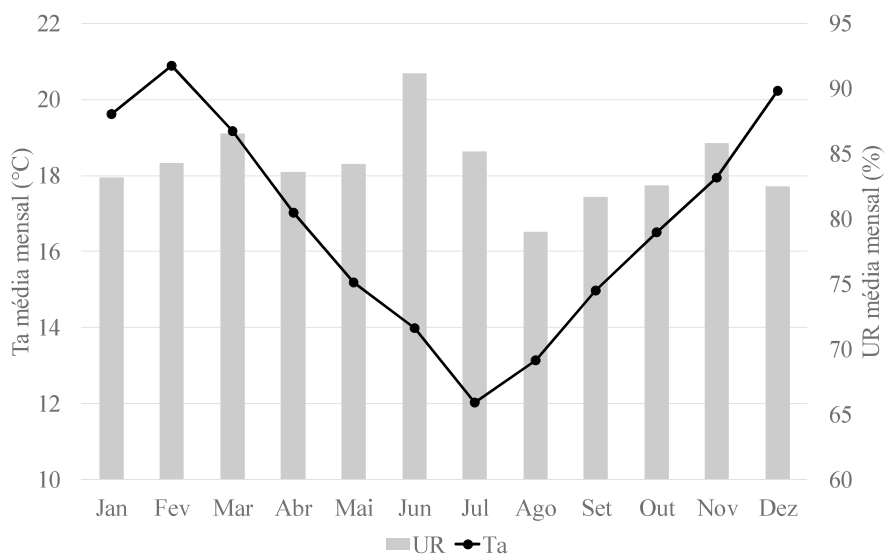


Figura 2 - Temperaturas médias mensais para o TRY com dados do Aeroporto de 2013. (AUTORAS, 2019).



### 4.1.2 Estação meteorológica do SIMEPAR

O ano climático de referência obtido a partir dos dados do SIMEPAR foi 2008. As temperaturas médias para 2008 mostraram comportamento um pouco diferente do esperado para Curitiba, já que as médias mensais de julho e agosto (meses que geralmente tem as médias mais baixas), foram mais altas que as médias mensais de junho e setembro.

Na Figura 3 é possível observar que junho e setembro tiveram as menores médias mensais de temperatura do ar, respectivamente, 14,3 °C e 15,2 °C. Já as médias mensais de fevereiro e março foram as mais altas, atingindo 21,2 °C e 20,4 °C. Em relação a UR, o mês de janeiro registrou o maior valor médio (85%) e julho o menor valor médio (72%).

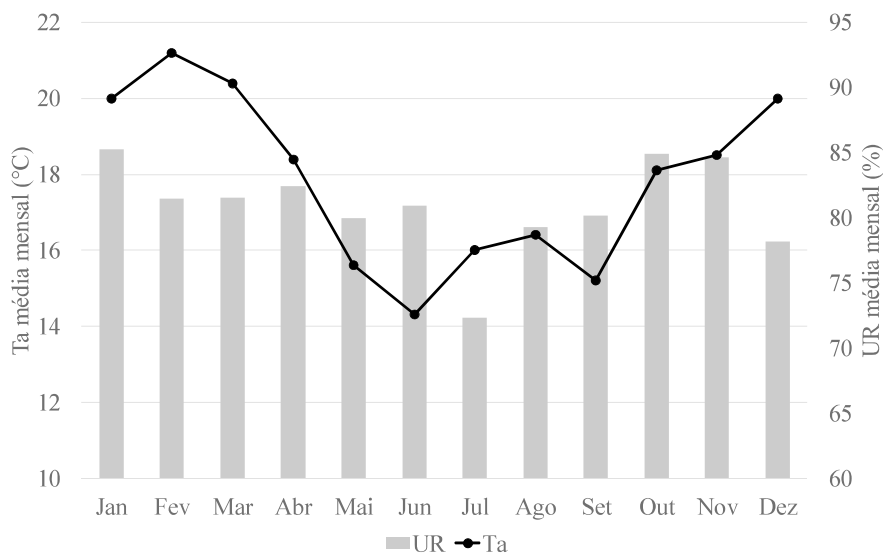


Figura 3 - Temperaturas médias mensais para o TRY com dados do SIMEPAR de 2008. (AUTORAS, 2019).

## 4.2 Comparações dos anos climáticos de referência

### 4.2.1 Comparação TRY 2008 (SIMEPAR) e 2013 (Aeroporto)

A partir da análise dos TRY (Aeroporto e SIMEPAR) é possível perceber algumas diferenças entre o ano climático de referência provindo de dados do SIMEPAR e do Aeroporto. Essa diferença se dá principalmente pela localização dessas duas estações. Enquanto a do SIMEPAR está localizada no campus Centro Politécnico da UFPR, em uma área densamente urbanizada, a estação do Aeroporto está localizada fora da malha urbana de Curitiba.

Observa-se na Figura 4 que existem diferenças significativas entre os dois TRY. A tendência observada é que pela estação do SIMEPAR estar localizada em uma área de maior densidade urbana, as temperaturas médias do ano de referência são mais altas. Por exemplo, para o mês de julho, a diferença de temperatura do ar média foi de 4 °C, sendo de 16 °C para o SIMEPAR e 12 °C para o Aeroporto.

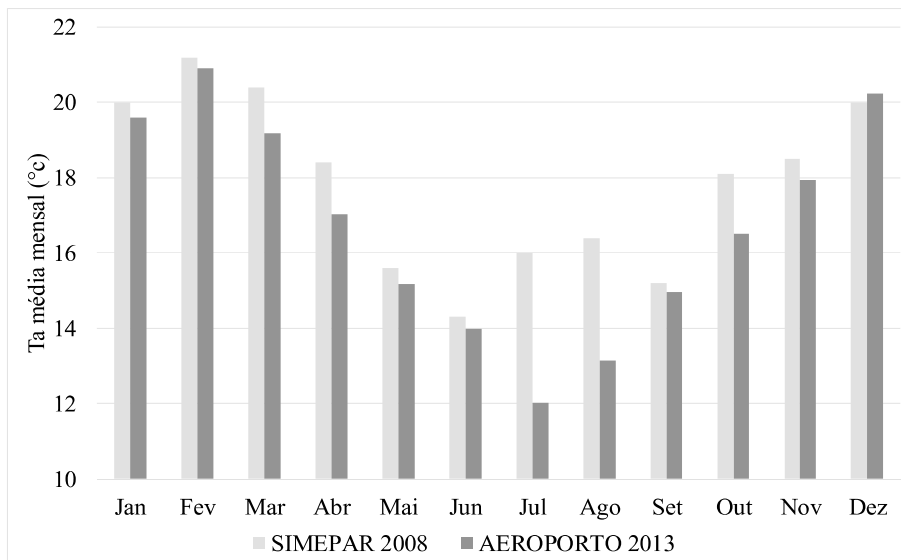


Figura 19 - Temperaturas médias mensais para os TRY com dados do SIMEPAR e Aeroporto. (AUTORAS, 2019).

Outra alteração observada é que para todos os meses, exceto em dezembro, em que o Aeroporto registrou média mais alta, o SIMEPAR apresentou médias de temperatura do ar mais altas que o Aeroporto. Essa informação reforça a ideia de que para posterior uso do TRY em análises de conforto, de desempenho térmico e energético de edificações e definições de estratégias bioclimáticas, é importante que os dados climáticos utilizados sejam provindos da estação meteorológica mais próxima do contexto urbano da situação a ser analisada.

#### 4.2.2 Comparação entre os TRY de 1969 e 2001 - Aeroporto

A Figura 5 apresenta as temperaturas médias mensais para os anos de 1969 e 2013, anos climáticos de referências obtidos a partir dos dados da estação do Aeroporto. É possível observar diferenças entre os dois anos de 0,1 °C (novembro) até 2,5 °C (dezembro). De modo geral, houve pouca variação nos valores de Ta média para 1969 e 2013. Observa-se que para os meses de janeiro, março, julho, agosto, setembro e novembro foram registradas temperaturas médias mais altas em 1969. Já para os demais meses (fevereiro, abril, maio, junho, outubro e dezembro) as temperaturas médias mais altas ocorreram em 2013, apresentado as maiores diferenças.

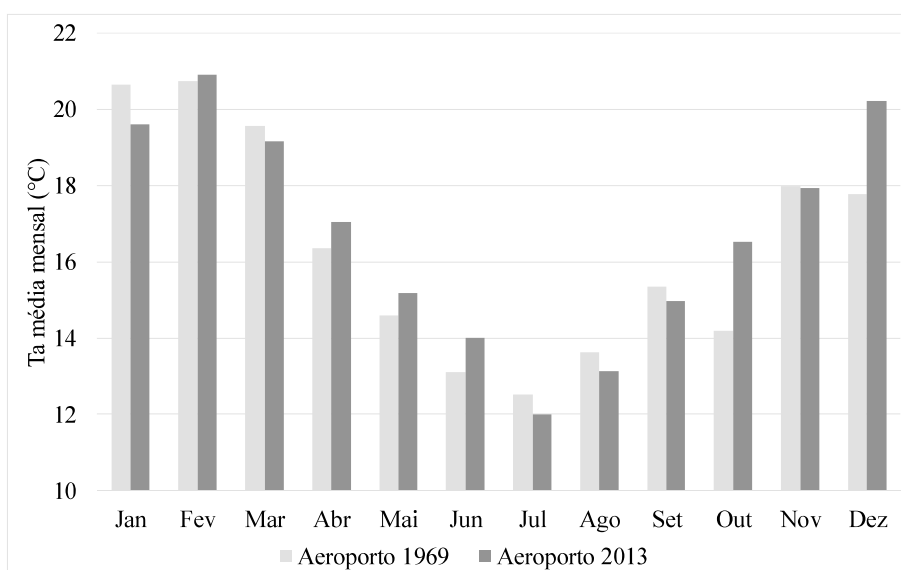


Figura 5 - Temperaturas médias mensais para os TRY de 1969 e 2013 - Aeroporto. (AUTORAS, 2019).

### 4.2.3 Comparação entre os TRY de 2008 e 2013 - SIMEPAR

Para os dados referentes à estação do SIMEPAR (Figura 6), as médias mensais apresentaram valores mais baixos para o ano de 2008, com exceção dos meses de maio, julho, agosto e novembro. As diferenças máxima e mínima são de 2,1 °C em janeiro e 0,3 °C em agosto, respectivamente. Em junho e dezembro os valores médios foram iguais para os dois anos.

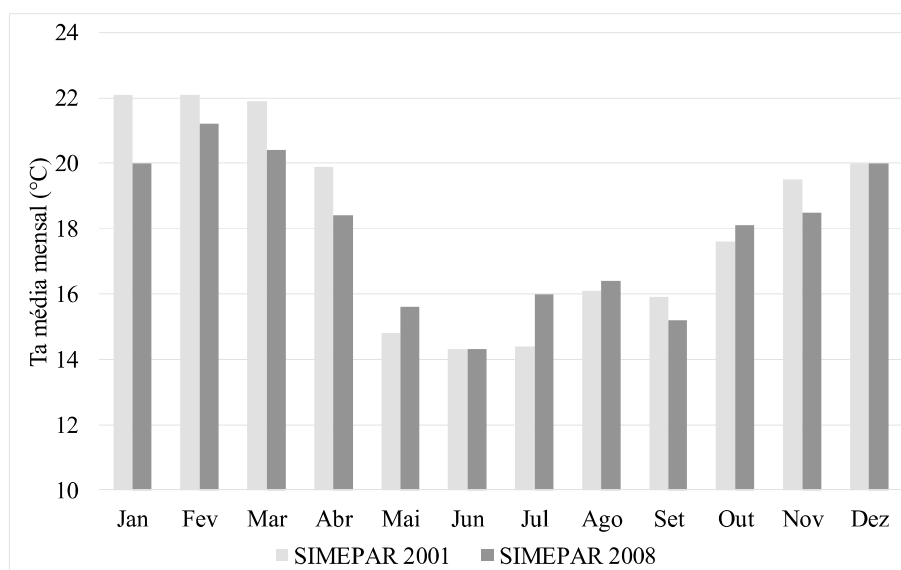


Figura 6 - Temperaturas médias mensais para os TRY de 2001 e 2008 - SIMEPAR. (AUTORAS, 2019).

### 4.3 Estratégias bioclimáticas

A Tabela 3 compara os graus de conforto e desconforto e as estratégias bioclimáticas recomendadas para o TRY 1969 e o TRY 2008. Nota-se que houve uma melhora de aproximadamente 7% nos níveis de conforto. Da mesma forma, o desconforto para o frio diminuiu em 13,2% das horas do ano, enquanto o desconforto para o calor não houve alteração significativa. A análise por estratégias mostra uma diminuição considerável na necessidade do uso de aquecimento artificial. Enquanto em 1969 o aquecimento artificial era necessário em 11,8% das horas do ano, em 2008 esse valor passa para 4%. A necessidade de aquecimento solar passivo também apresenta diferenças, sendo 18,9% em 1969 contra 15,3% em 2008. Apesar de não ter uma grande diferença nos níveis de desconforto para o calor, a análise bioclimática indica uma maior necessidade de sombreamento para os dados de 2008 (29,6%) em relação aos de 1969 (23,2%).

Tabela 3 – Porcentagens de conforto e desconforto e respectivas estratégias para 1969 e 2008 (AnalysisBio, UFSC).

	1969	2008
<b>Conforto</b>	<b>20,0%</b>	<b>27,1%</b>
<b>Desconforto</b>	<b>80,0%</b>	<b>72,9%</b>
<b>Frio</b>	<b>73,2%</b>	<b>66,0%</b>
Alta Inércia Térmica/Aquecimento Solar	42,5%	46,7%
Aquecimento Solar Passivo	18,9%	15,3%
Aquecimento Artificial	11,8%	4,0%
Umidificação	0,0%	0,1%
<b>Calor</b>	<b>6,8%</b>	<b>6,9%</b>
Ventilação	6,8%	6,8%
Alta Inércia p/ Resfr.	1,0%	0,9%
Resfr. Evap.	1,0%	0,9%
Sombreamento	23,2%	29,6%

As Figuras 7 e 8 apresentam os diagramas bioclimáticos traçados a partir dos valores médios horários de Ta e UR, para os anos de 1969 (dados Aeroporto) e 2008 (dados SIMEPAR) respectivamente. Verifica-se que para 2008 há maior quantidade de horas dentro da zona de conforto, assim como na zona de alta inércia térmica e aquecimento solar, como já visto nos valores apresentados na Tabela .

ZONAS:

1. Conforto
2. Ventilação
3. Resfriamento Evaporativo
4. Alta Inércia Térmica p/ Resfr.
5. Ar Condicionado
6. Umidificação
7. Alta Inércia Térmica/ Aquecimento Solar
8. Aquecimento Solar Passivo
9. Aquecimento Artificial
10. Ventilação/ Alta Inércia
11. Vent./ Alta Inércia/ Resf. Evap.
12. Alta Inércia/ Resf. Evap.

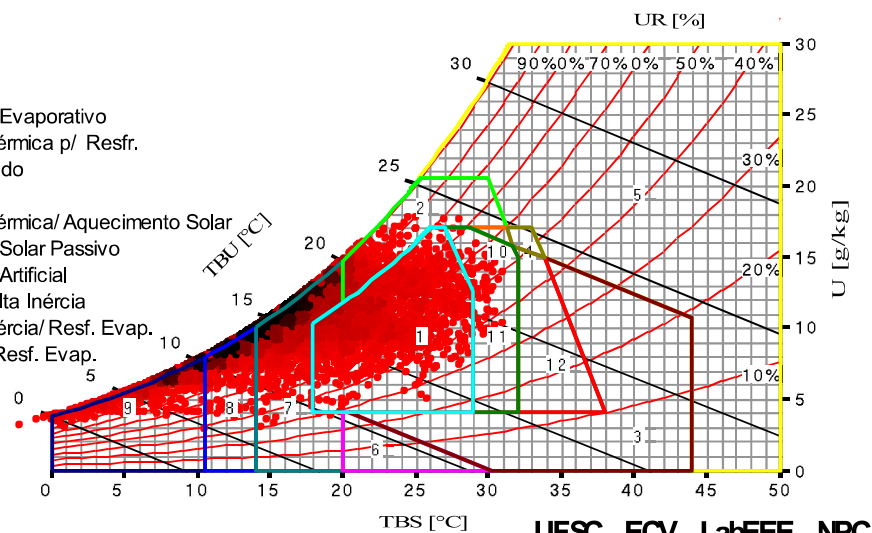


Figura 7 – Diagrama bioclimático - TRY de 1969 – Aeroporto. (AUTORAS, 2019).

ZONAS:

1. Conforto
2. Ventilação
3. Resfriamento Evaporativo
4. Alta Inércia Térmica p/ Resfr.
5. Ar Condicionado
6. Umidificação
7. Alta Inércia Térmica/ Aquecimento Solar
8. Aquecimento Solar Passivo
9. Aquecimento Artificial
10. Ventilação/ Alta Inércia
11. Vent./ Alta Inércia/ Resf. Evap.
12. Alta Inércia/ Resf. Evap.

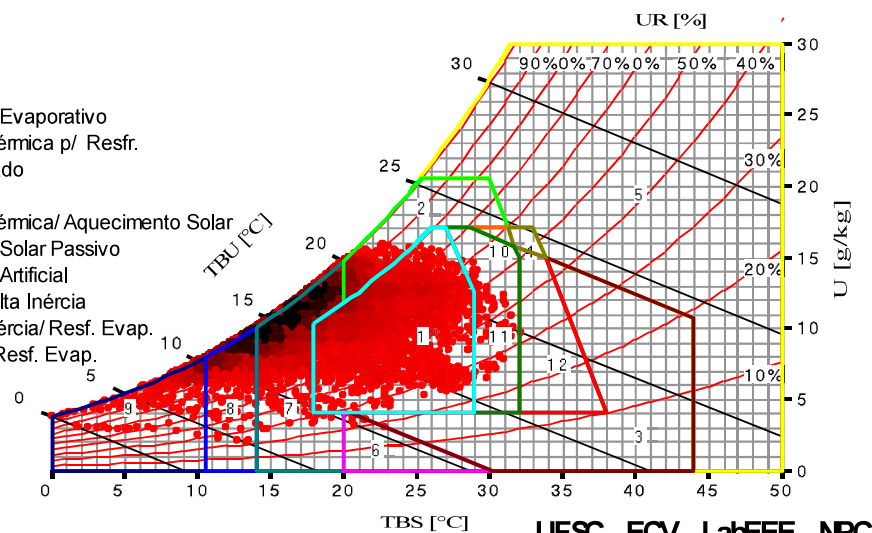


Figura 8 – Diagrama bioclimático - TRY de 2008 – SIMPEPAR. (AUTORAS, 2019).

## 5. CONCLUSÕES

Nessa pesquisa, a aplicação do método proposto pela ASHRAE para a definição do ano climático de referência (TRY) no período de 2002 a 2016, com os dados das estações meteorológicas do Aeroporto e SIMPEPAR, resultou em diferentes anos. Para os dados do Aeroporto o ano climático de referência obtido foi 2013 e para os dados do SIMPEPAR foi 2008. Essa diferença para duas estações em uma mesma região demonstra a importância de se analisarem dados, que posteriormente seriam usados para avaliar desempenho termo energético de edificações, assim como, para as definições de estratégias bioclimáticas de projeto. A escolha de quais dados são mais adequados para essas análises depende da área a ser avaliada, isto é, o contexto urbano pode ser mais uma variável a ser analisada para a definição de quais dados climáticos utilizar.

Outra importante consideração diz respeito à atualização dos dados. A análise comparativa entre os anos climáticos de referência, com dados provenientes da mesma estação meteorológica, mostrou que há diferenças nos valores médios mensais. Essas diferenças, apesar de pequenas, se referem à dados médios. A análise de conforto (TRY 1969 x TRY 2008) mostra que as porcentagens de conforto e desconforto, assim com as estratégias, podem mudar com o tempo, indicando a necessidade de analisar as estratégias com dados atualizados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220 – parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. ABNT: Rio de Janeiro, 2003.
- AMERICAN Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). *ASHRAE Handbook: Fundamentals*. New York, ASHRAE, 2009.
- GOULART, S.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. Florianópolis: PROCEL/Núcleo de Pesquisa em Construção; UFSC, 1998.
- HERRERA, M.; NATARAJAN, S.; COLEY, D. A.; KERSHAW, T.; RAMALHO-GONZÁLEZ, A. P.; EAMES, M.; FOSAS, D.; WOOD, M. A review of current and future weather data for building simulation. **Building Services Engineering Research e Technology**. v. 0, pg. 1-26, 2017.
- INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Arquivos Climáticos INMET 2018. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018>. Acesso em: 22 de junho de 2019.
- LUZ, E. G.; CANDIDO, C. R.; NOGUEIRA, M. C. J. A.; SANTOS, F. M. M.; LEÃO, E. F. T. B. Aplicação de metodologias de tratamento de dados do clima local para avaliação de diretrizes bioclimáticas em Sinop-MT. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018.
- PBMC. **Painel brasileiro de mudanças climáticas. Mudanças climáticas e cidades: Relatório Especial do Painel brasileiro de mudanças climáticas**. 1º ed, Rio de Janeiro, COPPE-UFRJ: 2016.
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 11, n. 5, p. 1633-1644, 2007.
- PEREIRA, I.; ALVES, T.; PINHEIRO, R.; ASSIS, E. S. Metodologia de tratamento de dados climáticos para inserção em softwares de simulação energética de edifícios. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL E ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 04., 2004, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2004.
- RORIZ, M. Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros. São Carlos: Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações; ANTAC, 2012.
- ROSSI, F. A.; DUMKE, E.; KRÜGER, E. L. Atualização do ano climático de referência para Curitiba. In: ENCONTRO NACIONAL E ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2009, Natal. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2009.

## AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Construção Civil (PPGECC) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Agradecemos também ao Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) pelo fornecimento de dados climáticos, possibilitando a realização da pesquisa.

## 5 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ENTORNO URBANO NA TEMPERATURA DO AR

### RESUMO

A formação climática das cidades é um sistema particular e está diretamente relacionada ao entorno urbano. O objetivo dessa pesquisa é explorar a influência do entorno urbano no comportamento das variáveis climáticas. Foi utilizado o algoritmo de geração de dados climáticos *Urban Weather Generator* (UWG) para elaboração de um arquivo climático epw correspondente as características urbanas do entorno do campus Centro Politécnico, da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Para tanto, foram realizadas análises como uso e ocupação do solo, além da composição do entorno urbano com as variáveis de albedo e absortância das superfícies, calor antropogênico, características das edificações do entorno. Os resultados demonstraram que o UWG foi capaz de caracterizar o comportamento da variável de temperatura do ar para o entorno do campus da UFPR.

**Palavras-chave:** *Urban Weather Generator*; temperatura do ar; entorno urbano.

### ABSTRACT

*The climatic formation of cities is a particular system and is causally related to the urban environment. The objective of this research is to explore the influence of the urban environment on the behavior of climatic variables. The Urban Weather Generator (UWG) climatic data generation algorithm was used to prepare an epw climate file corresponding to the urban characteristics surrounding the Centro Politécnico campus, at the Federal University of Paraná (UFPR). For this purpose, analyzes such as land use and occupation were carried out, in addition to the composition of the urban environment with the variables of albedo and surface absorption, anthropogenic heat, characteristics of the surrounding buildings. The results showed that the UWG was able to characterize the behavior of the air temperature variable around the UFPR campus.*

**Keywords:** *Urban Weather Generator; Air temperature; urban surroundings.*

### 5.1 INTRODUÇÃO

As cidades são sistemas complexos. A formação climatológica desses ambientes depende de inúmeros fatores como uso e ocupação do solo, geometria dos cânions urbanos, porcentagem de vegetação e corpos d'água, calor antropogênico, planejamento urbano bioclimático. Como consequência, há a formação de ilhas de calor, distúrbios no ciclo do carbono e aumento do efeito estufa.

Segundo o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas – PBMC, para os diferentes biomas do Brasil, indicadores preveem aumento de temperatura, que vai de 2,5 °C a 6 °C, até o final do século XXI (PBMC, 2016). Ainda, segundo esse órgão, até 2050, a porcentagem de população urbana mundial aumentaria de 64% para 69% (PBMC, 2016). Dessa forma, mostra-se necessário intervenções e análises mais detalhadas das variáveis do clima urbano, como, por exemplo, a temperatura do ar.

As mudanças de temperatura do ar em centros urbanos além de estarem ligadas a questões globais ainda ganham influência pela forma como a cidade é urbanizada. As consequências do aumento de temperatura do ar impactam também no desempenho de edificações.

Para avaliar o desempenho térmico e energético das edificações dados climáticos são necessários. Esses não podem ser escolhidos aleatoriamente, pois podem não representar as normais climatológicas do local estudado, além de que podem gerar cargas climáticas inadequadas para a edificação em estudo. Indica-se um mínimo de 10 anos de dados (LUZ et al., 2018; ROSSI, DUMKE e KRÜGER, 2009) para a realização de uma avaliação e posteriormente gerar um arquivo climático. Ainda assim, em geral, a cadeia de dados disponíveis para análise e geração de arquivos climáticos, são de dados de estações meteorológicas localizadas em áreas rurais. Esse fator dificulta a verificação de situações climáticas especiais de uma microrregião, e impacta diretamente no conforto térmico de pedestres e de quem habita a região.

Alguns estudos que buscam aproximar o entorno urbano e as simulações de energia em edificações são relacionados ao algoritmo *Urban Weather Generator* (UWG). Esse programa gera um novo arquivo climático, baseado nas características do entorno urbano. Dentro do arquivo climático de entrada, o algoritmo atualiza as variáveis climáticas de temperatura do ar, umidade do ar e temperatura radiante. Esse arquivo é do tipo epw, utilizado em simulação de desempenho de edificações. As alterações das variáveis climáticas são decorrentes das informações colocadas no algoritmo, em relação ao entorno urbano da edificação em análise ou de uma estação meteorológica urbana (SALVATI; ROURA; CECERE, 2016; CHESA; PALME, 2018).

Lima, Scalco e Lamberts (2019) e Machado (2019) estudaram, com uso do *Urban Weather Generator* (UWG), a influência da radiação solar no clima urbano e o efeito desse na carga térmica de edifícios comerciais em duas cidades do Brasil, o primeiro em Maceió/AL e o segundo em Santa Maria/RS. Os resultados de Lima, Scalco e Lamberts (2019) demonstraram que houve uma redução de carga para resfriamento de 16% a 18%, quando considerado uma geometria urbana que recebe sombreamento, para o clima de Maceió. Já Machado (2019) demonstrou que a ilha de calor em Santa Maria resulta em um aumento percentual de 5% a 59% da carga térmica para resfriamento.

Em estudo, Salvati et al. (2020) analisaram a performance energética de diferentes edifícios quando considerados fenômenos climáticos como a ilha de calor e obstrução solar em 10 casos de estudo diferentes, sendo em Roma, na Itália e em Antofagasta no Chile. Os resultados mostraram que as sombras urbanas são fundamentais para redução do consumo de energia para resfriamento em climas quentes e que o efeito da ilha de calor é mais significativo para climas temperados.

Dessa forma, prever que o uso do arquivo climático modificado, em função do entorno em que a edificação está inserida, pode auxiliar na obtenção de resultados térmicos e energéticos mais fiéis à realidade. Dessa forma, possibilitando a intervenção com medidas mais eficazes na diminuição do consumo de energia. Esse estudo avalia a influência do entorno urbano na alteração climática, a partir de dados

proveniente de uma estação fora da malha urbana, para a cidade de Curitiba, através da análise dos valores médios de temperatura do ar.

## 5.2 OBJETIVO

O objetivo dessa pesquisa é explorar a influência do entorno urbano no comportamento da temperatura do ar.

## 5.3 MÉTODO

Para verificar a influência da urbanização nas variáveis climáticas foi utilizado o programa *Urban Weather Generator* (UWG). Os dados de entrada necessários são denominados dados de referência e compreende os seguintes dados: classificação do solo, porcentagem da área de fachada, porcentagem de área construída (taxa de ocupação), altura das edificações e características térmicas dos materiais naturais e construtivos.

A classificação do solo, foi realizada com auxílio do programa de Sistema de Informações Geográficas (SIG) QGIS e um *plug in* de classificação do solo denominado *Semi-Automatic Classification Plug-in* (SCP). As porcentagens da área de ambiente construído (edificações), foram obtidos por meio dos mapas 3D disponibilizados no site <<https://cadmapper.com/>>. Esse aplicativo *online* transforma dados geográficos provenientes de fontes públicas como *OpenStreetMap* e NASA, em arquivos CAD e de programas 3D como *SketchUp*. Os valores referentes às características térmicas dos materiais naturais e das edificações foram retirados de normas e de artigos científicos.

A seguir está descrito o processo metodológico referente ao desenvolvimento desse estudo.

### 5.3.1 Caracterização climática

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, Curitiba possui clima temperado marítimo úmido (Cfb) (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007), caracterizado por alta pluviosidade e por temperaturas amenas. Além disso, segundo o zoneamento bioclimático brasileiro a cidade se enquadra na Zona Bioclimática 1 (ABNT, 2003), sendo a capital mais fria do país. A temperatura média anual é 19,7 °C e os meses mais quentes variam entre janeiro e fevereiro e os mais frios entre junho e julho.

### 5.3.2 Área de estudo

A verificação das alterações microclimáticas foi feita com base na comparação de valores de temperatura do ar entre duas áreas, uma urbana e outra rural. Candido e Rossi (2019) verificaram diferenças de valores de temperatura do ar, a partir do método TRY, para dados monitorados pelas estações meteorológicas do SIMEPAR



(Sistema Meteorológico do Paraná) e do Aeroporto Afonso Pena. A partir dessa constatação, as áreas do entorno dessas duas estações foram escolhidas para a presente pesquisa. Sendo assim, o entorno urbano é representado pela estação meteorológica do SIMEPAR (Figura 8 a) e o entorno rural pela estação meteorológica do Aeroporto Afonso Pena (Figura 8 b).

Para a verificação da influência da ocupação do solo no microclima foram definidos raios de influência, com base em Oke (2004). O autor afirma que o raio de influência em estudos de clima urbano varia de estudo para estudo, mas que em geral, uma boa consideração está entre 100 e 500m. Nessa pesquisa foi utilizado o raio de 350 metros para as duas áreas escolhidas. A escolha desse valor levou em consideração as diferentes ocupações do solo da área urbana, sendo elas, área construída (bairro Jardim das Américas e Campus Centro Politécnico da UFPR) e vegetação nativa (reserva do Campus Centro Politécnico da UFPR).

Figura 8 – Mapa do entorno da (a) estação meteorológica do SIMEPAR e do (b) Aeroporto Afonso Pena.



FONTE: A autora, elaborado a partir de imagem OpenStreet Map (2020)

A Figura 8 (a) apresenta o entorno urbano do qual foram extraídos os índices urbanos necessários para compor o arquivo de entrada do UWG. O ponto central da circunferência compreende a localização da estação meteorológica do SIMEPAR, com latitude  $-25,45^\circ$  e longitude  $-49,24^\circ$ . Já a Figura 8 (b) apresenta o entorno da estação meteorológica do Aeroporto Afonso Pena, latitude  $-25,52^\circ$  e longitude  $-49,17^\circ$ , considerada uma estação de referência em área rural. Dela também foram extraídos índices para compor o arquivo de entrada no UWG, e foi utilizado o mesmo raio de entorno, 350 metros, assim como realizado em outros estudos com essa característica como Salvati, Roura e Cecere (2016) e Salvati et al (2020).

### 5.3.3 Uso e Ocupação do Solo

Para a classificação do solo, foram definidos quatro usos: asfalto, área construída (taxa de ocupação das edificações), vegetação arbórea e vegetação rasteira. Para inserção desses dados no UWG foi necessário obter as porcentagens de cada uso.

Para tanto, foram utilizadas imagens Sentinel-2, o programa de Sistemas de Informação Geográficas (SIG) QGIS e, acoplado a esse último, o *plug-in Semi-automatic Classification* (SCP), responsável pela classificação do solo. Nos próximos tópicos serão abordados os procedimentos realizados para obtenção dos mapas de uso e ocupação do solo, para obtenção da real área construída e da área de fachada do entorno urbano estudado.

#### Procedimento 1: Imagens de Satélite

As imagens de satélite utilizadas no estudo de classificação do solo foram imagens do satélite Sentinel-2. O sensor desse satélite é multiespectral optoeletrônico, tendo resolução de 10 a 60 metros, nas zonas espectrais infravermelho de onda curta, infravermelho próximo e visível. Esse sensor tem 13 canais espectrais, que permite a captura de diferenças na vegetação, incluindo alterações temporais, e minimiza o impacto na qualidade de fotografias da atmosfera (EOS, 2015). As diferentes bandas das imagens Sentinel-2 e suas especificidades podem ser visualizadas na Tabela 3.

Para esse estudo, foram utilizadas as imagens com bandas de resolução de 10 metros, devido o raio de estudo ser pequeno, 350 metros. Dessa forma, as bandas utilizadas foram as bandas 2, 3, 4 e 8.

As imagens utilizadas<sup>4</sup> têm resolução de 10 metros e são distribuídas gratuitamente pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Foram buscados os conjuntos de dados com céu limpo, com cobertura de nuvens sendo inferior a 10%. As imagens são Level-2A, referentes a refletância de superfície (CONGEDO, 2020).

Após a abertura das bandas de imagem no programa QGIS, foi realizada a correção de subtração de objetos escuros, indicada por Chávez (1996, apud Congedo, 2020 p. 132) que explica que “a correção se faz necessária devido ao fato de que alguns dos pixels, nas imagens, estarão em sombra completa, e a radiações recebidas (visualizadas na imagem), são resultado das dispersões atmosféricas.”

---

<sup>4</sup> Disponíveis no site *EarthExplorer* ([www.earthexplorer.usgs.gov/](http://www.earthexplorer.usgs.gov/)). As imagens utilizadas são datadas de 24 de junho de 2019, como pode ser verificado no ID:L1C\_T22JFS\_A020913\_20190624T132237.

Tabela 3 - Bandas das imagens Sentinel-2

Banda	Comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolução (m)
Banda 1 – Aerossol Costeiro	0.443	60
Banda 2 – Azul	0.490	10
Banda 3 - Verde	0.56	10
Banda 4 – Vermelho	0.665	10
Banda 5 – Red Edge 1	0.705	20
Banda 6 – Red Edge 2	0.740	20
Banda 7 Red Edge 3	0.783	20
Banda 8 – infravermelho Próximo (NIR)	0.842	10
Banda 8A – Red Edge 4	0.865	20
Banda 9 – Vapor de Água	0.945	60
Banda 10 – Cirrus	1.375	60
Banda 11 – SWIR	1.610	20
Banda 12 - SWIR	2.190	20

FONTE: Adaptado de Congedo (2020).

## Procedimento 2: *Semi-automatic Classification* Plug in

O processo de classificação do solo tem sido utilizado nos mais diversos estudos, em áreas diferentes como engenharia ambiental e arquitetura, porém esse procedimento é realizado, em sua maioria de forma manual.

A fim de facilitar o processo de desenvolvimento de mapas de uso e ocupação do solo, em 2012 o engenheiro Luca Congedo desenvolveu um *plug in* para o programa QGIS denominado SCP (*Semi-automatic Classification*), capaz de classificar o uso e ocupação do solo de maneira supervisionada. Esse procedimento possibilita a identificação de materiais em imagens, com base nas diferentes bandas de imagem (assinaturas espectrais). A seguir estão descritas as etapas do procedimento.

- 1) Conversão de vetores para *raster*: após a correção atmosférica das bandas selecionadas para o estudo (bandas 2, 3, 4 e 8), é criado o conjunto de bandas que será trabalhado no SCP, denominado *Band Set*. Com o conjunto de bandas corrigidas é realizada a conversão dos vetores para *raster*, usando o tipo de conversão *Center of Pixels*. Congedo (2020) explica que durante o processo de conversão o vetor é comparado ao *raster* de referência, e *pixels* de varredura de saída são atribuídos a ele, desde que o centro de pixels esteja dentro do polígono. Esse polígono é referente as imagens de satélite utilizadas.
- 2) Recorte das áreas de estudo: a partir dos *rasters* foram feitos os recortes das imagens que representavam as áreas de estudo. Primeiramente foi usado a ferramenta de corte de *raster* do SCP, obtendo o corte para a área do Aeroporto Afonso Pena e do entorno urbano da estação meteorológica do SIMEPAR. O SCP possibilita o corte de diferentes *rasters* ao mesmo

tempo, o que otimiza o trabalho de recorte, porém essa função apenas corta a imagem de forma retangular. Assim, posterior a classificação do solo foi necessário recortar o retângulo em circunferência.

- 3) Definição dos ROI (*Region of Interest*): essa ferramenta faz a classificação de diferentes materiais com assinaturas espectrais diferentes. Segundo Congedo (2020) cada ROI é identificado por uma identidade de classe, sendo atribuído, dessa forma a uma classe de cobertura do solo, esse último sendo um identificador de macroclasse.

Essa diferenciação dos ROI é importante pois é através da criação de diferentes classes para área, de telhado por exemplo, que se chega ao resultado da macroclasse de área construída. Os identificadores criados nessa pesquisa foram: (1) Vegetação Arbórea; (2) Vegetação Rasteira; (3) Área construída (referente as edificações) e (4) Área Pavimentada (referente ao revestimento em asfalto). Nesse processo são criados inúmeros ROI para cada macroclasse. Ainda, nessa etapa é possível atribuir o nome e a cor nas identidades de macroclasse.

- 4) Escolha do algoritmo de classificação: o algoritmo de classificação é usado para gerar o mapa de uso do solo. Segundo Congedo (2020) o algoritmo de classificação compara as características espectrais dos diferentes pixels da imagem com as identidades atribuídas às macroclasses.

Ainda, segundo Congedo (2020) o *plug-in* SCP possui três algoritmos de classificação, sendo eles: (1) Distância Mínima, calcula a distância euclidiana entre as assinaturas espectrais dos pixels; (2) Máxima Verossimilhança, estima a probabilidade de um pixel pertencer a uma classe de cobertura do solo, aplicando o teorema de Bayes; e (3) Mapeamento de ângulo espectral, calcula o ângulo entre diversas assinaturas espectrais dos pixels das imagens e das assinaturas espectrais caracterizada pelos ROI atribuídos pelo operador. Para essa pesquisa foi testado os dois métodos mais indicado para pesquisas de entorno urbano, por Congedo (2020), Máxima Verossimilhança e mapeamento de ângulo espectral. Foi concluído que o método com resultado mais fiel a realidade desse estudo (a partir da comparação visual da realidade local), foi o Mapeamento de ângulo espectral, sendo ele utilizado.

Procedimento 3: Correção da taxa de área construída, taxa da área de fachada e altura das edificações

Segundo Bueno (2010) e Salvati et al. (2020) os demais parâmetros necessários para compor o arquivo de programação do UWG são:

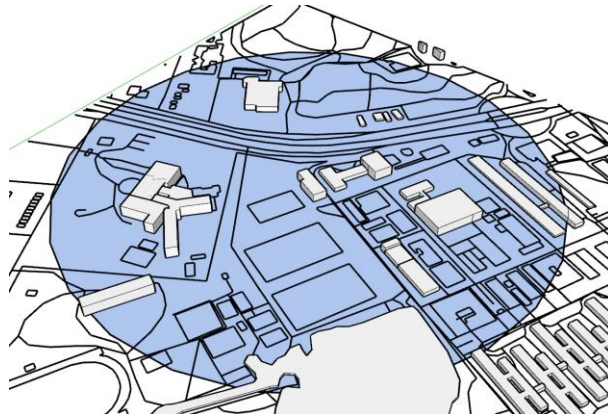
- Taxa de área construída: porcentagem de área construída (edificações) em relação a área total estudada;

- Altura média das edificações: altura média inserida na programação, referente a altura média das edificações do entorno urbano estudado;
- Taxa de área de fachada: relação entre a área de fachada das construções presentes no entorno urbano e a área total estudada, de 350m.

Esses parâmetros foram obtidos a partir da geometria urbana fornecida pelo site CADMAPPER<sup>5</sup>. Essa ferramenta transforma dados de fontes abertas como *OpenStreetMap* e Nasa, em diversos softwares de desenho e modelagem como AutoCAD e *SketchUp*. O site disponibiliza gratuitamente até 1km<sup>2</sup> de material.

Foi necessário rever a taxa de área construída obtidas pelo SCP, devido a inconsistências nos pixels entre áreas de edificações e área de pavimentação (asfalto), essa análise foi realizada de forma visual. Sendo assim, foi obtido o arquivo do CADMAPPER no formato para o programa *SketchUp*, da área em análise. Assim, foi traçada a circunferência de 350 metros e selecionadas as áreas dos polígonos referentes a edificações e entorno urbano, como mostra a Figura 9. Na sequência foi obtida a área ocupada pelas edificações do entorno e foi realizado o cálculo para obtenção da taxa de ocupação das edificações construídas (Tabela 4).

Figura 9 – Circunferência do entorno urbano do SIMEPAR



FONTE: Adaptado de CADMAPPER (2020).

Tabela 4 – Correção da taxa de área construída

Área total de edificações (m <sup>2</sup> )	Taxa de área construída
164238,8	43%

FONTE: A autora (2020).

A altura média das edificações foi medida com auxílio da geometria 3D, obtida no CADMAPPER. Nota-se pela Figura 9 que algumas das edificações não possuem o modelo em 3D, apenas a projeção da área que ocupa. Dessa forma, foi utilizada uma ferramenta do *Google Earth Pro*, que mede distâncias em 3D. Segundo Moro,

<sup>5</sup> <https://cadmapper.com/>

Krüger e Camboin (2019), a diferença entre medições *in loco* e da ferramenta do *Google Earth Pro*, é próximo a 2%. Sendo assim, foram aferidas as medidas e foi calculado o valor da altura média das edificações (Tabela 5).

Tabela 5 – Altura média das edificações

Número de edificações (unidade)	Altura Média (m)
67	6,8

FONTE: A autora (2020).

Por fim, foi calculado o valor da porcentagem de área de fachada da área de estudo. Para tanto, foi utilizado novamente o modelo 3D apresentado na Figura 9 e a régua 3D do *Google Earth Pro*, resultando no valor de 13% (Tabela 6).

Tabela 6 – Taxa de área de fachada

Área de fachada (m <sup>2</sup> )	Taxa de área de fachada (%)
50737,35	13

FONTE: A autora (2020).

#### 5.3.4 Elaboração do arquivo de entrada no Urban Weather Generator (UWG)

O *Urban Weather Generator* (UWG) é um programa que transforma dados meteorológicos do arquivo climático padrão (epw), usado em simulações térmica energética de edificações, em um arquivo epw referente às condições climáticas de um entorno urbano específico (BUENO, 2010). Para desenvolvimento desse estudo foi utilizada a versão V4 do programa, sem interface gráfica. Dessa forma, foi elaborado um arquivo de dados de entrada, em xml, com as informações da área urbana estudada e do entorno da estação meteorológica de referência do arquivo climático epw (aqui representada pela Estação Meteorológica do Aeroporto Afonso Pena)

O algoritmo do UWG é baseado na teoria de modelos de dossel urbano e balanço de energia de edificações (BUENO, 2010; MACHADO, 2019; SALVATI et al., 2020). O modelo consiste em quatro diferentes componentes de cálculo, sendo: (1) Modelo da estação rural; (2) Modelo de difusão vertical, (3) Modelo da camada limite e; (4) Modelo de dossel urbano e de balanço de energia de edificações (SALVATI; ROURA; CECERE, 2016).

Na Tabela 7 estão apresentados os valores de entrada utilizados no arquivo de programação do UWG. Na última coluna da tabela são apresentadas as fontes das quais foram retirados os valores utilizados na pesquisa. Os valores de taxa de vegetação arbórea e rasteira, taxa de área construída, taxa de asfalto, taxa de área de fachada e altura das edificações, foram obtidas por meio dos procedimentos descritos nas seções 5.2.1 e 5.2.2.

Tabela 7 – Parâmetros de entrada no UWG

	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor utilizado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Referência</b>
<b>Área Urbana</b>	Calor antropogênico rua	10.79	W/m <sup>2</sup>	Callejas (2012); Ferreira, Oliveira, Soares (2010)
	Emissividade asfalto	0.92		Oke (1988)
	Albedo asfalto	0.3		Oke (1988)
	Albedo vegetação rasteira	0.16		Angelini et al. (2015)
	Albedo vegetação densa	0.12		Angelini et al. (2015)
	Taxa vegetação arbórea	0.17672	% decimal	Calculado SCP
	Taxa vegetação rasteira	0.28054	% decimal	Calculado SCP
	Taxa área construída	0.43	% decimal	Calculado
	Taxa asfalto	0.11	% decimal	Calculado
	Taxa área de fachada	0.13	% decimal	Calculado
	Altura média edificações	6.8	m	Calculado
<b>Telhado</b>	Emissividade telhado laje concreto	0.87		Muniz-Gaal et al. (2018)
	Albedo laje concreto escuro	0.21		Muniz-Gaal et al. (2018) Calculado base 15220 (BRASIL, 2003)
	Condutividade térmica	1.78	W/mk	
	Inercia Térmica	1753.13	kJ/m <sup>3</sup> K	Calculado base Aldawi 2013
	Espessura	0.32	m	Estimado
	Vegetação	0		Estimado
	Inclinação	0.08	unidade	Estimado
	Temperatura inicial	20	°C	Default programa
<b>Parede</b>	Emissividade	0.92		Oke (1988)
	Albedo	0.4		Oke (1988)
	Condutividade térmica	1.18	W/mK	Calculado ABNT NBR 15220 (BRASIL, 2003)
	Inercia Térmica	1120	kJ/m <sup>3</sup> K	Calculado base Aldawi (2013)
	Espessura	0.15	m	Estimado
	Vegetação	0		Default programa
	Inclinação	0		Default programa
	Temperatura inicial	20	°C	Default programa
<b>Vidro</b>	Albedo	0.4		Oke (1988)
	Condutividade térmica	1.18	W/mK	Calculado ABNT NBR 15220 (BRASIL, 2003)
	Inercia Térmica	1120	kJ/m <sup>3</sup> K	Calculado base Aldawi (2013)
<b>Área Rural</b>	Espessura	0.15	m	Estimado
	Vegetação	0		Default programa
	Inclinação	0		Default programa
	Temperatura inicial	20	°C	Default programa
	Taxa de vegetação rasteira	0.72	% decimal	Calculado

FONTE: A autora (2020).

O arquivo climático utilizado foi o SWERA 838400, referente a estação meteorológica do Aeroporto Afonso Pena, obtido em endereço online<sup>6</sup>.

#### 5.3.5 Tratamento dos dados

Os dados foram obtidos de duas formas. Primeiro, foram revisados os valores médios de temperatura de bulbo seco para as diferentes fontes de dados, sendo eles, arquivo climático SWERA 838400, o arquivo climático modificado pelo UWG e os dados de medição da estação meteorológica do SIMEPAR, para o ano de 2008 (CANDIDO; ROSSI, 2019). Foram selecionados os meses que apresentaram maior e menor valores médios de temperatura do ar, respectivamente fevereiro e junho.

A partir da seleção, foram obtidas as médias horárias de temperatura do ar para os referidos meses.

#### 5.3.6 Teste t

Para verificar a relação entre os dados médios de temperatura do ar do arquivo climático gerado pelo UWG e os provenientes da estação meteorológica do aeroporto (SWERA 838400) foi utilizado o teste t. Foram testados os valores horários médios das 8760 horas. Primeiramente foi calculado o valor P. Essa variável indica se a hipótese nula é verdadeira ou não. Quando os valores de P são altos é um indicativo de que os dados representam um nulo verdadeiro (COSTA NETO, 2002). Já quando P é um valor baixo é improvável que a hipótese nula seja verdadeira.

No caso, analisou-se a hipótese nula de que os dados horários médios de temperatura do ar registrados pelo aeroporto (SWERA) são iguais aos dados médios de temperatura do ar gerados pelo algoritmo UWG, para o nível de confiança de 5%.

### 5.4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados nas próximas seções estão divididos em duas partes. A primeira mostra os resultados da classificação do uso do solo e a correção de dados da taxa de área construída. Já a segunda parte analisa as diferenças de temperatura de bulbo seco para os dados do arquivo climático SWERA, do arquivo climático modificado pelo UWG e os dados provenientes da estação meteorológica do SIMEPAR, no ano climático padrão de 2008.

#### 5.4.1 Uso do solo

Como resultado do uso do solo, foram gerados dois gráficos com o *software* QGIS. A

---

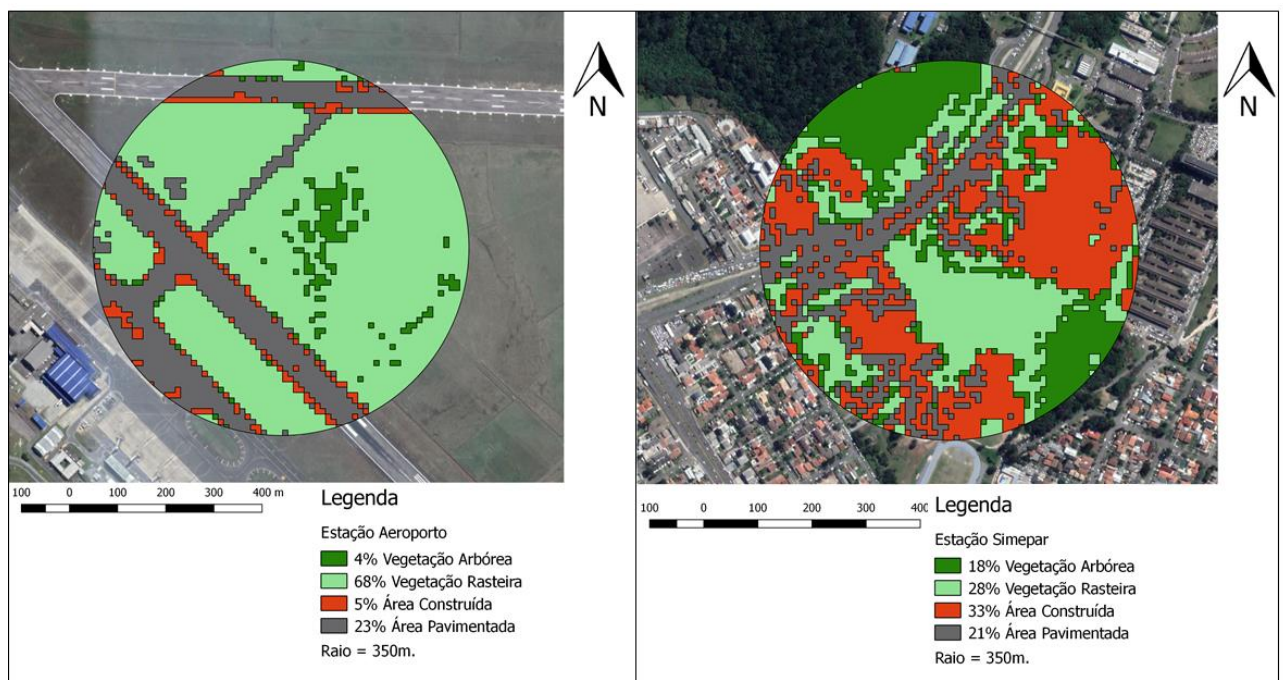
<sup>6</sup> [https://www.energyplus.net/weather-location/south\\_america\\_wmo\\_region\\_3/BRA//BRA\\_Curitiba-Afonso.Pen.838400\\_SWERA](https://www.energyplus.net/weather-location/south_america_wmo_region_3/BRA//BRA_Curitiba-Afonso.Pen.838400_SWERA)



Figura 10 (a) apresenta os resultados para o entorno da estação meteorológica do Aeroporto Afonso Pena, no qual as taxas de diferentes usos do solo foram calculadas a partir das áreas obtidas pela tabela de atributos do polígono. Verificou-se que para o raio de 350 metros a maior porção do solo é composta por vegetação rasteira (68%), o segundo uso evidenciado é a área pavimentada (23%) e as duas ocupações menos significativas nesse raio, foram vegetação arbórea (4%) e área construída (5%).

Já a Figura 10 (b) apresenta o resultado para o entorno urbano da estação meteorológica do SIMEPAR, no campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná. Nessa classificação do solo, os resultados obtidos para vegetação arbórea e rasteira foram, respectivamente, 18% e 28%, o que já era esperado, devido parte do entorno ser composto pela reserva de mata da UFPR e por boa parte do campus Centro Politécnico e Jardim Botânico. Os índices de área construída e área pavimentada, nesse caso, não tiveram resultados satisfatórios, devido ao tamanho dos pixels das imagens de satélite utilizadas. Dessa forma, foi necessário a realização de uma correção desses dados.

Figura 10 – Mapa do uso do solo no entorno da (a) estação meteorológica do Aeroporto Afonso Pena e da (b) estação meteorológica do SIMEPAR



FONTE: A autora, elaborado a partir de imagem Sentinel-2 (2020).

Para correção dos dados de área construída e pavimentada foram utilizados os dados disponibilizados no site CADMAPPER, como demonstrado na seção 5.3.3, o valor utilizado para geração do arquivo climático então foi para área construída com taxa de 43% e área pavimentada com taxa de 11%.

### 5.4.2 Teste t

A hipótese nula testada foi de que os valores médios da temperatura do ar registrados pelo aeroporto (SWERA) são iguais aos dados médios de temperatura do ar gerados pelo UWG. O valor de P encontrado foi de 0 (zero), indicando que a hipótese nula não é verdadeira, ou seja, os dados do arquivo SWERA são diferentes dos dados gerados pelo UWG (Tabela 8).

Tabela 8 – Teste t para os dados SWERA e UWG

	Ta SWERA	Ta UWG
Média	17,171	18,291
Variância	25,449	22,387
Observações	8760	8760
Correlação de Pearson	0,934	
Hipótese da diferença de média	0,000	
gl	8759	
Stat t	-57,964	
P(T<=t) uni-caudal	0,000	
t crítico uni-caudal	1,645	
P(T<=t) bi-caudal	0,000	
t crítico bi-caudal	1,960	

FONTE: A autora (2020)

### 5.4.3 Temperatura de bulbo seco

Os resultados de temperatura média mensal de temperatura do ar são apresentados no Quadro 1. Esses dados mensais foram utilizados para avaliar quais seriam os meses mais críticos (mais quente e mais frio) em relação à temperatura de bulbo seco. Dessa forma, foi verificado que o mês com média mais quente para temperatura do ar foi fevereiro, nos três casos amostrais, e que julho foi o mês com médias mais frias, tanto no arquivo climático SWERA e dos dados provenientes da estação meteorológica do SIMEPAR. Para o arquivo climático gerado pelo *software* UWG verificou-se que as médias mais baixas foram em julho e agosto (14,55°C para os dois meses), sendo que a média em junho 15,02°C.

Quadro 1 - Temperaturas de bulbo seco classificadas por cores

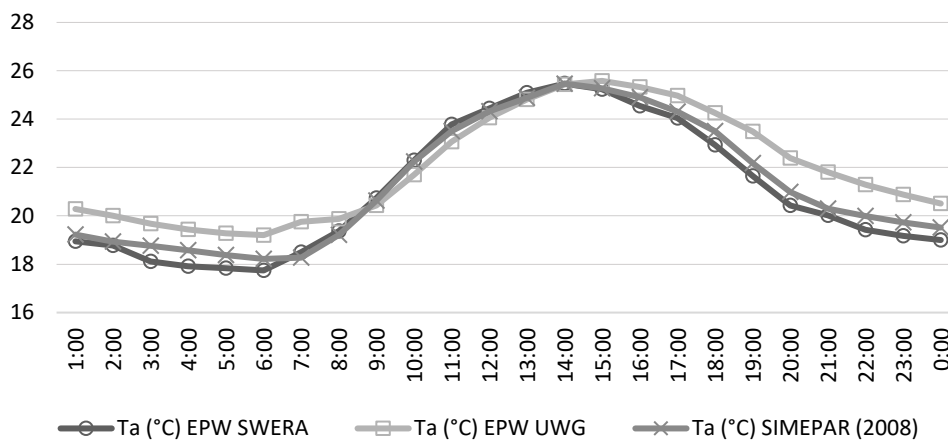
Mês	Temperatura do ar (°C)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
EPW SWERA	20,94	21,06	20,05	18,69	14,93	13,14	13,55	13,28	15,26	16,84	18,77	19,83
EPW UWG	21,93	21,98	21,02	19,71	16,6	15,02	14,55	14,55	15,98	17,76	19,78	20,87
SIMEPAR	20,04	21,3	20,38	18,45	15,65	14,28	16,03	16,36	15,16	18,15	18,49	20,01

FONTE: Autora (2020).

A partir dos resultados do Quadro 1, foram selecionados os meses mais frio e mais quente, para comparar as diferenças encontradas entre as três fontes de dados avaliadas. Na Figura 11 estão apresentadas as médias horárias de temperatura de bulbo seco para o mês de fevereiro. A variação de temperatura média com maior diferença foi 1,3°C para o horário das 20h. A temperatura do ar média horária mais alta ocorreu às 14h, temperatura de 25,47°C para as três fontes analisadas.

Além disso, pode-se observar que para os horários das 18h até as 8h, os valores de temperatura média do arquivo climático gerado pelo UWG ficaram mais altas, possivelmente devido a capacidade do algoritmo ser capaz de prever a tendência da ilha de calor do entorno urbano, como apontado em Bueno (2010) e Salvati, Roura e Cecere (2016). Ainda, vale ressaltar que os arquivos climáticos são elaborados com dados representativos que descartam meses e anos com temperatura mais alta ou mais baixa, sendo assim tanto os dados do ano TRY do SIMEPAR quanto os dados do arquivo climático SWERA, seriam correlatos a dados mais suaves.

Figura 11 – Média horária de temperatura de bulbo seco para o mês de fevereiro



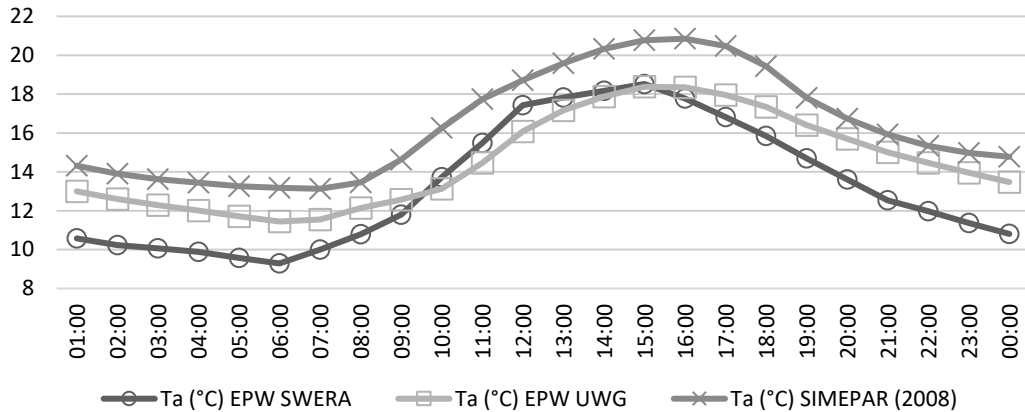
FONTE: Autora (2020).

Já para o mês de junho (Figura 12) a variação do arquivo climático UWG se mostrou maior em relação a estação meteorológica do SIMEPAR. As temperaturas horárias médias foram, respectivamente, 20,85°C e 18,35°C, para a estação meteorológica do SIMEPAR e para o arquivo climático UWG, no horário das 14h. Nesse sentido é importante avaliar que Salvati, Roura e Cecere (2016) concluíram que a medição da estação meteorológica pode ser influenciada pelas superfícies urbanas próximas ao termômetro e que apesar do UWG ser considerado uma ferramenta satisfatória para prever os efeitos da morfologia urbana nas variáveis climáticas, ele deixa a desejar quando são considerados parâmetros muito peculiares do entorno urbano. No caso do estudo dos autores, o programa não foi capaz de prever a influência da brisa marítima para um entorno urbano (SALVATI; ROURE; CECERE, 2016).

Se for avaliada a diferença entre as médias horárias do arquivo climático SWERA e UWG (Tabela 8), nota-se que o algoritmo UWG foi capaz de prever um

aumento de temperatura no entorno urbano analisado. Lembra-se que o arquivo climático SWERA é proveniente de uma estação meteorológica rural.

Figura 12 – Média horária de temperatura de bulbo seco para o mês de junho

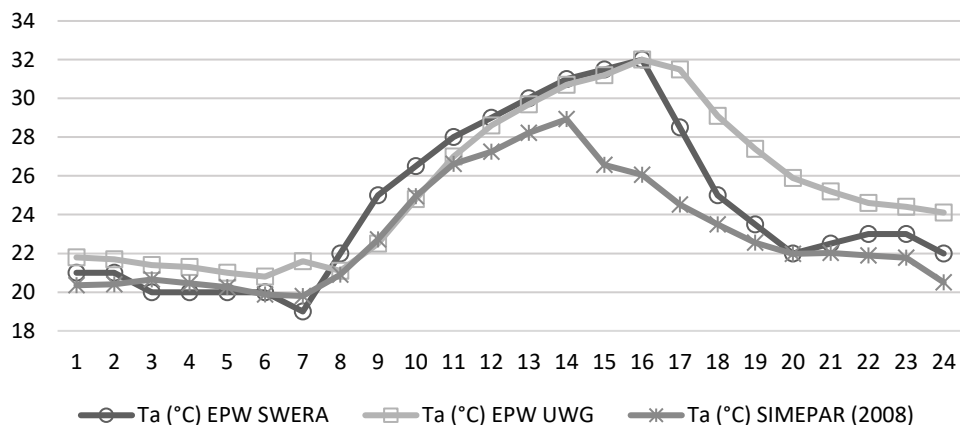


FONTE: Autora (2020).

Ao analisar os dados de um dia específico, representado aqui por um dia de fevereiro e junho (Figura 13 e Figura 14), demonstra-se que o comportamento da curva tem coerência com o comportamento da variável de temperatura do ar no contexto urbano (comparação da curva de Ta do SIMEPAR x UWG).

A Figura 13 representa o conjunto de dados de um dia de fevereiro para os arquivos climáticos SWERA, UWG e SIMEPAR. Apesar da variação entre os dados do SIMEPAR e os dados do arquivo climático UWG, é possível verificar visualmente que a tendência do comportamento da variável temperatura do ar, para Curitiba, foi representada. O aquecimento do ambiente urbano começa no início da manhã, coincidindo com o período de incidência de radiação solar e se mantém até início da noite, quando lentamente a temperatura tende a cair.

Figura 13 – Dados horários de temperatura de bulbo seco para um dia de fevereiro

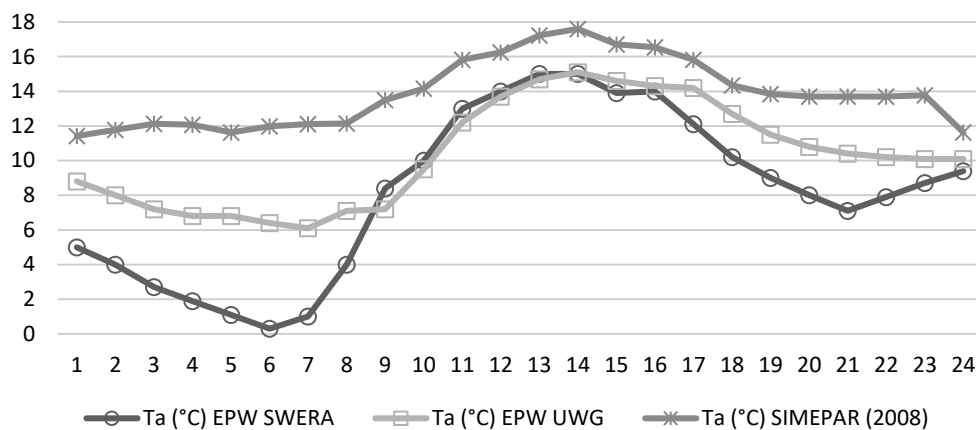


FONTE: Autora (2020).

Os dados do SIMEPAR foram utilizados como forma de verificação do comportamento da temperatura do ar dos dados gerados pelo UWG. Ressalta-se que os dados utilizados como entrada no algoritmo UWG são de 2012, enquanto os dados do SIMEPAR se referem ao ano climático de referência 2008.

Da mesma forma, para os dados de um dia no inverno, foi possível perceber o comportamento da temperatura do ar horária para o entorno analisado em Curitiba ao se comparar o comportamento das curvas de Ta do UWG e do SIMEPAR (Figura 14). Os valores de temperatura aumentam a partir das 8h e tem seu pico entre as 13h e 14h, a partir das 16h a temperatura cai, mas se mantém mais alta, comportamento que é resultado da radiação solar incidente nas superfícies urbanas, principalmente proveniente das edificações e calçamentos. Esse efeito mantém a temperatura da área urbana mais elevada.

Figura 14 – Dados horários de temperatura de bulbo seco para um dia de junho



FONTE: Autora (2020).

## 5.5 CONCLUSÃO

Esse estudo apresentou as alterações na variável de temperatura de bulbo seco para um arquivo climático gerado pelo algoritmo *Urban Weather Generator* (UWG) e as diferenças entre o arquivo climático base utilizado para geração (SWERA 838400) e os dados da estação meteorológica do SIMEPAR, para o ano climático TRY descrito em Candido e Rossi (2019).

Assim como indicado em Salvati, Roura e Cecere (2016) a diferença dos valores gerados pelo UWG e os dados do SIMEPAR (TRY 2008) pode ser resultado da diminuição de eficiência do UWG para regiões urbanas que possuem densidade construída muito diferente, com usos mistos. O que é o caso do entorno urbano em volta da estação meteorológica do SIMEPAR, pois no seu entorno (raio de análise) existe parte de uma reserva de mata, o próprio campus da UFPR e parte do bairro predominantemente residencial Jardim das Américas.

Outra possível explicação para a diferença dos valores gerados pelo UWG está relacionada com a base de dados utilizada para comparação. Os dados

escolhidos para a comparação são referentes ao ano climático de referência TRY 2008, que é considerado um ano típico, sem grandes variações de temperatura. Enquanto o arquivo base de entrada (SWERA) se refere ao ano de 2012, que não é considerado um ano típico, conforme descrito no capítulo 4.

Mesmo com as inconsistências do algoritmo para porções não homogêneas, foi possível identificar que o modelo pode ser validado para a alteração de arquivos climáticos provenientes de estações rurais. Pois os resultados apresentados demonstram coerência no comportamento da variável climática de temperatura do ar, ao longo das horas dos dias, assim como ao longo dos meses, ao comparar visualmente as curvas de  $T_a$  dos dados UWG e do SIMEPAR.

Indica-se que novos estudos sejam realizados avaliando outros fatores como temperatura radiante e umidade relativa do ar, assim como, pesquisas que estudem outras áreas de Curitiba, em porções que sejam mais homogêneas em densidade de construção e vegetação. Além de pesquisas que validem os resultados com medições locais.

Os dados diários de temperatura do ar demonstraram que o arquivo gerado com o UWG, apesar de ter diferenças com o medido pela estação meteorológica do SIMEPAR, representa bem o comportamento da temperatura do ar, para um dia de verão e um dia de inverno para Curitiba.

Além disso, salienta-se que não é possível saber a metodologia utilizada para a geração do arquivo climático tido como base nesse estudo (SWERA 838400) pois, em geral, as cadeias de dados meteorológicos históricos possuem falhas de medição, podendo ter falta de dados de horas, meses ou até mesmo anos. Dessa forma, uma correção é necessária, para preenchimento dos dados faltantes e aqui evidencia-se que não se pode afirmar qual foi a metodologia adotada para a geração do arquivo climático tido como base.

## AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) pelo fornecimento dos dados temperatura do ar.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15.220** – parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. ABNT: Rio de Janeiro, 2003.
- ALDAWI, F.; ALAM, F.; KHAN, I.; ALLGHAMDI, M. Effect of climates and building materials on house wall thermal performance. **Procedia Engineering**, v. 56, p. 661-666, 2013. ISSN: 1877-7058.
- ANGELINI, L. C.; FAUSTO, M. A.; MUTZENBERG, D.; NASSARDEN, D. DANELICHEN, V.; MARQUES, H.; MACHADO, N.; NOGUEIRA, J.; BIUDES, M. Relação entre albedo e temperatura da superfície estimados por sensoriamento remoto na área urbana de Cuiabá, Mato Grosso. In: **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa-PB, Brasil, abril, 2015.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). STANDARD 90.1. **Energy standard for buildings except low-rise residential buildings**. ASHRAE: Atlanta, 2010.
- BUENO, B. **An Urban Weather Generator Coupling a Building Simulation Program with an Urban Canopy Model**. 2010. 152f. Dissertação (Master of Science in Building Technology), Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- CALLEJAS, I. J. A. **Avaliação temporal do balanço de energia em ambientes urbanos na cidade de Cuiabá-MT**. 2012. Tese (Doutorado em Física Ambiental), Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2012.
- CANDIDO, C. R.; ROSSI, F. A. ANO CLIMÁTICO DE REFERÊNCIA PARA CURITIBA: COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DE DUAS ESTAÇÕES. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 15, 2019, João Pessoa. **Anais...** Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias. João Pessoa: 2019, p. 1021-1030.
- CHIESA, G; PALME, M. Valutare la vulnerabilità urbana ai cambiamenti climatici e alle isole di calore urbano. **TECHNE**, v. 15, p. 237-245, 2018. ISSN: 2239-0243.
- CONGEDO, L. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Rome, 266 f. 2020.
- COSTA NETO, P. L. de O. Estatística Básica. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.
- LIMA, I.; SCALCO, V.; LAMBERTS, R. Estimating the impact of urban densification on high-rise office building cooling loads in a hot and humid climate. **Energy and Buildings**, v. 182, p. 30-44, 2019. ISSN:0378-7788.
- LUZ, E. G.; CANDIDO, C. R. ; NOGUEIRA, M. C. J. A. ; SANTOS, F. M. M. ; LEO, E. F. T. B. . Aplicação de metodologias de tratamento de dados do clima local para avaliação de diretrizes bioclimáticas em Sinop-MT. In: **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 2018, Foz do Iguaçu. Anais do XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre: ANTAC, 2018. v. 17. p. 1017-1026.

MACHADO, R. M. S. **Modelagem do impacto da ilha de calor urbano sobre o desempenho energético de escritórios condicionados artificialmente**. 2019. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2019.

MORO, J.; KRÜGER, E.; CAMBOIM, S. Metodologia para análise e quantificação de sombreamento proveniente de edificações de entorno sobre espaços públicos abertos. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 15, 2019, João Pessoa. **Anais...** Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias. João Pessoa, 2019.

MUNIZ-GÄAL, L. P.; PEZZUTO, C. C.; CARVALHO, M. F. H. de; MOTA, L. T. M. Parâmetros urbanísticos e o conforto térmico de cânions urbanos: o exemplo de Campinas, SP. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 177-196. 2018.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (PBMC). **Mudanças climáticas e cidades: Relatório Especial do Painel brasileiro de mudanças climáticas**. 1º ed, Rio de Janeiro, COPPE-UFRJ: 2016.

PEEL, M.; FINLAYSON, B; MCMAHON, T. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633-1644, 2007.

ROSSI, F. A.; DUMKE, E.; KRÜGER, E. L. Atualização do Ano Climático de referência para Curitiba. In: X Encontro nacional de conforto em ambientes construídos, 2009, Natal. In: **X Encontro Nacional e VI Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído**, 2009. p. 1-10.

SALVATI, A.; ROURA, H. C.; CECERE, C. Urban heat island prediction in the mediterranean context: an evaluation of the urban weather generator model. **ACE: Architecture, City and Environment**, v. 11, n. 32, p. 135-156, 2016. ISSN: 1886-4805.

SALVATI, A.; PALME, M.; CHIESA, G.; KOLOKOTRONI, M. Built form, urban climate and building energy modelling: case-studies in Rome and Antofagasta, **Journal of Building Performance Simulation**, v.1, p. 1-17, 2020.

YANG, J. H. **The curious case of the urban heat island.: A systems analysis**. 78 f. 2016. Thesis. Master of Science in Engineering. University of Toronto, Toronto, 2016.



## 6 ANÁLISE TÉRMICA E ENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO: INFLUÊNCIA DO ENTORNO URBANO

### RESUMO

As edificações têm seu comportamento térmico e energético determinado pelo ambiente em que estão inseridas, porém a maioria dos estudos de desempenho de edificações são realizados com dados climáticos de estações consideradas rurais. Diante disso, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar as variações de temperatura do ar interna e do consumo relativo para refrigeração de uma edificação de laboratórios, da Universidade Federal do Paraná (UFPR) campus Centro Politécnico, em Curitiba, com base em dois arquivos climáticos. Foi utilizado para análise, o *plug-in EcoDesigner STAR* para o programa de modelagem da informação da construção (BIM) *ArchiCAD*. Foram analisadas a edificação considerando ventilação natural e posteriormente o consumo de energia para refrigeração. Os resultados encontrados mostram que a utilização de um arquivo climático proveniente de estação meteorológica rural, na simulação termo energética da edificação analisada, subestima o consumo de energia para refrigeração em até 13,11% e os valores de temperatura do ar em até 3,3°C, quando a edificação é ventilada naturalmente.

**Palavras-chave:** Desempenho térmico e energético de edificações; *Urban Weather Generator*; edificação pública.

### ABSTRACT

*Buildings have their thermal and energetic behavior determined by their surrounding environment; however, most studies of building performance are carried out with climatic data from rural meteorological stations. Thus, the goal of this research was to evaluate variations in indoor air temperature and in relative consumption for cooling in a laboratory building, at the Federal University of Paraná (UFPR) Centro Politécnico campus, in Curitiba. The analysis was carried out based on two climatic data. The EcoDesigner STAR plug-in for the ArchiCAD construction information modeling (BIM) program was used for analysis. The energy consumption for cooling of the building was analyzed considering natural ventilation. The results showed that the use of a climatic file from a rural meteorological station would underestimate the energy consumption for refrigeration by up to 13.11% and the values of air temperature in up to 3.3%, when the building is naturally ventilated.*

**Keywords:** *Building thermal and energetic performance; Urban Weather Generator; public building.*

### 6.1 INTRODUÇÃO

O desempenho energético e o consumo de energia de uma edificação recebem influências do meio externo e do meio interno. Muitos *softwares* de simulação energética como *DesignBuilder* e *EnergyPlus* são capazes de analisar o desempenho energético de uma forma sistêmica e confiável (YANG et al., 2012). Os dados climáticos utilizados nesses modelos, em geral, são provenientes de estações

meteorológicas rurais. Essas séries de dados são derivados de observações de longo prazo e que resultam em uma base de dados que não considera o ambiente microclimático no qual a edificação se insere.

De fato, com o aperfeiçoamento dos *softwares* de modelagem energética da edificação, representar as interações entre fenômenos físicos nas escalas urbanas considerando as interações na interface ambiente-edifício torna-se um passo importante (LAUZET et al., 2017). Apesar dessas observações, o número de trabalhos de simulação de desempenho energético que consideram aspectos microclimáticos, no ambiente em que o edifício é ou será inserido, é pequeno. Além disso, a partir das possibilidades desse tipo de modelagem, existe a probabilidade de verificar mais assertivamente quais seriam as estratégias que podem diminuir o consumo energia nas edificações.

Salvati et al. (2020) analisaram a performance energética de diferentes edifícios quando considerados fenômenos climáticos como a ilha de calor e obstrução solar em 10 casos de estudo diferentes, sendo em Roma, na Itália e em Antofagasta no Chile. Os resultados mostraram que as sombras urbanas são fundamentais para redução do consumo de energia para resfriamento em climas quentes e que o efeito da ilha de calor é mais significativo para climas temperados.

Outros estudos como Lima, Scalco e Lamberts (2019) e Machado (2019) estudaram, com uso do UWG, a influência da radiação solar no clima urbano e o efeito desse na carga térmica de edifícios comerciais em duas cidades do Brasil, o primeiro em Maceió/AL e o segundo em Santa Maria/RS. Os resultados de Lima, Scalco e Lamberts (2019) demonstraram que houve uma redução de carga para resfriamento de 16% a 18%, quando considerado uma geometria urbana que recebe sombreamento, para o clima de Maceió. Já Machado (2019) demonstrou que a ilha de calor em Santa Maria resulta em um aumento percentual de 5% a 59% da carga térmica para resfriamento.

Com isso, percebe-se que as temperaturas nos centros urbanos tendem a ser mais elevadas do que nas áreas rurais, devido ao efeito de diversos fatores como calor antropogênico, incidência de radiação solar, radiação de ondas longas e a formação de ilhas de calor. Esses fatores são específicos para cada região, mesmo dentro de uma mesma cidade e tem sido deixado de lado sistemicamente em estudos de avaliação de desempenho térmico e energético de edificações.

Sendo assim, mostram-se necessárias as considerações do entorno urbano em simulações de desempenho das edificações. Em geral, quando é considerado o meio urbano na simulação, são realizadas simulações por *Computational Fluid Dynamics* (CFD), mas essas são onerosas, principalmente por dois fatores: (1) precisam de um computador com processador e memória de alta qualidade, e; (2) o tempo de simulação pode levar até dias, como indicado em Morille, Musy e Malys (2016).

A proposta da utilização do *Urban Weather Generator* (UWG) é usar uma análise menos onerosa, baseada na teoria de dossel urbano, camadas limites e balanço de energia, com a finalidade de alterar arquivos climáticos baseados em

estações rurais levando em consideração o entorno urbano que ela se insere. Nessa pesquisa são apresentadas a metodologia utilizada para desenvolvimento da simulação e a comparação dos resultados entre as simulações da edificação com o arquivo climático SWERA e o arquivo climático modificado pelo UWG.

## 6.2 OBJETIVO

O objetivo dessa pesquisa foi avaliar as variações de temperatura do ar interna e do consumo relativo para refrigeração de uma edificação de laboratórios, da Universidade Federal do Paraná (UFPR) campus Centro Politécnico, em Curitiba, com base em dois arquivos climáticos distintos: (1) o arquivo climático epw SWERA, que tem base de dados do Aeroporto Afonso Pena; e (2) o arquivo climático epw modificado pelo UWG.

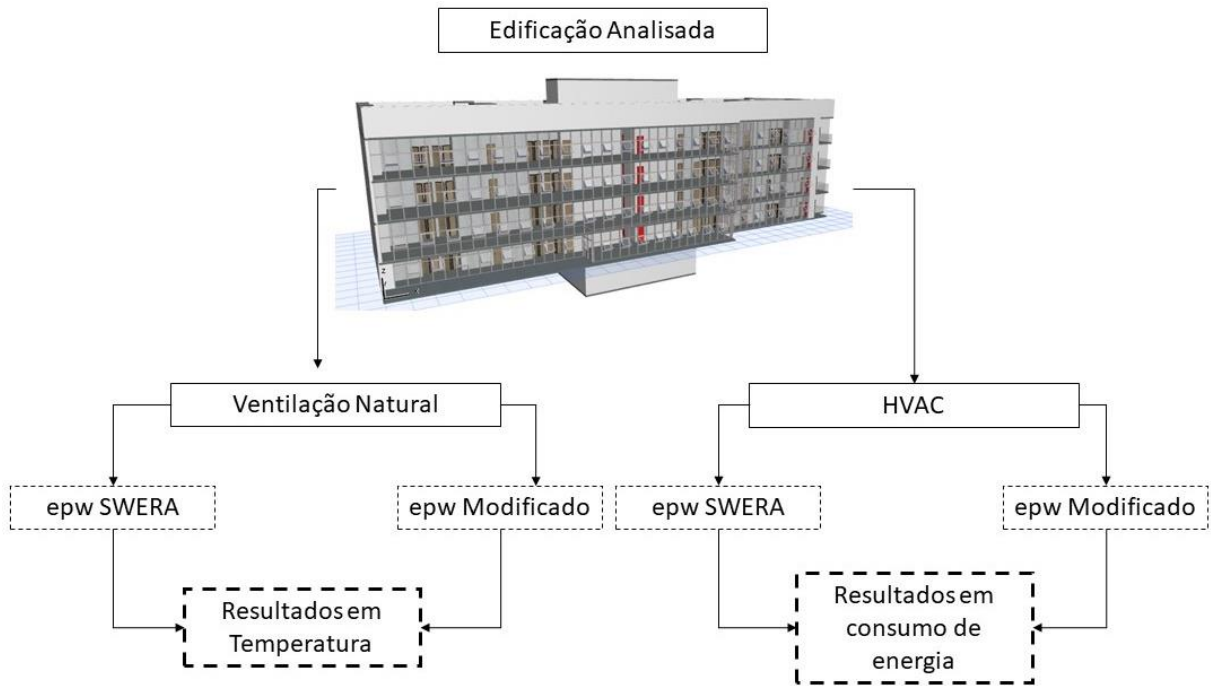
## 6.3 MÉTODO

A partir do arquivo climático modificado pelo algoritmo *Urban Weather Generator* (UWG), foram realizadas simulações de uma edificação que está em construção no campus Centro Politécnico, da Universidade Federal do Paraná (UFPR). A análise foi realizada em duas etapas, considerando os dois arquivos climáticos: (1) para edificação ventilada naturalmente; e (2) para a edificação condicionada artificialmente.

Os dois arquivos climáticos utilizados foram: o da estação meteorológica do Aeroporto Afonso Pena, referenciada como SWERA 838400 e o arquivo climático alterado com os resultados da influência do entorno urbano, por meio do software *Urban Weather Generator* (UWG).

Foram testados dois modelos para cada arquivo climático utilizado, totalizando quatro simulações. Esses casos foram adotados a fim de comparar os resultados da edificação ventilada naturalmente e condicionada artificialmente com os dados climático epw SWERA e o arquivo climático modificado pelo UWG. É importante salientar que a única alteração entre os modelos comparados foi o arquivo climático epw utilizado. Os dados então foram analisados e comparados para a edificação ventilada naturalmente em temperatura média do ar, e para a edificação condicionada artificialmente (HVAC), foi utilizado o consumo de energia anual. O diagrama da Figura 15 demonstra isso.

Figura 15 – Diagrama do fluxo da análise da edificação



FONTE: A autora (2020).

### 6.3.1 Caracterização da edificação analisada

A edificação (Figura 16), objeto desse estudo, é uma obra em andamento, no campus Centro Politécnico da UFPR, localizado próximo à entrada de pedestres, pela Avenida Cel. Francisco H. dos Santos, no bairro Jardim das Américas, em Curitiba. Os projetos arquitetônicos, de condicionamento de ar e memorial descritivo da edificação, foram fornecidos pela Superintendência de Infraestrutura da UFPR.

Figura 16 – Mapa de localização do edifício de laboratórios estudado



FONTE: A autora (2020).

A edificação possui quatro pavimentos com uso para ensino, e dois blocos de área técnica, um no subsolo e outro na cobertura (Figura 17). O pavimento térreo é composto por 5 laboratórios com salas de apoio e uma copa. Já o primeiro pavimento, é composto por sete salas de laboratório e uma sala de coordenação. O segundo pavimento possui cinco laboratórios uma sala para computação científica e copa. Já o terceiro pavimento é composto por seis laboratórios.

A fachada sudoeste tem fechamento com pele de vidro, sendo esse o acesso principal ao edifício. Nas outras fachadas as aberturas são correspondentes a tamanhos de janelas padrão. A Figura 17 mostra o modelo 3D da edificação, com a fachada de pele de vidro, na orientação sudoeste.

Figura 17 – Modelo 3D da edificação



FONTE: A autora, modelado a partir do projeto no programa ArchiCAD 23 (2020).

As paredes externas são compostas por tijolos cerâmicos de 9 cm e revestimento cerâmico, para a simulação, foi ainda utilizado reboco interno e externo, tendo a alvenaria largura de 15 cm, ao todo.

Já as paredes internas foram compostas por fechamento em *drywall*, sem isolamento, assim como indicado no memorial descritivo do projeto de arquitetura. As lajes foram modeladas sendo de concreto armado com contrapiso e sem acabamento, devido a falta de informações no projeto. Além disso, na cobertura foram utilizadas telhas de fibrocimento, de acordo com o memorial descritivo.

Para as esquadrias foi utilizado vidro laminado incolor simples, devido a falta de informações disponíveis sobre o filme fumê, que está indicado no memorial descritivo da arquitetura, como aditivo ao vidro simples na fachada de vidro (Tabela 9).

Tabela 9 - Propriedades térmicas do vidro

Vidro	Vidro Incolor Comum
Fator Solar (SHGC)	0,87
Transmissão Luminosa	0,89
Transmitância (W/m <sup>2</sup> -K)	5,8

FONTE: Adaptado de ASHRAE (2010).

Os parâmetros (Tabela 10) de entrada para a criação dos materiais no software são: condutividade térmica, densidade e calor específico.

Tabela 10 - Propriedades Térmicas dos materiais da edificação

Material	Massa aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Condutividade térmica (W/(m.k))	Calor específico (Kj/(kg.K))
Argamassa comum	1800	1,15	1,0
Tijolos e telhas de barro	1500	0,9	0,92
Telha Fibrocimento	1400	0,65	0,84

FONTE: Adaptado de NBR 15220-2 (2003, p. 10).

### 6.3.2 Modelagem na ferramenta *Building Information Modelling* (BIM)

A fim de diminuir o tempo no processo de desenho do modelo energético, optou-se por utilizar a ferramenta de modelagem BIM, *ArchiCAD*, proveniente da empresa *Graphisoft*. Para esse estudo foi utilizada a versão 23 do programa.

Antes de iniciar a modelagem, foram configurados os materiais e as respectivas composições para que os dados ficassem de acordo com o que foi descrito no memorial descritivo do projeto de arquitetura do edifício. Apesar do *ArchiCAD* possuir uma biblioteca com diversos materiais, optou-se por criar materiais com propriedades térmicas de acordo com a NBR 15220. A descrição de como a edificação foi modelada no programa BIM está descrita no Apêndice A.

### 6.3.3 Configurações de simulação no *EcoDesign STAR*

Para a simulação térmica e energética da edificação foi utilizado o *plugin* de análise térmica e energética para edificações, para o *ArchiCAD*, chamado *EcoDesigner STAR*. Ele possibilita a simulações térmica e energéticas no próprio *Archicad*, mas para que seja possível rodar a simulação, a modelagem deve seguir critérios específicos que são encontrados no passo a passo do manual disponível pela própria fabricante (GRAPHISOFT, 2014).

Além das diretrizes mencionadas na seção anterior é importante ressaltar que a criação de zonas térmicas é o principal argumento necessário para que a simulação possa rodar, é através das configurações colocadas nas zonas que pode ser avaliado os consumos de energia e valores de temperatura do ar, levando em consideração o padrão de utilização da edificação.

Uma das principais configurações da construção das zonas é a limitação geométrica de suas faces. Assim como indicado em GRAPHISOFT (2014) foi utilizado o método de geometria interna da aresta para construção das zonas, de cada ambiente. Assim, o programa considera o volume de ar interno do ambiente para a criação dos elementos zonas térmicas.

Após a criação de zonas é necessário definir os padrões de ocupação, temperaturas de termostato, padrão de iluminação, configurações de condicionamento de ar e ventilação natural. Nessa pesquisa foram utilizados valores com base na ocupação real do edifício, valores padrões de iluminação e nenhuma carga de equipamentos, como será descrito a seguir.

O perfil de operação do edifício de laboratórios estudado foi indicado como sendo, para dias de semana, das 8 horas da manhã às 18 horas da tarde. Em cada perfil de operação, são configuradas as informações de densidade de iluminação, das temperaturas do termostato, da densidade de equipamentos e da taxa de ocupação de pessoas. Para essa pesquisa foi utilizado:

- Iluminação com lâmpadas LED, com densidade de 0,5W/m<sup>2</sup>;
- Densidade de equipamentos igual a zero;
- Taxa de ocupação de pessoas: 20m<sup>2</sup> por pessoa;
- Termostato com temperaturas de 22 °C a 24 °C;
- Horário de funcionamento das 08h até as 18h.

Após a configuração do perfil de ocupação, iniciou-se a criação dos blocos térmicos que serviram como referência de cálculo pelo simulador. No caso do *EcoDesigner* STAR, em cada bloco térmico podem ser agrupados os ambientes que possuem configurações similares, por exemplo, os laboratórios foram agrupados, todos, no bloco térmico de laboratórios. Nesses blocos, podem ser adicionados os sistemas de condicionamento de ar e ventilação natural. O sistema de condicionamento de ar, seguiu o padrão descrito no projeto de climatização disponibilizado pela Suinfra (Superintendência de Infraestrutura da UFPR), sendo composto por máquinas split.

#### 6.3.4 Tratamento dos dados

Foram feitas duas análises de dados para esse estudo. A primeira comparando os resultados de temperatura interna do ar da edificação naturalmente ventilada com o arquivo climático SWERA 838400 e o arquivo climático modificado pelo UWG. E a segunda análise comparando o consumo de energia para refrigeração dos ambientes que tem uso contínuo, como laboratórios, salas de apoio e copas, para os dois arquivos climáticos.

É importante salientar que todos os ambientes e pavimentos da edificação foram simulados, mas foram analisados e discutidos, para a edificação naturalmente

ventilada, apenas os resultados de temperatura do ar interna, dos laboratórios do pavimento térreo e primeiro pavimento.

#### 6.4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

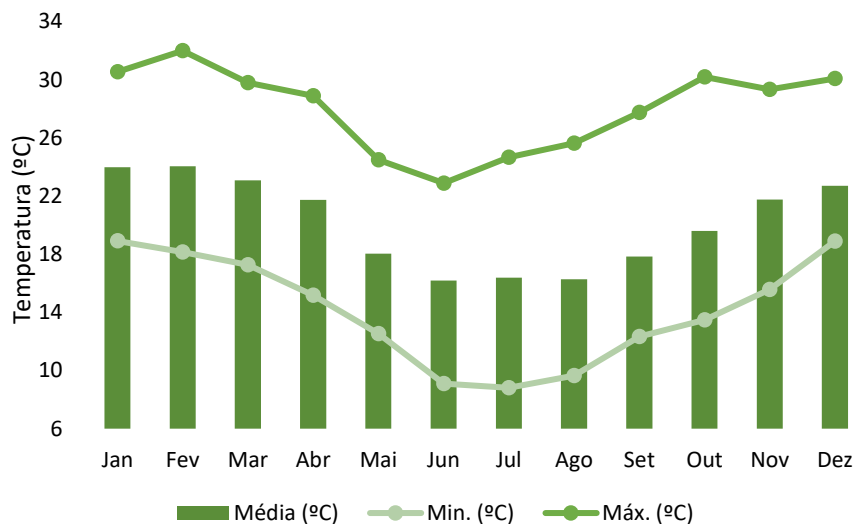
Nessa seção serão apresentados os resultados das simulações realizadas com o arquivo climático SWERA e com o arquivo climático modificado pelo UWG. Primeiro será analisado a edificação naturalmente ventilada para os dois casos e posteriormente serão analisados os consumos energéticos para refrigeração da edificação, para os dois casos.

##### 6.4.1 Temperatura média do ar

Nessa seção estão apresentados os dados de temperatura do ar para a edificação ventilada naturalmente. Considerando os dois arquivos climáticos: SWERA e UWG.

Os valores médios, mínimos e máximos, das temperaturas internas, obtidos a partir da simulação com os dados climáticos SWERA, para o bloco térmico composto pelos laboratórios do térreo está disposta na Figura 18. Os meses com menores mínimas e maiores máximas foram respectivamente julho com mínima de 9,10°C e fevereiro com máxima de 31,98°C.

Figura 18 – Temperaturas mensais dos blocos de laboratório do térreo para arquivo climático EPW SWERA



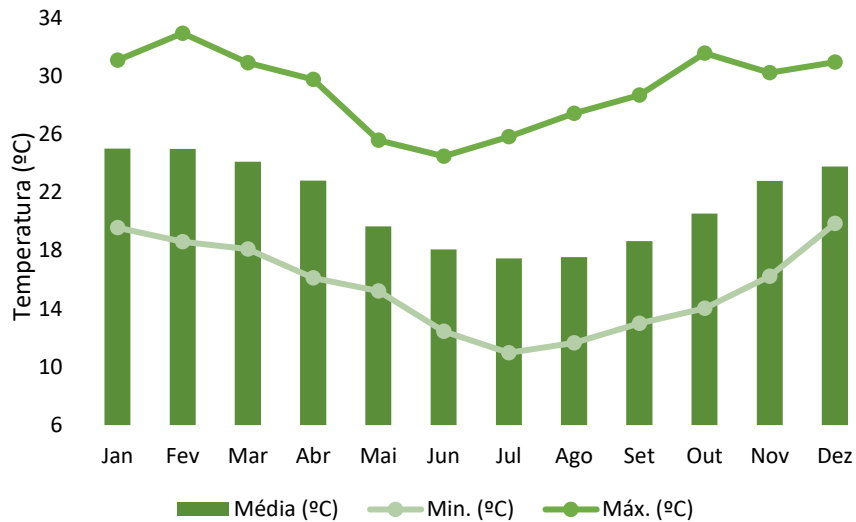
FONTE: A autora (2020).

Já a Figura 19 mostra as temperaturas médias, máximas e mínimas mensais, para os blocos de laboratório do pavimento térreo, simulados com o arquivo climático modificado pelo UWG. Pode-se notar que os valores de temperatura do ar mínima e máxima no ambiente foram mais altas na simulação com o arquivo climático modificado. As mínimas não foram menores do que 10°C. A temperatura mínima



interna chegou a variar 3,33°C para mais em junho, mês considerado mais frio nos dados climáticos analisados. Já a temperatura máxima interna variou até 1,4°C para mais no mês de outubro.

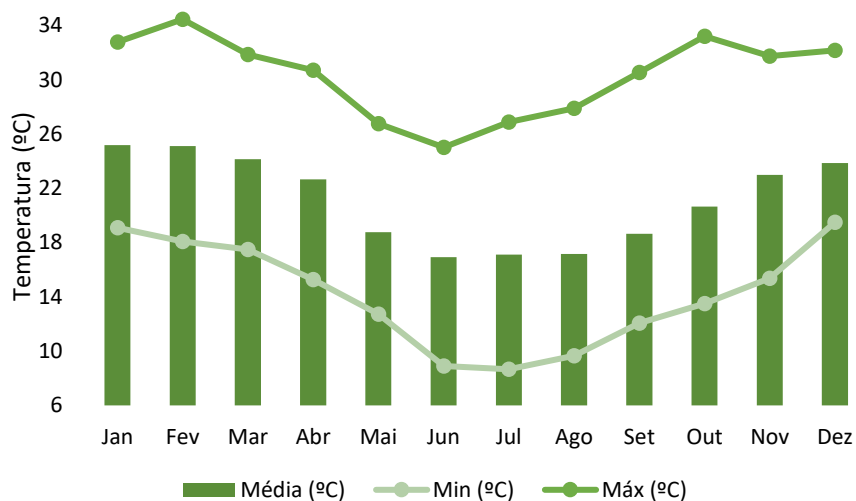
Figura 19 – Temperaturas mensais dos blocos de laboratório do térreo para arquivo climático EPW UWG



FONTE: A autora (2020).

Para os laboratórios do primeiro pavimento, os resultados de temperatura interna mínima, máxima e média com o arquivo climático SWERA, estão dispostos na Figura 20. Nesse gráfico é possível observar que o mês com a menor temperatura mínima foi o mês de julho, marcando 8,66°C e o mês com a maior temperatura máxima foi fevereiro, com 34,44°C. As médias mostram que apesar de fevereiro ter a temperatura máxima mais alta, janeiro foi o mês mais quente, em média, com 25,17°C.

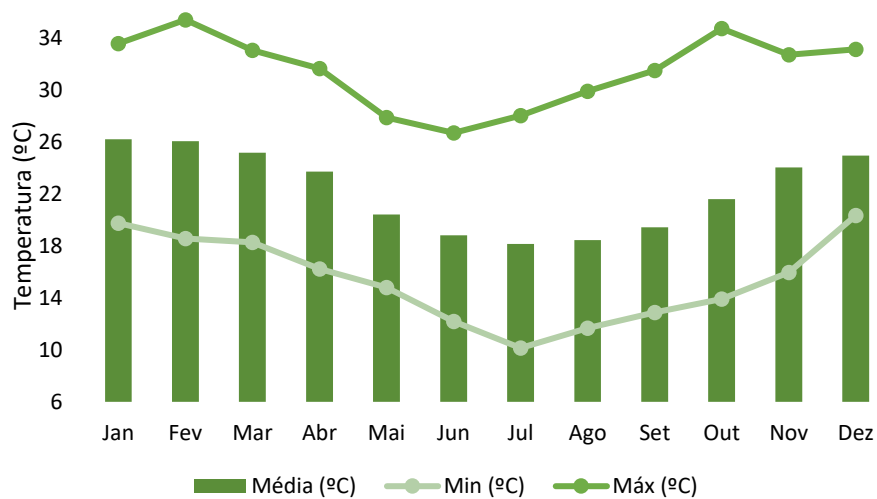
Figura 20 – Temperaturas mensais dos blocos de laboratório do 1º pavimento para arquivo climático EPW SWERA



FONTE: A autora (2020).

Na Figura 21 podem ser observados os resultados dos blocos térmicos do primeiro pavimento, levando em consideração a ventilação natural. Os resultados demonstram que o mês com menor mínima foi julho também, com 10,14°C, com variação em relação ao arquivo climático SWERA de 1,48°C. Já para as temperaturas máximas registradas, o mês de fevereiro também foi o com maior temperatura máxima, com 35,39°C, variando em 0,95°C em relação aos resultados com arquivo climático padrão. As temperaturas mensais internas médias também demonstram esse aumento de temperatura decorrente do arquivo climático modificado. Nesse caso as variações médias foram maiores para os meses frios como junho, com 2,2°C de diferença.

Figura 21 – Temperaturas mensais dos blocos de laboratório do 1º pavimento para arquivo climático EPW UWG



FONTE: A autora (2020).

Os resultados da simulação térmica da edificação, para ventilação natural, estão em acordo com o que foi apontado em Candido e Rossi (2019). As autoras verificaram temperaturas mais altas para a região da estação meteorológica do SIMEPAR, mesmo contexto urbano no qual a edificação está inserida. Em consequência, foi verificado que para a edificação, no mesmo contexto urbano, teve as temperaturas internas aumentadas, para as temperaturas internas máxima, média e mínima.

#### 6.4.2 Consumo de energia

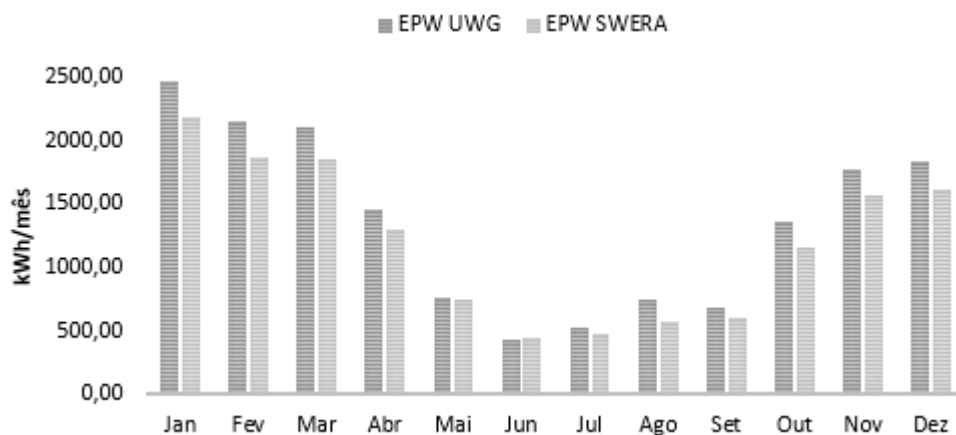
Nessa seção serão apresentados os resultados para a simulação da edificação condicionada artificialmente para refrigeração. É importante ressaltar que as configurações do condicionamento do ar foram colocadas na simulação conforme o projeto de climatização disponibilizado pela prefeitura do campus Centro politécnico da UFPR.

A Figura 22 mostra o consumo mensal para refrigeração para os dados climáticos UWG e SWERA. A comparação é feita considerando os dados de consumo obtidos com o arquivo SWERA *versus* os dados de consumo obtido com o arquivo UWG. Lembra-se que em geral, os arquivos utilizados em simulação de desempenho termo energético são provenientes de estações meteorológicas oficiais, e que tais estações geralmente ficam em locais fora da malha urbana. Assim, optou-se por compara os dados de consumo de energia simulados a partir da base de dados climáticos do Aeroporto (SWERA) e do arquivo gerado pelo algoritmo UWG.

Comparando-se os dados é possível observar que o consumo em kWh para o mês de fevereiro (considerado o com médias mais altas) foi 13,21% maior quando se leva em consideração o entorno urbano com o arquivo climático UWG. Já em março a variação ficou parecida com a de fevereiro, sendo 11,91% maior com o arquivo climático UWG. Entre os meses de inverno o que possuiu a maior variação foi o mês de agosto. A avaliação demonstrou que considerando o entorno urbano, o aumento de consumo de energia para refrigeração foi de 23,37%.

É importante verificar que o programa de simulação baseado em balanço de energia considera as cargas da edificação conforme o termostato colocado nos ambientes. Nessa pesquisa foi utilizado o termostato de 22 °C a 24 °C. Dessa forma, sempre que a temperatura fosse superior a 24°C o programa consideraria que existe consumo de energia para refrigeração, por isso os resultados demonstram consumo de energia para refrigeração nos meses de inverno.

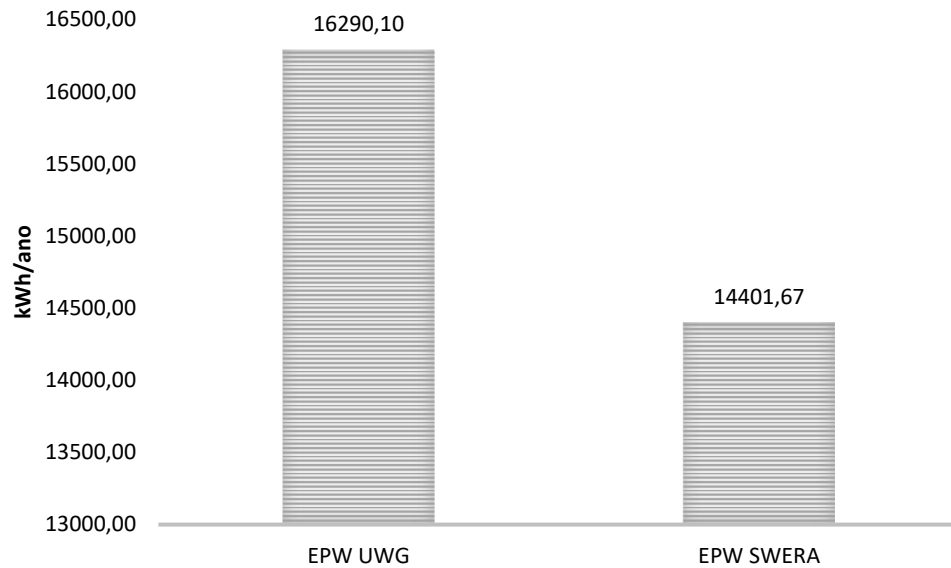
Figura 22 – Consumo de energia mensal para refrigeração com os dois arquivos climáticos



FONTE: A autora (2020).

Na Figura 23 podemos observar o consumo anual para refrigeração da edificação em kWh, para a mesma configuração de equipamentos de condicionamento de ar, iluminação, pessoas e atividades, apenas variando os dados climáticos utilizados. O aumento de consumo de energia anual total na edificação analisada com o arquivo climático modificado é 11,59% maior que o consumo na edificação analisada com o arquivo climático SWERA.

Figura 23 – Comparativo do consumo de energia anual de carga para refrigeração a partir da simulação com os arquivos climáticos SWERA e UWG



FONTE: A autora (2020).

Esse resultado corrobora com os resultados de Lima, Scalco e Lamberts (2019), Salvati et al. (2020) e Xu et al. (2020) e Machado (2019). Isto é, o entorno urbano tem influência significativa na carga térmica das edificações.

É importante salientar que a relação entre o meio urbano e o consumo de energia de edificações deve ser avaliado caso a caso, pois em regiões de clima quente é preferível porções urbanas mais sombreadas, que acabam por ter uma incidência menor de radiação solar direta enquanto em regiões predominantemente frias a incidência de radiação solar direta pode ser positiva, e diminuir os consumos para aquecimento (LIMA, SCALCO e LAMBERTS, 2019; SALVATI et al., 2020).

Para Curitiba os resultados indicam que o consumo de energia da edificação é maior para a situação em que se considerou a influência do entorno urbano. Uma proposta de estudo futuro seria avaliar o impacto para a carga de aquecimento da edificação.

## 6.5 CONCLUSÃO

Essa pesquisa teve como objetivo avaliar as diferenças no desempenho térmico e no consumo de energia para refrigeração de uma edificação pública, com base em dois arquivos climáticos. O primeiro conjunto de dados foram simulados com os dados climáticos provenientes da estação meteorológica do aeroporto Afonso Pena (SWERA 838400) e o segundo com os dados climáticos gerado pelo algoritmo UWG, considerando o entorno urbano no qual a edificação analisada faz parte.

Os resultados demonstraram que houve alterações no desempenho térmico e no consumo de energia para refrigeração da edificação. Quando considerada a temperatura interna dos ambientes a variação máxima foi de 3,3 °C para o mês de

fevereiro. As simulações utilizando os dados climáticos gerados pelo UWG resultaram em temperaturas mais altas. Além disso foi possível verificar que a maior variação de temperatura ocorreu nos meses do inverno, o que mostra que o entorno urbano tem função relevante no aumento de temperatura do ar e conseqüentemente das edificações.

Para a edificação analisada com condicionamento artificial de ar, os resultados mostraram que o consumo anual de energia da edificação aumentou em quase 12%. Quando analisado o consumo de energia para refrigeração mês a mês a variação chegou a 23,37% para agosto. Os resultados encontrados estão em acordo com o que tem sido verificado em outros estudos, como em Salvati et al (2020), Lima, Scalco e Lamberts (2019) e Machado (2019), que também verificaram aumento na carga de refrigeração da edificação e aumento da temperatura interna, devido ao contexto urbano.

Além disso, foi utilizado para simulação um programa de modelagem BIM com o *plug-in EcoDesigner STAR*. Outros trabalhos, como Alam e Ham (2014) e Tahmasebi, Banihashemi e Hassanabadi (2011) também utilizaram o *plug-in* do ArchiCAD para análise da edificação e obtiveram bons resultados. Os primeiros analisaram os parâmetros do Eco Designer STAR para desenvolvimento do BEM em comparação entre outro *plug-in* e encontraram similaridades entre o Eco Designer STAR e os *softwares* reconhecidos internacionalmente para desenvolvimento de análises térmicas e energéticas da edificação, como *EnergyPlus* e *DesignBuilder*.

Já Tahmasebi, Banihashemi e Hassanabadi (2011) utilizaram o programa para validar diferentes tipos de vidros (laminado, insulado e simples) em diferentes taxas nas fachadas de edificações, encontrando resultados que possibilitam a decisão projetual.

Indica-se que novos estudos sejam realizados avaliando a carga de aquecimento, pois as maiores diferenças ocorreram nos meses mais frios.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a SUINFRA da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pelo fornecimento dos projetos arquitetônicos e complementares da edificação estudada. A autora agradece também a empresa Graphisoft Brasil pelo fornecimento da licença temporária do *ArchiCAD 23* e do *plug-in EcoDesigner STAR*.

## REFERÊNCIAS

- ALAM, J.; HAM, J. J. Towards a BIM-based energy rating system. 2014. International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia: Rethinking Comprehensive Design: Speculative Counterculture; 19, 2014, **Proceedings**, CAADRIA, Hong Kong, pp. 285-294.
- ASHRAE (2010). **Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR15220** Desempenho térmico de edificações. ABNT: Rio de Janeiro, 2005
- AZEVEDO, N. C.; TAVARES, S. F. Interoperabilidade entre as ferramentas Revit e OpenStudio para simulação. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 11, n. 1, p. e01901-e019019, julho 2020. ISSN 1980-6809.
- CANDIDO, C. R.; ROSSI, F. A. ANO CLIMÁTICO DE REFERÊNCIA PARA CURITIBA: COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DE DUAS ESTAÇÕES. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 15, 2019, **Anais**. João Pessoa. Anais João Pessoa: 2019, p. 1021-1030.
- FERREIRA, M.; OLIVEIRA, A; SOARES, J. Anthropogenic heat in the city of São Paulo, Brazil. **Theor Appl Climatology**, v. 104, p. 43-56, agosto 2011. DOI 10.1007/s00704-010-0322-7
- GRAPHISOFT. EcoDesigner STAR user manual. 2014
- LAUZET, N.; MORRILE, B.; LEDUC, T.; MUSY, M. What is the required level of details to represent the impact of the built environment on energy demand? **Procedia Environmental Sciences**. v. 38, p 611-618, 2017.
- LIMA, I.; SCALCO, V.; LAMBERTS, R. Estimating the impact of urban densification on high-rise office building cooling loads in a hot and humid climate. **Energy & Buildings**, v. 182, n.1, p. 30-44, 2019. ISSN 0378-7788.
- MACHADO, R. M. S. **Modelagem do impacto da ilha de calor sobre o desempenho energético de escritórios condicionados artificialmente**. 2019. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- MORILLE, B.; MUSY, M.; MALYS, L. Preliminary study of the impact of urban greenery types on energy consumption of building at a district scale: Academic study on a canyon street in Nantes (France) weather conditions. **Energy and Buildings**, v. 114, p 275-282, 2016.
- SALVATI, A.; PALME, M.; CHIESA, G.; KOLOKOTRONI, M. Built form, urban climate and building energy modelling: case-studies in Rome and. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 13, n. Issue 2: Microclimatic Boundary Conditions in Building Simulation Models, p. 1-17, Janeiro 2020. ISSN 1940-1507.
- TAHMASEBI, M. M.; BANIHASHEMI, S.; HASSANABADI, M. S. Assessment of the variation impacts of window on energy consumption and carbon footprint. **Procedia Engineering**, v. 21, p. 820-828, 2011. ISSN 1877-7058.

XU, X.; AZARIJAFARI, H.; GREGORY, J.; NORFORD, L.; KIRCHAIN, R. An integrated model for quantifying the impacts of pavement albedo and urban morphology on building energy demand. **Energy & Buildings**, v. 211, n.1, p. 1-10, janeiro 2020. ISSN 0378-7788.

YANG, X.; LIHUA ZHAO, M.; QINGLIN, M. 2012. An Integrated Simulation Method for Building Energy Performance Assessment in Urban Environments. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 243–251, 2012.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa pesquisa objetivou explorar a influência do entorno urbano na temperatura do ar, nas temperaturas internas e no consumo de refrigeração de uma edificação pública, na cidade de Curitiba-PR.

Para responder o objetivo geral foram estabelecidos três objetivos específicos.

1) Analisar alterações nas variáveis climática de temperatura do ar e umidade relativa do ar em Curitiba, entre uma estação meteorológica rural e uma urbana, a fim de atualizar o ano climático TRY.

Com a observação dos dados foi possível verificar que o padrão de ocupação do entorno urbano implica no comportamento do microclima local. A diferença entre os dados da temperatura do ar média do TRY das duas estações estudadas chegou a 4,0 °C. Analisando as estratégias bioclimáticas para os arquivos climáticos gerados por estudos anteriores e os atuais, observou-se aumento do período de conforto e diminuição do desconforto por frio

2) O objetivo da segunda etapa da pesquisa foi explorar a influência do entorno urbano no comportamento da temperatura do ar.

Os resultados demonstraram que para o verão a simulação teve resultado mais próximo aos dados registrados pela estação meteorológica do SIMEPAR (centro da análise urbana). Enquanto para o inverno, os valores das médias horárias do arquivo climático do UWG apresentaram maior variação em relação aos dados da estação do SIMEPAR. Dessa forma, a consideração do ambiente urbano (através do arquivo UWG) mostra que há aumento da temperatura do ar para o ambiente analisado.

Assim como indicado em Salvati, Roura e Cecere (2016), a diferença entre os valores gerados pelo UWG e os dados da estação meteorológica oficial (SIMEPAR) pode ser resultado da diminuição de eficiência do UWG para regiões urbanas que são muito heterogêneas (com vários tipos de ocupação). O que é o caso do entorno urbano em volta da estação meteorológica do SIMEPAR. No raio de análise analisado (350 metros) existe parte remanescente de mata nativa, as construções do campus da UFPR e parte do bairro Jardim das Américas, com uso predominantemente residencial.

Mesmo com as inconsistências do algoritmo para porções não homogêneas, foi possível identificar que o modelo pode ser usado para a alteração de arquivos climáticos provenientes de estações rurais. Os resultados apresentados demonstram coerência no comportamento da variável temperatura do ar, ao longo das horas dos dias e dos meses, como pode ser visualizado no comportamento das curvas de temperatura do ar.

3) O objetivo da etapa três dessa pesquisa foi avaliar as diferenças nos valores de consumo de energia para refrigeração em uma edificação real (edifício de laboratórios, da Universidade Federal do Paraná), pertencente ao entorno urbano



analisado (Centro Politécnico da UFRP, em Curitiba), em relação ao arquivo climático padrão (SWERA) e o arquivo climático modificado pelo UWG.

Os resultados demonstraram que houve alterações no desempenho térmico e no consumo de energia para refrigeração da edificação. Quando considerada a temperatura interna dos ambientes, a variação chegou a 3,3 °C a mais, para o arquivo climático UWG. Além disso foi possível verificar que a maior variação de temperatura do ar interna se deu nos meses do inverno, o que mostra que o entorno urbano tem função relevante no aumento de temperatura do ar e conseqüentemente das edificações. Esse evento não necessariamente é negativo. Salvati et al. (2020) afirmam que para cidades de clima temperado o aumento de temperatura para os meses do inverno nem sempre é negativo.

Para a edificação analisada com condicionamento artificial de ar, os resultados mostraram que o consumo anual de energia da edificação aumentou em quase 12%, quando comparado os dados simulados com o arquivo SWERA e o UWG. Os resultados obtidos estão em acordo com o que foi verificado em outros estudos, como em Salvati et al (2020), Lima, Scalco e Lamberts (2019) e Machado (2019), que também verificaram aumento na carga de refrigeração da edificação e aumento da temperatura interna, devido ao contexto urbano (utilizando arquivo climático modificado pelo UWG).

Em relação ao método utilizado, observou-se que o uso dos programas de modelagem BIM *ArchiCAD 23* e o plugin de simulação *EcoDesigner STAR* possibilitou a avaliação termo energética da edificação. As pesquisas de Alam e Ham (2014) e Tahmasebi, Banihashemi e Hassanabadi (2011) também utilizaram o *plug-in* do *ArchiCAD* para análise da edificação e obtiveram bons resultados. Os primeiros analisaram os parâmetros do *EcoDesigner STAR* para desenvolvimento do BEM em comparação entre outro *plug-in* e encontraram similaridades entre o *EcoDesigner STAR* e os *softwares* reconhecidos internacionalmente para desenvolvimento de análises térmicas e energéticas da edificação, como *EnergyPlus* e *DesignBuilder*.

Já Tahmasebi, Banihashemi e Hassanabadi (2011) utilizaram o programa para validar diferentes tipos de vidros (laminado, insulado e simples) em diferentes taxas nas fachadas de edificações, encontrando resultados que possibilitam a decisão projetual. Dessa forma, os resultados apresentados têm coerência com o indicado na literatura e podem agregar em considerações urbanísticas e para desenvolvimento de edificações com desempenho térmico melhor para cidades de clima predominantemente temperado, assim como Curitiba.

Dentre as limitações dessa pesquisa, cita-se:

- Realização de simulações de consumo de energia somente para refrigeração;
- Avaliação de um recorte espacial específico, com características heterogêneas de densidade de ocupação do solo;
- Avaliação de uma tipologia específica de edificações pública, com características de uso particulares;

- Impossibilidade de validação dos dados climáticos com medições locais de variáveis microclimáticas;

Para pesquisas futuras sugere-se:

- Realizar simulações para verificar o consumo energético para aquecimento da edificação analisada nessa pesquisa, visto que como comprovado em Salvati et al. (2020), para cidades com características de clima temperado a influência da formação de ilha de calor nem sempre é de todo negativa, pois pode resultar em diminuição da carga de aquecimento das edificações;
- Avaliar o comportamento de outras variáveis climáticas, tais como: umidade do ar e temperatura radiante média, no contexto urbano avaliado nessa pesquisa, assim como o impacto dessas variáveis no desempenho energético da edificação;
- Avaliar outras porções urbanas de Curitiba, que apresentem ocupação mais homogêneas em relação à densidade de ocupação do solo vegetação;
- Validação dos resultados obtidos por meio de um monitoramento local das variáveis microclimáticas.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, L. V. **Avaliação da escala de influência da vegetação no microclima por diferentes espécies arbóreas**. 2008. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- ABREU-HARBICH, L. V.; SAMPAIO, V. H. P.; LABAKI, L. C.; MATZARAKIS, A. Influência de diferentes configurações urbanas no conforto térmico em cânions urbanos de Campinas, SP - Estudos de campos e simulações computacionais. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 7, 2014, **Anais**. Maceió. Anais Avanços no desempenho das construções - pesquisa, inovação e capacitação profissional. Maceió: 2014, p. 449-458.
- AKBARI, H.; KOLOKOTSA, D. Three decades of urban heat islands and mitigation technologies. **Energy & Buildings**, v. 133, p. 834–842, 2016.
- ALAM, J.; HAM, J. J. Towards a BIM-based energy rating system. 2014. International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia: Rethinking Comprehensive Design: Speculative Counterculture; 19, 2014, **Proceedings**, CAADRIA, Hong Kong, pp. 285-294.
- ALBUQUERQUE, M. M.; LOPES, W. G. R. Influência da vegetação em variáveis climáticas: Estudo em bairros da cidade de Teresina, Piauí. **Ra'e Ga**, v. 36, p 38-68, 2016.
- ALLEGRI, J.; DORER, V.; CARMELIET, J. Influence of morphologies on the microclimate in urban neighbourhoods. **Journal of Wind Eng. Ind. Aerodynamics**, v.144, p. 108–117. 2015
- ALMEIDA, A.; GIOIELLI, B.; CUNHA, E.; FERRUGEM, A. Automatização do processo de simulação energética de uma edificação hoteleira em 8 zonas bioclimáticas brasileira. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 7, 2014, Maceió. **Anais**. Avanços no desempenho das construções - pesquisa, inovação e capacitação profissional. Maceió: 2014, p. 399-408.
- AMORIM, C.N.D.; BAFFI, B; SILVA, C.F. Simulação Computacional da Envoltória de Edifício Público. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 8, 2016, São Paulo. **Anais**. Os desafios e as perspectivas da internacionalização da construção. São Paulo: 2016, pg. 491-502.
- AMORIM, C. D. N.; MACIEL, R. A.; SILVA, C. F.; LOPES, A. F. O.; NÉRIS, H. S. D. S.; BAPTISTA, I. B. Etiquetagem de edifícios para avaliação energética do campus da UNB. Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 6, 2012, Juiz de Fora. **Anais** Da concepção à Desconstrução: A Integração do Ambiente Construído, Juiz de Fora: 2012, p. 2915-2922.
- ANDREIS, C.; BESEN, P.; WESTPHAL, F. S. Desempenho energético de fachadas envidraçadas em climas brasileiros. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 7, 2014, Maceió. **Anais** Avanços no desempenho das construções - pesquisa, inovação e capacitação profissional. Maceió: 2014, p. 926-935.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220** Desempenho térmico de edificações. ABNT: Rio de Janeiro, 2005.

BLOCKEN, B.; STATHOPOULOS, T.; BEECK, J. P. A. J. Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment. **Building and Environment**, v. 100, p. 50-81. 2016.

BOGO, A.; BARBOSA, M. J.; GOULART, S.; LAMBERTS, R.; PIETROBON, C.; PITTA, T. **Bioclimatologia aplicada ao projeto de edificações visando o conforto térmico**. Relatório Interno no 02/94, Núcleo de Pesquisa em Construção, UFSC, Florianópolis, SC, 1994.

BOUYER, J. **Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments**. 2009. 306f. Tese (Doutorado em ciências da engenharia, geociências e arquitetura) Universidade de Nantes, Nantes, 2009.

BOZONNET, E.; ALLARD, F.; MUSY, M.; CHAZELAS, M.; GUARRACINO, G. Approche méthodologique de la construction durable en milieu urbain: le microclimat urbain et son impact environnemental sur les constructions. In: Approche méthodologique de la construction durable en milieu urbain (**URBAT**). Nantes, 2006.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Balço energético nacional: ano base 2016**. Brasília, 2017.

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Estimativas anuais de Emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 2º ed. Brasília. 2014

BROWN, R. D.; GILLESPIE, T. J. **Microclimatic Landscape Design: creating thermal comfort and energy efficiency**. New York: John Wiley & Sons, 1995.

BUENO, B. **An Urban Weather Generator Coupling a Building Simulation Program with an Urban Canopy Model**. Thesis. Master of Science in Building Technology. Massachusetts Institute of Technology, 152f. 2010.

CALLEJAS, I. J. A.; NOGUEIRA, M. C. J A; BIUDES, M. S; DURANTE, L. C. Variação sazonal do balanço de energia em cidade localizada na região central do Brasil. **Mercator**, v. 15, p. 85–106, 2016.

CANDIDO, C. R.; ROSSI, F. A. ANO CLIMÁTICO DE REFERÊNCIA PARA CURITIBA: COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DE DUAS ESTAÇÕES. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 15, 2019, João Pessoa. **Anais** Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias. João Pessoa: 2019, p. 1021-1030.

CECHINEL, R. J.; HACKENBERG, A. M.; TONDO, G. H. Desempenho térmico em habitações de interesse social inseridas na cidade de Joinville e recomendações para melhoria dos parâmetros mínimos construtivos. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 8, 2016, São Paulo. **Anais** Os desafios e as perspectivas da internacionalização da construção. São Paulo: 2016, p. 661-681.

CHIESA, G; PALME, M. Valutare la vulnerabilità urbana ai cambiamenti climatici e alle isole di calore urbano. **TECHNE**, v. 15, p. 237-245, 2018. ISSN: 2239-0243.

COUTINHO, B.; SILVEIRA, F.; FERNANDES, L.; CARNEIRO, A.; SHIMOMURA, A.; LABAKI, L. A influência da vegetação e das variáveis climáticas no nível de conforto dos usuários da praça do coco em Campinas. Encontro Nacional de Tecnologia no

Ambiente Construído, 6, 2012, Juiz de Fora. **Anais** Da concepção à Desconstrução: A Integração do Ambiente Construído, Juiz de Fora: 2012, p. 71-79.

DALBEM, R.; CUNHA, E. G.; VICENTE, R.; FIGUEIREDO, A. J.; SILVA, A. C. S. B. Discussão do desempenho da envoltória de uma passive house adaptada à zona bioclimática 2 em acordo com o RTQ-R. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 201-222, 2017.

DIDONÉ, E. L.; WAGNER, A.; PEREIRA, F. O. R. Estratégias para edifícios de escritórios energia zero no Brasil com ênfase em BIPV. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 3, p. 27-42, 2014.

DIULIO, M. de la P.; REUS NETTO, G.; BERARDI, R.; CZAJKOWSKI, J. D. Impacto de la envoltante en la demanda de energía en calefacción residencial de la región metropolitana de La Plata, tomando como caso testigo el reciclado energético de una vivienda. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, p. 55-70, 2016.

DOERFLER, M. A.; KRÜGER, E. L. Avaliação dos impactos termo-energéticos da orientação solar em habitação de interesse social na zona bioclimática 1. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 7, 2014, Maceió. **Anais** Avanços no desempenho das construções - pesquisa, inovação e capacitação profissional. Maceió: 2014, p. 489-497.

DUARTE, D. H. S. **O impacto da vegetação no microclima em cidades adensadas e seu papel na adaptação aos fenômenos de aquecimento urbano: Contribuições a uma abordagem interdisciplinar**. 2015. 153f. Livre Docência (Departamento de Tecnologia da Arquitetura) Faculdade de Arquitetura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

DURANTE, L. C. **Sombreamento arbóreo e desempenho termoenergético de edificações**. 2012. 228f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2012.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D.P.; BERGAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6ª edição. Rio de Janeiro. 2008.

IPEA. **11 Cidades e Comunidades Sustentáveis**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2019. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods11.html>. Acesso em: 12 de outubro de 2020.

KOSUTOVA, K.; HOOFF, T.; BLOCKEN, B.; HERSEN, J. Cross-ventilation in a generic isolated building equipped with louvers: Wind-tunnel experiments and CFD simulations. **Building and Environment**, v. 154, p. 263-280. 2019.

KRÜGER, E. L.; GONZALEZ, D. E. G. Impactos da alteração no albedo das superfícies no microclima e nos níveis de conforto térmico de pedestres em cânions urbanos. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 3, p. 89-106. 2016.

KRÜGER, E.; ROSSI, F. Quantificação da ilha de calor de Curitiba considerando aspectos de estabilidade atmosférica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 4, p. 394-404, 2015.

LANDSBERG, H. E. Man-Made Climatic Change. **Science**, v. 170, p. 1265-2374, 1970.

LAUZET, N.; MORRILE, B.; LEDUC, T.; MUSY, M. What is the required level of details to represent the impact of the built environment on energy demand? **Procedia Environmental Sciences**. v. 38, p 611-618, 2017.

LEAL, L. **A influência da vegetação no clima urbano da cidade de Curitiba – PR**. 2012. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

LIMA, I.; SCALCO, V.; LAMBERTS, R. Estimating the impact of urban densification on high-rise office building cooling loads in a hot and humid climate. **Energy & Buildings**, v. 182, n.1, p. 30-44, 2019. ISSN 0378-7788.

LIU, L.; LIU, J.; LIN, Y. Spatial-Temporal Analysis of the Urban Heat Island of a Subtropical City by Using Mobile Measurement. **Procedia Engineering**, v. 169, p 55–63, 2016.

LUZ, E. G.; CANDIDO, C. R.; NOGUEIRA, M. C. J. A.; SANTOS, F. M. M.; LEÃO, E. F. T. B. Aplicação de metodologias de tratamento de dados do clima local para avaliação de diretrizes bioclimáticas em Sinop-MT. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018.

MACHADO, R. M. S. **Modelagem do impacto da ilha de calor urbano sobre o desempenho energético de escritórios condicionados artificialmente**. 2019. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2019.

MENDES, A. L. **Arquitetura bioclimática na Amazônia: um estudo da obra de Severiano Mário Porto no setor norte do campus UFAM**. 2019. 202f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Sustentabilidade na Amazônia) Universidade Federal do Amazonas, Manaus. 2019.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: Noções básicas e climas do Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina dos Textos, 2007.

MINELLA, F. C. O. **Avaliação da influência de aspectos da geometria urbana sobre os níveis de conforto térmico em ruas de pedestres de Curitiba**. 2009. 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Curitiba. 2009.

MINELLA, F. C. O.; HONJO, S.; KRÜGER, E. L. Estratégia de melhoria do ambiente térmico diurno em situação de verão de uma fração urbana da cidade de São Paulo. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 4, p. 139-158. 2012.

MINELLA, F. C. O.; KRÜGER, E. L. Proposição do índice “fração vegetada” e sua relação com alterações na temperatura do ar e no conforto térmico no período diurno e em situação de verão para Curitiba. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 353-371, 2017.

MINELLA, F. C. O.; KRÜGER, E. L.; HONJO, S.; GOYETTE, S.; HEDJAZI, A. Análise do ambiente térmico externo do projeto SOVALP/Genebra. Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 6, 2012, Juiz de Fora. **Anais Da concepção à Desconstrução: A Integração do Ambiente Construído**, Juiz de Fora: 2012, p. 2951-1962.

MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. **CLIMA URBANO**. 1º ed, São Paulo: Contexto, 2003.

MORILLE, B.; MUSY, M.; MALYS, L. Preliminary study of the impact of urban greenery types on energy consumption of building at a district scale: Academic study on a canyon street in Nantes (France) weather conditions. **Energy and Buildings**, v. 114, p 275-282, 2016.

MUNIZ-GÄAL, L. P.; PEZZUTO, C. C.; CARVALHO, M. F. H. de; MOTA, L. T. M. Parâmetros urbanísticos e o conforto térmico de cânions urbanos: o exemplo de Campinas, SP. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 177-196. 2018.

MUNIZ, L. G.; PEZZUTO, C. C. O efeito dos parâmetros urbanísticos na variação microclimática de um cânion urbano. Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 8, 2016, São Paulo. **Anais Os desafios e as perspectivas da internacionalização da construção**. São Paulo: 2016, p. 1341-1353.

MUSY, M.; MALYS, L.; MORILLE, B.; SZUCS, A. Impacto of vegetation on urban climate, thermal comfort and building energy consumption – Overview of VegDUD Project results. In: **IC2UHI**, Veneza, Itália. 2014.

NAKATA-OSAKI, C. M.; SOUZA, L. C. L. de; RODRIGUES, D. S. Impacto da geometria do cânion urbano na intensidade de ilha de calor noturna: análise através de um modelo simplificado adaptado a um SIG. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 3, p. 73-87. 2016.

NICO-RODRIGUES, E. A.; ALVAREZ, C. E. de; SANTO, A. D.; PIDERIT, M. B. Quando a janela define a condição de desempenho térmico em ambientes ventilados naturalmente: caso específico das edificações multifamiliares em Vitória, ES. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 2, p. 7-23, 2015.

NUNES, A. M. L. A.; SILVA, M. F.; BARBOSA, R. V. R.; BARBIRATO, G. M. Análise do padrão de ventilação natural na cidade de Arapiraca-AL. In: **III Congresso Latino Americano de Engenharia do Vento**, 2018, São Paulo. Anais do III Congresso Latino Americano de Engenharia do Vento, São Paulo: 2018.

OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal heat island: Comparison of scale model and field observations. **Journal of Climatology**. 1, 237-254, 1981.

OKE, T. R. **Boundary Climate Layers**. 2º ed, Taylor & Francis e-Library: 1987.

OKE, T. R. **Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations At Urban Sites**. 1º ed, n. 81, World Meteorological Organization: 2006.

OKE, T. R. The urban energy balance. **Progress in Physical Geography**. v. 12, p 471, 1988.

OLGYAY, V. **Design with climate**. Princeton University Press, New Jersey, 1963.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (PBMC). **Mudanças climáticas e cidades: Relatório Especial do Painel brasileiro de mudanças climáticas**. 1º ed, Rio de Janeiro, COPPE-UFRJ: 2016.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 11, n. 5, p. 1633-1644, 2007.

PEREIRA, I.; ALVES, T.; PINHEIRO, R.; ASSIS, E. S. Metodologia de tratamento de dados climáticos para inserção em softwares de simulação energética de edifícios. **In: Conferência Latino-americana de Construção Sustentável e Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 04., 2004, São Paulo. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2004.

PNUMA. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. **Mude o hábito: Um guia da ONU para a neutralidade climática**. 1ºed. UNEMG: 2008.

PRADA, A. **Energy Performance of Buildings: Modeling of Dynamic Summer Behavior**. 2012. 195f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Universidade de Trento, Trento.

RENDON, E. **Modélisation de la végétation urbaine comme régulateur**

**Thermique**. 2017. 237f. Tese (Doutorado em Climatologia) Universidade de Toulouse, Toulouse, 2017.

ROCHA, A. C.; BARROS, M. M. S. B; LEITE, B. C. C.; PETRECHE, J. R. D. Avaliação do desempenho térmico de fachada com painéis leves em edificação de múltiplos pavimentos. **In: XVI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído**, 8, 2016, São Paulo. Anais Os desafios e as perspectivas da internacionalização da construção. São Paulo: 2016, p. 755-764

RODRIGUES, C. O. M.; PEDRINI, A. Integração da simulação termoenergética nas primeiras fases do processo projetual: o estudo de seis casos. **Ambiente Construído**. v. 17, n. 1, p. 245-266, 2017.

ROMERO, M. A. B. **Princípios Bioclimáticos para o Desenho Urbano**. 1º ed. CopyMarker.com: 2000.

RORIZ, M. Uma proposta de Revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro. ANTAC, São Carlos, São Paulo. 2012. Disponível em: [http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Proposta\\_Revisao\\_Zoneamento\\_Bioclimatico.pdf](http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Proposta_Revisao_Zoneamento_Bioclimatico.pdf). Acesso em: 14/05/2019.

RORIZ, M. Classificação de Climas do Brasil – Versão 3.0. ANTAC, São Carlos, São Paulo. 2014. Disponível em: [http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/Climas\\_v3.pdf](http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/Climas_v3.pdf). Acesso em: 14/05/2019.

ROSSI, F. A. **Análise da influência da ocupação do solo na variação da temperatura em diferentes localidades da cidade de Curitiba**. 2004. 167f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Curitiba.

ROSSI, F. A.; DUMKE, E.; KRÜGER, E. L. Atualização do ano climático de referência para Curitiba. Encontro Nacional e Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2009, Natal. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2009.

ROTH, M. Review of urban climate research in (sub) tropical regions. **International Journal of Climatology**, v. 27, agosto, p. 1859–1873, 2007.

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, 2013a.



- RUPP, R. F.; GHISI, E. Potencial de economia de energia elétrica em edificações comerciais híbridas localizadas em Florianópolis, SC. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 1, p. 143-160, 2013b.
- RUZICKI, S.; DUARTE, C.; BRANDALISE, M.; GRALA, E. Análise da sensibilidade do RTQ-C quanto a variação da densidade de carga interna de edificações de escritórios nas zonas bioclimáticas brasileiras 1, 2 e 3. **In: XVI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído**, 8, 2016, São Paulo. Anais Os desafios e as perspectivas da internacionalização da construção. São Paulo: 2016, p. 552-567.
- SANTOS, L. H.; SANCHES, J. C. M. Direção e velocidade dos ventos como parâmetro de projetos arquitetônicos em Sinop/MT. **In: 5º Seminário Mato-Grossense de Habitação de Interesse Social**, 2013, Cuiabá. Anais... Cuiabá: 2013.
- SALVATI, A.; ROURA, H. C.; CECERE, C. Urban heat island prediction in the mediterranean context: an evaluation of the urban weather generator model. **ACE: Architecture, City and Environment**, v. 11, n. 32, p. 135-156, 2016. ISSN: 1886-4805.
- SALVATI, A.; PALME, M.; CHIESA, G.; KOLOKOTRONI, M. Built form, urban climate and building energy modelling: case-studies in Rome and Antofagasta, **Journal of Building Performance Simulation**, v.1, p. 1-17, 2020.
- SHINZATO, P.; DUARTE, D. H. S. Impacto da vegetação nos microclimas urbanos e no conforto térmico em espaços abertos em função das interações solo-vegetação-atmosfera. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 197-215, abr./jun. 2018.
- SILVA, A. S.; ALMEIDA L. S. S.; GHISI, E. Análise de incertezas físicas em simulação computacional de edificações residenciais. **Ambiente Construído**. v. 17, n. 1, p. 289-303, 2017.
- SILVA, A. S.; GHISI, E. Análise comparativa dos resultados do desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial pelos métodos de simulação do RTQ-R e da NBR 15575-1. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p.213-230, 2014.
- SILVA, A. S.; GHISI, E. Análise de sensibilidade global dos parâmetros termofísicos de uma edificação residencial de acordo com o método de simulação do RTQ-R. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 135-148, 2013
- SCROCCARO, M. P.; TAVARARES, S. F.; LIMA, C. A. A influência das vias de transporte coletivo na formação das ilhas de calor urbanas. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 13, **Anais**, Campinas. 2015. p. 1-10.
- SOUSA, J.; LAMENHA, M.; FREITAS, R; BITTENCOURT, L. Efeito da altura e porosidade de edifícios na ventilação urbana. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 7, 2014, Maceió. **Anais** Avanços no desempenho das construções - pesquisa, inovação e capacitação profissional. Maceió: 2014, p. 794-803.
- TAHMASEBI, M. M.; BANIHASHEMI, S.; HASSANABADI, M. S. Assessment of the variation impacts of window on energy consumption and carbon footprint. **Procedia Engineering**, v. 21, p. 820-828, 2011. ISSN 1877-7058.
- TERASSI, R. K.; KRÜGER, E. L. Avaliação bioclimática de residências históricas em Curitiba. **Revista de Engenharia e Construção Civil**, v. 1, n. 2, p. 78-95. 2014.

TOPALAR, Y.; BLOCKEN, B.; MAIHEU, B.; HEIJST, G. J. F. A review on the CFD analysis of urban microclimate. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1613–1640. 2017.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. 2º ed. Recife: 2006.

VINET, J. **Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs**. 2000, 251f. Tese (Doutorado em ciências de engenharia). Universidade de Nantes Université de Nantes, 2000.

XU, X.; AZARIJAFARI, H.; GREGORY, J.; NORFORD, L.; KIRCHAIN, R. An integrated model for quantifying the impacts of pavement albedo and urban morphology on building energy demand. **Energy & Buildings**, v. 211, n.1, p. 1-10, janeiro 2020. ISSN 0378-7788.

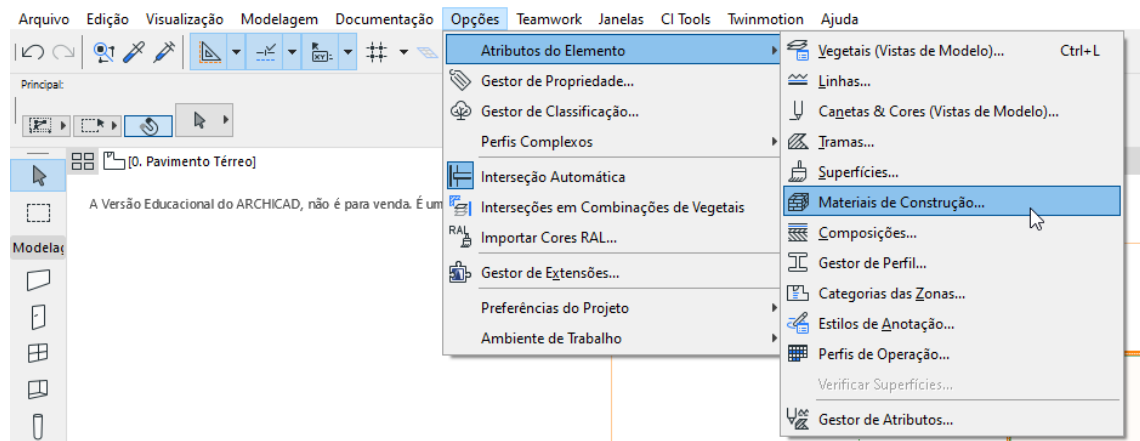
YANG, X.; ZHAO, L.; BRUSE, M.; MENG, Q. An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. **Energy and Buildings**, v. 54, p 243-251, 2012.

## APÊNDICE A – MODELAGEM BIM PARA BEM

Nesse apêndice estão descritos os passos para modelagem Building Information Modelling (BIM), no *ARCHICAD*, com intuito de desenvolver simulação térmica e energética de edificações.

Para criar materiais no *ARCHICAD* o usuário deve acessar o menu na barra superior em Opções, atributos do elemento e materiais de construção, como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Criação de material no ArchiCAD

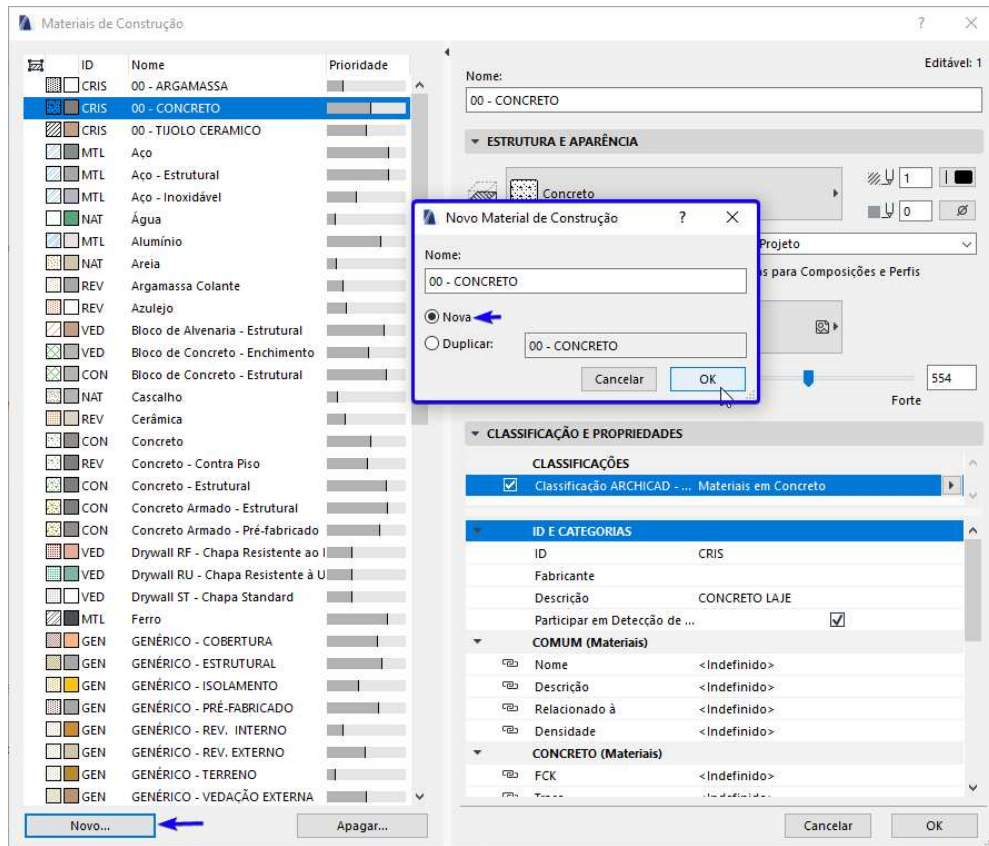


FONTE: Obtido a partir de ArchiCAD 23 (2020).

Dentro do menu de matérias, é necessário navegar até o ícone novo e dar nome ao material. Existem duas opções, duplicar ou novo, foi optado por novo para ter todos os parâmetros zerados para a configuração, como pode ser observado na Figura 25.

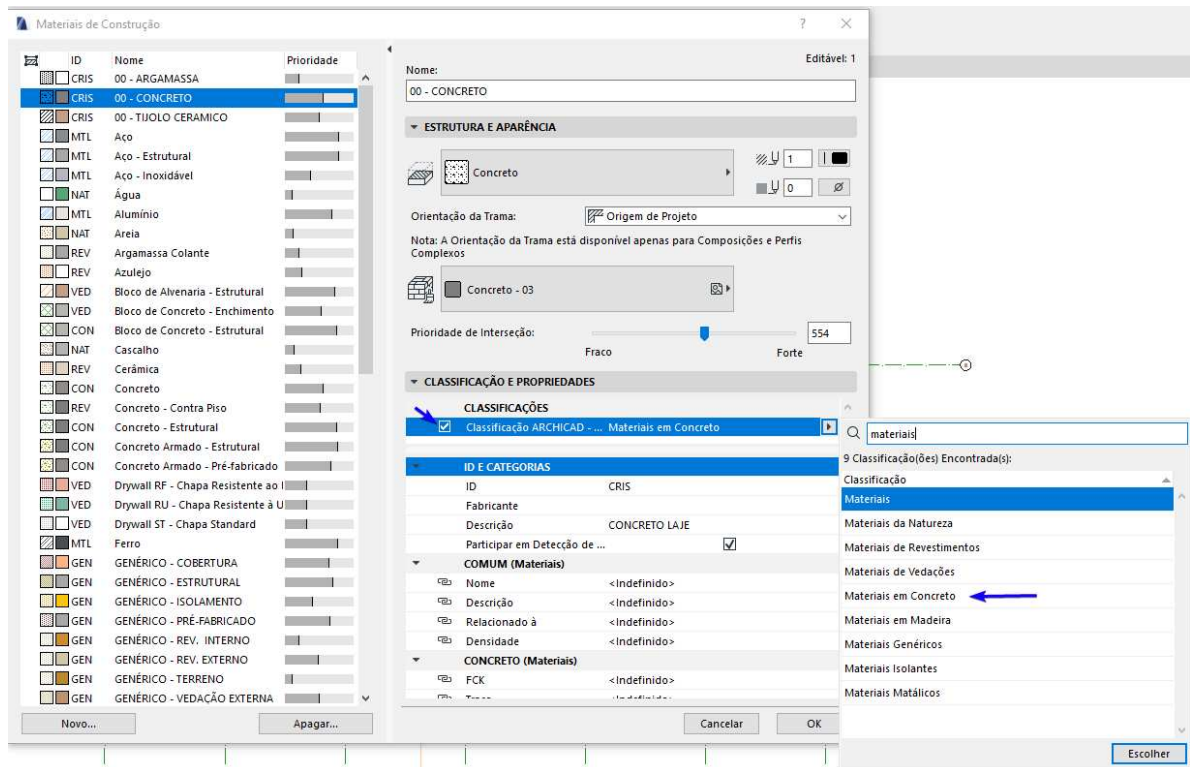
Após o material criado, é importante o classificar, para que o conjunto de parâmetros seja o adequado, então o usuário acessar o menu classificações e selecionar a classificação correta para o material. Esse processo pode ser visto na Figura 26.

Figura 25 – Criação de novo material no ArchiCAD



FONTE: Obtido a partir de ArchiCAD 23 (2020).

Figura 26 – Classificação de novo material no ArchiCAD

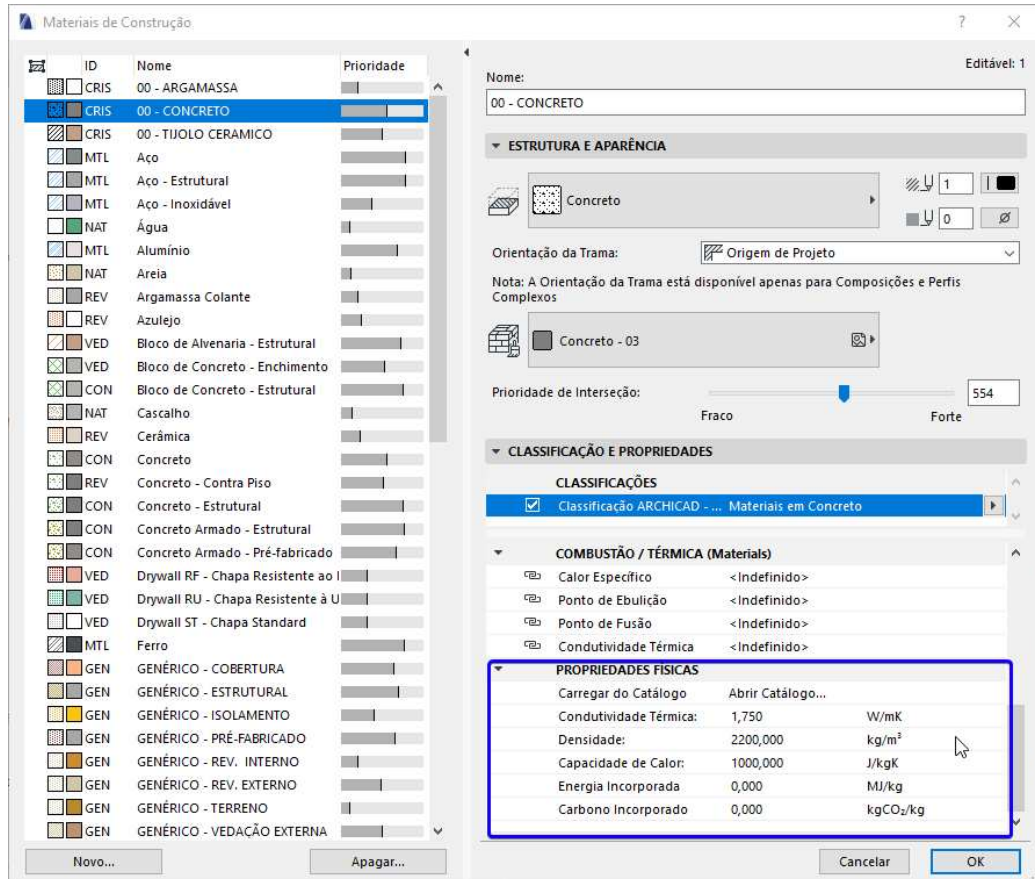


FONTE: Obtido a partir de ArchiCAD 23 (2020).

Após ter classificado o material, foi configurado os parâmetros citados anteriormente, com os valores retirados da NBR 15220-2. Como pode ser observado na

Figura 27.

Figura 27 – Parâmetros do novo material com valores retirados da norma ABNT/NBR 15220-2

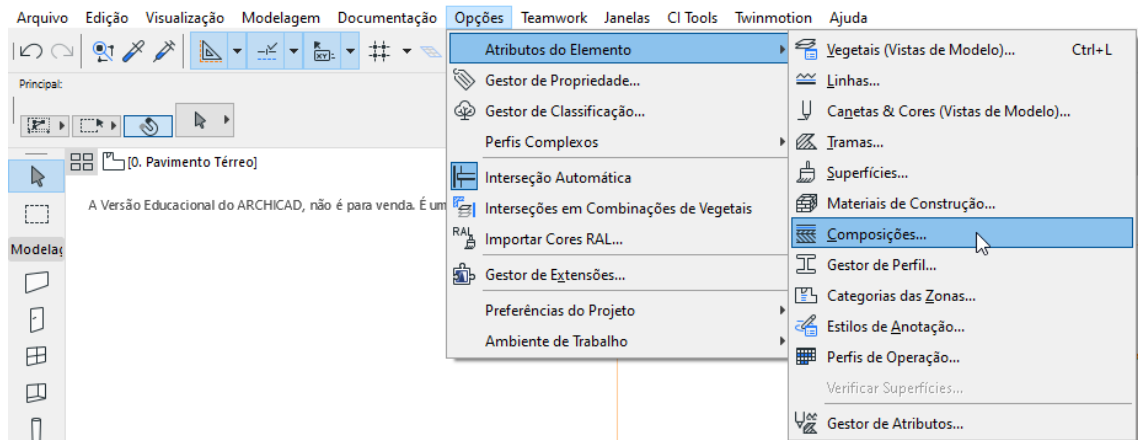


FONTE: Obtido a partir de ArchiCAD 23 (2020).

Com os materiais configurados foi possível criar as composições de parede interna e externa, assim como cobertura e laje. Para a criação das composições o usuário deve acessar o menu opções, direcionando para atributos do elemento e finalmente em composições, como mostra a Figura 28.

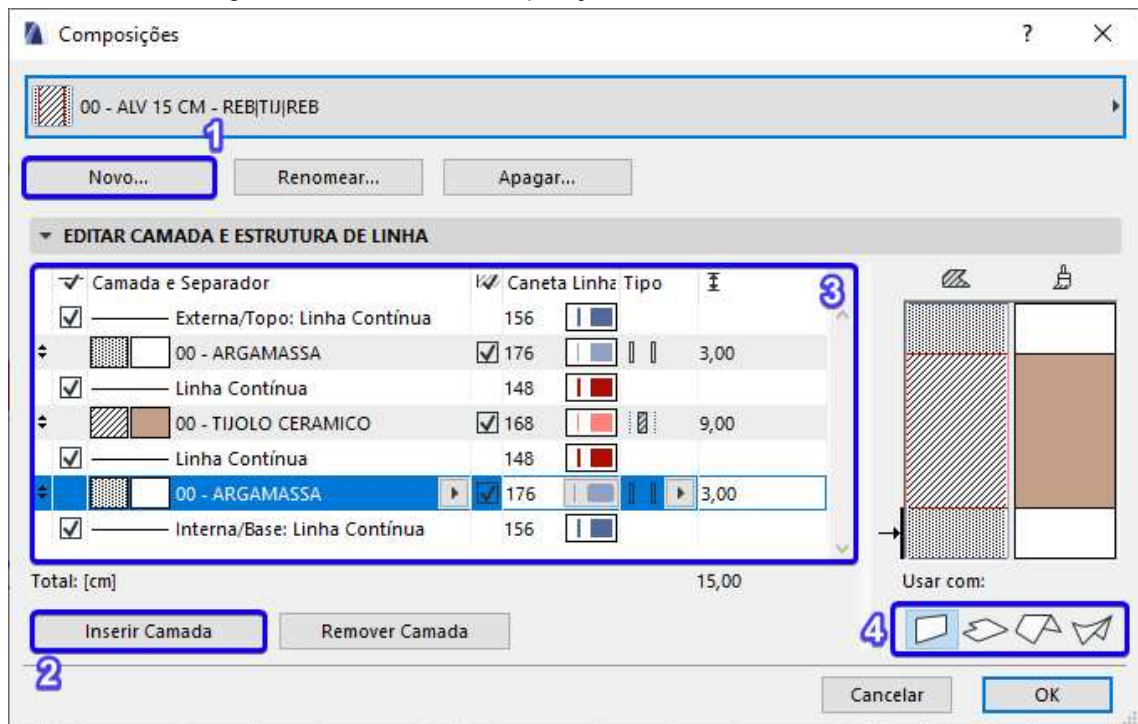
As composições criadas para o projeto em análise foram paredes (4), portanto para cada estilo de parede, foi criada (1) a composição com as camadas (2), aplicando nelas os materiais e espessuras. As camadas criadas (3) para as composições são: camada externa, núcleo, camada interna. Tanto as camadas externas quanto internas, foram consideradas como acabamentos na configuração da coluna tipo, como mostra a Figura 29.

Figura 28 – Caminho para criação de composições no ArchiCAD



FONTE: Obtido a partir de ArchiCAD 23 (2020).

Figura 29 – Diferentes composições de materiais no ArchiCAD

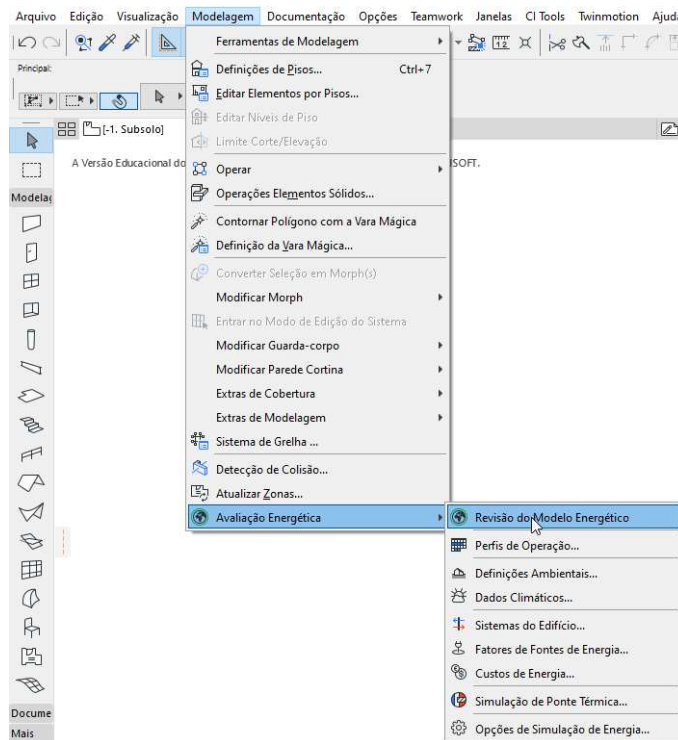


FONTE: Obtido a partir de ArchiCAD 23 (2020).

O modelo da edificação de laboratórios foi realizado a partir das configurações iniciais citadas. Para a modelagem, foram utilizadas as ferramentas: Parede, Laje, Janela, Porta, Cobertura e Zonas.

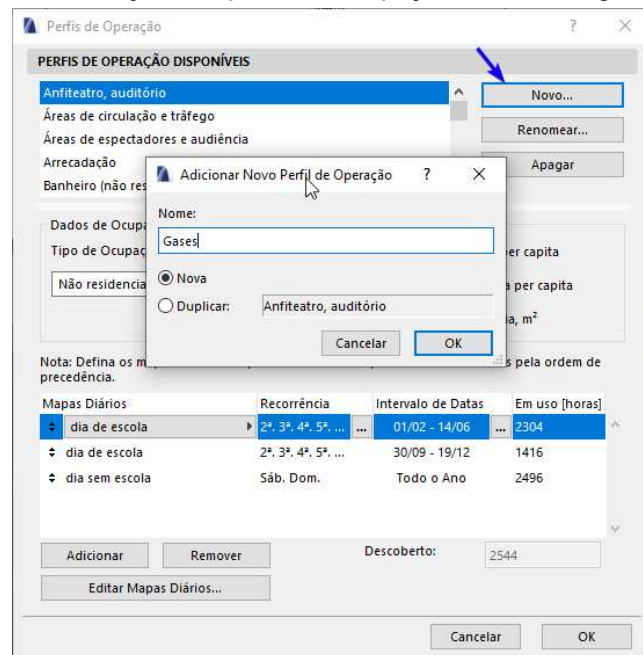
Para criar um perfil de operação é necessário acessar a aba do plug in no ArchiCAD, como mostra a Figura 30, e em seguida as configurações na opção perfis de operação, como visto na Figura 31.

Figura 30 – Acesso às opções de simulação do EcoDesigner STAR no ArchiCAD



FONTE: Obtido a partir de ArchiCAD 23 (2020).

Figura 31 – Criação dos perfis de ocupação no EcoDesigner STAR

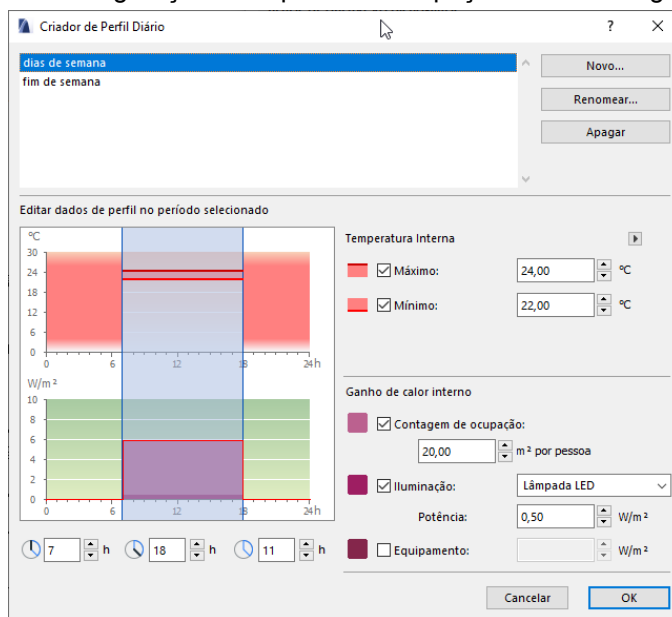


FONTE: Obtido a partir de ArchiCAD 23 (2020).

Em cada perfil de operação, são configuradas as informações de densidade de iluminação, das temperaturas do termostato, da densidade de equipamentos e da taxa de ocupação de pessoas, como mostra a

Figura 32.

Figura 32 – Configurações dos perfis de ocupação no EcoDesigner STAR



FONTE: Obtido a partir de ArchiCAD 23 (2020).