

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Arquitetura

Marina da Silva Garcia

Consumo de energia e conforto térmico em *campus* universitário: uma proposta de *benchmarking*

Belo Horizonte, MG

2022

Marina da Silva Garcia

Consumo de energia e conforto térmico em campus universitário: uma proposta de *benchmarking*

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável.

Área de Concentração: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável

Linha de Pesquisa: Tecnologia do Ambiente Construído

Orientadora: Prof.^a Dr^a Roberta Vieira Gonçalves de Souza

Coorientadora: Prof.^a Dr^a Ilka Afonso Reis

Belo Horizonte

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

G216c Garcia, Marina da Silva.
Consumo de energia e conforto térmico em *campus* universitário
[manuscrito] : uma proposta de *benchmarking* / Marina da Silva Garcia. - 2022.
295f. : il.

Orientadora: Roberta Vieira Gonçalves de Souza
Co-orientadora: Ilka Afonso Reis.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de
Arquitetura.

1. Conforto térmico - Teses. 2. Energia elétrica – Consumo – Teses.
3.Ventilação - Teses. 4. Universidades e faculdades – Edifícios – Teses. I.
Souza, Roberta Vieira Gonçalves. II. Universidade Federal de Minas Gerais.
Escola de Arquitetura. III. Título.

CDD 720.472

Ficha catalográfica elaborada por Hugo Avelar Cardoso Pires CRB-6 3125



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AMBIENTE CONSTRUÍDO E PATRIMÔNIO SUSTENTÁVEL

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Consumo de energia e conforto térmico em campus universitário: uma proposta de benchmarking"

MARINA DA SILVA GARCIA

Tese de Doutorado defendida e aprovada, no dia **vinte e oito de julho de dois mil e vinte e dois**, pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Eduardo Leite Krüger

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Profa. Dra. Eleonora Sad de Assis

Escola de Arquitetura/UFMG

Profa. Dra. Joyce Correna Carlo

Universidade Federal de Viçosa (UFV)

Profa. Dra. Lucila Chebel Labaki

Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Profa. Dra. Ilka Afonso Reis

Instituto de Ciências Exatas/UFMG - Coorientadora

Profa. Dra. Roberta Vieira Gonçalves de Souza - Orientadora

PPG-ACPS/UFMG

Belo Horizonte, 28 de julho de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Roberta Vieira Gonçalves de Souza, Professora do Magistério Superior**, em 28/07/2022, às 13:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ilka Afonso Reis, Professora do Magistério Superior**, em 28/07/2022, às 15:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Joyce Correna Carlo, Usuário Externo**, em 28/07/2022, às 16:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eleonora Sad de Assis, Professora do Magistério Superior**, em 30/07/2022, às 20:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Leite Kruger, Usuário Externo**, em 12/08/2022, às 11:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lucila Chebel Labaki, Usuário Externo**, em 29/11/2022, às 21:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1638566** e o código CRC **56644EBE**.

“O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”

“This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001”

Dedico este trabalho a Deus e à minha amada família,
em especial aos meus pais Cláudio Osnei e Roseli,
à minha irmã Letícia Maria e aos meus avós
Naur, Aparecida, João Batista e Maria Lígia

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Professora Dr^a Roberta V. G. de Souza, querida orientadora, que é para mim um exemplo e inspiração. Obrigada por todo o trabalho, pela dedicação, pelo conhecimento compartilhado e pelo carinho. Foi uma honra estar próxima a você junto ao Labcon-UFMG nos anos de formação como pesquisadora, desde o mestrado até a finalização do doutorado.

Agradeço à querida Professora Dr^a Ilka Afonso Reis, minha coorientadora, pela dedicação, pela disponibilidade, pela paciência e pelo auxílio prestado, principalmente nas questões relacionadas à estatística, sempre de maneira muito gentil e cuidadosa. Foi uma alegria e uma honra conhecer e trabalhar com você.

Agradeço ao Professor Godfried Augenbroe (*in memoriam*), da *Georgia Institute of Technology* (GT), por aceitar me receber no *High Performance Building Lab* em programa de doutorado sanduíche. Seu *feedback* positivo sobre o projeto foi um grande motivador para mim desde o início. Infelizmente, com o advento da pandemia, não foi possível concretizar o intercâmbio para a GT. Mesmo à distância, o professor Fried manteve contato, colaborando via internet. Neste processo, recebi a inesperada notícia de seu falecimento. Me sinto muito triste por esta perda, mas emocionada e honrada por ter sido acolhida por este profissional exemplar.

Muito obrigada aos Professores Drs. Joyce Carlo, Eduardo Krüger e Ana Carolina Veloso pela dedicação e atenção para colaborar com esse trabalho na etapa de Qualificação.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pelo auxílio financeiro concedido para o desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço aos estudantes que realizaram Iniciação Científica no Labcon-UFMG me auxiliando no doutorado: Maíra Freitas, Thais Bitarães, Isabela Oliveira, Danielly Eulário, David Muniz e Fernanda Carvalho. Muito obrigada pela dedicação e pelo carinho, sou muito grata a vocês!

Muito obrigada a todos os profissionais da UFMG que me auxiliaram, concedendo acesso a dados e esclarecimentos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço ao Departamento de Projetos da UFMG (DPP/UFMG); à Pró-Reitoria de Administração (PRA/UFMG), ao Departamento de Manutenção e Infraestrutura (DEMAI/UFMG) e em especial ao engenheiro Helder Gattoni.

Agradeço ao Projeto Oasis/ UFMG por ceder bolsistas para auxiliar no levantamento de dados *in loco* no período final da pesquisa.

Muito obrigada ao querido Arq. Msc. Daniel Amaral, pelo apoio prestado durante os experimentos relacionados às simulações computacionais, em especial às de ventilação natural em CFD.

Agradeço a todos os companheiros do Labcon-UFMG, em especial à Claudia Guidi, Isadora Buchala, Helder Gattoni, Karla Abraão, Géssica Mara, Jackeline Vilela, Ana Carolina Veloso e Camila Ferreira, que compartilharam comigo muitos conhecimentos e momentos bons. Seu carinho e palavras de incentivo foram muito importantes para mim.

Agradeço às minhas amigas Deise, Bruna Pimentel, Bruna Lantyer, Nayara e Thainá, que me apoiaram nos melhores e nos piores momentos.

Agradeço ao meu amado noivo Harnon por estar comigo e me apoiar diariamente durante todo o caminho desta pesquisa, sempre de modo compreensivo e atencioso.

Meus sinceros agradecimentos à toda a minha família, especialmente aos meus pais Cláudio Osnei e Roseli, minha irmã Letícia Maria e meus avós Aparecida (*in memorian*), Naur (*in memorian*), João Batista e Maria Lígia; por me proporcionarem a oportunidade de fazer este doutorado e por serem meus maiores apoiadores, incondicionalmente. Vocês me fazem acreditar que sou capaz de vencer todos os desafios, buscando sempre o caminho da retidão, da dedicação e do serviço a Deus. Obrigada por seus conselhos, por todas as orações e por manterem o período de isolamento social da pandemia o mais leve possível. Para vocês dedico cada conquista.

Por fim e mais importante, agradeço a Deus pelo dom da vida e por conduzir os meus caminhos. O agradeço por me proporcionar saúde para desenvolver este trabalho e me dar forças para perseverar, principalmente quando sofremos os impactos de uma pandemia.

RESUMO

O *benchmarking* é uma ferramenta para comparação de consumo energético entre edifícios similares ou o mesmo edifício ao longo do tempo, sendo útil para o aumento de transparência quanto à gestão de energia e ao desenvolvimento de políticas para a eficiência energética. A métrica mais utilizada em *benchmarkings* energéticos é a *Energy Use Intensity* (EUI). No entanto, em edificações onde o condicionamento do ar é feito predominantemente por ventilação natural, como nas Universidades Públicas Brasileiras, a avaliação do EUI pode não ser suficiente para indicar a eficiência das edificações em uso, dado que há possibilidade de ocorrência de situações de desconforto térmico. Portanto, o objetivo desta tese é desenvolver um sistema de *benchmarking* interno de edifícios de *campi* universitários baseado no consumo de energia elétrica e no conforto térmico. Foram utilizados como estudo de caso os edifícios da Universidade Federal de Minas Gerais, em Belo Horizonte. Como métrica para análise de energia considerou-se o EUI e, como métricas para o conforto térmico, utilizaram-se o Percentual de Horas Ocupadas em Conforto (PHOC) e ao Graus Hora de Calor (GHC). Uma base de dados referente ao EUI de 110 edificações dos *campi* foi construída e optou-se por focar nos edifícios de Unidades Acadêmicas (UA) (27 prédios), para os quais foram levantadas também suas características arquitetônicas. O conforto térmico dos ambientes de salas de aula naturalmente ventiladas foi analisado a partir do desenvolvimento de arquétipos e simulações computacionais paramétricas de 55 mil cenários, com o *software* EnergyPlus. O método deste trabalho, de caráter interdisciplinar, incluiu a elaboração de quatro equações preditivas via modelos de regressão múltipla: duas equações referentes à energia para predição de EUI e duas referentes ao conforto térmico para predição de PHOC e GHC. As equações de EUI foram separadas para edifícios com e sem laboratórios de equipamentos densos. As equações de conforto térmico são referentes a salas de aula. Foi proposto um *benchmarking* com classificação dos prédios na escala de A a E tanto para EUI quanto para conforto térmico, integrados em uma matriz que gera classificações finais de níveis “bom”, “médio”, “ruim” e “muito ruim”. As equações desenvolvidas apresentaram R^2 de 0,93 a 0,97. Analisadas as UAs da UFMG, verificou-se que 29% apresentaram diagnóstico “Bom”, 53% “Médio” e 18% “Ruim”. Nenhuma UA foi classificada como “Muito ruim”. Espera-se que esse diagnóstico possa ser utilizado para embasar a priorização de medidas de *retrofit*. Acredita-se, que, para prédios em condicionamento híbrido ou com ventilação natural seja essencial a inclusão da indicação de conforto térmico em um processo de *benchmarking* energético. A contextualização do estudo de caso sugere que a metodologia desenvolvida pode ser replicada para outras universidades públicas do país.

Palavras-chave: *Benchmarking*. Eficiência energética em edificações. Conforto térmico. Edifícios universitários. Interdisciplinar.

ABSTRACT

Benchmarking is a tool used for comparing energy consumption between a group of similar buildings or the same building over time. It is applicable for increasing transparency regarding energy management and the development of policies for energy efficiency. However, in buildings with predominance of natural ventilation, as Brazilian Public Universities, the EUI evaluation may not be sufficient to indicate the efficiency of the buildings in use, given that there is the possibility of occurrence of thermal discomfort. Therefore, the goal of this thesis is to develop an internal benchmarking system of university campus buildings based on electricity consumption and thermal comfort. The buildings of the Federal University of Minas Gerais, in Belo Horizonte, were used as a case study. EUI was considered as the metric for energy consumption analysis. The Percentage Occupied of Hours in Comfort (POHC) and the Degrees of Heat (DHH) were used as metrics related to thermal comfort. A EUI database of 110 buildings was built and focus was directed to 27 buildings of Academic Units, for which architectural characteristics were also raised. The thermal comfort of naturally ventilated classroom environments was analyzed from the development of archetypes and parametric computer simulations of 55 thousand scenarios with the EnergyPlus software. The method of this work, of interdisciplinary character, included the elaboration of four predictive equations via multiple regression models: two equations for the prediction of EUI and two related to thermal comfort, being one for POHC and one for DHH. The equations for EUI were divided for buildings with or without laboratories with high density of installed power. The thermal comfort equations consider the classrooms. A benchmarking was proposed with the classification of buildings on the scale from A to E both for EUI and for thermal comfort. The benchmarking classification was integrated by a matrix which generated classifications in levels "Good", "Medium", "Poor" and "Very poor". The developed equations presented R^2 from 0.93 to 0.97. It was found that 29% of the analyzed buildings are in the diagnostic zone "Good", 53% in "Medium" and 18% in "Poor". No Academic Unit was classified as "Very poor". It is expected that this diagnosis can be used to support the prioritization of retrofit measures. Author considers that for buildings of hybrid conditioning or with natural ventilation it is essential to include the indication of thermal comfort in a benchmarking process. The contextualization of the case study suggests that the methodology developed can be replicated in other public universities in the country.

Keywords: Benchmarking. Energy efficiency in buildings. Thermal comfort. University buildings. Interdisciplinary.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHE - *Advancement of Sustainability in Higher Education*

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

DPI – Densidade de Potência Instalada

EA/UFMG – Escola de Arquitetura da UFMG

ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

EUI – *Energy Use Intensity*

GHC – Graus-Hora de Calor

IES – Instituições de Ensino Superior

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

LABCON/UFMG – Laboratório de Conforto Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais

NBR - Norma Brasileira

ODS - Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável

ONU - Organização das Nações Unidas

PAF – Percentual de Abertura da Fachada

PAF_{vent} - Percentual de Abertura Útil para Ventilação

PHOC – Percentual de Horas Ocupadas em Conforto

PPD - Percentual de Pessoas Desconfortáveis

RTQ-C - Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos

TAV – *Thermal Acceptability Vote*

TBS – Temperatura de Bulbo Seco

TBU – Temperatura de Bulbo Úmido

TPV - *Thermal Preference Vote*

TSV – *Thermal Sensation Vote*

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas

USP – Universidade de São Paulo

VAT – Voto de Aceitabilidade Térmica

VPT – Voto de Preferência Térmica

VST - Voto de Sensação Térmica

ZB – Zona Bioclimática

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação climática de Belo Horizonte nas regiões de localização dos <i>campi</i> analisados.....	33
Figura 2 – Carta psicrométrica com dados horários de temperatura de bulbo seco de Belo Horizonte para: (a) todo o ano e para (b) os meses de novembro a março	34
Figura 3 – Carta solar para a cidade de Belo Horizonte com escala de cores referentes às Temperaturas Neutras.....	35
Figura 4 - Imagem da etiqueta de uso de energia para edifícios em operação - <i>Display Energy Certificate</i> (Reino Unido).....	39
Figura 5 - Arquétipo de universidade e instituição de ensino técnico do projeto DEO CBCS	48
Figura 6 - Fórmula para a classificação no benchmarking do CBCS.	49
Figura 7 - Sistema de classificação de EUI total proposto por Ding <i>et al.</i> (2018).....	59
Figura 8 - Sistema de classificação de EUI para consumo de iluminação artificial proposto por Ding <i>et al.</i> (2018).....	59
Figura 9 - Tabela de <i>benchmarking</i> final proposta por Ding <i>et al.</i> (2018).....	59
Figura 10 - <i>Ranking</i> proposto por Li e Chen (2021) com base nos resíduos	60
Figura 11 - <i>The Energy Benchmarking Tool</i> desenvolvida pela CIBSE	65
Figura 12 – Ferramenta ENERGY STAR Portfolio Manager – <i>Energy Use Report</i> ...	65
Figura 13 - Ferramenta <i>Energy Consumption Indicators & Benchmarks</i> do governo de Hong Kong para edifícios de universidades (grupo C6)	66
Figura 14 – Exemplo de resultado da plataforma de <i>benchmarking</i> energético brasileira.....	67
Figura 15 - Limites de temperaturas operativas aceitáveis para ambientes condicionados naturalmente.....	70
Figura 16 - Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente ventilados	72
Figura 17 - Limites de Percentuais de Horas Ocupadas em Conforto considerados no regulamento RTQ-C	74
Figura 18 - Limites de Graus-Hora de Resfriamento estabelecidos pelo RTQ-R para a Zona Bioclimática 3	75
Figura 19 - Localização das salas 315 e 410B - Escola de Arquitetura UFMG	86
Figura 20 - Sala 315 - Escola de Arquitetura UFMG	86
Figura 21 - Sala 410B - Escola de Arquitetura da UFMG.....	87
Figura 22 - Termômetros utilizados por Souza (2019) e Bitarães (2019) para a medição de TBS, TBU e temperatura de globo das salas 315 e 410B da Escola de Arquitetura da UFMG.....	88

Figura 23 - Termômetro Kata utilizado por Souza (2019) e Bitarães (2019) para a medição da velocidade do ar das salas 315 e 410B da Escola de Arquitetura da UFMG	88
Figura 24 - Resultados das medições realizadas por Souza (2019) e Bitarães (2019) das salas 315 e 410B da Escola de Arquitetura da UFMG	89
Figura 25: Resultados de sensação térmica obtidos pelos questionários aplicados na sala 315 da Escola de Arquitetura da UFMG no estudo de Souza (2019) e Bitarães (2019).....	90
Figura 26: Resultados de sensação térmica obtidos pelos questionários aplicados na sala 410B da Escola de Arquitetura da UFMG no estudo de Souza (2019) e Bitarães (2019).....	90
Figura 27 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos	92
Figura 28 - Exemplo de identificação do tipo de condicionamento de ar: tipo misto (unidades de ar-condicionado <i>split</i>).....	99
Figura 29 – Exemplos de tipos de uso dos espaços considerados para o levantamento de dados	105
Figura 30: Tipos de proteção solar considerados no levantamento de dados	106
Figura 31 - Tipos de pavimento considerados no levantamento de dados para as salas de aula.	110
Figura 32 - Tipos de janela considerados no levantamento de dados para as salas de aula	110
Figura 33 - Exemplos de janelas com venezianas no <i>campus</i> Pampulha, UFMG ..	110
Figura 34 - Morfologias consideradas para o levantamento de dados das salas de aula	112
Figura 35 - Representação esquemática do funcionamento da clusterização com o algoritmo <i>K-means</i>	114
Figura 36 - Representação do método do cotovelo (<i>elbow method</i>) para definição da quantidade ótima de clusters.....	115
Figura 37 - Fotografias de alguns dos tipos de fachadas de UA da UFMG consideradas para a elaboração do modelo de simulação CFD	119
Figura 38 - Vistas aéreas do Instituto de Ciências Biológicas (ICB), utilizado como geometria básica para o estudo de obtenção dos Cps das fachadas	119
Figura 39 - Representação do modelo considerado para as simulações em CFD..	120
Figura 40 - Malha tridimensional tetraédrica gerada para as simulações em CFD .	122
Figura 41 - Trecho da malha tridimensional gerada para as simulações CFD	123
Figura 42 - Modelo do EnergyPlus para sala 315	126
Figura 43 – Modelo do EnergyPlus para sala 410B	126
Figura 44 - <i>Schedules</i> considerados para as simulações no EnergyPlus.	127
Figura 45 - Exemplos de proteções solares tipicamente encontrados nos <i>campi</i> da UFMG em Belo Horizonte	134

Figura 46 - Máscara de sombra para proteção solar horizontal sul (30°).....	134
Figura 47 - Máscara de sombra para proteção solar horizontal norte (56°)	134
Figura 48 - Esquemas de alteração do percentual de abertura das fachadas a partir da consideração da existência de venezianas. À esquerda o cenário sem venezianas e à direita o cenário com venezianas.	136
Figura 49 - Perspectiva esquemática da estratégia de ventilação cruzada considerada no estudo paramétrico.....	136
Figura 50 - Tipo de veneziana considerado nos estudos.	136
Figura 51 - Exemplos de modelos geométricos das morfologias 1A, 2A sem ventilação cruzada e 2A com ventilação cruzada, considerados para as simulações.....	139
Figura 52 – Tabela da ASHRAE 55-2017 para acréscimo de limite para aceitabilidade de Temperatura operativa máxima a depender da velocidade do ar	141
Figura 53 - Estrutura da base de dados referente ao conforto térmico das salas de aula	142
Figura 54 - Limites dos intervalos dos níveis de eficiência.....	146
Figura 55 - Quadro de <i>benchmarking</i> das Unidades Acadêmicas - Conforto térmico médio das salas de aula e EUI médio dos prédios.....	150
Figura 56 - Representação da densidade de respostas no território brasileiro.	152
Figura 57 - Representação da densidade	152
Figura 58: Zonas Bioclimáticas brasileiras e os grupos climáticos criados para a análise do conjunto de dados.....	153
Figura 59 - Comparação das temperaturas médias anuais de bulbo seco (a) e percentual médio das temperaturas anuais externas dentro e fora da zona de conforto adaptativo ASHRAE 55 (b), por ZBs	153
Figura 60 - Imagens de edifícios de universidades públicas do Brasil	161
Figura 61 - Imagens de edifícios da UFMG.....	162
Figura 62 – Representação gráfica dos quatro arquétipos para SA.....	184
Figura 63 –Localização das SA reais identificadas a partir de levantamento na literatura	187
Figura 64 – Matriz de correlação com dados das unidades acadêmicas sem laboratórios de equipamentos densos e presença menos significativa de aparelhos de ar-condicionado (Modelo 1).....	195
Figura 65 - Matriz de correlação com dados das unidades acadêmicas com laboratórios de equipamentos densos e presença mais significativa de aparelhos de ar-condicionado (Modelo 2).....	197
Figura 66 - Coeficientes do Modelo 1 - Predição de EUI para prédios sem laboratórios de equipamentos densos e presença menos significativa de aparelhos de ar-condicionado	200
Figura 67 - Análise de variância (ANOVA) do Modelo 1 - Predição de EUI para prédios sem laboratórios de equipamentos densos e presença menos significativa de aparelhos de ar-condicionado	201

Figura 68 - Coeficientes do Modelo 2 - Predição de EUI para prédios com laboratórios de equipamentos densos e presença mais significativa de aparelhos de ar-condicionado	202
Figura 69 - Análise de variância (ANOVA) do Modelo 2 - Predição de EUI para prédios com laboratórios de equipamentos densos e presença mais significativa de aparelhos de ar-condicionado	204
Figura 70 - Matriz de correlação com dados das salas de aula simuladas (Modelo 3: PHOC e Modelo 4: GHC)	205
Figura 71 - Ranqueamento dos coeficientes de variação das medianas do PHOC (a) e do GHC (b) nas categorias das variáveis explicativas	206
Figura 72 - Análise de variância (ANOVA) do Modelo 3 (PHOC – salas de aula)...	210
Figura 73 - Análise de variância (ANOVA) do Modelo 4 (GHC – salas de aula)	212
Figura 74 – Regra simplificada para identificação do tipo de arquétipo para salas de aula além das consideradas na amostra	213
Figura 75 - Limites de classificação para PHOC e GHC das salas de aula.	215
Figura 76 - Indicação dos pontos de classificação de conforto térmico dos exemplos analisados	216
Figura 77 – Quadro de <i>benchmarking</i> das unidades acadêmicas da UFMG: EUI médio e conforto térmico médio das salas de aula	220
Figura 78 – Aplicação de três Unidades Acadêmicas da UFMG no <i>benchmarking</i> do CBCS	230

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação de artigos científicos de <i>benchmarking</i> energético em edifícios e seu método matemático.	47
Quadro 2 - Principais produções científicas brasileiras sobre <i>benchmarking</i> energético de edificações (continua)	51
Quadro 3 - Artigos internacionais sobre consumo de energia em edifícios universitários	57
Quadro 4 - Variáveis consideradas em estudos de <i>benchmarking</i> energético de edificações em uso.....	61
Quadro 5 - Variáveis arquitetônicas relacionadas ao conforto térmico em ambientes internos (continua).....	79
Quadro 6 – Variáveis consideradas e os métodos utilizados para o levantamento de dados das Unidades Acadêmicas da UFMG em Belo Horizonte	102
Quadro 7 – Variáveis consideradas e métodos utilizados para o levantamento de dados das salas de aula da UFMG	108
Quadro 8 - Morfologias consideradas para o levantamento de dados das salas de aula	111
Quadro 9 - Parâmetros utilizados para geração de malha - simulações em CFD... ..	122
Quadro 10 - Tipos de combinações de envoltória utilizados para as simulações paramétricas.....	132
Quadro 11 – Resumo dos ambientes computacionais usados.....	151
Quadro 12 - Preferência térmica em ambientes de Unidades Acadêmicas da UFMG	159
Quadro 13 - Aceitabilidade térmica em ambientes de Unidades Acadêmicas da UFMG	160

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estrutura do questionário	96
Tabela 2 - Valores médios de absorvência à radiação solar.....	106
Tabela 3 - Dados considerados para a simulação computacional das salas de aula da Escola de Arquitetura da UFMG.....	125
Tabela 4 – Estudos realizados com variações <i>one-factor-at-a-time</i>	129
Tabela 5 - Estatísticas descritivas e valores considerados para a variação das variáveis no estudo paramétrico.....	131
Tabela 6 - Coeficientes de pressão considerados nas simulações computacionais no EnergyPlus, por orientação, com base no experimento de simulações em CFD	135
Tabela 7 - Temperaturas do solo consideradas para as simulações no EnergyPlus, com base em pré-processamento com Slab	137
Tabela 8 - Composições de envoltória consideradas nas simulações paramétricas com o EnergyPlus	138
Tabela 9 - Configurações para os tipos de iluminação artificial considerados nas simulações	138
Tabela 10 - Algumas configurações de entrada fixas utilizadas no <i>software</i> EnergyPlus	140
Tabela 11 – Valores máximo, mínimo e Limite máximo D considerados para o Modelo 1 (sem laboratórios de equipamentos densos e presença menos significativa de aparelhos de ar-condicionado).....	147
Tabela 12 - Valores máximo, mínimo e Limite máximo D considerados para o Modelo 2 (com laboratórios de equipamentos densos e presença mais significativa de aparelhos de ar-condicionado).....	147
Tabela 13 - Votos de Sensação Térmica (VST) e Percentual de Pessoas Desconfortáveis (PPD) médios calculados com base nos votos, dos usuários de Unidades Acadêmicas da UFMG, por ambiente	158
Tabela 14 - Número de pavimentos dos edifícios da amostra	163
Tabela 15 - Quantidade de edifícios e unidades consumidoras da UFMG em Belo Horizonte.....	164
Tabela 16 - Área construída total e consumo anual total de energia elétrica das edificações da UFMG em Belo Horizonte	167
Tabela 17 - Cps das janelas calculados a partir das simulações com CFD.....	173
Tabela 18 – Estatísticas de validação dos modelos simulados frente aos dados medidos.....	174
Tabela 19- Ângulos de brises horizontais por fachada - estatísticas descritivas.....	180
Tabela 20 - Áreas e proporções medianas de cada <i>cluster</i> de SA.....	183
Tabela 21 – Descrição dos arquétipos para SA	184

Tabela 22 – Limites de cada termo do Modelo 1 (prédios sem laboratórios de equipamentos densos e presença menos significativa de aparelhos de ar-condicionado).....	201
Tabela 23 - Limites de cada termo do Modelo 2 (prédios com laboratórios de equipamentos densos e presença mais significativa de aparelhos de ar-condicionado)	203
Tabela 24 – Limites de cada termo do Modelo 3 (PHOC – salas de aula).....	209
Tabela 25 – Resumo de valores e classificações: EUI médio e conforto térmico ...	222
Tabela 26 – Cenário de classificações de conforto térmico das salas de aula sem a consideração de ventiladores.....	224
Tabela 27 – Valores de EUI médios medianos calculados para a UFMG, os valores de EUI relatados por pesquisas anteriores, seus climas e amostras consideradas	228

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Número de respostas válidas por grupo climático	154
Gráfico 2 – Proporção e números totais de respostas válidas por sexo, grupo climático e tipo de instituição.....	154
Gráfico 3 – Número total de respostas válidas por atividade dos ocupantes	154
Gráfico 4 - Tipos de sistemas de ventilação em prédios do tipo Unidades Acadêmicas	155
Gráfico 5 - Tipos de sistemas de ventilação encontrados em prédios do tipo Unidades Acadêmicas, por tipo de ambiente	156
Gráfico 6 - Sistemas de condicionamento de ar indicados como predominantes pelos usuários de Unidades Acadêmicas da UFMG, por tipo de ambiente.	157
Gráfico 7 - Números de pavimentos das Unidades Acadêmicas de universidades públicas brasileiras.....	163
Gráfico 8 - Tipos de sistema de ventilação dos edifícios de universidades no Brasil	163
Gráfico 9 - Evolução de consumo de energia elétrica anual nos <i>campi</i> da UFMG em Belo Horizonte, de 2010 a 2019.	165
Gráfico 10 - Frequência de ocorrência de EUI médio (kWh/m ² /ano) da amostra de edifícios da UFMG em Belo Horizonte (série temporal de 2015 a 2019)	166
Gráfico 11 - EUI médio (kWh/m ² /ano) <i>campi</i> UFMG em Belo Horizonte (série temporal de 2015 a 2019)	166
Gráfico 12 - EUI médio (kWh/m ² /ano) por tipo de atividade	167
Gráfico 13 – Dados das UABH: (a) área construída total; (b) Idade; (c) número de pavimentos e (d) horários de funcionamento	169
Gráfico 14 - Percentuais de Abertura das Fachadas (PAF) médios das UABH: (a) Norte, (b) Leste, (c) Sul e (d) Oeste	169
Gráfico 15 - Características médias das envoltórias das UABH: (a) U paredes;.....	169
Gráfico 16 – EUI médio das UABH	170
Gráfico 17 - Setorização de áreas por tipos de uso das UABH.....	170
Gráfico 18 - Proporção de área construída condicionada artificialmente das UABH	170
Gráfico 19 – EUI médio das UABH agrupado pela existência de Laboratórios de equipamentos densos	171
Gráfico 20 - EUI médio das UABH agrupado por áreas do conhecimento.....	172
Gráfico 21 – Sala 410B: Temperatura média do ar (°C) medidos e simulados	174
Gráfico 22 - Sala 315: Temperatura média do ar (°C) medidos e simulados	174
Gráfico 23 - Resultados de PHOC a partir da modificação individual de variáveis .	175

Gráfico 24 - Resultados de PHOC a partir da modificação individual da morfologia	176
Gráfico 25 - (a) Sistema de condicionamento de ar das salas de aula e (b) Presença de ventilação cruzada nas SA.....	177
Gráfico 26 – Morfologias das SA (%). Em tracejado, as morfologias onde seria possível haver ventilação cruzada	178
Gráfico 27 – Tipos de janelas das SA (%).....	178
Gráfico 28 – Orientação das fachadas das SA (%).....	179
Gráfico 29 – Percentual (a) e tipos de brise (b) encontrados nas SA.....	179
Gráfico 30 - Ângulos dos brises horizontais das SA por orientação de fachada	180
Gráfico 31 – Absortância e transmitância térmica de paredes e coberturas das SA	181
Gráfico 32 – Localização das AS por tipo de pavimento (T: térreo, I: intermediário e C: cobertura).....	181
Gráfico 33 – Percentual de abertura da fachada (PAF) das SA.....	181
Gráfico 34 – Pé direito das SA	182
Gráfico 35 – Altura do peitoril das janelas das SA	182
Gráfico 36 – Densidade de ocupação das SA.....	182
Gráfico 37 – Número de arquétipos indicado pelo método do cotovelo	182
Gráfico 38 – Variáveis área e proporção para cada <i>cluster</i> de SA.....	184
Gráfico 39 – Frequência de ocorrência relativa de cada <i>cluster</i> na amostra de SA	185
Gráfico 40 – Identificação de cada arquétipo na nuvem de pontos agrupada por <i>cluster</i> das SA.....	185
Gráfico 41 - PHOC (a) e Graus-hora de calor (b) de amostra de SA existentes de cada <i>cluster</i> e os resultados dos arquétipos (pontos vermelhos)	186
Gráfico 42 - Comparação entre dados das salas de aula reais da UFMG e da literatura	187
Gráfico 43 – Existência de ventilação cruzada nas SA da UFMG e da literatura	188
Gráfico 44 - Existência de proteção solar nas SA da UFMG e da literatura.....	188
Gráfico 45 – Tipos de janela nas SA reais da UFMG (a) e da literatura (b)	188
Gráfico 46 – <i>Clusters</i> desenvolvidos a partir das SA da UFMG (1 a 4) e as SA reais identificadas a partir da literatura (5)	189
Gráfico 47 - Distribuição das variáveis de saída PHOC (a) e GHC (b) obtidas a partir das simulações paramétricas das SA	190
Gráfico 48 – Relação entre PHOC e GHC	191
Gráfico 49 – Dispersão da relação entre PHOC e GHC.....	191
Gráfico 50 - Resultados de PHOC e GHC das SA a partir do agrupamento pela existência de variáveis arquitetônicas	192

Gráfico 51 – Valores de PHOC e GHC das SA a partir da orientação das fachadas	193
Gráfico 52 – Valores de PHOC e GHC das SA a partir do tipo de pavimento	193
Gráfico 53 - Valores de PHOC e GHC das SA a partir do PAF	194
Gráfico 54 – Modelo 1: EUI por proporção de salas de aula (raiz quadrada) agrupado por área do conhecimento	196
Gráfico 55 – Modelo 1: EUI por proporção de área condicionada com equipamentos tipo <i>split</i> agrupado por existência de CPD 24h	196
Gráfico 56 - Modelo 2: EUI por proporção de áreas de estudos (raiz quadrada) agrupado por existência de lâmpadas LED	198
Gráfico 57 - Modelo 2: EUI por proporção de áreas de estudos (raiz quadrada) agrupado por área do conhecimento	199
Gráfico 58 – Modelo 1: dados medidos versus dados preditos	200
Gráfico 59 – Modelo 1: teste dos erros (Gráfico quantil-quantil)	200
Gráfico 60 - Modelo 2: dados medidos versus dados preditos	203
Gráfico 61 - Modelo 2: teste dos erros (Gráfico quantil-quantil)	203
Gráfico 62 - Modelo 3: dados simulados versus dados preditos (PHOC)	208
Gráfico 63 - Modelo 3: teste da normalidade dos erros (Gráfico quantil-quantil).....	208
Gráfico 64 - Modelo 4: dados simulados versus dados preditos (GHC)	212
Gráfico 65 - Modelo 4: teste da normalidade dos erros (Gráfico quantil-quantil).....	212
Gráfico 66 - Percentis de classificação para o PHOC das salas de aula	214
Gráfico 67 - Distribuição em escala logarítmica de base 10 dos Graus Hora de Calor das salas de aula e seus percentis de classificação	214
Gráfico 68 - Temperaturas operativas ao longo do ano - sala conforto nível A.....	216
Gráfico 69 - Temperaturas operativas ao longo do ano - sala conforto nível B.....	217
Gráfico 70 - Temperaturas operativas ao longo do ano - sala conforto nível C.....	217
Gráfico 71 - Temperaturas operativas ao longo do ano - sala conforto nível D.....	217
Gráfico 72 - Temperaturas operativas ao longo do ano - sala conforto nível E.....	218
Gráfico 73 – EUI médio das UAs da UFMG	221
Gráfico 74 – PHOC e GHC anuais médios das UAs da UFMG.....	221
Gráfico 75 – Proporções de classificações de conforto térmico das salas de aula por UA	221

GLOSSÁRIO

Salas de aula

Ambientes de ensino e aprendizagem tradicionais, com quadro e carteiras.

Demais áreas de estudos

Áreas onde ocorrem atividades relacionadas ao estudo e ensino sem a utilização de equipamentos específicos, como bibliotecas, salas de monitoria e auditórios.

Laboratórios de pesquisa e informática

Laboratórios onde a principal atividade é a pesquisa e os equipamentos existentes possuem consumo de energia igual ou inferior ao de computadores.

Laboratórios de equipamentos densos

Laboratórios onde a principal atividade é a pesquisa e são compostos por equipamentos cujo consumo de energia elétrica é superior ao de computadores.

Gabinetes de professores & salas administrativas

Salas de uso exclusivo de professores ou técnicos administrativos da instituição. Caracterizadas por baixa densidade de ocupação e uso típico de escritório (mesas com computadores).

Circulação

Ambientes de passagem entre espaços de permanência prolongada.

Outros

Demais áreas, como sanitários e depósitos.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	26
1.1 Problema	30
1.2 Objetivos	31
1.2.1 Objetivo geral	31
1.2.2 Objetivos específicos	31
1.3 Estudo de caso	32
1.4 Originalidade e estrutura do trabalho	35
2. REVISÃO DE LITERATURA	37
2.1 <i>Benchmarking</i> de consumo de energia em edificações	37
2.1.1 Abordagens <i>top-down</i> e <i>bottom-up</i> para desenvolvimento de sistemas de <i>benchmarking</i>	41
2.1.2 Principais métodos matemáticos para desenvolvimento de sistemas de <i>benchmarking</i>	44
2.1.3 <i>Benchmarking</i> energético de edifícios: contexto brasileiro	47
2.2. Breve contexto sobre o ensino superior e o contexto brasileiro	54
2.3. Eficiência energética e <i>benchmarking</i> energético de edifícios de ensino superior	56
2.3.1. Cenário no Brasil	62
2.4. Plataformas de <i>benchmarking</i> existentes	64
2.5. Conforto térmico em espaços internos	68
2.5.1. Principais métricas consideradas pelos regulamentos e sistemas de <i>benchmarking</i> para análise do conforto térmico	73
2.5.2. Principais variáveis arquitetônicas que influenciam o conforto térmico em ambientes internos	77
2.5.3. Conforto térmico em edifícios de IES	82
3. MATERIAIS E MÉTODO	92
3.1. Contextualização do problema e do estudo de caso	93
3.1.1. Aplicação do questionário para caracterização de conforto térmico e uso de sistemas de condicionamento de ar	94
3.1.2. Comparação de características arquitetônicas do estudo de caso frente a outras construções da mesma tipologia	98
3.2. Levantamento de dados primários	99
3.3. Desenvolvimento de base de dados quanto ao consumo de energia elétrica	101
3.4. Desenvolvimento de base de dados quanto ao conforto térmico	106

3.4.1.	Definição dos ambientes analisados	106
3.4.2.	Definição e levantamento das variáveis arquitetônicas das salas de aula 107	
3.4.3.	Desenvolvimento de arquétipos para as salas de aula.....	113
3.4.4.	Simulações computacionais para níveis de conforto térmico	116
3.4.5.	Tratamento dos dados de saída e criação da base de dados	140
3.5.	Análise de dados e desenvolvimento do <i>benchmarking</i>	143
3.5.4.	Análises de correlação	143
3.5.5.	Elaboração das equações preditivas	143
3.5.6.	Elaboração do sistema de classificação	145
3.6.	Ambientes computacionais	151
4.	RESULTADOS	152
4.1.	Resultados do questionário para caracterização de conforto térmico e uso de sistemas de condicionamento de ar.....	152
4.1.1.	Sistemas de ar-condicionado encontrados nas IES brasileiras.....	155
4.1.2.	Respostas dos usuários de Unidades Acadêmicas da UFMG em relação ao tipo de sistema de condicionamento de ar sua experiência térmica no verão e no inverno.....	157
4.2.	Contextualização do estudo de caso em relação ao cenário nacional.....	161
4.3.	<i>Benchmark</i> simples baseado na intensidade de consumo de energia.....	164
4.4.	Descrição da base de dados quanto ao EUI das Unidades Acadêmicas.....	168
4.5.	Construção da base de dados de conforto térmico das salas de aula	172
4.5.1.	Coeficientes de pressão das fachadas	172
4.5.2.	Simulações preliminares - comparação com dados medidos	173
4.5.1.	Análise de sensibilidade local	175
4.5.3.	Modelos de referência das salas de aula	177
4.6.	Descrição da base de dados quanto ao conforto térmico das salas de aula	190
4.7.	Equações preditivas	194
4.7.1.	Equações preditivas de intensidade de uso da energia (EUI) das Unidades Acadêmicas	194
4.7.2.	Equações preditivas de conforto térmico das salas de aula (PHOC e GHC).....	204
4.7.3.	Identificação dos arquétipos para salas de aula além da amostra	213
4.8.	Sistema de classificação	214
4.8.1.	Classificação quanto ao EUI	214
4.8.2.	Classificação de conforto térmico das salas de aula.....	214

4.9. <i>Benchmarking</i> das Unidades Acadêmicas dos <i>campi</i> : EUI médio e conforto térmico médio das salas de aula.....	219
5. DISCUSSÃO	226
5.1. Quanto ao consumo de energia (EUI).....	227
5.2. Quanto ao conforto térmico.....	231
5.3. Limitações do trabalho e sugestões para trabalhos posteriores	235
6. CONCLUSÕES	237
REFERÊNCIAS	238
APÊNDICE A: Revisão sistemática da literatura sobre eficiência energética e <i>benchmarking</i> em universidades.....	254
APÊNDICE B: Questionário sobre tipos de condicionamento de ar e experiência térmica nos edifícios de <i>campus</i> de instituições de ensino superior no Brasil	265
APÊNDICE C: Análises referentes ao experimento de simulações em CFD.....	271
APÊNDICE D: Estudo de diferenças dos resultados entre tipos de morfologias das salas de aula	273
APÊNDICE E: Mapeamento das rodadas possíveis para simulações paramétricas	275
APÊNDICE F: Pré-Processamento com SLAB/EnergyPlus para definição da temperatura do solo	280
APÊNDICE G: Demais respostas do questionário.....	281
APÊNDICE H: Listagem de interações promissoras e variáveis que não funcionariam bem juntas – Modelo 1 – predição de EUI para prédios sem laboratórios densos..	288
APÊNDICE I: Listagem de interações promissoras e variáveis que não funcionariam bem juntas – Modelo 2 - predição de EUI para prédios com laboratórios densos..	289
APÊNDICE J: Resultado ANOVA do Modelo 3 – predição de PHOC para as salas de aula	290
APÊNDICE K: Resultado ANOVA do Modelo 4 – predição de GHC para as salas de aula	292
ANEXO 1: Resolução nº01/2020, de 02 de setembro de 2020.....	294

1. INTRODUÇÃO

A discussão a respeito do desenvolvimento sustentável faz com que seja imprescindível a avaliação dos impactos gerados pelo setor da construção civil no planeta. Este setor é responsável por uma parcela significativa dos danos causados pelo ser humano ao meio ambiente, tanto pelos recursos naturais utilizados como pelos resíduos gerados em todo o ciclo de vida das construções (BRASIL, 2017). Segundo a *International Energy Agency* (IEA) (2018), a construção e operação de edifícios foi responsável por cerca de 36% do consumo final global de energia e 40% das emissões de CO₂ do planeta em 2017. Em 2020, foi observada uma queda nas emissões de CO₂ pelo setor de edifícios, ocasionada principalmente por conta pandemia de COVID-19 (SARS-CoV-2) (IEA, 2021a). No entanto, a retomada parcial de atividades em 2021 foi suficiente para gerar forte recuperação dos níveis de emissões de dióxido de carbono, segundo aponta a IEA (2021b).

Internacionalmente, a Agenda 2030 se propõe acelerar a transformação sustentável do ambiente construído devido à crescente conscientização sobre os impactos do mesmo nas questões ambientais globais (KHOSHBAKHT; GOU; DUPRE, 2018). Nesta agenda, foram elaborados dezessete objetivos da Organização das Nações Unidas (ONU) para o desenvolvimento sustentável (ODS) (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2019). A busca pela maior eficiência energética no ambiente construído está relacionada com três deles: Saúde e bem-estar, Energia limpa e acessível, e Cidades e comunidades sustentáveis. Em 2021, a 26ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática (COP 26) gerou o Pacto de Glasgow, no qual foi indicada a aceleração na adoção e disseminação de medidas de eficiência energética como uma das medidas de mitigação à crise climática (UN, 2021).

A geração de energia é reconhecida como uma das atividades antropogênicas mais impactantes para o meio ambiente. No Brasil, em 2021, ano em que a matriz elétrica do país apresentou maior participação de fontes termelétricas por conta da escassez hídrica, o consumo final de energia elétrica aumentou 4,2% em relação ao ano de 2020, que havia decrescido 1% em relação a 2019 por conta da pandemia (EPE, 2021a; EPE, 2022). Os edifícios são responsáveis por 51% do consumo total de energia elétrica no Brasil, sendo que o setor público (incluindo prédios de instituições de ensino públicas) representa 8% desse consumo (EPE, 2021b). Assim, são

necessárias medidas imediatas para controlar e reduzir a demanda de energia. Portanto, a investigação de processos e tecnologias em prol da eficiência energética na arquitetura e na construção civil pode contribuir para a mitigação dos impactos gerados por este setor (CAO; DAI; LIU, 2016).

Os sistemas de certificação de eficiência energética são considerados ferramentas eficazes para a redução do consumo de energia elétrica e das emissões de CO₂ (ASENSIO; DELMAS, 2017). No Brasil, existem critérios para avaliar a eficiência energética de edifícios residenciais, comerciais, públicos e de serviços estabelecidos pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBE Edifica) (BRASIL, 2010). Desde a sua implementação em 2010, até outubro de 2021, o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética dos Edifícios Comerciais, Serviços e Edifícios Públicos (RTQ-C) da PBE Edifica culminou na aplicação de 281 ENCEs (Etiqueta Nacional de Conformidade Energética) (INMETRO, 2021). Segundo Chung, Hui e Lam (2006), em países onde o sistema de rotulagem já está consolidado, um aspecto importante a ser observado é o consumo relativo de energia dos edifícios, de acordo com suas diferentes tipologias.

Uma das ferramentas utilizadas para avaliar o consumo relativo de um edifício é o *benchmarking* que, segundo Khoshbakht, Gou e Dupre (2018), indica um ponto de referência e um limite para avaliar o desempenho do edifício em relação a uma métrica, ou seja, um indicador de desempenho. Segundo os autores, o *benchmarking* de edifícios energeticamente eficientes pode ser considerado um caminho inicial para a promoção do uso eficiente de energia, a partir da avaliação do desempenho dos edifícios existentes. Os indicadores, como o *Energy Use Intensity* (EUI) (em português, Intensidade de Uso de Energia) em kWh/m²/ano, fornecem informações que tornam os usuários, proprietários, equipe de gerenciamento ou os responsáveis pelo pagamento das contas de serviços públicos cientes do desempenho no uso de energia. Os resultados de um *benchmark* podem ser utilizados para encorajar os responsáveis por edifícios com baixa performance a adotar medidas de otimização, auxiliando no gerenciamento do uso de energia (CHUNG, 2011 e KHOSHBAKHT; GOU; DUPRE, 2018). Chung (2011) delimita dois tipos de sistemas de *benchmarking*: os públicos e os internos, a depender se o sistema resultante poderá ser utilizado publicamente ou não.

Em relação às tipologias de edificações, considera-se que os edifícios dos *campi* universitários são espaços com significativo potencial de contribuição em prol do desenvolvimento sustentável, devido à função social das universidades de capacitar os futuros tomadores de decisão da sociedade (MOHAMMADALIZADEHKORDE; WEAVER, 2018). Quando se aborda o consumo de energia em edificações universitárias, tem-se que a partir da implementação de mudanças na envoltória, no comportamento do usuário e nas definições de temperatura interna (*set-points*), Chung e Rhee (2014) identificaram potencial de economia de energia de 6% a 30% em edifícios universitários existentes da China. Com a adoção de ações de eficiência energética nos sistemas de iluminação, Delvaeye *et al.* (2016) constataram economia de energia anual entre 18% e 46% em três salas de aula existentes na Bélgica, enquanto Kaminska e Ozadowicz (2018) verificaram a redução de consumo de iluminação artificial de 28% em edifícios de escritórios e 24% em edifícios educacionais existentes na Polônia. Estes estudos demonstram que estas edificações possuem significativo potencial de melhoria em eficiência energética.

Internacionalmente, ações foram tomadas no sentido de tornar as universidades em exemplos de práticas sustentáveis, com, por exemplo, a construção de espaços mais adaptados ao clima, adequação de espaços existentes, além de estímulos para mudanças de hábitos dos usuários. Algumas dessas ações resultaram na formação de organizações como a instituição internacional AASHE - *Advancement of Sustainability in Higher Education* (AASHE, 2019) e a Rede Universitária de Programas de Educação Ambiental – RUPEA de Universidades Brasileiras (RUPEA, 2019); além da assinatura da Declaração para Instituições do Ensino Superior no encontro Rio + 20 em 2012, na qual instituições de diversas partes do mundo se comprometeram a incorporar questões de sustentabilidade no ensino, pesquisa e em suas próprias gestões e espaços físicos (UNGC, 2019).

Outro aspecto que reforça a importância de estudos acerca da eficiência energética em edifícios educacionais é a necessidade de redução dos custos de operação, desafio presente no gerenciamento das universidades, principalmente no âmbito público nacional, por ocasiões comuns de contingenciamento orçamentário (DOU, 2019; PODER360, 2022). Os custos com energia assumem uma das maiores parcelas na operação e manutenção das instalações ao longo da vida útil dos edifícios (LEE; AUGENBROE, 2007). Assim, o entendimento das características de uso de energia e

o desenvolvimento de um sistema de *benchmarking* podem contribuir para as questões financeiras relacionadas aos custos de manutenção e operação destes espaços.

Segundo Allab *et al.* (2017), na Europa, edifícios universitários costumam ser grandes consumidores de energia e possuir baixos níveis de qualidade ambiental interna. Singh *et al.* (2019), em revisão sobre o conforto térmico em edificações educacionais a partir de trabalhos internacionais, constataram que os estudantes se sentem frequentemente desconfortáveis, mais comumente por calor. Trabalhos nacionais que abordaram o conforto térmico em ambientes educacionais também apontaram situações de desconforto térmico nesses ambientes, principalmente quando ventilados naturalmente (KRÜGER; ZANNIN, 2004; BUONOCORE *et al.*, 2020). Por sua vez, a falta de ambientes termicamente adequados gera interferência na saúde e na produtividade dos ocupantes, como mostra as pesquisas de Siqueira *et al.* (2017), Carvalho *et al.* (2018) e Piil *et al.* (2020).

Por fim, sabe-se também que as características arquitetônicas dos espaços afetam as suas condições ambientais internas e o uso de energia. Trabalhos internacionais como os de Rezaee *et al.* (2018), Luca, Dogan e Kurnitski (2018) e Zhang e Algenbroe (2018) e nacionais, como os de Bre *et al.* (2016), Silva, Almeida e Ghisi (2016), Veloso, Souza e Koury (2017) e Alves *et al.* (2017), abordam as relações entre características arquitetônicas e o consumo de energia. Veloso, Souza e Koury (2016) destacam a relevância da consideração do tipo de condicionamento de ar para a análise de *benchmarking* energético de edifícios de Belo Horizonte e recomendam que, em climas amenos, a ventilação natural seja uma estratégia amplamente explorada.

Diferentes autores indicam que o conforto térmico deve ser analisado ao avaliar a eficiência energética de edifícios existentes (MEIER; OLOFSSON; LAMBERTS, 2002; BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014 e GNECCO *et al.*, 2022). No entanto, até o momento, não foram observados trabalhos de *benchmarking* com foco em edifícios existentes ventilados naturalmente que, tendo em vista importância da qualidade do ambiente interno para a saúde e produtividade dos ocupantes, considerassem também o conforto térmico nos espaços internos.

1.1 Problema

O estado da arte revela uma lacuna no que se refere ao desenvolvimento de sistemas de *benchmarking* energético de edifícios existentes que considere o conforto térmico dos espaços internos, aspecto relevante, principalmente, para aqueles edifícios que utilizam a ventilação natural. Ainda, no Brasil, o *benchmarking* de edifícios universitários foi pouco explorado, sendo esta uma tipologia que carece de maiores investigações. Portanto, o presente trabalho se insere na necessidade do desenvolvimento de métodos de *benchmarking* energético adequados para edifícios com amplo uso da ventilação natural, de modo que o mesmo seja adequado às particularidades climáticas e arquitetônicas do grupo de edifícios estudado.

Tendo em vista: a) o impacto do conforto térmico na saúde e na produtividade dos ocupantes, b) o impacto social dos edifícios universitários e c) o impacto que a redução do consumo de energia pode gerar na otimização da gestão de recursos; o presente trabalho foi delineado de acordo com a seguinte pergunta:

- *Como desenvolver um benchmarking energético que considere a complexidade de edifícios universitários com amplo uso da ventilação natural e que incorpore aspectos relacionados ao conforto térmico de ambientes internos?*

A pergunta de pesquisa se desdobra em outros questionamentos, como:

- *Qual a relação entre aspectos arquitetônicos e o consumo de energia de edifícios complexos como os de universidades?*
- *Qual a relação entre aspectos arquitetônicos e o conforto térmico de ambientes internos de universidades?*

Partiu-se da premissa de que edifícios com modos de condicionamento de ar distintos gerariam situações de conforto térmico também distintos. Por isso, a pesquisa apresentou foco em edifícios de universidades que apresentassem maior uso da ventilação natural. De acordo com a experiência da pesquisadora e do grupo de pesquisa, também se partiu da premissa de que instituições públicas e privadas apresentariam modos de condicionamento de ar predominantes diferentes, sendo as primeiras mais adeptas à ventilação natural e as segundas com maior adoção de sistemas de condicionamento artificial. No entanto, tendo em vista a lacuna de

literatura para embasar tal premissa, a contextualização acerca dos modos de condicionamento de ar nas instituições de ensino superior públicas e privadas e a experiência térmica gerada nestes espaços foi investigada por meio da aplicação de questionários.

O presente trabalho se justifica pela integração da análise do conforto térmico de ambientes internos ao *benchmarking* energético de edifícios ventilados prioritariamente de modo natural. A literatura indica que as condições de conforto térmico devem ser analisadas ao avaliar a eficiência energética de edifícios existentes, porém este é um desafio ainda não abordado pelas pesquisas de *benchmarking*, principalmente no que tange à tipologia de edifícios de ensino superior.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema de *benchmarking* interno para edifícios universitários prioritariamente ventilados naturalmente, que considere o consumo de energia elétrica e o conforto térmico, utilizando como estudo de caso as edificações da Universidade Federal de Minas Gerais.

1.2.2 Objetivos específicos

- ❖ Levantar por meio de questionário a percepção de usuários em relação ao conforto térmico em edifícios de uso universitário no Brasil;
- ❖ Levantar por meio de questionário os modos de condicionamento de ar presentes em edifícios de uso universitário no Brasil;
- ❖ Calcular a intensidade de uso de energia (EUI) média dos prédios da UFMG em Belo Horizonte;
- ❖ Desenvolver arquétipos de salas de aula e calcular o Percentual de Horas Ocupadas em Conforto Térmico (PHOC) e Graus Hora de Calor¹ (GHC) destes espaços, a partir de simulações computacionais paramétricas;

¹ O presente trabalho utiliza o termo Graus Hora de Calor (GHC) para a mesma métrica citada na literatura como Graus Hora de Resfriamento. Isto foi feito porque no caso do presente estudo, não se pretende inserir equipamentos de ar-condicionado para resfriar os ambientes quando os mesmos apresentam temperaturas acima da faixa limite. Assim, entende-se que o ambiente não seria resfriado, mas sim os ocupantes sentiriam calor. Por isso, a métrica é referenciada como GHC.

- ❖ Desenvolver equação preditiva para o EUI, para o PHOC e para o GHC, a partir da base de dados de intensidade de consumo de energia e dos resultados das simulações paramétricas;
- ❖ Construir *benchmarking* para as métricas de EUI médio e de conforto térmico médio de maneira que seja possível visualizar as classificações de forma integrada.

1.3. Estudo de caso

A UFMG é uma instituição pública de ensino superior fundada em 1927, localizada na região Sudeste, a mais industrializada do Brasil, e possui três *campi*: o *campus* Pampulha, o *campus* Saúde (ambos em Belo Horizonte), e o *campus* Montes Claros, além de unidades isoladas na região centro-sul de Belo Horizonte (MEC; UFMG, 2017). O *campus* Pampulha é composto por 81 prédios com uma área total de 452.617 m² e o *campus* Saúde por 20, com área construída de 110.724 m².

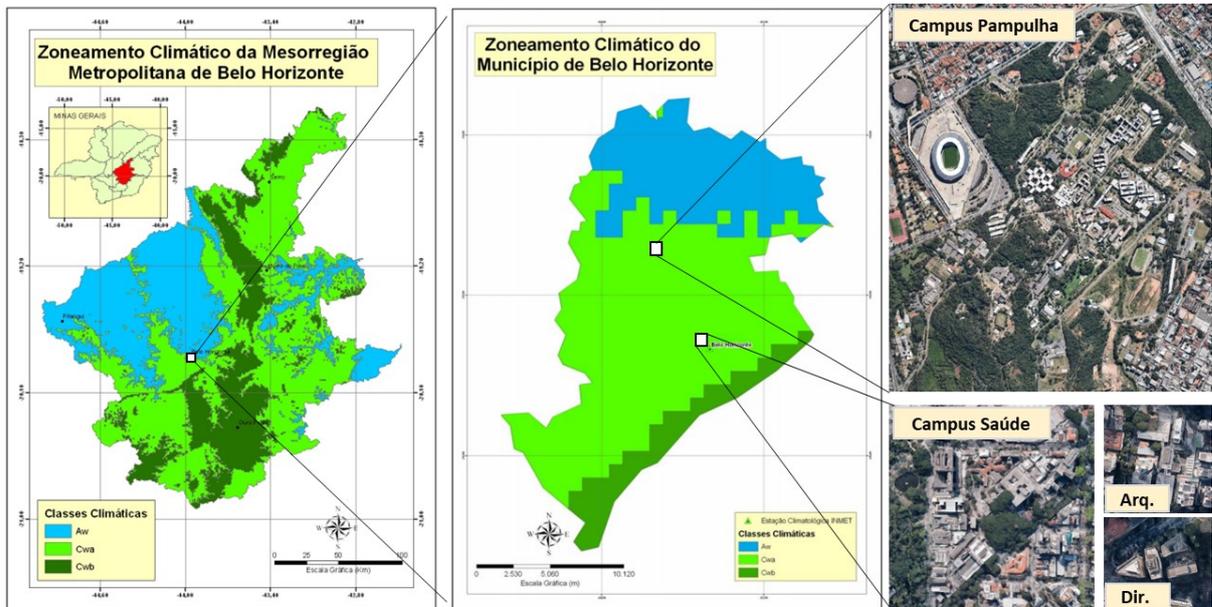
Os edifícios da UFMG em Belo Horizonte foram construídos entre 1926 e 2018, com ambientes de ensino, laboratórios, escritórios administrativos, serviços, salas de conferência, entre outros, e são condicionados de formas variadas, com ampla utilização da ventilação natural. A Universidade conta hoje com uma edificação etiquetada pelo PROCEL Edifica, a Escola de Arquitetura. No entanto, ainda não possui sistema de avaliação de consumo de energia elétrica para os edifícios em uso dos *campi* como um todo. O Departamento de Projetos da UFMG indica que há aumento da demanda por instalação de equipamentos de ar-condicionado na universidade, porém, por questões orçamentárias, a Universidade adotou a diretriz de não fazer instalações cuja única justificativa seja necessidade de aumento de conforto térmico (DP - Comunicação Pessoal, 2022).

Por sua escala e pluralidade de atividades, considerou-se que o uso dos *campi* da UFMG na cidade de Belo Horizonte seria pertinente para as análises a serem desenvolvidas no presente trabalho, o que foi verificado a partir da análise exploratória das características de edificações universitárias em diferentes regiões do Brasil.

O clima de Belo Horizonte é classificado como tropical de altitude, sendo caracterizado por verão chuvoso com temperaturas elevadas e inverno seco com temperaturas amenas e pouca precipitação (ASSIS *et al.*, 2016). Segundo De Sá Júnior (2012), a

cidade apresenta 63% de sua área com classificação de Köppen Cwa (temperado com inverno seco e verão quente). As regiões onde estão localizados o *campus* Pampulha, o *campus* Saúde e as unidades isoladas possuem essa classificação (Figura 1).

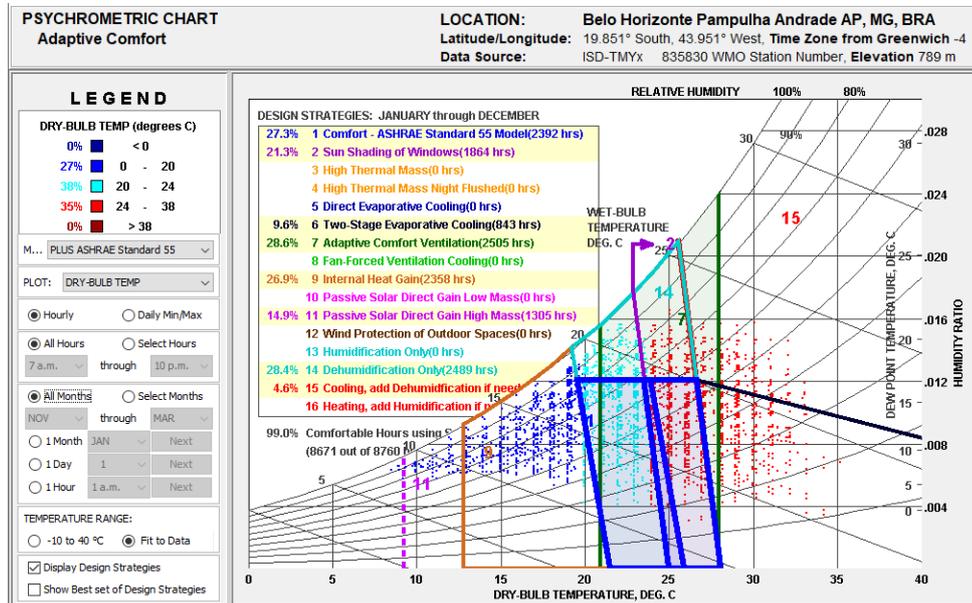
Figura 1 – Classificação climática de Belo Horizonte nas regiões de localização dos *campi* analisados



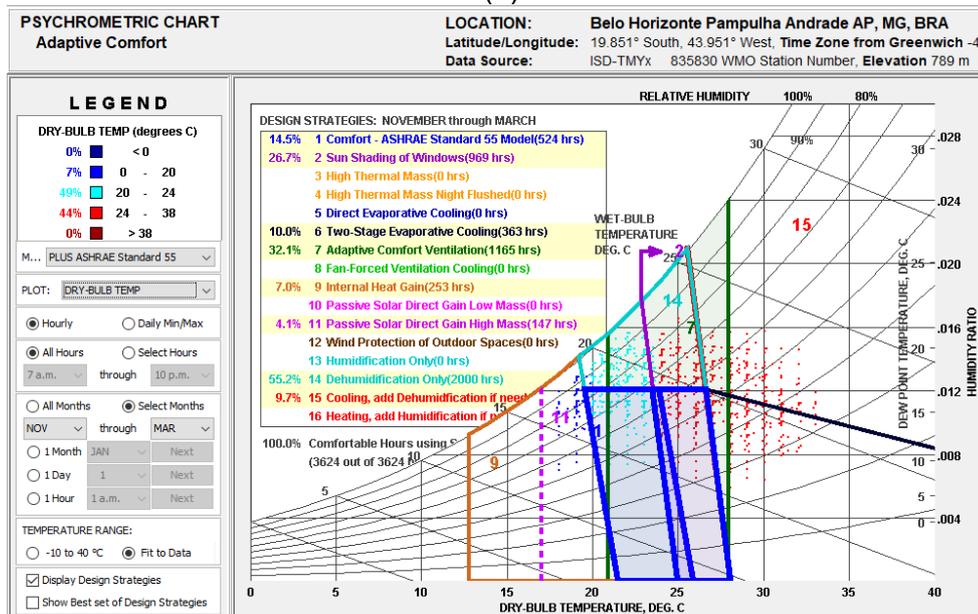
Fonte: Elaborado pela autora com base em De Sá Júnior (2009) e Google Earth.

A Figura 2 mostra a carta psicrométrica para a cidade de Belo Horizonte considerando a abordagem de conforto adaptativo da ASHRAE 55 (2017) com aceitabilidade de 90% e a Figura 3 mostra a carta solar da cidade disponibilizada por LABCON/UFMG (2022). Percebe-se que nos meses de novembro a março o percentual de temperaturas entre 24 e 38°C aumenta de 35 para 44% em relação ao período do ano inteiro (Figura 2).

Figura 2 – Carta psicrométrica com dados horários de temperatura de bulbo seco de Belo Horizonte para: (a) todo o ano e para (b) os meses de novembro a março

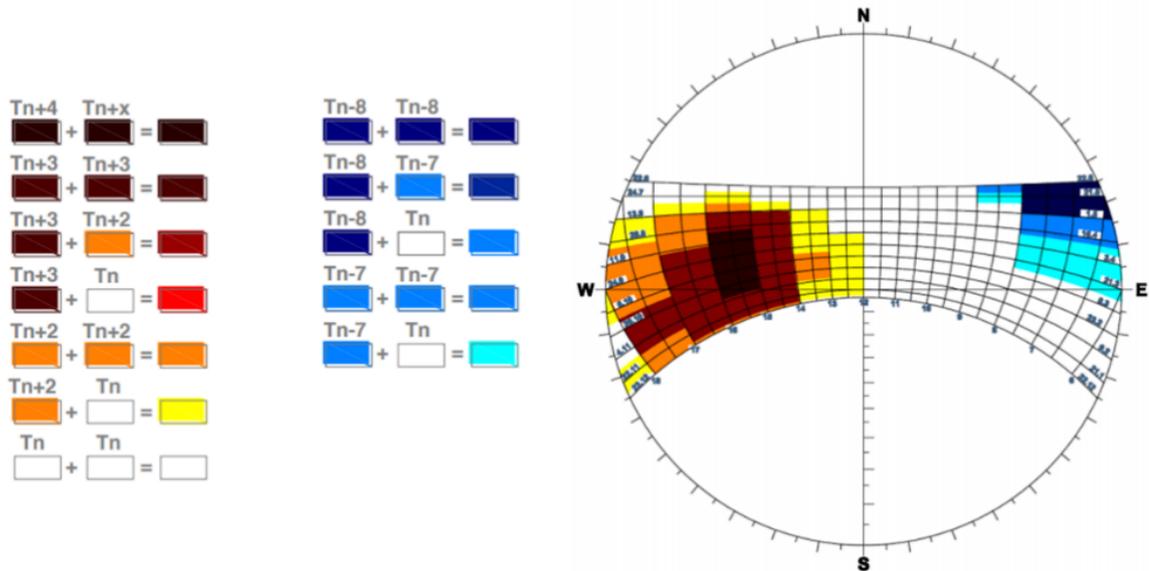


(b)



Fonte: Elaborado pela autora com base em arquivo climático TMYx (2004-2008) (CLIMATE ONE BUILDING, 2022), 2022.

Figura 3 – Carta solar para a cidade de Belo Horizonte com escala de cores referentes às Temperaturas Neutras



Fonte: Anexo I do RTQ-R (BRASIL, 2012).

1.4. Originalidade e estrutura do trabalho

Percebe-se, na literatura, a existência de sistemas de *benchmarking* de edificações em uso que, conforme Khoshbakht, Gou e Dupre (2018), utilizam a métrica EUI para a realização das avaliações de consumo relativo de energia das edificações. Há também trabalhos que avaliam o conforto térmico em ambientes educacionais, como os de Singh *et al.* (2019). O sistema de *benchmarking* desenvolvido Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) (CBCS; ELETROBRÁS; PROCEL, 2021), que inclui a tipologia de universidades, considera a métrica EUI porém não incorpora análises referentes ao conforto térmico. O ineditismo deste trabalho está associado à abordagem interdisciplinar a partir do desenvolvimento de um sistema de *benchmarking* de *campi* universitários que associe as avaliações de consumo de energia elétrica e de conforto térmico, considerando nas avaliações aspectos arquitetônicos dos espaços analisados.

A relevância do trabalho está associada ao potencial de contribuição da metodologia proposta para o melhor gerenciamento de recursos das instituições de ensino superior, tendo em vista que o conhecimento a respeito da utilização de energia e do conforto térmico de seus espaços possibilita uma tomada de decisões mais direcionada para medidas de melhoria na infraestrutura das instituições. Em edifícios

educacionais, tais melhorias podem ser válidas para a economia de recursos que poderiam ser investidos para fins educacionais, ou mesmo para a melhoria do ambiente de ensino e aprendizagem, favorecendo assim a qualidade das atividades desenvolvidas.

O trabalho também contribui com a criação de base de dados sobre o consumo de energia elétrica e a situação de conforto térmico de instituição de educação superior brasileira pública, que pode auxiliar no desenvolvimento de estudos para outras universidades do país. Por fim, o método de integração das análises de consumo de energia e conforto térmico desenvolvido na presente pesquisa pode ser utilizado para compor políticas de *benchmarking* de outras tipologias de edifícios.

Esta tese foi dividida em seis capítulos. O Capítulo 1 – Introdução, discorre sobre a contextualização do problema, objetivos, objeto de estudo e relevância do trabalho. O Capítulo 2 – Revisão bibliográfica, apresenta o referencial teórico utilizado para o desenvolvimento da pesquisa, trazendo dois principais eixos: *benchmarking* energético e conforto térmico em ambientes internos. O Capítulo 3 – Metodologia, apresenta os procedimentos metodológicos propostos. O Capítulo 4 apresenta os resultados, o Capítulo 5 apresenta as discussões, limitações do trabalho e sugestões para estudos futuros. O Capítulo 6 apresenta as conclusões. Por fim, são apresentadas as referências utilizadas para a elaboração deste documento, os apêndices e anexos. Arquivos complementares foram disponibilizados de modo eletrônico em Garcia (2022).

2. REVISÃO DE LITERATURA

Inicialmente, para a contextualização do problema e identificação da lacuna quanto ao desenvolvimento de *benchmarking* para edifícios universitários, foi realizada uma revisão bibliográfica sistemática sobre a produção internacional e nacional acerca do tema Eficiência Energética em Edifícios de *Campi* Universitários. Esta etapa da pesquisa pode ser vista no Apêndice A.

A análise bibliométrica identificou haver uma lacuna no que se refere ao *benchmarking* energético de universidades no Brasil. Ressaltou-se ainda que estes instrumentos devem estar adaptados para edifícios condicionados de modo natural ou misto².

2.1 *Benchmarking* de consumo de energia em edificações

Nos anos 1970, empresas utilizaram termo *benchmark* para desenvolver ferramentas de comparação de parâmetros de produção. A partir dos anos 1990, o termo passou a ser utilizado na comparação do consumo de energia de edifícios similares (PÉREZ-LOMBARD *et al.*, 2009). Segundo Sharp (1996), o *benchmarking* é uma ferramenta para analisar o potencial de economia de energia de um edifício sem que seja necessário realizar uma análise rigorosa individual, a partir da comparação com edifícios similares. “‘Observar’ que um edifício consome mais energia do que 80% ou 90% dos prédios similares a ele pode ser um indicador convincente para a realização de melhorias” (SHARP, 1996, pg. 4.321, tradução nossa).

Diferentes publicações apontam que o *benchmarking* é uma ferramenta útil para governos e para o setor privado no que se refere à gestão do consumo de energia (CHUNG; HUI; LAM, 2006; PÉREZ-LOMBARD *et al.*, 2009; KHOSHBAKHT; GOU; DUPRE, 2018). Chung, Hui e Lam (2006) indicam que esta ferramenta é utilizada para o desenvolvimento de políticas públicas para o uso eficiente da energia. Pode-se utilizar *benchmarks* tanto para comparar um prédio com um conjunto de prédios similares, quanto para comparar o mesmo conjunto de edifícios ao longo do tempo (HONG *et al.* 2013).

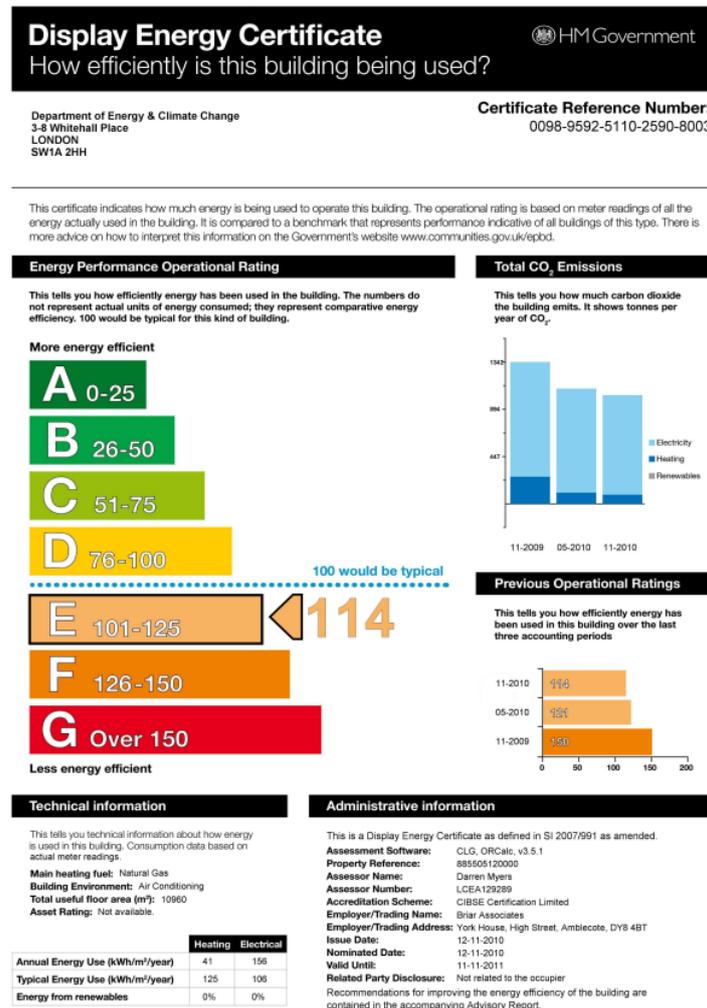
² De acordo com Gokarakonda, Van Treeck e Rawal (2019), há duas classificações de edifícios condicionados de modo misto: os *zoned* (zoneados) e os *complementary* (complementares). No primeiro, o uso do ar-condicionado é feito em alguns ambientes do prédio e, no segundo, sua utilização ocorre em todos os ambientes, porém de maneira periódica.

Os sistemas de *benchmarking* trazem transparência sobre o uso da energia em edificações (BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014). Através do processo de *benchmarking* pode-se realizar a comparação dos indivíduos de mesma tipologia entre si e desenvolver faixas de classificação. Por serem baseados em dados medidos, os *benchmarkings* seriam mais condizentes com o real desempenho dos edifícios do que sistemas de classificação elaborados com base em simulações (BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014).

Neste sentido, Borgstein e Lamberts (2014) destacam o sistema de *benchmarking Energy Star*, que classifica edifícios comerciais em uso. A divulgação pública das classificações do *Energy Star* tornou-se obrigatória para grandes edifícios comerciais em Nova York e outras cidades. Na Europa, a diretiva *European Energy Performance of Buildings* determina que seja feita a classificação sobre o uso de energia de edifícios em operação. Esta diretiva foi adotada de forma diferente pelos países europeus. No Reino Unido, o *benchmarking* ganhou destaque a partir de uma política mandatória na qual prédios públicos com área construída acima de 500 m² e frequentados pelo público geral passaram a ser obrigados a produzir e exibir a *Display Energy Certificate* (Figura 4). Uma informação central nesta etiqueta é a *Energy Performance Operational Rating*, uma classificação realizada a partir da comparação da proporção do uso de energia medida do edifício (considerando sua emissão de CO₂) com a do *benchmark* que representa o desempenho típico de prédios similares em uso (DCLG, 2008; HONG *et al.*, 2013; BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014).

No que se refere aos procedimentos para o desenvolvimento do *benchmarking*, estudos indicam que anteriormente à análise comparativa, seja definido o indicador a ser considerado (CHUNG; HUI; LAM, 2006; PÉREZ-LOMBARD *et al.*, 2009). Os indicadores possibilitam a comparação com referências existentes em relação à média (valor típico) e/ou aos indivíduos com melhores desempenhos (PÉREZ-LOMBARD *et al.*, 2009). Assim, pode-se encorajar indivíduos com baixo desempenho a seguirem melhores práticas de um edifício de referência (CHUNG, 2011).

Figura 4 - Imagem da etiqueta de uso de energia para edifícios em operação - *Display Energy Certificate* (Reino Unido).



Fonte: DECC (2011).

No âmbito do consumo de energia em edificações, o indicador EUI (*Energy Use Intensity*), que normaliza o consumo de energia por área (em kWh/m²) é reconhecido como o mais utilizado (KHOSHBAKHT; GOU; DUPRE, 2018). Este índice tem sido empregado ao longo dos anos, desde a década de 1990 com estudos como o de Sharp (1996), que desenvolveu um sistema de *benchmarking* para edifícios comerciais dos Estados Unidos, sendo precursor do sistema *Energy Star* (CHUNG; HUI; LAM, 2006); a estudos recentes como o de Veloso, Souza e Santos (2020) que desenvolveram *benchmarks* para torres de escritórios em Belo Horizonte, Brasil. Outra métrica menos comum também utilizada na literatura como expressão da EUI é a divisão do consumo de energia por ocupantes em kWh/ocupante ou kWh/estudante, no caso de edifícios educacionais (GERALDI; GHISI, 2022a).

Apesar de o EUI ser um indicador consolidado na literatura, Chung, Hui e Lam (2006) apontam para limitações do seu uso individual na prática do *benchmarking*. Os autores afirmam que este índice pode ser impactado por características dos edifícios e seus sistemas, como os equipamentos de ar-condicionado. Devido a isto, pesquisas usualmente incorporam o desenvolvimento de regressões multilíneas para correlacionar características importantes ao EUI dos edifícios (SAHRP, 1996; CHUNG; HUI; LAM, 2006; BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014; VELOSO; SOUZA; SANTOS, 2020). Há estudos que utilizaram outros métodos de predição, como as redes neurais artificiais (HONG *et al.*, 2013; GERALDI; GHISI, 2022).

Segundo Chung, Hui e Lam (2006), os procedimentos para a realização do *benchmarking* são: a) coleta de dados, b) normalização do EUI pela condição climática dos edifícios, c) desenvolvimento do modelo de regressão para identificação das relações entre o EUI e fatores significativos da edificação, e d) desenvolvimento de uma escala, ou seja, um conjunto de percentis estimados a partir da distribuição do indicador. Já Pérez-Lombard *et al.* (2009) caracterizam o processo de *benchmarking* em quatro etapas: 1) desenvolvimento de uma base de dados com informações sobre o consumo de energia de um conjunto de prédios, 2) coleta de dados sobre o uso de energia do indivíduo (prédio) a ser analisado em relação ao cenário, 3) realização da análise comparativa frente ao conjunto da base de dados, e 4) estabelecimento de recomendações de medidas para a redução do consumo de energia. Os primeiros autores incorporam a predição como parte do procedimento para desenvolvimento de um *benchmarking*, enquanto os últimos não. Assim, entende-se que a predição não é essencial ao *benchmarking*, mas, por identificar fatores influentes, é válida para a identificação de recomendações de melhoria.

Em relação às análises comparativas, o *benchmarking* pode envolver a classificação de edifícios. Como exemplo, a classificação utilizada pelo *Display Energy Certificate* do Reino Unido (Figura 4) considera níveis que variam de A a G, (mais eficiente para menos eficiente) com base na comparação com um valor de referência. Este tipo de classificação está de acordo com as recomendações da ISO 52003-1:2017 (ISO, 2017). No Brasil, apesar de ainda não haver etiqueta para classificação de eficiência energética referente operação dos edifícios, os regulamentos para etiquetagem existentes também os classificam em níveis que variam de A a E (mais a menos eficientes) (BRASIL, 2021).

Chung (2011) classifica os sistemas de *benchmarking* em duas categorias: sistemas internos ou sistemas públicos. A categoria irá depender da possibilidade, ou não, de o sistema ser utilizável pelo público geral, ou ser utilizado internamente por uma organização. Já Hong *et al.* (2013) agruparam as abordagens de desenvolvimento de *benchmarking* de acordo com a granularidade dos dados utilizados, nomeando os métodos *top-down* e *bottom-up*. O próximo tópico do capítulo apresentará estas abordagens.

2.1.1 Abordagens *top-down* e *bottom-up* para desenvolvimento de sistemas de *benchmarking*

As abordagens *top-down* e *bottom-up* para o desenvolvimento de sistemas de *benchmarking* são agrupamentos definidos por Hong *et al.* (2013) e Burman *et al.* (2014). Sua definição tem sido adotada em trabalhos recentes como o de Alves *et al.* (2017), o de Wong *et al.* (2019) e o de Geraldi e Ghisi (2022a). Um sistema *top-down* é aquele elaborado a partir de dados gerais sobre o sistema analisado, sem que se tenha informações sobre os subsistemas envolvidos. Ele pode ser posteriormente refinado à medida que haja informações disponíveis sobre os subsistemas. Uma abordagem *bottom-up* é aquela na qual há informações sobre os subsistemas, que possibilitam a construção de uma visão geral a partir da união das partes (HONG *et al.*, 2013).

No que tange ao *benchmarking* energético de edifícios, há diferentes métodos que se enquadram na categoria *top-down*. O primeiro deles compara diretamente os valores de EUI dos prédios. Os percentis de distribuição são empregados para definir os *benchmarks*, ou seja, os valores de referência. No caso do Reino Unido, o percentil 50 indica o desempenho típico, enquanto o percentil 25 é o limite indicativo de “boas práticas” (HONG *et al.*, 2013). Outro método possível é o uso de ferramentas de predição para identificar características determinantes para o uso de energia do edifício, como as regressões multilíneas. Neste caso, os dados utilizados referem-se às variáveis que influenciam no consumo de energia, como os percentuais de aberturas das fachadas (PAFs) e o azimute (HONG *et al.*, 2013).

A abordagem *top-down* favorece o entendimento do consumo de energia de um edifício em relação ao contexto de edifícios similares. O incentivo para a melhoria vem da pressão pela comparação com os pares. Uma limitação desta abordagem é que a

comparação de EUI, neste caso, não traz informações úteis aos gestores sobre se o edifício está consumindo energia de maneira eficiente ou não. Isto se dá por conta da alta granularidade das informações, que não trazem dados sobre os subsistemas. Assim, a comparação com esta abordagem indica prédios com maiores ou menores intensidades do uso de energia, mas não trazem informações sobre sua eficiência (HONG *et al.*, 2013).

Já na abordagem *bottom-up*, o *benchmarking* do edifício se dá com base na análise teórica do edifício, com base em características específicas. O desempenho teórico é obtido a partir de um modelo representativo do edifício. Portanto, o sucesso do método depende da acurácia do modelo desenvolvido. Os dois métodos de abordagem *bottom-up* apresentados por Burman *et al.* (2014) foram a modelagem termo energética (*building physics*) e a agregação de usos finais, a partir da aplicação em escolas do Reino Unido. Ambos podem ser utilizados para desenvolvimento de *benchmarks* e podem auxiliar na identificação de medidas de melhoria (BURMAN *et al.*, 2014).

A modelagem termo energética estima o uso de energia a partir de equações matemáticas que relacionam propriedades térmicas como as características da envoltória, a permeabilidade ao ar, a densidade de potência instalada de equipamentos, dentre outros ou de motores de cálculo aplicados em ferramentas computacionais (BURMAN *et al.*, 2014). Federspiel, Zhang e Arens (2002) desenvolveram uma série de equações matemáticas que envolviam propriedades térmicas para prever a EUI de edifícios de laboratórios nos Estados Unidos. Os autores desenvolveram um *benchmark* que representaria o consumo de um edifício de laboratório idealmente eficiente e desenvolveram um indicador para comparação entre os edifícios e o *benchmark*, representativo da eficiência dos edifícios da amostra. Este índice consistiu na divisão entre o consumo de energia do *benchmark* pelo consumo medido da edificação.

O maior desafio na utilização deste método consta na calibração do modelo, para que a EUI estimada seja próxima ao dado medido. Burman *et al.* (2014) apontam que as diferenças entre resultados simulados e dados medidos têm relação com o alto nível de incerteza de algumas variáveis envolvidas na simulação, como os padrões de utilização e a densidade de ocupação. A partir das simulações, pode-se desenvolver um modelo base (*baseline*) com características típicas, a partir do qual pode-se

comparar os demais edifícios (BURMAN *et al.*, 2014). Neste sentido, Alves *et al.* (2017) desenvolveram modelos representativos de torres de escritórios para Belo Horizonte com características típicas e, a partir de simulações computacionais, calcularam *baselines* de EUI para cada modelo. A partir disto, foram discutidas possíveis medidas de melhoria para a redução do consumo energético do estoque de edifícios (ALVES *et al.*, 2017). Os *baselines* desenvolvidos podem ser considerados como *benchmarks* para a comparação de edifícios de escritórios em Belo Horizonte.

Já o método da agregação dos usos finais, como indica o nome, consiste no cálculo do consumo de energia de todos os usos finais e, a partir de sua agregação, chega-se consumo final do edifício (BURMAN *et al.*, 2014). Os autores afirmam que este seria o procedimento mais preciso para prever o desempenho energético de um edifício específico. As estimativas por uso final podem ser obtidas a partir de auditorias e comparados com dados medidos ou diretamente a partir de medidores de consumo por uso final. Assim, este método pode ser utilizado para desenvolver sistemas de *benchmarking* no nível dos subsistemas (BURMAN *et al.*, 2014). Ding *et al.* (2018), por exemplo, desenvolveram *benchmarks* separados para o consumo de energia dos sistemas de iluminação, de equipamentos e condicionamento de ar para universidades na China.

Como principais vantagens do método *bottom-up*, Burman *et al.* (2014) enfatizam que o método baseado nos modelos termo energéticos seria o único a considerar em detalhe características físicas do edifício, como seus materiais e usos. Em relação ao método da agregação de usos finais, aponta-se como vantagens o auxílio na separação dos diferentes fatores que contribuem para o consumo de energia, a facilidade de entendimento e o fato de ser uma boa ferramenta para o diagnóstico energético por uso final de uma edificação específica. Como limitações, os métodos *bottom-up* têm a necessidade de obtenção de dados detalhados e de qualidade, processo que pode ser dispendioso (HONG *et al.*, 2013). No caso da agregação dos usos finais, tem-se também a limitação de não considerar fatores físicos como os materiais de construção utilizados (BURMAN *et al.*, 2014).

Burman *et al.* (2014) afirmam que uma possível combinação dos métodos *top-down* e *bottom-up* seria a comparação estatística simples do EUI de um edifício com seus pares (*top-down*) e a utilização de métodos *bottom-up* para comparar o desempenho energético operacional do prédio com os *benchmarks* referentes ao seu próprio

desempenho teórico, que pode considerar o prédio como um todo ou os seus subsistemas. Os modelos teóricos dos métodos *bottom-up* podem se basear em condições esperadas, como no estudo de Ding *et al.* (2018), ou em padrões pré-estabelecidos e sujeitos a limites de eficiência energética (BURMAN *et al.*, 2014).

Em suma, os métodos de *benchmark top-down* são mais adequados para comparar o uso de energia de um prédio em relação a um conjunto de prédios similares, enquanto os métodos *bottom-up* são indicados para referenciar o quão eficiente é o uso de energia no edifício (BURMAN *et al.*, 2014).

2.1.2 Principais métodos matemáticos para desenvolvimento de sistemas de *benchmarking*

Chung (2011) realizou uma revisão de literatura e identificou os principais métodos matemáticos utilizados pela comunidade científica para o desenvolvimento de sistemas de *benchmarking*. Estes são descritos a seguir.

O **Método de normalização simples** consiste na consideração de índices que levam em conta unicamente a relação entre duas variáveis, como o uso da energia e a área construída do edifício (EUI, kWh/m²). A partir deste índice, é elaborada uma tabela de *benchmarking* (ou tabela de referência), para a comparação dos edifícios. Correções relacionadas ao clima podem ser feitas quando o sistema for utilizado por edifícios em diferentes regiões climáticas. Apesar de ser um método simples e pouco dispendioso em termos de custo, pode-se considerar que uma de suas limitações é o fato de não considerar fatores que influenciam no consumo energético de diferentes edificações (CHUNG, 2011).

Outro método citado por Chung (2011) é o do **Mínimo quadrado ordinário (OLS), ou regressão linear**. A partir do OLS, é possível considerar o impacto de variáveis relacionadas ao edifício (como idade, número de pavimentos etc.) no consumo de energia. Aplica-se este método para estimar os coeficientes das variáveis explicativas do modelo de regressão, sendo o EUI a variável dependente. Elabora-se uma equação de regressão, que representa um nível de eficiência energética médio. Segundo Chung (2011), pode-se considerar que edifícios com EUI acima do estimado são considerados ineficientes, enquanto os que possuem EUI abaixo do estimado são considerados eficientes. A tabela de *benchmark* (ou tabela de referência) pode ser calculada a partir dos valores preditos de EUI para os indivíduos da amostra, no qual

cada EUI medido será comparado com a tabela (CHUNG, 2011). Entende-se que esta abordagem considera que as discrepâncias entre o EUI estimado e medido são decorrentes da ineficiência ou eficiência, não considerando possíveis limitações do modelo.

Caso o modelo contenha mais de um regressor, é chamado de modelo de regressão múltipla. A equação de um modelo de regressão múltipla pode ser escrita como $Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_p x_p + \epsilon$. O Y representa a variável dependente (EUI), β_0 o intercepto, β_i , $i=1,2,3,\dots,p$, os coeficientes de inclinação atrelados às p variáveis explicativas x_i , $i=1,2,3,\dots,p$, e ϵ representa o termo de erro. A decisão sobre quais variáveis permanecerão no modelo é feita por meio de testes de significância estatística dos coeficientes. Uma das medidas da qualidade do ajuste de um modelo de regressão linear é o coeficiente de determinação, também conhecido como R^2 . O coeficiente de determinação mede a proporção da variabilidade da variável dependente que é explicada pelas variáveis independentes presentes no modelo. Quanto mais próximo de 1 é o valor R^2 , melhor será considerado o modelo ajustado, principalmente para fins de predição.

Chung, Hui, Lam (2006), afirmam que a definição de uma equação preditiva final de *benchmarking* envolve uma decisão relacionada ao objetivo de uso: se o uso pretendido será feito por especialistas, como arquitetos e engenheiros, ou outros usuários, como os proprietários das edificações. Tal definição impacta na opção de escolha por um modelo preditor mais preciso matematicamente (mais variáveis significativas), ou por um modelo que pode ser interpretado de forma mais simples (menos variáveis significativas), com menos precisão do que o primeiro.

Chung (2011) cita outros métodos como o **Mínimo quadrado ordinário corrigido (COLS)**, a **Fronteira de Análise Estocástica (SFA)** e a **Análise de Envelopamento de Dados (DEA)**. Nos três casos a eficiência dos prédios é determinada pela distância em relação à fronteira. O COLS é um método no qual a linha de regressão OLS é movida para baixo, de forma que nenhum ponto se posicione abaixo da mesma. Todos os resíduos, ou seja, as distâncias entre os pontos observados até seu valor predito pela equação de regressão, são consideradas medidas de ineficiência (CHUNG, 2011). O SFA utiliza a linha de regressão OLS adicionada a uma fórmula para determinar a natureza estocástica da mesma, alterando o seu intercepto (CHUNG,

2011; KHOSHBAKHT; GOU; DUPRE, 2018). No DEA a fronteira é determinada a partir do conjunto dos casos mais eficientes (CHUNG, 2011; SILVA; SANT ANA; LOURENÇO, 2019).

Outros métodos são citados por Chung (2011), como o das **simulações** e as **Redes Neurais Artificiais (RNAs)**. O método das simulações consiste na utilização de modelos computacionais com base em dados de entrada realísticos para simular, avaliar e comparar o consumo energético anual e estratégias de controles de sistemas em um edifício (CHUNG, 2011). Este método foi utilizado por Borgstein e Lamberts (2016) para desenvolver o *benchmarking* de agências bancárias no Brasil. As RNAs são métodos relacionados ao aprendizado de máquinas que são utilizadas para aprender relações complexas e não lineares entre *inputs* e *outputs* de uma base de dados (CHUNG, 2011; HONG *et al.*, 2013). Apesar de sua alta capacidade de predição, este modelo não retorna os coeficientes de influência das variáveis independentes em relação à variável dependente. Hong *et al.* (2013) utilizaram as RNAs e, para compreender a contribuição de cada variável independente no resultado, foi realizado um posterior estudo de sensibilidade com variações individuais de cada variável e identificação do percentual de alteração da variável saída.

Chung (2011) apresenta uma relação de trabalhos que desenvolveram sistemas de *benchmarking* do consumo de energia elétrica em edificações não residenciais e o método utilizado por cada um deles. Dentre vinte e três trabalhos citados (de 1982 a 2010), verificou-se que o método mais utilizado foi o OLS (regressão linear), correspondendo a 52% dos trabalhos, incluindo um trabalho brasileiro de Signor, Westphal e Lamberts (2001). O Quadro 1 traz uma relação de trabalhos de *benchmarking* energético de edifícios não residenciais posteriores ao levantamento de Chung (2011) e seus respectivos métodos matemáticos. Observa-se que a regressão linear permanece um método popular na produção científica levantada.

Tendo em vista a vasta utilização do método de regressão linear múltipla para a análise de consumo de energia elétrica em edifícios, optou-se por trabalhar com este método na presente tese.

Quadro 1 - Relação de artigos científicos de *benchmarking* energético em edifícios e seu método matemático.

Ano	Autores	Método matemático	País
2006	Chung, Hui e Lam	Regressão linear múltipla	Hong Kong
2013	Hong <i>et al.</i>	Redes Neurais Artificiais	Reino Unido
2014	Borgstein e Lamberts	Regressão linear e simulação	Brasil
2015	Sekki, Airaksinen e Miimu	Regressão linear	Finlândia
2016	Wang	Regressão linear múltipla	Taiwan
2018	Ding <i>et al.</i>	Regressão linear múltipla	China
2018	Khoshbakht, Gou e Dupre	Fronteira de Análise Estocástica	Austrália
2019	Silva, Sant Ana e Lourenço	Análise de Envolvimento de Dados	Brasil
2019	Wong <i>et al.</i>	Regressão linear múltipla	Brasil
2021	Li e Chen	Regressão linear múltipla	Canadá
2021	Veiga <i>et al.</i>	Redes Neurais Artificiais	Brasil
2022	Gnecco <i>et al.</i>	Regressão linear múltipla	Brasil
2022a	Geraldi e Ghisi	Redes Neurais Artificiais	Brasil

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Entre os trabalhos citados no Quadro 1, nota-se que publicações recentes têm sido produzidas no Brasil acerca do *benchmarking* energético de edifícios. O cenário nacional referente a este assunto será abordado mais à frente no presente trabalho.

2.1.3 *Benchmarking* energético de edifícios: contexto brasileiro

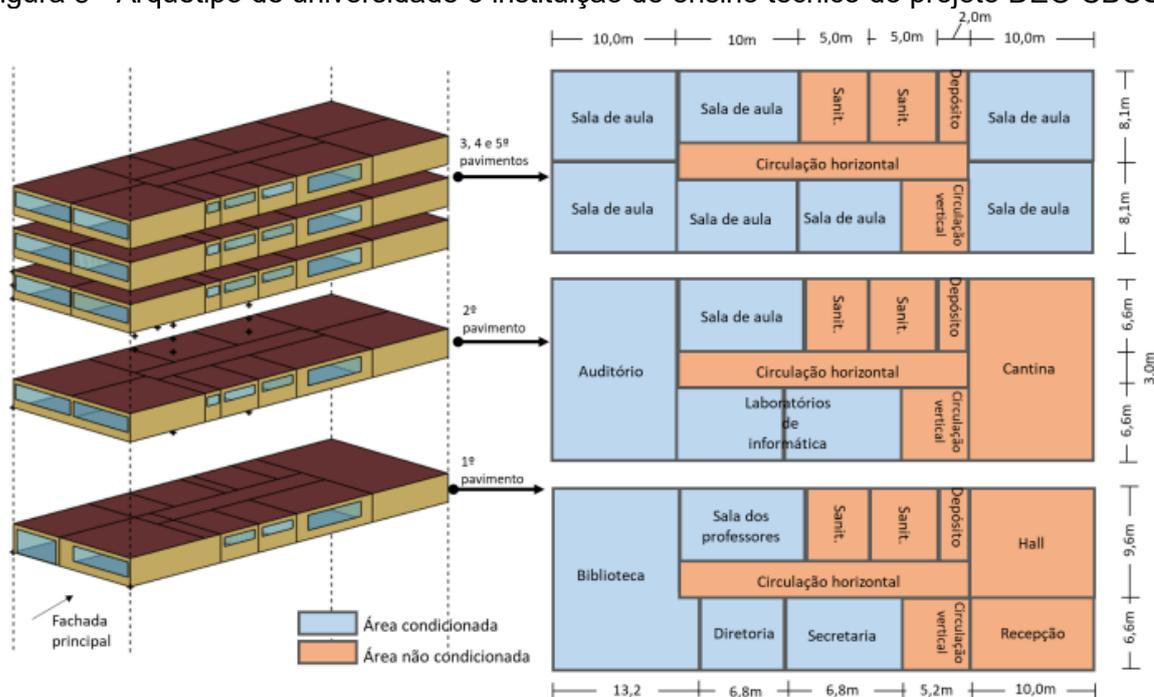
No Brasil, o primeiro movimento no sentido de estudos em escala nacional referentes ao consumo energético de edifícios em uso e suas características deu-se com o projeto “Desempenho Operacional Energético em Edificações” do Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), lançado em 2013 e desenvolvido em 2014. O estudo piloto advindo deste projeto referiu-se ao *benchmarking* de agências bancárias (BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014). Os autores utilizaram um modelo de regressão linear com base em 1890 edifícios de 57 cidades para a predição do consumo energético, considerado como *benchmark*. A única variável considerada na equação foi o Graus Horas de Resfriamento para a correção climática, atingindo R^2 de 0,13. Segundo os autores, este resultado mostra que o clima é apenas uma das variáveis que influenciam no consumo de energia das agências bancárias. Simulações termo energéticas com arquétipos foram utilizadas para a predição de consumo por usos finais (BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014).

Em 2015, foi desenvolvido o *benchmarking* de edifícios corporativos com base em uma parceria entre a Embaixada Britânica e o programa Procel. No ano seguinte, o

projeto foi estendido para cobrir edifícios administrativos públicos em escala federal e municipal, a partir do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. Em 2018, com o projeto META, administrado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), foi desenvolvida uma base de dados referente a características como densidades de instalação de iluminação e equipamentos de prédios de quinze tipologias. Em 2019, a partir da parceria entre a Eletrobrás e o comitê de energia do CBCS, foram incluídas informações do consumo de energia para as quinze tipologias (VEIGA *et al.*, 2021) incluindo edifícios universitários. Os *benchmarks* do projeto podem ser acessados por meio da plataforma *online* <https://plataformadeo.cbcs.org.br/> que podem ser acessados mediante cadastro junto ao CBCS.

Em evento *online*, foi apresentada a metodologia adotada pelo projeto de *benchmarking* energético do CBCS supracitado. Foram desenvolvidos arquétipos com base na avaliação do banco de dados da EPE e do CBCS. Foram realizadas simulações paramétricas e o desenvolvimento de equações de *benchmarking* com base em regressão multilinear. Bases de dados de parceiros e auditorias energéticas de alguns prédios foram utilizadas para a validação das equações desenvolvidas³ (CBCS; ELETROBRÁS; PROCEL, 2021). A Figura 5 mostra o arquétipo desenvolvido para representar edifícios universitários e de instituições de ensino técnico.

Figura 5 - Arquétipo de universidade e instituição de ensino técnico do projeto DEO CBCS



³ O presente trabalho contribuiu com dados de consumo energético dos prédios da UFMG.

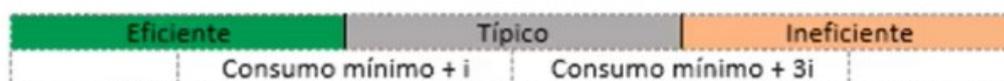
Observa-se na Figura 5 que o arquétipo considera prédio de cinco andares com área de circulação central e salas de aula condicionadas artificialmente. Na capacitação *online* oferecida pela organização (CBCS, 2021), citou-se que o arquétipo desenvolvido tendeu a representar mais instituições privadas do que públicas. Também foi citado que um arquétipo separado referente a um bloco de gabinetes de professores foi desenvolvido – espaços estes mais presentes em instituições públicas. Portanto, para a realização do *benchmarking*, há uma equação para o edifício e outra equação para os gabinetes de professores (CBCS, 2021).

No caso dos edifícios de universidades, os dados de entrada necessários para a plataforma brasileira são: estado, cidade, área de salas de aula, área de salas com computadores, demais áreas da universidade, tipo de sistema de condicionamento de ar (ventilador, VRF ou *split*), renovação de ar (não tem ou de acordo com nível 2 da NBR 16401-3), densidade de potência de iluminação, turno (noite, manhã e noite ou manhã, tarde e noite) e densidade de alunos em sala de aula. Como limitação da equação é citado que não são considerados os ambientes de laboratórios específicos nem cargas de tomada de equipamentos de cozinha, refeitórios, centros esportivos e central de processamento de dados (CBCS; PROCEL; INMETRO, 2021a). Para os edifícios de gabinetes de professores, as variáveis de entrada são: estado, cidade, área total, tipo de sistema de condicionamento de ar, DPI de iluminação, turno e sombreamento (com brise ou sem brise) (CBCS; PROCEL; INMETRO, 2021b).

Os níveis de classificação dos prédios no sistema de *benchmarking* foram: ineficiente, típico e eficiente, conforme mostra a Figura 6.

Figura 6 - Fórmula para a classificação no benchmarking do CBCS.

$$i = \frac{\text{consumo máximo da edificação} - \text{consumo mínimo da edificação}}{5}$$



Fonte: CBCS, ELETROBRÁS, PROCEL (2021).

Parte da metodologia desenvolvida no projeto do CBCS é apresentada em Veiga *et al.* (2021), com a descrição da aplicação do aprendizado de máquinas (*Support Vector Machine*) para estimação da intensidade de consumo energético de agências bancárias a nível nacional. O estudo diz agregar técnicas mais sofisticadas para modelo de *benchmarking* descrito em Borgstein e Lamberts (2014). Foram utilizados

arquétipos para a simulação de 48.000 cenários utilizando o EnergyPlus. Para a elaboração dos arquétipos, diversas fontes de levantamento de dados foram utilizadas, incluindo as bases de dados do CBCS e análises fotográficas via *Google Earth* e *Google Street View*. Os Graus Hora de Resfriamento foram considerados como variável indicativa do clima (VEIGA *et al.*, 2021).

Paralelamente aos projetos do CBCS citados anteriormente, pesquisadores têm desenvolvido trabalhos recentes referentes ao tema. Veiga *et al.* (2021) afirmam que o Brasil ainda se encontra atrás de países como Estados Unidos e Índia no que se refere a políticas públicas para o incentivo de práticas sustentáveis em edifícios. O país ainda não possui uma política de abertura de dados de consumo energético do estoque de edificações. Assim, a obtenção de dados é considerada a principal dificuldade para o desenvolvimento de sistemas de *benchmarking* no contexto brasileiro (VEIGA *et al.*, 2021; VELOSO; SOUZA; SANTOS, 2020). Gnecco *et al.* (2022) afirmam que o investimento em *benchmarking* energético no país ainda é inicial e carece de maiores aportes.

A partir de pesquisa na base de dados Scopus realizada em junho de 2022, foram elencados os trabalhos brasileiros relacionados ao *benchmarking* energético de edifícios publicados em periódicos internacionais, sem restrição de data. As palavras-chave utilizadas para a busca foram: "*benchmark**" AND "*building*" AND "*energy*" a serem identificadas em títulos, resumos ou palavras-chave. Aplicou-se o filtro para limitar aos trabalhos ao *Country/territory Brazil*. Com estes critérios de busca, foram encontrados 30 trabalhos. Os títulos e resumos dos artigos foram analisados e aqueles que não apresentavam relação com o tema do *benchmarking* energético de edifícios foram excluídos da relação. Ao final, foram elencados 11 trabalhos, de 2014 a 2022. Considera-se que o resultado reforça o entendimento de que o tema ainda se encontra em estágio de desenvolvimento inicial no país. No entanto, percebe-se interesse crescente por parte de organizações e da comunidade científica brasileira, tendo em vista que a maior parte dos trabalhos identificados foram publicados nos últimos dois anos. O Quadro 2 traz a relação dos trabalhos e suas principais contribuições.

Quadro 2 - Principais produções científicas brasileiras sobre *benchmarking* energético de edificações (continua)

Ano	Autores	Tipologia	Principais contribuições
2014	Borgstein e Lamberts	Agências bancárias	<ul style="list-style-type: none"> • Proposição de método de <i>benchmarking</i> a partir da simulação computacional e de regressão linear múltipla. • Uso de dados medidos para construção de base de dados e identificação do consumo energético mediano, que serve de base para a comparação simples da amostra (<i>benchmarking</i> simples). • Dados medidos basearam o desenvolvimento dos arquétipos, calibrado para representar seu consumo mediano. Simulações termo energéticas feitas no <i>software</i> EnergyPlus para a estimativa do consumo por uso final. • Consideram a análise do conforto térmico importante para o <i>benchmarking</i> energético, mas não o abordam no estudo. O conforto térmico é considerado com condição básica a partir do uso de ar-condicionado, presente nos edifícios analisados.
2016	Borgstein, Lamberts e Hensen	-	<ul style="list-style-type: none"> • Apresentam revisão de literatura sobre avaliação energética de edifícios não residenciais agrupados em: cálculos de engenharia, simulações, métodos estatísticos, aprendizado de máquinas e outros. • Indicam que métodos que analisem o conforto ambiental junto à questão energética devem ser desenvolvidos.
2017	Alves <i>et al.</i>	Escritórios	<ul style="list-style-type: none"> • Apresenta metodologia para o desenvolvimento de arquétipos para estimar <i>baselines</i> (valores de referência) do consumo de energia (EUI) de um estoque de edifícios em escala municipal, a partir da análise de parâmetros urbanísticos e visitas <i>in loco</i>. • Estimativa do consumo atual e análise de possíveis medidas de redução de consumo energético do estoque de prédios de escritórios de Belo Horizonte. EUIs de 90 e 83 kWh/m²/ano foram estimados para prédios construídos entre 1940-1970 e 1980-1990, respectivamente. Prédios construídos após anos 2000 tiveram previsão de 93 kWh/m²/ano para prédios condicionados de modo misto e 142 kWh/m²/ano para aqueles com ar-condicionado central. • <i>Insights</i> para a redução do consumo energético envolveram a substituição de lâmpadas, atualização de sistemas de ar-condicionado e o uso mais intenso de estratégias de resfriamento passivo, como a ventilação natural.

Quadro 2 (continuação) - Principais produções científicas brasileiras sobre *benchmarking* energético de edificações (continua)

Ano	Autores	Tipologia	Principais contribuições
2017	Bezerra <i>et al.</i>	Salas de aula universitárias	<ul style="list-style-type: none"> • Apresenta <i>benchmarking</i> energético a partir do método DEA (<i>Data Envelopment Analysis</i>) de ambientes internos a partir da análise da iluminação artificial e sistema de condicionamento artificial de ar. O resultado é comparado à classificação de acordo com o RTQ-C. • Ambos os modelos DEA e a classificação de acordo com o regulamento brasileiro indicaram que as salas analisadas seriam ineficientes. • O modelo DEA indica possibilidade de redução de consumo de aproximadamente 43% e 23% nos sistemas de iluminação artificial e de condicionamento de ar, respectivamente.
2019	Wong <i>et al.</i>	Agências bancárias	<ul style="list-style-type: none"> • Utilização da abordagem <i>bottom-up</i>. • Identificação de fatores influentes no consumo energético dos edifícios analisados. • Classificação dos tipos de edifícios em quatro categorias, de acordo com sua implantação (dentro de edifícios comerciais, terraço, semi isolados ou isolados no terreno).
2020	Wong <i>et al.</i>	Agências bancárias	<ul style="list-style-type: none"> • Análise de 11 edifícios com o método <i>bottom-up</i> e classificação destes de acordo com os regulamentos RTQ-C e INI-C. Comparação das classificações com consumo real dos edifícios obtidos em estudo de benchmarking energético. • Indica-se que INI-C apresenta diferenças entre o consumo estimado e o real devido a diferentes razões, inclusive os valores de referência utilizados no método para edifícios comerciais. • São propostos parâmetros de referência específicos para agências bancárias para a melhoria da acurácia do modelo representativo. • São apontadas vantagens e fragilidades do método INI-C. Conclui-se que o sistema INI-C necessita de melhorias em termos de método de cálculo que valores de referência devem ser especificados não somente para agências bancárias, mas para as diferentes tipologias de edifícios.
2021	Veloso, Souza e Santos	Torres de escritórios	<ul style="list-style-type: none"> • Desenvolvimento de <i>benchmarking</i> energético baseado em dados medidos de 127 edifícios em Belo Horizonte, a partir da análise das contas de energia e das características dos edifícios. • Foram propostas classificações diferenciadas pelos tipos de condicionamento de ar. • Uma escala logarítmica de cinco níveis (A a E) foi proposta, na qual cada nível representava 20% da amostra (percentis). • Recomendação pelo uso da ventilação natural para escritórios em climas amenos como o de Belo Horizonte. • A acessibilidade aos dados foi tida como uma considerável dificuldade para a realização de estudos de <i>benchmarking</i> no Brasil.

Quadro 2 (finalização) - Principais produções científicas brasileiras sobre *benchmarking* energético de edificações

Ano	Autores	Tipologia	Principais contribuições
2021	Geraldi <i>et al.</i>	Escolas	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliação do impacto da forma em <i>benchmarking</i> energético de método <i>bottom-up</i>. Investigação com uso de sete geometrias para modelos de referência, com elaboração de equações de regressão. • Ao comparar dados reais aos obtidos com diferentes modelos de referência, os resultados do <i>benchmarking</i> energético são significativamente alterados. • Conclui-se que a forma exerce impacto sobre o resultado de <i>benchmarking</i> energético. A cidade e a área condicionada artificialmente também são citadas como variáveis relevantes.
2022a	Geraldi e Ghisi	Escolas	<ul style="list-style-type: none"> • Usa método <i>bottom-up</i> para o desenvolvimento de <i>benchmarking</i> energético com base na utilização de arquétipos e aprendizado de máquinas (Redes Neurais Artificiais). • Simulações foram utilizadas para determinar o consumo de energia por uso final. O algoritmo <i>k-means</i> foi utilizado para a Clusterização. • O <i>benchmarking</i> consistiu em comparar o consumo total e por uso final previsto com o valor típico (médio) da amostra (EUI medido maior ou menor do que o valor típico, <i>benchmark</i>).
2022b	Geraldi e Ghisi	Escolas	<ul style="list-style-type: none"> • Propõe um método para integrar a satisfação térmica em <i>benchmarking</i> energético. Utilização de método probabilístico que integra consumo de energia, aspectos climáticos, sistema de condicionamento e satisfação térmica. • Concluem que <i>machine learning</i> pode ser utilizado para integrar aspectos subjetivos ao <i>benchmarking</i> energético.
2022	Gnecco <i>et al.</i>	Creches	<ul style="list-style-type: none"> • Um <i>benchmarking</i> local foi proposto e comparado ao sistema nacional do CBCS. Não foram encontradas diferenças significativas entre os dois sistemas. • Sugere-se que sistemas de <i>benchmarking</i> locais sejam utilizados para análises mais detalhadas, onde haja aspectos singulares como características construtivas ou clima. • Indica as condições de conforto do usuário como questão para investigações futuras.

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Observa-se, com o Quadro 2, a utilização de arquétipos em diferentes trabalhos para superar os desafios relacionados à falta de dados medidos disponíveis no país. Diferentes autores citaram a dificuldade de obtenção de dados reais como entrave para o desenvolvimento de políticas de *benchmarking* no Brasil. Do ponto de vista metodológico, o uso de regressões multilíneas é observado, mas recentemente também se nota a adoção de métodos computacionais como o aprendizado de máquinas e a clusterização.

Alguns trabalhos citaram a importância da referência ao desempenho ambiental junto à análise energética (BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014; BORGSTEIN; LAMBERTS; HANSEN, 2016; GNECCO *et al.*, 2022) sendo que Geraldi e Ghisi (2022b) fizeram uma proposta de método para incorporar a satisfação térmica ao *benchmarking* energético. O trabalho se baseou em base de dados acerca da sensação térmica de usuários de escolas e incorporou esta variável em um índice unificado. Este índice, desenvolvido com o método probabilístico *Bayesian Network*, representa a probabilidade de o edifício ser classificado em cinco classes, de A a E. As classificações representam a interpretação de um especialista em relação à análise integrada de diferentes variáveis como nível de satisfação térmica, uso de energia, horas de operação, ocupação, clima etc. (GERALDI; GHISI, 2022b).

Entre as tipologias estudadas nas publicações internacionais há maior presença de agências bancárias, seguido por prédios de escolas e escritórios, como pôde ser visto no Quadro 2. Assim, observa-se uma lacuna no que se refere a estudos de *benchmarking* para a tipologia de edifícios universitários. A próxima seção do trabalho irá abordar estudos referentes a esta tipologia.

2.2. Breve contexto sobre o ensino superior e o contexto brasileiro

O investimento em Instituições de Ensino Superior (IES) pode afetar positivamente o desenvolvimento econômico de um país pela formação de capital humano de alta escolaridade (CHEN; HSIAO, 2020). A expansão das IES tem sido observada em diferentes países nos últimos anos, como China, Irã e Brasil (FEREIDOUNI; ROUHANI, 2019; INEP; MEC, 2019; CHEN; HSIAO, 2020). A proporção de matrículas de alunos é uma das métricas utilizadas para se referir à expansão das IES.

Na China, a taxa bruta de matrícula subiu de 4% para 16% da população na última década. A rápida expansão trouxe desafios como a necessidade de adequação de instalações físicas precárias já que foi identificado que investimento em infraestrutura adequada é necessário para garantir o sucesso dos alunos (CHEN; HSIAO, 2020).

No Brasil, a estrutura das IES vem se expandindo desde 1960 com estruturas multi *campi*. Esse crescimento tem sido mais expressivo desde 2007, com a introdução do Programa de Apoio aos Planos de Reestruturação e Expansão das Universidades Federais, o REUNI (SILVA; NETO; LIRA, 2020). De 2008 até 2018, o número de alunos matriculados em IES brasileiros apresentou um crescimento de aproximadamente 45%, com média de 4% ao ano (INEP; MEC, 2019). No entanto, com população de mais de 211 milhões de pessoas (IBGE, 2020), a proporção bruta de matrículas brasileira em 2018 ainda era de aproximadamente 4% da população. Entende-se que, apesar do aumento observado nas IES brasileiras, ainda há potencial para maior expansão no índice de matrículas populacionais, o que poderá refletir na necessidade de expansão da infraestrutura.

Existem dois principais sistemas educacionais no Brasil: o público e o privado. De acordo com o Censo da Educação Superior (INEP; MEC, 2019), o número de IES no país em 2018 era de 2.537, com um total aproximado de 8,4 milhões de alunos matriculados e 385 mil professores. Desse total, as Universidades (54% públicas e 46% privadas) incorporaram 53% dos alunos matriculados. Outros tipos de instituições incluem Centros Universitários, Faculdades e Institutos Federais.

De acordo com o Balanço Nacional de Energia, BEN (EPE, 2020), a maior parte do consumo de energia por fonte é proveniente de energia elétrica (18%) e, em 2019, os setores comercial, residencial e público foram responsáveis por 52% do consumo total de energia elétrica. Os edifícios das IES participam de dois dos grupos citados (públicos e comerciais), mas não há informações disponíveis específicas sobre o uso energético dessa tipologia dos edifícios.

2.3. Eficiência energética e *benchmarking* energético de edifícios de ensino superior

Segundo Khoshbakht, Gou e Dupre (2018), os edifícios de instituições de ensino superior exercem importante papel para a criação de um futuro sustentável, por isso percebe-se crescente interesse no desenvolvimento de medidas em prol da sustentabilidade destes espaços, o que inclui sua eficiência energética. “De fato, as universidades podem servir como modelos e estudos de caso para programas e práticas que poderiam ser escalonados ao nível de um assentamento urbano inteiro, como um bairro (...) ou até mesmo um município” (MOHAMMADALIZADEHKORDE; WEAVER, 2018, p. 4, tradução nossa). Internacionalmente, muitas universidades têm trabalhado em temas relacionados ao desenvolvimento sustentável, o que inclui a avaliação de seu consumo de energia (MA; LU; WENG, 2015).

Wong *et al.* (2019) em estudo relativos a edificações de ensino, afirmam que, por conta da vasta quantidade do estoque de edifícios com diferentes níveis de complexidade, estes edifícios devem ser agrupados de acordo com diferentes categorias. Os estudos a apresentados a seguir mostram os tipos de categorias encontrados para a separação destes edifícios. Wang (2016) mostrou que o consumo de energia de edificações universitárias era de 3 a 4,9 vezes maior do que o de escolas de Taiwan, por conta de maiores períodos de utilização e maior carga instalada de equipamentos. Allab *et al.* (2017), reforçam que as análises de consumo de energia para edifícios educacionais devem ser feitas de forma separada para cada nível de formação.

Chung e Rhee (2014) analisaram o consumo de energia de onze edifícios de uma universidade em Seul, Coréia do Sul, de clima Dwa⁴ de acordo com a classificação de Köppen e Geiger. Os prédios analisados eram condicionados artificialmente e foram construídos entre 1961 e 2011, com área total entre 3,5 a 40 mil m². Foi identificado EUI médio de 223 kWh/m²/ano considerando todo o *campus*. O menor EUI observado foi de 106 kWh/m²/ano, referente a um ginásio com escritórios, enquanto o maior foi 399 kWh/m²/ano, referente a um centro de TI. Considerando prédios de salas de aula, o EUI médio foi de 151 kWh/m²/ano. Estes abrigavam ensinamentos gerais e ciências sociais. Nos prédios onde indicou-se atividades de pesquisa e salas de aula, o EUI médio foi de 273 kWh/m²/ano. Estes abrigavam cursos das engenharias e saúde.

⁴ Clima continental úmido de verão quente influenciado pelas monções

Khoshbakht, Gou e Dupre (2018) apresentaram revisão de literatura sobre o consumo energético de edifícios de IES. Observou-se variação de 79 a 739 kWh/m²/ano entre os edifícios analisados, todos de climas subtropicais úmidos nos EUA, Coreia do Sul, China, Taiwan, Japão e Austrália. Não foi informado o tipo de condicionamento de ar dos edifícios. O maior consumo de energia foi de uma universidade norte-americana e o menor foi de Taiwan. O período considerado para as análises variou de 1 a 4 anos. A análise de 80 prédios do *campus* de uma universidade da Austrália em clima Cfa⁵ revelou EUI médio de 170 kWh/m²/ano considerando todo o *campus*. O EUI médio considerando apenas os prédios de ensino foi de 145 kWh/m²/ano, enquanto para prédios de pesquisa, foi de 379 kWh/m²/ano (KHOSHBAKHT; GOU; DUPRE, 2018).

O Quadro 3 traz um resumo de trabalhos internacionais referentes ao consumo de energia em universidades e os valores de EUI médios encontrados. Os EUI médios variaram de 72 a 389 kWh/m²/ano. É possível observar que os trabalhos que apontam maior consumo se referem a locais de climas frios e países desenvolvidos economicamente. Os menores EUI foram encontrados em Taiwan, China e Malásia, países em desenvolvimento, em locais de clima mais quente. O tamanho da amostra de prédios analisados variou de 11 a 80 prédios.

Quadro 3 - Artigos internacionais sobre consumo de energia em edifícios universitários

Fonte	País	Clima Köppen (KOTTEK et al., 2006)	Cond. de ar	Amostra	EUI médio (kWh/m ² /ano)
Wang (2016)	Taiwan	Cwa, Cfa, Cwb, Am e Aw (tropicais e temperados)	CA	51	72
Sekki, Airaksinen e Saari (2015)	Finlândia	Dfb (continental úmido com verão fresco)	CA	13	229
Li e Chen (2021)	Canada	Dfc (subártico sem estação seca)	CA	24	389
Ding et al. (2018)	China	Cfa (subtropical úmido)	CA	18	91
Khoshbakht, Gou e Dupre (2018)	Australia	Cfa (subtropical úmido)	CA	80	170
Shukri, Jailani e Hauashdh (2022)	Malásia	Af (equatorial)	N/A	13	108
Chung e Rhee (2014)	Coréia do Sul	Dwa (continental úmido com verão quente)	CA	11	223

CA: Condicionamento artificial (aquecimento ou refrigeração), N/A: Não informado.

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

⁵ Clima subtropical úmido, com verão quente.

Edifícios universitários podem compreender diferentes usos e complexidades dentro de *campi*. Pesquisas buscam analisar o consumo de energia, identificar os fatores influentes e métodos de desenvolvimento de *benchmarking* para este tipo de edifícios.

O tipo de uso dos espaços foi citado por diferentes pesquisas. Sartor *et al.* (2000) identificaram que prédios de laboratórios podem consumir de 4 a 100 vezes mais por área do que edifícios comerciais convencionais. Federspiel, Zhang e Arens (2002) indicaram que o EUI de laboratórios podem ser de 4 a 5 vezes superior do que outros prédios. Os autores verificaram que o modelo para *benchmarking* das edificações universitárias na Califórnia se tornou mais preciso a partir da separação dos edifícios que possuíam laboratórios dos que não possuíam. Khoshbakht, Gou e Dupre (2018) confirmam o impacto dos laboratórios no consumo como consideravelmente maior do que outras atividades como ensino, gabinetes e administração. Tal fato se justifica devido ao uso intenso de equipamentos e de sistemas condicionamento artificial (FEDERSPIEL; ZHANG; ARENS, 2002; KHOSHBAKHT; GOU; DUPRE, 2018).

Em uma universidade, mesmo em um só prédio, é possível que haja diferentes usos dos espaços, como salas de aula, espaços de pesquisa, salas administrativas etc. (WANG, 2016). Ding *et al.* (2018) denominaram estes prédios de complexos, e realizaram análise energética de 13 prédios de *campus* da China considerando a variedade de usos internos: percentual de áreas públicas, percentual de áreas de laboratórios e percentual de escritórios de pesquisa. Li e Chen (2021) realizaram *benchmarking* interno de IES canadenses considerando variáveis do percentual de tipo de espaços na equação de regressão multilinear. Foram utilizadas quatro classificações: laboratórios, serviços escolares (salas de aula, escritórios), serviços públicos (bibliotecas, circulação, áreas de encontro social, cantinas, lojas e sanitários) e outros (áreas técnicas, depósitos, vestiários etc.). O R^2 atingido considerando apenas estas variáveis foi de 89,62% (LI; CHEN, 2021).

Em relação aos sistemas de *benchmarking* propostos para esta tipologia, destaca-se o trabalho de Ding *et al.* (2018). Tendo em vista a complexidade de diferentes usos internos dos edifícios, os autores propuseram uma abordagem *bottom-up*, com classificação separada em 3 usos finais dos edifícios: iluminação, ar-condicionado e equipamentos. Esta análise foi realizada a partir dos dados de medidores por uso final nos edifícios. A classificação proposta foi feita em dois níveis, onde o primeiro classifica o consumo energético total dos prédios de A a E de acordo com o EUI

atingido. O segundo nível classifica os subsistemas em + ou -, a depender se o consumo dos subsistemas atingiu valor maior ou menor do que a mediana, o *benchmark* estabelecido. Assim, considerando os três usos finais supracitados, de modo ilustrativo, a classificação final de um prédio pode ser representada como A+++ ou B+-. As Figuras 7 a 9 ilustram o sistema de *benchmarking* proposto por Ding *et al.* (2018).

Figura 7 - Sistema de classificação de EUI total proposto por Ding *et al.* (2018).

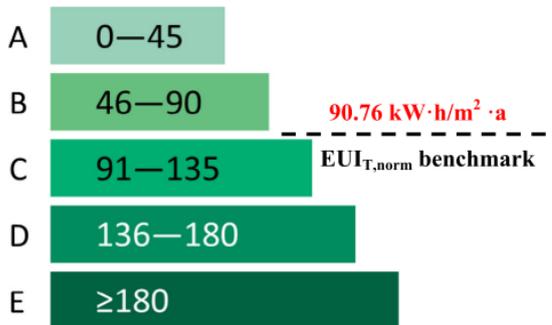


Figura 8 - Sistema de classificação de EUI para consumo de iluminação artificial proposto por Ding *et al.* (2018).

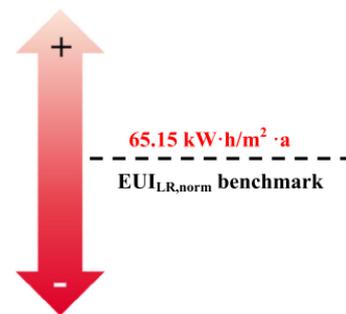


Figura 9 - Tabela de *benchmarking* final proposta por Ding *et al.* (2018).

Number of studied building	First grade index	Second indices			Rating grade
		EUI _{T,norm}	EUI _{LR,norm}	EUI _{AC,norm}	
1	A	+	+	+	A+++
2	B	+	-	+	B+--+
3	B	+	+	+	B+++
4	B	+	-	+	B+--+
5	B	+	-	-	B+---
6	B	+	+	-	B++-
7	B	+	+	-	B++-
8	B	+	+	+	B+++
9	C	-	+	-	C-+-
10	C	-	+	-	C-+-
11	D	-	+	-	D-+-
12	D	-	+	-	D-+-
13	E	-	-	+	E---+

Fonte: Ding *et al.* (2018).

Em seu estudo de *benchmarking* interno de 24 edifícios universitários canadenses, Li e Chen (2021) não propuseram uma classificação de A a E, mas sim um *ranking*, onde as edificações foram listadas na ordem, de mais a menos eficiente. O *ranking* proposto baseou-se nos resíduos da equação de regressão. Ou seja, se a diferença entre o EUI

medido de um edifício em relação ao EUI previsto pela equação fosse negativa, entendia-se que esta diferença era causada pela eficiência do prédio. Pelo contrário, se a diferença fosse positiva, considerava-se que este excedente se devia à ineficiência do prédio. Quanto maior o resíduo negativo, mais eficiente o prédio, e quanto maior o resíduo positivo, menos eficiente. Este método gerou um *ranking* diferente do que a comparação de EUI (LI; CHEN,2021) (Figura 10).

Figura 10 - *Ranking* proposto por Li e Chen (2021) com base nos resíduos

	Measured EUI (GJ/m ²)	Regression EUI_{build} (GJ/m ²)	Residuals (GJ/m ²)
Building 21	0.91	1.75	-0.84
Building 19	0.74	1.40	-0.66
Building 9	0.90	1.55	-0.65
Building 10	1.14	1.63	-0.49
Building 16	0.85	1.31	-0.46
Building 12	0.76	1.17	-0.41
Building 2	1.47	1.85	-0.38
Building 4	1.17	1.54	-0.37
Building 7	1.27	1.61	-0.34
Building 17	0.96	1.29	-0.33
Building 20	1.75	1.88	-0.13
Building 13	1.10	1.21	-0.11
Building 18	1.39	1.47	-0.08
Building 24	1.40	1.40	0.00
Building 23	1.38	1.34	0.04
Building 8	1.46	1.40	0.06
Building 14	1.95	1.64	0.31
Building 6	2.09	1.65	0.44
Building 1	2.02	1.48	0.54
Building 3	2.39	1.83	0.56
Building 15	2.42	1.72	0.70
Building 5	1.99	1.28	0.71
Building 22	2.11	1.35	0.76
Building 11	2.61	1.49	1.12

Fonte: Li e Chen (2021).

Vasta literatura internacional indica os sistemas condicionamento artificial como responsáveis por importante parcela do consumo de energia dos edifícios, inclusive na tipologia dos edifícios de IES (SANTAMOURIS *et al.*, 1994; CHUNG; HUI; LAM, 2016; PRITONI *et al.*, 2017; DING *et al.* 2018; WONG *et al.*, 2019; VELOSO; SOUZA; SANTOS, 2020). Nos Estados Unidos, o uso destes sistemas representou mais de 40% do uso total de energia de edifícios IES e, em laboratórios, excede 60% do consumo total de energia (PRITONI *et al.*, 2017). Ding *et al.* (2018) utilizaram o consumo anual de sistemas de condicionamento de ar como indicador para o *benchmarking* de energia, que foi dividido por tipos de terminais, como sistemas de unidades *split*, VRV e *Fancoil* (DING *et al.*, 2018).

Além do tipo de uso do edifício e seus espaços internos, e do uso de ar-condicionado, outras variáveis são identificadas por trabalhos científicos como influentes no consumo de energia. O

Quadro 4 mostra algumas variáveis nos estudos de *benchmarking* energético de edificações em uso e as referências que as abordaram.

Quadro 4 - Variáveis consideradas em estudos de *benchmarking* energético de edificações em uso

Variáveis	Autores
Geometria (área, volume, altura, número de pavimentos, etc.)	Wong <i>et al.</i> (2019), Chung, Hui, Lam (2006), Khoshbakht, Gou e Dupre (2018)*, Sharp (1998)*
Clima	Wong <i>et al.</i> (2019), Chung, Hui, Lam (2006), Monts e Blissett (1982)*
Tipo de uso do edifício	Wong <i>et al.</i> (2019), Khoshbakht, Gou e Dupre (2018)*, Monts e Blissett (1982)*
Idade	Wong <i>et al.</i> (2019), Khoshbakht, Gou e Dupre (2018)*, Veloso, Souza, Koury (2017), Sekki, Airaksinen e Saari (2015)* Chung, Hui, Lam (2006),
Padrão de ocupação	Wong <i>et al.</i> (2019), Chung, Hui, Lam (2006), Khoshbakht, Gou e Dupre (2018)*, Sharp (1998)*, Monts e Blissett (1982)*, Ding <i>et al.</i> (2018)
Densidade de ocupação	Wong <i>et al.</i> (2019), Chung, Hui, Lam (2006), Khoshbakht, Gou e Dupre (2018)* e Sharp (1998)*
Propriedades térmicas da envoltória	Wong <i>et al.</i> (2019), Veloso, Souza, Koury (2017)
Comportamento do usuário	Chung, Hui, Lam (2006).
Sistema de condicionamento de ar	Wong <i>et al.</i> (2019), Ding <i>et al.</i> (2018)*, Chung, Hui, Lam (2006), Monts e Blissett (1982)*
Sistemas de iluminação artificial	Ding <i>et al.</i> (2018)*, Chung, Hui, Lam (2006)
Consumo de equipamentos	Ding <i>et al.</i> (2018)*, Sharp (1998)*
Existência de proteção solar	Wong <i>et al.</i> (2019), Veloso, Souza, Koury (2017)
Temperatura externa	Jafary <i>et al.</i> (2016)*
Disciplina acadêmica	Wang (2016)*, Khoshbakht, Gou e Dupre (2018)*
Percentual de área por tipo de uso	Ding <i>et al.</i> (2018)*, Khoshbakht, Gou e Dupre (2018)*, Sartor <i>et al.</i> (2000)*
Orientação da fachada frontal	Wong <i>et al.</i> (2019)
Percentual de abertura da fachada	Wong <i>et al.</i> (2019), Veloso, Souza, Koury (2017)
Instituição pública ou privada	Wang (2016)

*Referências que trabalharam com a tipologia de edifícios educacionais.

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Dado o impacto significativo do uso de condicionamento artificial de ar no consumo de energia, práticas comuns em relação à busca da eficiência energética de edifícios com este tipo de condicionamento envolvem, dentre outras práticas, o controle sobre os *set-points*, (AGDAS *et al.*, 2015). Apesar do uso considerável de sistemas de condicionamento artificial de ar nos *campi* dos EUA citados por Pritoni *et al.* (2017), os autores afirmaram que as condições térmicas nesses espaços eram geralmente ruins devido à má gestão dos *set-points*. Do mesmo modo, Allab *et al.* (2017) observaram que os edifícios universitários na Europa tendem a ser grandes consumidores de energia e têm baixos níveis de qualidade ambiental interna, o que inclui baixo conforto térmico.

No Brasil, Buonoccore *et al.* (2020) observaram uma tendência de *supercooling* em salas de aula equipadas com unidades *split* em um prédio de IES localizado em uma cidade de clima equatorial brasileira. Por um lado, o uso desnecessário de sistemas de condicionamento artificial do ar ou a má gestão dos *set-points* podem levar a um maior consumo de energia (ALLAB *et al.*, 2017; COSTA; FREIRE; KIPERSTOK, 2020) e, por outro lado, o baixo consumo de energia pode camuflar um ambiente térmico inadequado (MEIER; OLOFSSON; LAMBERTS, 2002; BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014). Assim, a partir dos estudos mencionados nesta seção, pode-se verificar que o conforto térmico é um aspecto importante a ser considerado na análise da eficiência energética dos edifícios, assim como afirmado por estudos de benchmarking energético anteriores (BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014; BORGSTEIN; LAMBERTS, HENSEN, 2016; GERALDI; GHISI, 2022b; GNECCO *et al.*, 2022).

O próximo item do trabalho irá abordar brevemente o contexto do cenário brasileiro no que se refere a práticas de sustentabilidade em universidades públicas.

2.3.1. Cenário no Brasil

Há diversas iniciativas em curso no Brasil ligadas ao aumento de sustentabilidade nos *campi* de universidades públicas. O programa pioneiro no sentido do gerenciamento permanente do consumo de energia elétrica dos *campi* de uma universidade pública brasileira foi o PURE-USP, da Universidade de São Paulo (USP), iniciado em 1997 (SAIDEL; DA SILVA; DO NASCIMENTO, 2014). Este programa baseou-se em um projeto de pesquisa denominado CONSERVUSP, de 1996, o qual teve como objetivo

conhecer as características de consumo de energia dos edifícios da universidade e avaliar o seu potencial de economia. Identificou-se que o consumo com iluminação artificial representava a maior parcela de consumo e que dois edifícios apresentariam potencial de redução de consumo de energia elétrica de 28,6% e 44%. O programa PURE-USP teve como objetivo disseminar as práticas na universidade, analisar e sistematizar as contas de energia, e encorajar a aquisição de equipamentos mais eficientes. Estima-se que, de 2001 a 2011, o programa tenha auxiliado na economia de aproximadamente 36 mil MWh ou 9 milhões de Reais (SAIDEL; DA SILVA; DO NASCIMENTO, 2014).

O Projeto Campus Sustentável é uma parceria entre a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e a CPFL Energia, que se iniciou em agosto de 2017, com investimento no âmbito dos programas de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) e PEE (Programa de Eficiência Energética) da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). O Projeto visa melhorar a infraestrutura do *campus* e, através do estudo e desenvolvimento de novas tecnologias, aprimorar o ensino e a pesquisa (UNICAMP, 2022).

UFMG Sustentável é uma ação institucional que visa à promoção da sustentabilidade nas ações cotidianas, que se desenvolvem tanto na esfera administrativa quanto nas práticas de ensino, pesquisa e extensão da UFMG (UFMG, 2022). Ao final de 2019, foi firmado o Projeto Oásis: um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Institucional que concentra as iniciativas de aprimoramento de gestão energética do *Campus* Pampulha. Neste sentido, ele tem como meta a implementação de novas tecnologias conjugadas com produção científica, redução de custos e sustentabilidade energética do *Campus*.

Em paralelo, foi criada dentro da PRA a Divisão de Eficiência Energética – DEFE. Vinculada ao Departamento de Gestão Ambiental, a DEFE tem como objetivos:

- Elaborar um modelo de consumo de energia elétrica para a UFMG, possibilitando simular o impacto de alterações de configuração energética e padrões de consumo;
- Elaborar e implementar mecanismos de controle de consumo;
- Estudar e propor o emprego de fontes alternativas de energia dentro da UFMG, bem como assessorar a gestão de projetos de pesquisa correlatos;

- Assessorar as unidades em suas ações de eficiência energética;
- Identificar oportunidades de redução de despesas com energia elétrica.

Ao final de 2021, havia duas usinas solares em funcionamento dentro da UFMG: uma na Escola de Engenharia, vinculada ao Laboratório Tesla, e outra na Faculdade de Medicina, alimentando a Biblioteca José Baeta Viana.

O Ministério da Educação destinou ao final de 2019 às Instituições de Ensino Superior (IFES) verbas para a instalação de energia solar fotovoltaica. O valor destinado à UFMG foi de cerca de R\$ 2,5 milhões. Este recurso é utilizado na construção de três usinas fotovoltaicas nos Centro de Atividades Didáticas (CAD) no *Campus Pampulha* com 500 kW de potência instalada no total. Com isso, os CADs tornarão autossuficientes em energia, o excedente energético será aproveitado em outras unidades da universidade. A previsão é que estas usinas solares sejam inauguradas ao longo de 2022.

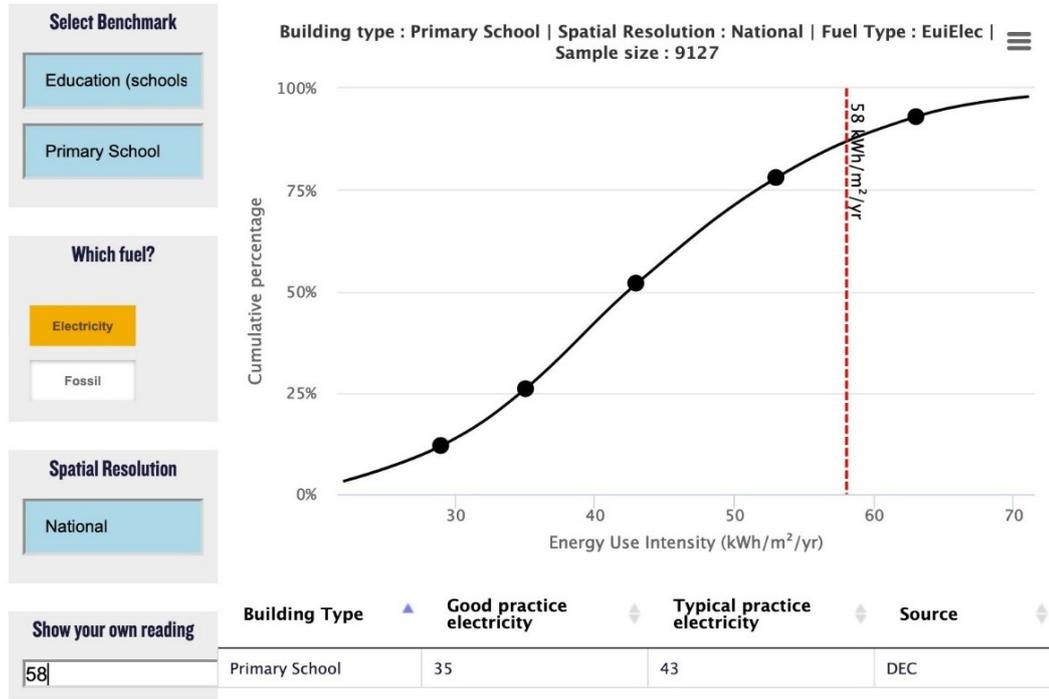
Tendo em vista o aumento de instalações de usinas fotovoltaicas para a geração de energia, pontua-se que análises referentes ao uso de energia e ao conforto térmico nas edificações, quando realizadas *à priori*, fornecem subsídios para que os sistemas de geração distribuída sejam dimensionados de maneira adequada.

2.4. Plataformas de *benchmarking* existentes

Existem atualmente diferentes ferramentas *online* para o *benchmarking* energético de edificações desenvolvidas por órgãos e associações, como a *The Energy Benchmarking Tool* desenvolvida pela CIBSE, a *Energy Consumption Indicators & Benchmarks* elaborada pelo governo de Hong Kong, e a *Energy Star Portfolio Manager*, desenvolvida pelo governo Norte Americano. Os exemplos referem-se a sistemas de *benchmarking* públicos, mas o acesso a estas plataformas permite visualizar os tipos de informação e resultados que podem ser disponibilizados ao público a partir de um processo de *benchmarking* (Figura 11 a 13).

Figura 11 - *The Energy Benchmarking Tool* desenvolvida pela CIBSE

ENERGY BENCHMARKING TOOL DASHBOARD



Showing 1 to 1 of 1 entries

* Energy consumption benchmarks for existing buildings in kWh/m2/yr unless stated otherwise

Fonte: CIBSE (2022).

Figura 12 – Ferramenta ENERGY STAR Portfolio Manager – *Energy Use Report*



Fonte: GreenerU (2020).

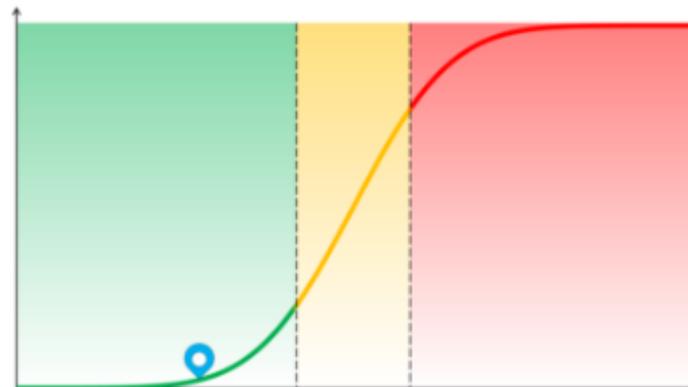
Figura 13 - Ferramenta *Energy Consumption Indicators & Benchmarks* do governo de Hong Kong para edifícios de universidades (grupo C6)

BENCHMARK RESULTS COMPARED WITH YOUR PEER GROUP



DESCRIPTION OF PERFORMANCE

-  **GOOD** :-Your energy performance is among the top 25th percentile of other similar premises
-  **GENERAL** :-Your energy performance is between the bottom 25th and the top 25th premises percentile of other similar premises
-  **BELOW AVERAGE** :-Your energy performance is among the bottom 25th percentile of other similar premises



-  Range of Good
-  Range of General
-  Range of Below Average
-  Your are here

Your energy performance is better than 90% of the premises under your subgroup. (i.e. you are at ≤ 10 th percentile of your subgroup)

COMPARISON OF ANNUAL ENERGY CONSUMPTION

Your Value:	18584 GJ
Benchmark Value (Group Typical)*:	54809 GJ

Note: Energy consumption benchmark model is developed based on the surveyed data for your energy consuming sub-group. Based on the model, the Benchmark Value is calculated from your inputs and it represents the typical energy consumption performance having similar operational & physical characteristics among your peer group.

Fonte: EMSD (2022).

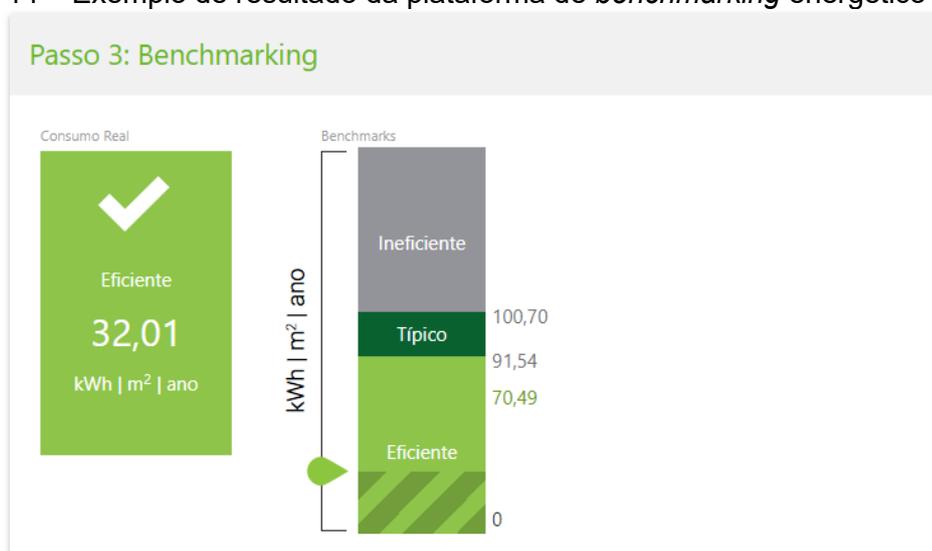
A partir da Figura 11 pode-se observar que a plataforma de *benchmarking* elaborada pela CIBSE (2022), que permite a comparação de EUI em função dos percentis. É informado o tipo de edifício, a escala de comparação, número da amostra e o tipo de combustível considerado. A ferramenta insere o EUI do edifício analisado na curva e identifica o EUI típico (percentil 50) e o EUI de boas práticas (percentil 25).

Na Figura 12 destaca-se a informação em histogramas, onde o consumo de energia por área é dividido em cores (4 níveis) e o edifício em questão é inserido no histograma para fins de comparação. Também são informados o score do edifício e o score médio (típico) em relação à pontuação do programa *Energy Star*.

Com a Figura 13 pode-se observar que a ferramenta desenvolvida pelo governo de Hong Kong realiza a comparação de consumo de energia em relação aos percentis e classifica os edifícios entre bom, geral e abaixo da média. O nível bom representa o percentil 25, o geral entre os percentis 25 e 75 e o abaixo da média, acima do percentil 75. A comparação é feita em função do tipo de uso do edifício. O consumo típico estimado é informado junto ao consumo do prédio analisado.

Como citado anteriormente, a plataforma brasileira compara o EUI do edifício com os EUI estimados para os níveis eficiente, típico e ineficiente. Um exemplo de aplicação pode ser visto na Figura 14. O valor de EUI típico informado não se refere ao valor mediano da amostra da base de dados desenvolvida, mas ao valor estimado de acordo com a equação multilinear desenvolvida a partir da base de dados, de acordo com o índice *i* mostrado na Figura 6 (CBCS, ELETROBRÁS, PROCEL 2021).

Figura 14 – Exemplo de resultado da plataforma de *benchmarking* energético brasileira



Fonte: Elaborado pela autora com base em CBCS (2022).

Em comum, observa-se que todas as plataformas informam o valor típico a ser considerado para a comparação. Também, nenhuma delas até o momento informa questões relacionadas ao conforto térmico para a classificação das edificações. Para embasar os estudos referentes aos objetivos descritos nesta tese, a próxima seção do trabalho irá abordar o referencial teórico dos estudos de conforto térmico em ambientes internos.

2.5. Conforto térmico em espaços internos

De acordo com a ASHRAE 55 (2017), o conforto térmico é um estado mental ou estado de espírito no qual as pessoas se sentem satisfeitas com o ambiente térmico, o que é observado a partir de avaliações subjetivas. A importância dos estudos de conforto térmico é baseada na conservação de energia, na satisfação e na produtividade dos usuários (ASHRAE, 2017). Quando adaptados ao ambiente físico, os sistemas regulatórios do corpo não são sobrecarregados, então a capacidade de participar em atividades é melhorada (SIQUEIRA *et al.*, 2017). Estudos apontam a importância do conforto térmico para a saúde dos ocupantes, em que temperaturas do ar superiores a 28 °C geram aumento das frequências cardíacas e a exposição solar direta gera impacto no desempenho motor-cognitivo (SIQUEIRA *et al.*, 2017; CARVALHO *et al.*, 2018; PIIL *et al.*, 2020).

Na literatura, a forma mais aceita de avaliar o conforto térmico de um grupo de pessoas envolve a análise subjetiva da sensação térmica dos indivíduos e a correlação estatística desta com variáveis climáticas, espaciais e individuais. As duas principais abordagens que direcionam os estudos científicos relacionados ao conforto térmico no ambiente construído são: a abordagem de balanço térmico e a abordagem adaptativa. Essas abordagens estão presentes nos índices usados pela ASHRAE 55 e ISO 7730/2005 (ASHRAE, 2017; ISO 7730, 2005).

O modelo de balanço térmico considera que a sensação térmica dos indivíduos está relacionada ao balanço de calor do corpo, que depende da atividade metabólica, vestimenta, temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade (ISO 7730, 2005). Foi criado por Fanger (1970), que estabeleceu os índices *Predicted Mean Vote* (PMV) e *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD) com base em experimentos laboratoriais extensivos, com condições climáticas controladas. O

PMV prevê a sensação térmica média de um grupo de pessoas acordo com uma escala de sete pontos (-3 a +3, muito frio a muito quente) e o PPD prevê a porcentagem de pessoas insatisfeitas com o ambiente térmico. A ISO 7730/2005 e a ASHRAE 55 recomendam que, em ocupações humanas termicamente aceitáveis, o PPD deve ser inferior a 10% e o PMV deve estar entre +0,5 e -0,5 (ASHRAE, 2017; ISO 7730, 2005).

Estudos apontam que o modelo de balanço térmico (PMV) não seria o mais eficaz para a predição do conforto térmico em ambientes naturalmente condicionados e utilizados por indivíduos aclimatados a climas tropicais, condição predominante no território brasileiro (DE DEAR; BRAGER, 2002; PEREIRA; ASSIS, 2010). Indica-se que este modelo prevê sensação térmica de desconforto mais severa do que de fato é percebido pelos usuários (PEREIRA; ASSIS, 2010).

Os índices de abordagens adaptativas são baseados em medidas de ambientes reais e consideram a capacidade dos usuários de se adaptarem ao ambiente, seja por meio de adaptações comportamentais, fisiológicas e/ou psicológicas (DE DEAR; BRAGER, 1998; BRAGER; DE DEAR, 1998; DE DEAR; BRAGER, 2002; PEREIRA; ASSIS, 2010). Estes modelos foram desenvolvidos para espaços naturalmente condicionados com janelas operáveis controladas pelos usuários (ASHRAE, 2017). Existem na literatura diferentes índices que consideram a abordagem adaptativa. O principal deles é o modelo proposto por De Dear e Brager (2002), que foi incorporado à normativa americana ASHRAE 55 (2017). Esta norma apresenta faixas de temperaturas operativas⁶ para ambientes internos termicamente aceitáveis. O limite mínimo proposto pela referida norma para considerar um ambiente como termicamente adequado refere-se a um nível de aceitabilidade de 80% dos usuários, havendo também limites para o nível de aceitabilidade de 90% dos usuários (ASHRAE, 2017).

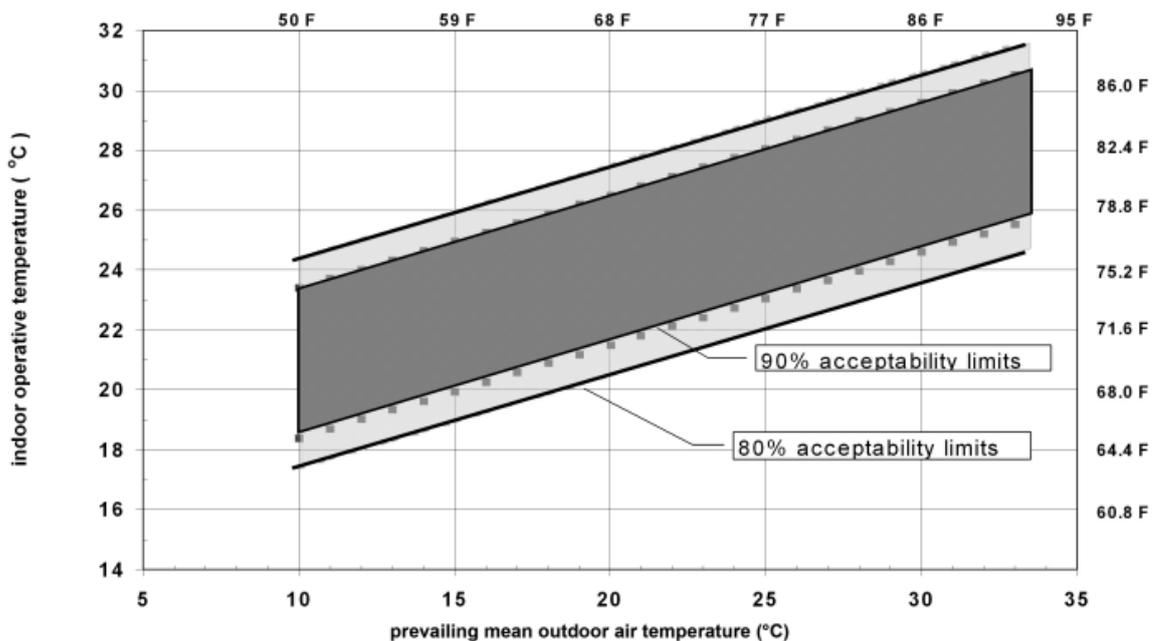
De acordo com a ASHRAE 55 (2017), as temperaturas operativas internas (T_o) permitidas pelo método adaptativo devem ser calculadas pelo limite de 80% da Figura 15 ou pelas Equações 1 e 2. Caso a T_o seja superior a 25 °C, é permitida a possibilidade de extensão do limite superior no caso de velocidade do ar acima de 0,3 m/s. Para velocidades do ar menores ou iguais a 0,6 m/s, permite-se o acréscimo de 1,2 °C ao limite superior. Para velocidades maiores que 0,6 e menores ou iguais a 0,9

⁶ Temperatura operativa: considerada como sendo a média aritmética entre a temperatura do ar e a temperatura média radiante, em °C (PEREIRA; ASSIS, 2010).

m/s, o acréscimo é de 1,8 °C. Já para velocidades do ar maiores que 0,9 e menores ou iguais a 1,2 m/s, permite-se o acréscimo de 2,2 °C (ASHRAE, 2017).

Os critérios de elegibilidade para utilização do método adaptativo da ASHRAE 55 (2017) são de que: a) não haja sistema de condicionamento artificial no ambiente, b) os ocupantes exerçam atividades cuja taxa metabólica esteja entre 1,0 e 1,3 met, c) os ocupantes tenham liberdade de adaptação de suas vestimentas nos ambientes interno e externo, e d) que a temperatura média predominante do ar externo seja maior que 10°C e menor que 33,5°C.

Figura 15 - Limites de temperaturas operativas aceitáveis para ambientes condicionados naturalmente



Fonte: ASHRAE 55 (2017).

$$\text{Limite máx. para 80\% de aceitabilidade (}^{\circ}\text{C)} = 0,31x \overline{t_{mpa(ext)}} + 21,3 \quad (\text{Equação 1})$$

$$\text{Limite mín. para 80\% de aceitabilidade (}^{\circ}\text{C)} = 0,31x \overline{t_{mpa(ext)}} + 14,3 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde $\overline{t_{mpa(ext)}}$ refere-se à Temperatura Média Predominante do ar externo (*Prevailing Mean Temperature*). O cálculo da $\overline{t_{mpa(ext)}}$, consiste na média aritmética simples das temperaturas médias de bulbo seco (TBS) do ar externo observadas durante 24h de dias anteriores ao dia em questão, devendo haver ao menos duas

medições por dia. Devem ser considerados não menos do que sete dias e não mais do que trinta dias consecutivos anteriores ao dia em questão (ASHRAE, 2017).

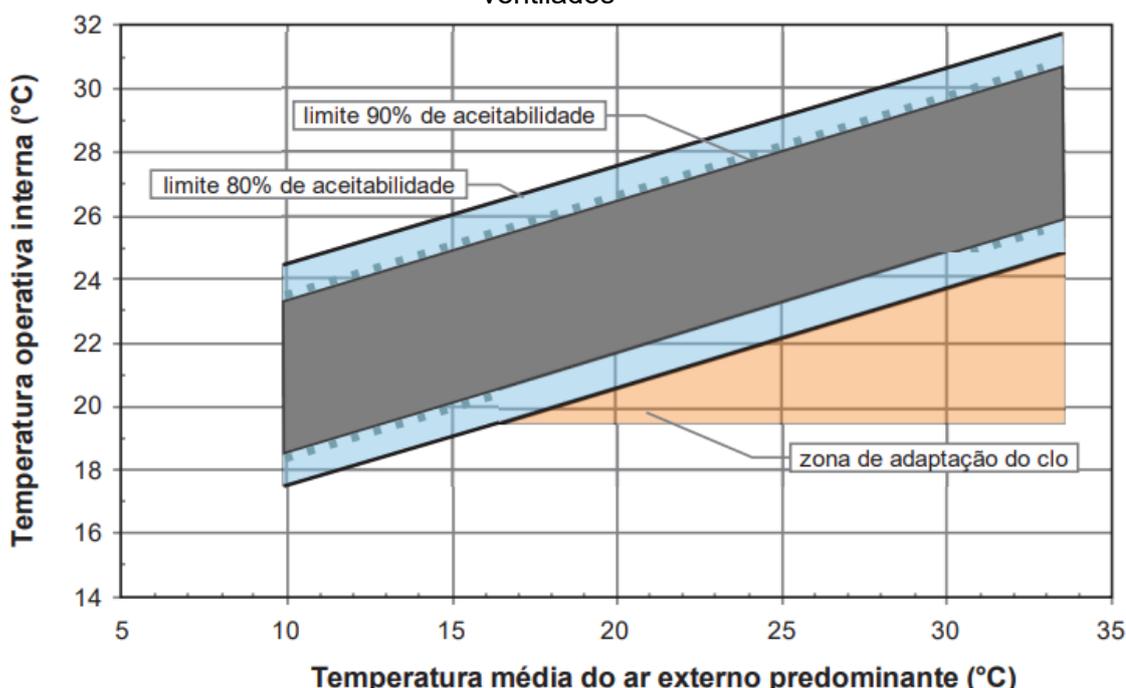
Pereira e Assis (2010) realizaram estudo comparativo de modelos adaptativos de conforto térmico desenvolvidos por pesquisas internacionais, incluindo o de De Dear e Brager (2002), Aluciems (1981), Humphreys (1978) e Nicol e Humphreys (2002) com pesquisas nacionais, com vistas a identificar modelos que poderiam representar adequadamente a aclimação da população brasileira em diferentes climas com base em pesquisas locais. Foram analisados modelos estáticos desenvolvidos para as cidades de Natal, Florianópolis e Belo Horizonte (ARAÚJO, 1996; XAVIER, 1999; GONÇALVES, 2000). Segundo Pereira e Assis (2010), o modelo de De Dear e Brager (2002), adotado pela ASHRAE 55 (2017) possui aproximação razoável da temperatura de conforto indicada para a cidade de Belo Horizonte e bons resultados em relação à predição de temperatura neutra para diferentes cidades brasileiras.

De Vecchi *et al.* (2015) compararam os limites de T_o adotados pela ASHRAE 55 (2017) com respostas de usuários aplicados em climas brasileiros, nas cidades de Belém e Florianópolis. A versão da norma americana analisada foi de 2013, mas a versão de 2017 não contém alterações referentes ao aspecto abordado no estudo. A partir de experimentos em campo com aplicação de questionários e medições de condições climáticas em salas de aula da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis, os autores observaram que os votos de aceitabilidade dos estudantes excederam os limites inferiores propostos pela ASHRAE 55 (2017). Assim, foi proposta uma zona de ajuste de clo , onde entendeu-se que, a partir de ajustes na vestimenta, a aceitabilidade dos usuários ao ambiente térmico seria mais permissiva a temperaturas mais baixas do que o proposto pela normativa americana. A maior tolerância a temperaturas baixas também foi observada por Rupp e Ghisi (2017) a partir de questionários aplicados a ocupantes de escritórios em Florianópolis.

O modelo de De Dear e Brager (2002) adotado pela ASHRAE (2017) também foi considerado na revisão da NBR 16401-2 (Instalações de condicionamento de ar — Sistemas centrais e unitários Parte 2: Parâmetros de conforto térmico) (LABEEE, 2020). Nesta normativa, a zona de adaptação de clo proposta por De Vecchi *et al.* (2015) foi incorporada (Figura 16). De acordo com a proposta, quando a temperatura operativa interna (T_o) for superior a $19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ao mesmo tempo em que a temperatura do ar externo for superior a $16,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, a zona de adaptação de clo deve ser utilizada.

Neste caso, o limite inferior para aceitabilidade de 80% dos usuários passa a ser de 19,5 °C. Assim como na normativa americana, a possibilidade de aumento da temperatura limite superior de acordo com o aumento da velocidade do ar também é permitida na proposta de revisão da normativa brasileira (LABEEE, 2020). No caso do estudo de De Vecchi *et al.* (2015), nas medições em salas de aula sem ar-condicionado e ventiladas de modo passivo ou com ventiladores, foi observada velocidade média do ar de 0,6 m/s. Considera-se que, por ser adotado em normativa brasileira, o modelo adaptativo acrescido da zona de adaptação de vestimenta com base em pesquisa com população brasileira, é suficientemente adequado para a análise do conforto térmico de ambientes internos ventilados naturalmente no território nacional.

Figura 16 - Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente ventilados



Fonte: Revisão da NBR 16401-2 (LABEEE, 2021).

Além da predição por modelos matemáticos, questionários também conformam método efetivo para a investigação acerca da percepção do ambiente térmico pelos usuários em edifícios existentes. A partir de perguntas diretas, podem ser investigadas a sensação térmica, aceitabilidade térmica, preferência térmica e o conforto térmico. Segundo a ASHRAE 55 (2017), existem dois tipos de pesquisas do ambiente térmico. As pesquisas *point-in-time* avaliam as percepções dos usuários em um momento e as

relacionam com fatores climáticos, como a TBS ou velocidade do ar. Já as pesquisas de satisfação térmica são utilizadas para avaliar a resposta do conforto térmico dos usuários ao longo de um determinado período:

A premissa básica deste tipo de pesquisa é que os ocupantes, por natureza, podem recordar instâncias ou períodos de desconforto térmico, identificar padrões na operação do edifício e fornecer votos de conforto “geral” ou “médio” em seu ambiente. O pesquisador pode definir um período a ser considerado pelos respondentes. Os ocupantes fornecem a integração do tempo (ASHRAE, 2017, p. 50, tradução nossa)⁷.

Pesquisas de campo aplicaram questionários para análise da satisfação térmica dos ocupantes de ambientes internos (TOE; KUBOTA, 2013; RUPP; GHISI, 2019; GIAMALAKI; KOLOKOTSA, 2019). Nestes casos, onde os índices referentes à sensação térmica (PMV) não foram calculados, mas obtidos por meio de questionário, eles foram denominados de *Actual Mean Vote* (AMV) ou *Thermal Sensation Vote* (TSV). Nestas pesquisas, a escala utilizada para o AMV ou TSV foi a de sete pontos, proposta por Fanger (1970). Também foram aplicadas questões referentes à preferência térmica e aceitabilidade térmica, cujos resultados foram denominados *Thermal Preference Vote* (TPV) e *Thermal Acceptability Vote* (TAV), respectivamente. A escala do TPV utilizada pelos estudos foi de “mais frio”, “sem alteração” ou “mais quente”, de acordo com a indicação da ASHRAE 55 (2017). No caso do TAV, a normativa americana sugere uma escala de sete pontos variando de “muito inaceitável” a “muito aceitável” (ASHRAE, 2017). No entanto, os estudos observados adotaram escala de dois pontos: “inaceitável” ou “aceitável” (TOE; KUBOTA, 2013; RUPP; GHISI, 2019).

2.5.1. Principais métricas consideradas pelos regulamentos e sistemas de *benchmarking* para análise do conforto térmico

A ASHRAE 55 (2017) recomenda que, para a predição acerca da aceitabilidade das condições térmicas de um ambiente ao longo do tempo, seja utilizada a métrica chamada *Exceedance Hours* (EH). A unidade desta métrica é em horas e ela

⁷ Citação original: “*The basic premise of the satisfaction survey is that occupants by nature can recall instances or periods of thermal discomfort, identify patterns in building operation, and provide “overall” or “average” comfort votes on their environment. The surveyor may identify a span of time for the respondents to consider. The occupants provide the time integration.*” (ASHRAE, 2017, p. 50).

representa a quantidade de horas em uso em que a T_o do ambiente excede os limites superiores ou inferiores estabelecidos pelos modelos, seja pela abordagem PMV ou pela adaptativa. A normativa indica que essa métrica também pode ser representada em percentual, dividindo-se a EH pela quantidade total de horas ocupadas.

No Brasil, o primeiro regulamento de eficiência energética (Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos, RTQ-C) (BRASIL, 2010), utilizado entre 2010 e 2021, considerou a representação percentual de EH para compor a metodologia de análise de ambientes de permanência prolongadas com ventilação natural, denominando-a de POC (Percentual de Horas Ocupadas em Conforto). Indicou-se que tanto as abordagens de conforto térmico indicadas na ASHRAE 55 (2017) ou ISO 7730 (2005) poderiam ser utilizadas. Neste método, as T_o do edifício analisado deveriam ser calculadas por meio de simulação computacional, com *software* como o EnergyPlus. A depender do percentual de POC alcançado, utilizava-se um índice de acordo com a escala de eficiência apresentada na Figura 17. De acordo com o RTQ-C, a partir do percentual de POC encontrado, o equivalente numérico correspondente deveria ser inserido na equação para obtenção da pontuação final do edifício (BRASIL, 2010).

Figura 17 - Limites de Percentuais de Horas Ocupadas em Conforto considerados no regulamento RTQ-C

Percentual de Horas Ocupadas em Conforto	EqNumV	Classificação Final
$POC \geq 80\%$	5	A
$70\% \leq POC < 80\%$	4	B
$60\% \leq POC < 70\%$	3	C
$50\% \leq POC < 60\%$	2	D
$POC < 50\%$	1	E

Fonte: BRASIL (2010).

Em 2021, o RTQ-C foi substituído pelo método denominado INI-C (Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviço e Públicas) (BRASIL, 2021). Neste regulamento, a métrica POC continua sendo considerada, cuja sigla adotada passa a ser PHOCT. Segundo o regulamento, as edificações totalmente ventiladas naturalmente ou híbridas devem ser analisadas em função do seu PHOCT. O índice deve ser calculado com base no

metamodelo desenvolvido por Rackes *et al.* (2016), disponibilizado em plataforma *online*. Caso o PHOCT alcançado seja superior a 90%, a classificação da envoltória é considerada nível A. Caso contrário, é necessário o cálculo da carga térmica interna de refrigeração (CgTR) para a condição real e a de referência. Esta CgTR é multiplicada pela fração de horas em desconforto por calor para a obtenção da carga térmica total anual da edificação (INMETRO, 2021). Ou seja, a consideração da avaliação do conforto térmico para a classificação da eficiência energética da envoltória pelo INI-C é feita de modo a considerar que, quando termicamente desconfortável, o ambiente será provido de condicionamento artificial.

Já no setor residencial, o RTQ-R (Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais) (INMETRO, 2012) considera o conforto térmico para a avaliação da envoltória e as métricas utilizadas são o Graus-Hora de Resfriamento (GH_R) e o consumo relativo anual para aquecimento. O GH_R é o somatório da diferença entre a temperatura operativa horária e a temperatura de base, quando a primeira excede o valor da segunda. Nesta normativa, a temperatura de base é definida em 26 °C. No método prescritivo, são apresentadas equações para a predição de GH_R para as diferentes Zonas Bioclimáticas (ZBs) do Brasil. A Figura 18 mostra os limites de GH_R definidos para compor o cálculo da classificação da envoltória, que também compõe o cálculo da pontuação final da unidade habitacional.

Figura 18 - Limites de Graus-Hora de Resfriamento estabelecidos pelo RTQ-R para a Zona Bioclimática 3

Eficiência	EqNumEnvAmb_{Resfr}	Condição
A	5	$GH_R \leq 822$
B	4	$822 < GH_R \leq 1.643$
C	3	$1.643 < GH_R \leq 2.465$
D	2	$2.465 < GH_R \leq 3.286$
E	1	$GH_R > 3.286$

Fonte: INMETRO (2012).

Guillén, Samuelson e Laurent (2019) apresentam estudo acerca da comparação de métricas para o *benchmarking* de edifícios, que incluíram métricas de energia (EUI e regressão) e conforto térmico, utilizadas para analisar 29 prédios. Do ponto de vista do conforto térmico, os autores utilizaram a métrica Graus-Dia de Desconforto por Frio ou por Calor. Essa métrica indica a média diária da diferença de graus entre a

temperatura interna e os limites estabelecidos pela abordagem de conforto térmico adaptativo considerada. Valores negativos indicam situações em que os usuários sentem frio e valores positivos indicam situações em que os usuários sentem calor (GIULLIÉN; SAMUELSON; LAURENT, 2019).

Em relação ao *benchmarking*, Guillén, Samuelson e Laurent (2019) demonstram que a utilização de diferentes métricas gera *rankings* distintos. Os autores mostram que as classificações dos edifícios são distintas no caso da adoção de diferentes métricas para o conforto térmico, como os Graus-Dia de Desconforto por Frio ou por Calor. Os autores argumentam que os *benchmarkers* (pessoas que desenvolvem os sistemas de *benchmarking*) devem inicialmente definir a motivação do sistema e, em seguida, escolher propriamente a métrica a ser utilizada (GIULLIÉN; SAMUELSON; LAURENT, 2019).

No Brasil, o sistema de *benchmarking* desenvolvido pelo CBCS não considera questões relacionadas ao conforto térmico para a avaliação dos edifícios. Conforme citado anteriormente, Geraldi e Ghisi (2022b) apresentaram proposta para a integração da satisfação térmica dos usuários ao *benchmarking* energético. A satisfação térmica dos usuários foi inserida com base em respostas de questionários aplicados a diretores de escolas, (abordagem *key person*). Os níveis considerados foram: muito baixo, baixo, neutro, alto e muito alto. Conforme a proposta dos autores, a performance energética do edifício é indicada por um único índice que representa a interpretação de um *expert* em relação à análise integrada dos aspectos citados (GERALDI; GHISI, 2022b). No referido trabalho, a classificação é feita em relação ao prédio como um todo e não são consideradas características arquitetônicas que poderiam influenciar na satisfação térmica dos ocupantes. A análise de fatores arquitetônicos que influenciam no conforto térmico pode auxiliar a tomada de decisão para melhorias e na construção de novos projetos. Estes fatores serão abordados no item seguinte do trabalho.

2.5.2. Principais variáveis arquitetônicas que influenciam o conforto térmico em ambientes internos

Olgay (1973) propôs Carta Bioclimática que aponta estratégias para favorecer o conforto térmico em ambientes internos a partir da temperatura do ar e da umidade relativa do local. Estas estratégias estão relacionadas à ventilação, ao sombreamento, à umidificação e à insolação. Givoni (1992) propôs carta bioclimática para países em desenvolvimento com base em diagrama psicrométrico. As estratégias indicadas na carta referem-se à ventilação natural, inércia térmica da envoltória (para resfriamento ou aquecimento), umidificação, resfriamento evaporativo, insolação (aquecimento solar), uso de ar-condicionado e aquecimento artificial (GIVONI, 1992).

De acordo com a NBR 15220-3 (ABNT, 2005), o território nacional é dividido em oito Zonas Bioclimáticas (ZBs). A normativa brasileira estabeleceu, para cada uma delas, estratégias bioclimáticas baseadas na carta de Givoni (1992). Para a ZB 3 (Belo Horizonte, são recomendados sombreamento nas aberturas de modo a permitir sol no inverno, paredes leves e refletoras (U inferior ou igual a $3,6 \text{ W/m}^2\text{K}$), coberturas leves e isoladas (U inferior ou igual a $2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$) e ventilação cruzada no verão (ABNT, 2005). Ressalta-se que no texto NBR 15220-3 (ABNT, 2005) é expresso que a mesma se aplica a edifícios habitacionais de interesse social. No entanto, não havendo estudos de zoneamento adequados a outros tipos de edifícios e densidades de ocupação, a referida normativa tem sido adotada para regulamentos aplicados a outros tipos e portes de edificações, como o RTQ-C e RTQ-R, citados anteriormente. Em setembro de 2021 foi instituído um Grupo de Trabalho junto à ABNT direcionado para o desenvolvimento do Zoneamento Climático Brasileiro a ser incluído na atualização da NBR 15220. Ao final da presente tese, este grupo ainda não havia finalizado o trabalho de revisão.

Do ponto de vista das estratégias para o favorecimento do conforto térmico em edifícios no Brasil, o controle sobre a insolação e a ventilação natural se destacam como fatores significativamente influentes e possuem relação com o consumo de energia (ABNT, 2005, CANDIDO *et al.*, 2008 e COSTA; FREIRE; KIPERSTOK, 2019). A ventilação consiste no processo de fornecer ar externo a um espaço ou edifício por meios naturais ou mecânicos (MORAWSKA *et al.*, 2020). A ventilação natural pode ser utilizada tanto para fins higiênicos, com a redução de poluentes e melhoria da qualidade do ar interno, como para fins de conforto térmico, aumentando as trocas de

calor por convecção e evaporação e reduzindo a necessidade de utilização de condicionamento artificial do ar (BEN-DAVID; RACKES; WARING, 2017; COSTA; FREIRE; KIPERSTOK, 2019).

Souza e Rodrigues (2012) observaram que a taxa de renovação de ar por meio da ventilação cruzada foi 3,5 vezes maior do que por meio da ventilação unilateral. A ventilação cruzada configura-se com a circulação de ar através de aberturas localizadas em lados opostos e a ventilação unilateral quando a circulação do ar se dá através de aberturas situadas em um mesmo lado de um ambiente (SOUZA; RODRIGUES, 2012). Segundo os autores, diferentes fatores influenciam na ventilação natural, como o número de janelas, seu tipo, posição e tamanho, assim como o perfil de ocupação e a posição da edificação em relação à direção de ventos predominantes.

Ben-David, Rackes e Waring (2017) afirmaram que a adoção de taxas de ventilação adequadas reduz a disseminação de doenças e aumenta a capacidade cognitiva dos usuários. Em contextos sanitários extremos, como o da pandemia do COVID-19, a ventilação como estratégia de promoção da saúde ganhou maior relevância. Morawska *et al.* (2020), observaram evidências para considerar o controle da ventilação nos ambientes internos como uma das estratégias para limitar o risco de infecção por transmissão aérea. Outras publicações científicas reiteram a importância da ventilação efetiva como forma de mitigação da transmissão do COVID-19 ou outras doenças, dada sua capacidade de remover ar exalado carregado de vírus dos ambientes, diminuindo assim a sua concentração geral e, portanto, qualquer dose subsequente inalada pelos ocupantes (SUN; ZHAI, 2020; MORAWSKA *et al.*, 2020; VAN DOREMALEN *et al.*, 2020).

No caso dos edifícios públicos com ventilação natural, Morawska *et al.* (2020) reconhecem ainda que a capacidade de ventilação efetiva dos ambientes depende de seu projeto arquitetônico, da utilização dos sistemas de portas e janelas e das condições externas. Do ponto de vista arquitetônico, Bhagat *et al.* (2020) indicam que a ventilação na qual a renovação do ar ocorre a partir da extração vertical do ar poluído (possivelmente contaminado) e quente próximo ao teto parece ser mais eficaz para minimizar os riscos de exposição à contaminação. Os autores sugerem a instalação de aberturas para exaustão do ar nas coberturas dos ambientes.

Percebe-se que a ventilação configura um fator importante tanto para o conforto térmico quanto para a saúde dos usuários. Além da questão da ventilação, diferentes trabalhos analisaram fatores **referentes ao projeto arquitetônico** que poderiam estar relacionados ao conforto térmico em ambientes internos. Por exemplo, Gagnon, Gosselin e Decker (2018) realizaram estudo com análise de sensibilidade de diferentes fatores em relação ao consumo de energia e conforto térmico de edifícios. Dentre as variáveis estudadas, foram citadas a orientação e a forma do edifício, a transmitância térmica da envoltória e o percentual de abertura da fachada. Gokarakonda, Van Treeck e Rawal (2019) estudaram a influência de parâmetros arquitetônicos no nas horas de ventilação natural, no conforto térmico e no consumo de energia para resfriamento em edifícios de condicionamento híbrido na Índia. Entre os fatores mais influentes, são citados o tamanho do edifício, o fator solar dos vidros, as propriedades térmicas da envoltória e a densidade de ocupantes.

O Quadro 5 traz um resumo de variáveis arquitetônicas e trabalhos nos quais elas foram abordadas. Os trabalhos elencados foram artigos de periódicos internacionais identificados a partir de pesquisa na base de dados Scopus atualizada em julho de 2022, onde foram considerados os termos de busca: *“adaptive thermal comfort”* OR *“thermal comfort”* AND *“building”* a serem pesquisadas em títulos, resumos e palavras-chave no período de 2016 a 2022, com *Country/Territory: Brazil*. Segundo estes critérios, foram identificados 120 artigos. Os títulos e resumos destes trabalhos foram analisados e aqueles que não apresentassem estudos referentes a estratégias arquitetônicas e sua relação com o conforto térmico em ambientes internos foram eliminados, restando assim 94 artigos. Destes, foram considerados para investigação de variáveis os vinte trabalhos mais citados. Com este procedimento buscou-se identificar as variáveis arquitetônicas mais comumente citadas pela literatura.

Quadro 5 - Variáveis arquitetônicas relacionadas ao conforto térmico em ambientes internos (continua)

Variáveis	Autores
Modo de operação (ventilação natural, artificial ou mista)	Rupp, de Dear e Ghisi (2018), De Vecchi <i>et al.</i> (2017), De Abreu-Harbich, Chaves e Brandstetter (2018), Rupp, Ghisi e De Dear (2019), Buonocore <i>et al.</i> (2020)
Tipologia do edifício / tipo de ambiente (particular ou compartilhado)	Rupp, Ghisi e De Dear (2019) e Chen <i>et al.</i> (2020)

Quadro 5 - Variáveis arquitetônicas relacionadas ao conforto térmico em ambientes internos (conclusão)

Variáveis	Autores
Densidade de ocupantes	Rackes <i>et al.</i> (2016)
DPI de iluminação e equipamentos	Rackes <i>et al.</i> (2016), Duarte <i>et al.</i> (2021)
Horas de utilização do espaço	Rackes <i>et al.</i> (2016), Chen <i>et al.</i> (2020)
Forma / área	Rackes <i>et al.</i> (2016), Chen <i>et al.</i> (2020).
Número de andares	Rackes <i>et al.</i> (2016),
Orientação (Azimute)	Silva, Almeida e Ghisi (2016), Duarte <i>et al.</i> (2021), Sakiyama <i>et al.</i> (2021b)
Elemento de proteção solar	Silva, Almeida e Ghisi (2016), Rackes <i>et al.</i> (2016), Ličina <i>et al.</i> (2018), Costa, Freire e Kiperstok (2019), Rocha <i>et al.</i> (2020), Sakiyama <i>et al.</i> (2021b)
Percentual de abertura da fachada (PAF)	Silva, Almeida e Ghisi (2016), Rackes <i>et al.</i> (2016), Sakiyama <i>et al.</i> (2021b)
Tipo de vidro (<i>Solar Heat Gain</i> , SHGC)	Silva, Almeida e Ghisi (2016), Rackes <i>et al.</i> (2016), Costa, Freire e Kiperstok (2019), Vettorazzi <i>et al.</i> (2021), Sakiyama <i>et al.</i> (2021b)
Tipo de janela (fator de abertura para ventilação)	Silva, Almeida e Ghisi (2016), Rackes <i>et al.</i> (2016), Costa, Freire e Kiperstok (2019),
Velocidade do ar (uso de ventiladores)	Rackes <i>et al.</i> (2016), Buonocore <i>et al.</i> (2020)
Ventilação natural / Ventilação cruzada / Ventilação noturna	Rackes <i>et al.</i> (2016), De Abreu-Harbach, Chaves e Brandstetter (2018), Costa, Freire e Kiperstok (2019), Buonocore <i>et al.</i> (2020), Sakiyama <i>et al.</i> (2021a)
Manutenção das janelas	Costa, Freire e Kiperstok (2019)
Operação dos elementos, como janelas e iluminação artificial	Sorgato, Melo e Lamberts (2016), Cóstola <i>et al.</i> (2019), Chen <i>et al.</i> (2020)
Transmitância térmica da envoltória	Silva, Almeida e Ghisi (2016), Rackes <i>et al.</i> (2016), Tubelo <i>et al.</i> (2018), Costa, Freire e Kiperstok (2019), Vettorazzi <i>et al.</i> (2021), Sakiyama <i>et al.</i> (2021b), Gregório-Atem <i>et al.</i> (2020)
Absortância solar da envoltória	Silva, Almeida e Ghisi (2016), Rackes <i>et al.</i> (2016), Gregório-Atem <i>et al.</i> (2020)

Fonte: elaborado pela autora, 2022.

Dentre os trabalhos elencados no Quadro 5, destaca-se artigo que apresenta análise de sensibilidade a partir de simulações computacionais de edifícios educacionais naturalmente ventilados e que considera a variação de ampla gama de variáveis

arquitetônicas, em diferentes climas do Brasil (RACKES *et al.*, 2016). Além disso, o Por esta tese abordar o conforto térmico de ambientes educacionais naturalmente ventilados, o trabalho de Rackes *et al.* (2016) é descrito em maior detalhe nesta seção. Tem-se ainda que esse trabalho foi incorporado ao novo regulamento para avaliação de eficiência energética para edificações comerciais, de serviços e públicas (INI-C) que possuam ventilação natural como modo de condicionamento de ar (BRASIL, 2021).

Rackes *et al.* (2016) desenvolveram um modelo de predição de conforto térmico para edifícios comerciais horizontalizados ventilados naturalmente por meio de redes neurais artificiais. Segundo os autores, a variação dos *inputs* foi configurada de modo a representar melhor edifícios de escolas e escritórios. O modelo foi desenvolvido com o *software* EnergyPlus, considerando 427 arquivos climáticos de cidades brasileiras. Para a simulação da ventilação natural, o módulo *Air Flow Network* do programa foi utilizado. A métrica para a análise do conforto térmico dos prédios foi o percentual médio de horas em desconforto por calor, considerando o limite de aceitabilidade de 80% proposto pela ASHRAE 55 (2017). O resultado consistiu na média dos resultados de todas as zonas térmicas ocupadas, exceto corredores e vãos de escadas. Os autores consideraram 55 variáveis que foram variadas simultaneamente a partir de abordagem Monte Carlo, gerando aproximadamente 50 mil simulações.

Segundo Rackes *et al.* (2016), após a elaboração da base de dados, foi realizada uma análise de sensibilidade para a geração do modelo preditivo. Como resultado desta análise, foram elencados os parâmetros com diferentes níveis de impacto para a predição da variável dependente: decisivo, muito influentes, influentes, marginais e insignificantes. Entre os fatores com impacto decisivo foram listados, em ordem decrescente, o clima (graus dia de resfriamento), a densidade de ocupação (ocupantes/m²), o aumento de velocidade do ar por ventilador de teto e a área (m²). Como fatores muito influentes foram citados: número de andares, densidade de potência elétrica instalada (equipamentos e iluminação), percentual de abertura da fachada para ventilação noturna, absortância solar da cobertura, velocidade do ar, fator de abertura máximo das janelas (PAFvent), fator solar do vidro e percentual de abertura da fachada (PAF). Os dez fatores mais influentes considerando o clima ameno (menos de 2267 graus dia) e edifícios grandes (maiores que 1.385 m²) foram: densidade de ocupantes, PAF, densidade de potência elétrica instalada

(equipamentos e iluminação), PAF para ventilação noturna, PAFvent, aumento de velocidade do ar por ventilador de teto, horas de utilização, número de andares, pé direito e absorvência solar da cobertura.

Como limitações do trabalho, foram citadas a limitação do EnergyPlus em simular a ventilação natural em edifícios. Também foi citada como limitação o fato de o resultado considerar uma média anual da média dos resultados das zonas térmicas de todo o prédio. Por isso, indica-se que a ferramenta não seja ideal para a identificação de zonas problemáticas ou períodos do ano mais problemáticos (RACKES *et al.*, 2016).

Conforme citado anteriormente, o modelo desenvolvido por Rackes *et al.* (2016) teve como foco edifícios escolares. A presente tese tem como foco edifícios de *campus* universitários. O próximo item do trabalho irá abordar estudos de conforto térmico referentes a estes ambientes.

2.5.3. Conforto térmico em edifícios de IES

No que diz respeito aos estudos de conforto térmico em edifícios de IES, os ambientes que costumam receber mais atenção dos pesquisadores são as salas de aula. Os alunos passam uma quantidade considerável de tempo nesses ambientes densamente ocupados e um bom desempenho na atividade de aprendizagem é considerado como tendo papel crucial em suas vidas (SINGH *et al.*, 2019).

Em revisão sobre estudos de conforto térmico em salas de aula universitárias dos últimos 50 anos em diferentes climas e modos de condicionamento de ar, Singh *et al.* (2019) verificaram que, em geral, os alunos relataram estar altamente insatisfeitos com as condições térmicas internas prevalentes das salas de aula. De forma geral, os usuários preferem temperaturas mais baixas do que as existentes (SINGH *et al.*, 2019). Alguns dos destaques da revisão indicam que: 1) tanto em salas de aula com ventilação natural quanto em salas com ar-condicionado, as temperaturas externas influenciam a aceitabilidade térmica e preferência dos ocupantes; 2) as diretrizes atuais para projetos de condicionamento de ar subestimam a preferência térmica dos usuários em climas quente e úmidos, onde temperaturas mais altas são toleráveis; e 3) que os alunos são mais propensos a aceitar ambientes ligeiramente frios do que ligeiramente quentes. Esses aspectos foram observados em ambientes de IES de países desenvolvidos e em desenvolvimento (SINGH *et al.*, 2019).

No Brasil, Krüger e Zannin (2004) realizaram medições em salas de aula de uma universidade em Curitiba (classificação de Köppen Cfb⁸) e indicaram que os alunos sentiam desconforto por calor durante o verão e desconforto por frio significativo durante o inverno. Outra pesquisa de campo em salas de aula com ventilação natural e com ar-condicionado de uma universidade em São Luís (Classificação de Köppen Am⁹) mostrou que os alunos indicaram desconforto por calor e preferência por ambientes mais frios em salas de aula com ventilação natural (BUONOCORE *et al.*, 2020). Nos ambientes climatizados, observou-se super resfriamento, apontando para problemas de *setpoint*.

Em pesquisa acerca do conforto térmico em salas de aula em clima equatorial brasileiro (Salvador, classificação de Köppen Af¹⁰), Costa, Freire e Kiperstok (2019) identificaram que 53% dos alunos indicaram se sentir confortáveis em ambientes naturalmente ventilados no verão, quando as temperaturas médias do ar variaram até 27,4 °C. Os autores notaram que o projeto do edifício analisado (edifício da Universidade Federal da Bahia) seguia diretrizes de projeto bioclimático que incluíam janelas com potencial de abertura de 100% do vão com abertura na altura do corpo dos usuários. Os mesmos defenderam a utilização de projeto bioclimático para ventilação adequada e, no caso do estudo, indicaram a necessidade da manutenção de caixilhos de janelas que se apresentavam malconservados, comprometendo sua capacidade de facilitar a ventilação natural e diminuindo significativamente a capacidade de regulação térmica no edifício. Estas diretrizes foram propostas em oposição à instalação de unidades de ar-condicionado como estratégia de refrigeração (COSTA; FREIRE; KIPERSTOK, 2019).

Atualmente, o Brasil possui um Banco de Dados Brasileiro de Conforto Térmico¹¹ (BDBCT), criado em 2014 para organizar pesquisas de campo brasileiras de conforto térmico que envolveram medições aliadas à aplicação de questionários (ANDRÉ *et al.*, 2019). Ele conta com pesquisas de campo *point-in-time* realizadas de 2000 a 2019 em quatro cidades brasileiras de climas tropicais e subtropicais: São Luís (Aw), Maceió (Am), Florianópolis (Cfa) e Maringá (Cfa) (ANDRÉ *et al.*, 2019). Uma proporção de

⁸ Temperado, sem estação seca e verão fresco.

⁹ Tropical de monção; apresenta um mês mais seco com precipitação menor que 60 mm, mas equivalente a mais de 4% da precipitação anual total.

¹⁰ Clima equatorial, apresenta precipitação média de pelo menos 60 mm em cada mês

¹¹ <http://www.labeee.ufsc.br/projetos/base-brasileira-de-dados-em-conforto-termico>

62% das respostas está relacionada ao ambiente universitário, sendo os demais dados referentes a ambientes de escritórios. Neste banco de dados, são consideradas respostas de TSV, TPV e TAV de acordo com as escalas dos trabalhos citados anteriormente. O Brasil participa com 7.390 votos de sensação térmica no Banco de Dados de Conforto Térmico Global ASHRAE II, sendo o quarto país com maior quantidade de respostas (BUONOCORE *et al.*, 2020). O atual banco de dados nacional, que ainda está em construção, conta com 10.925 votos.

André *et al.* (2019) e Buonocore *et al.* (2020) exploraram os resultados do BDBCT. Nos climas Cfa, 71% das respostas correspondem a períodos de inverno e outono. Os ambientes das pesquisas eram em grande parte ventilados naturalmente (37%), ou modo misto (40%), referente a ambientes com ar-condicionado, ar-condicionado e ventiladores, e exclusivamente ventiladores. No caso do modo de condicionamento misto, o modo de operação com a ventilação natural foi o mais observado (32%). Os respondentes foram em maioria mulheres (60%) de até 30 anos de idade (ANDRÉ *et al.*, 2019).

Em relação à sensação térmica dos usuários, André *et al.* (2019) e Buonocore *et al.* (2020) mostram que, no clima Cfa, temperaturas medianas de 28,2 °C obtiveram indicação de muito calor. No caso dos climas Am e Aw, analisados conjuntamente, as temperaturas medianas referentes à sensação térmica de muito calor foi 30,1 °C. A preferência térmica sofreu influência do clima local e dos modos de condicionamento de ar – ventilação natural (NV), modo misto (MM) ou ar-condicionado (AC). A preferência geral dos usuários foi por ambientes mais frescos quando a NV foi utilizada (59% dos votos), enquanto nos casos de MM e AC, a principal preferência térmica foi por "sem alteração". Embora a análise do BDBCT possa sugerir uma preferência térmica geral, ela não compreende a diversidade climática e cultural da grande extensão territorial do país e incorpora outras tipologias prediais além das instituições de ensino superior.

Conforme observado, o modo de condicionamento de ar é um fator que possui influência não somente no consumo de energia como também na sensação e preferência térmica dos usuários. De Vecchi, Cândido e Lamberts (2013) investigaram o efeito da utilização de ventiladores de teto no conforto térmico em salas de aula da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis (Cfa) com condicionamento híbrido, onde havia ar-condicionado, ventiladores ou ventilação natural. Os autores

verificaram que, com a velocidade do ar mais alta (0,9 m/s), os ocupantes podem aceitar temperaturas mais elevadas, entre 25 e 28 °C. Desta maneira, a partir do ajuste de *setpoints*, o consumo energético com condicionamento de ar poderia ser reduzido.

Ao passo que o aumento da velocidade do ar pode favorecer os limites de temperatura aceitáveis, uma questão que deve ser considerada no ambiente das salas de aula é a do ruído produzido por estes equipamentos. Libardi *et al.* (2006) discutem sobre a percepção de professores sobre os efeitos do ruído em sala de aula na sua saúde. Segundo os autores, 75% dos professores consideraram o ruído em sala de aula alto (55 a 102 dB), 86% deles relataram sintomas extra auditivos de tontura, problemas digestivos e no sistema circulatório e 95% dos respondentes relataram queixas vocais de cansaço e ardor na laringe após as aulas. Apesar dessa pesquisa ter sido realizada em salas de aula de ensino fundamental, ela aponta para a importância do nível adequado de ruído nas salas de aula, que pode influenciar a saúde dos professores.

Dias, Santos e Mariano (2019) analisaram os níveis de pressão sonora em salas de aula de uma universidade e os seus efeitos nas atividades exercidas por professores e alunos. O estudo foi realizado em dez salas de aula da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, com a participação de 279 alunos e 20 professores. As salas possuíam 75 m², 50 carteiras (0,66 ocupantes/m²) e dois ventiladores de teto. O ruído foi percebido tanto pelos estudantes como pelos professores como fator influente de forma negativa em suas atividades de ensino-aprendizagem nas salas de aula, sendo mais impactante para os professores do que para os estudantes.

Análises referentes a questões acústicas não fazem parte do escopo desta tese. Trabalhos que citam a questão do ruído nas salas de aula foram abordados pois os mesmos podem contribuir para a discussão acerca da adoção de ventiladores nestes espaços, já que são equipamentos que usualmente apresentam ruído quando utilizados. O próximo item do trabalho apresenta estudos sobre conforto térmico realizados em salas de aula em edifício que faz parte do estudo de caso da presente pesquisa – uma delas com ventiladores de teto.

2.5.3.1. Análises de conforto térmico em prédio da UFMG

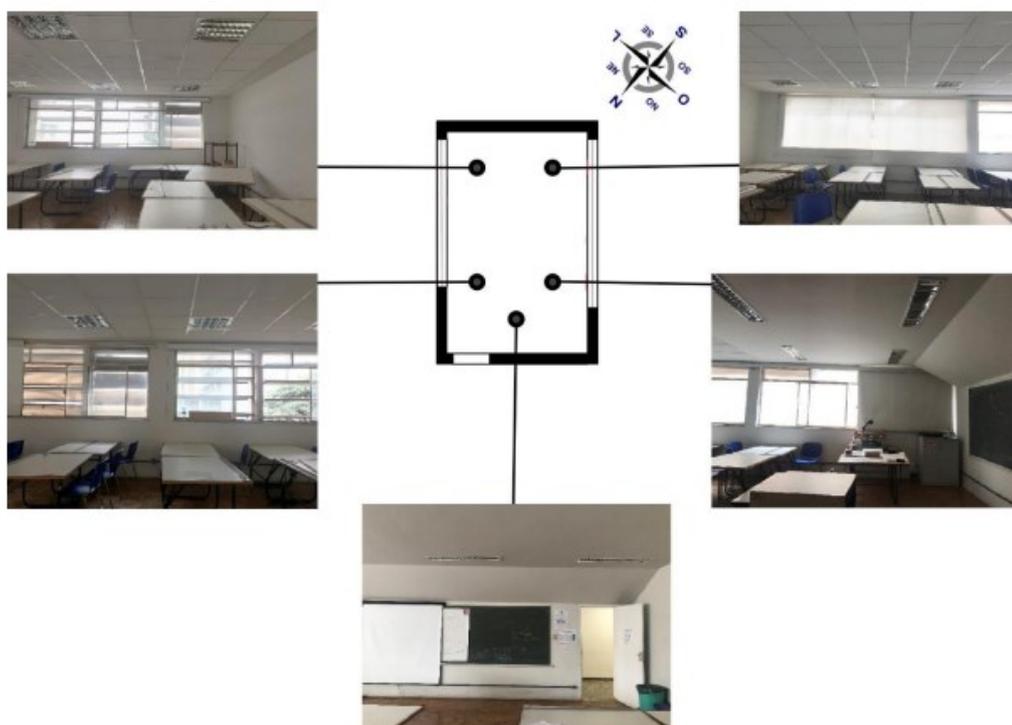
Souza (2019) apresentou análise do conforto térmico e da percepção do usuário de duas salas de aula da Escola de Arquitetura da UFMG em Belo Horizonte. Este trabalho é abordado em detalhe nesta seção pois, em virtude da pandemia de COVID-19 e conseqüente impossibilidade de realização de medições *in loco*, o referido trabalho foi utilizado como fonte para comparação de dados reais com dados simulados no desenvolvimento da presente pesquisa. As salas de aula estudadas por Souza (2019) são apresentadas nas Figura 19 a 21. Os dois ambientes selecionados possuem cobertura exposta, sendo uma no terceiro e outra no quarto andar (salas 315 e 410B, respectivamente).

Figura 19 - Localização das salas 315 e 410B - Escola de Arquitetura UFMG



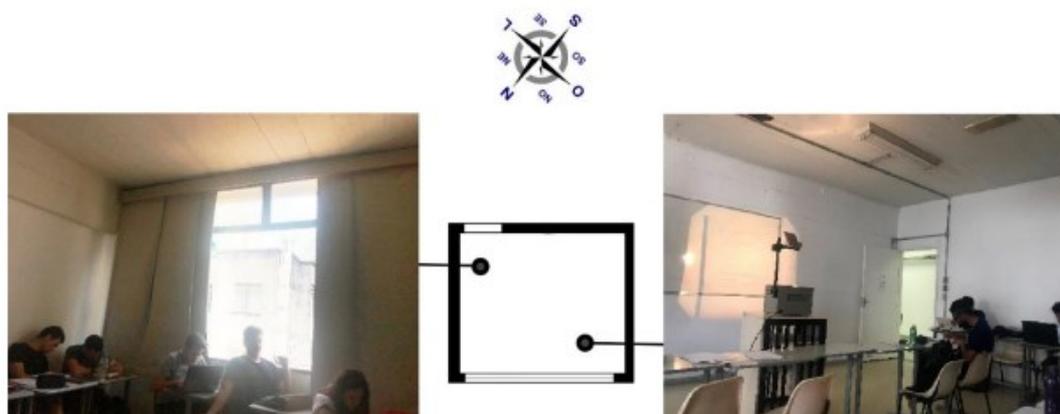
Fonte: Souza (2019).

Figura 20 - Sala 315 - Escola de Arquitetura UFMG



Fonte: Souza (2019).

Figura 21 - Sala 410B - Escola de Arquitetura da UFMG.



Fonte: Souza (2019).

Conforme visto na Figura 20, a sala de aula 315 (154,85 m²) possui orientação Nordeste-Sudeste e apresenta aberturas para ventilação cruzada em fachadas opostas. Há a presença de janelas de correr com bandeira em basculantes, proteção solar na fachada Nordeste e cortinas de tecido. A ventilação neste ambiente ocorre exclusivamente de maneira natural. O pé direito da sala é de 2,7 m e os percentuais de abertura das fachadas são de 34% e 51% (SOUZA, 2019). Segundo Bitarães (2019), a transmitância térmica das paredes é de 1,8 W/m²K (tijolo furado 18cm) e a da cobertura é de 3,74 W/m²K (cobertura plana em laje de concreto 10cm). Já a sala 410B (68,05 m²) apresenta duas aberturas em sua única parede exposta ao ar externo, orientada a Noroeste, também com janelas de correr com bandeira em basculante. Não há proteção solar para esta abertura, há dois ventiladores de teto e cortina de tecido. O pé direito da sala é de 3,0 m e o percentual de abertura da fachada é de 61% (SOUZA, 2019). A transmitância térmica das paredes é de 1,80 W/m²K e a da cobertura é de 2,06 W/m²K (telha de fibrocimento e laje de concreto 10cm) (BITARÃES, 2019).

Em ambas as salas de aula são ministradas aulas teóricas, sendo que na sala 315 também são ministradas aulas práticas, com maior movimentação e interação entre alunos e professores. As janelas e cortinas poderiam ser manipuladas por todos os usuários em ambas as salas (SOUZA, 2019). Segundo Bitarães (2019) os materiais das paredes externas do edifício encontram-se escuros devido ao mal estado de manutenção. Souza (2019) e Bitarães (2019) realizaram campanhas de medição nas salas 315 e 410B aliadas à aplicação de questionários. O questionário aplicado seguiu

o modelo da ASHRAE 55 (2017). Foram coletados dados de temperatura de bulbo seco (TBS), temperatura de bulbo úmido (TBU), velocidade do ar e temperatura de globo. As medições aconteceram no período de 17 a 29 de maio de 2019 (período letivo normal, anterior à pandemia), na estação de outono. Foram realizadas quatro medições em cada sala, sendo duas no período da tarde e duas no período da manhã. Para a medição do TBS, TBU e temperatura de globo, foram utilizados termômetros cedidos pelo Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética no Ambiente Construído (LABCON/UFMG) (Figura 22). Para o TBU foram utilizados dois termômetros presos por uma haste e amarrados a uma gaze umedecida. Para a temperatura de globo, foi utilizado um termômetro de globo. Para a medição da velocidade do ar, foi utilizado um termômetro Kata (Figura 23), que consiste em um termômetro de álcool em vidro com um grande bulbo e duas marcas (SOUZA, 2019).

Figura 22 - Termômetros utilizados por Souza (2019) e Bitarães (2019) para a medição de TBS, TBU e temperatura de globo das salas 315 e 410B da Escola de Arquitetura da UFMG



Fonte: Souza (2019) e Bitarães (2019).

Figura 23 - Termômetro Kata utilizado por Souza (2019) e Bitarães (2019) para a medição da velocidade do ar das salas 315 e 410B da Escola de Arquitetura da UFMG



Fonte: Souza (2019) e Bitarães (2019).

Com base nas medições realizadas, foram calculadas a temperatura média radiante e a velocidade e a umidade do ar. As equações utilizadas são apresentadas por Souza (2019). A Figura 24 mostra os resultados das medições junto aos dados obtidos pela estação meteorológica do Instituto de Meteorologia (INMET) número 83587, localizada na região central de Belo Horizonte, assim como o edifício analisado.

Figura 24 - Resultados das medições realizadas por Souza (2019) e Bitarães (2019) das salas 315 e 410B da Escola de Arquitetura da UFMG

	DATA	PERÍODO	HORÁRIO	FONTES DE DADOS	TBS (C)	TBU (°C)	Veloc. Ar (m/s)	UR %
S	17/05	Manhã	11:50	MEDIÇÃO	23,5	19,2	1,87	67,71
			9:00	IMMET	18,7	16	1,1	74
A	07/06	Manhã	10:50	MEDIÇÃO	22,5	18	2,21	65,58
			9:00	IMMET	17,7	14,1	1,8	67
L	23/05	Tarde	17:30	MEDIÇÃO	27,4	20,2	1,91	52,73
			15:00	IMMET	28,4	19,1	1,3	39
A	06/06	Tarde	16:40	MEDIÇÃO	23,3	16,9	2,00	53,55
			15:00	IMMET	20,6	13,7	2,1	43
3	29/05	Manhã	11:30	MEDIÇÃO	26,1	19,4	2,09	54,44
			9:00	IMMET	23,3	18,8	0,8	64
1	05/06	Manhã	9:40	MEDIÇÃO	22,4	18	2,35	66,20
			9:00	IMMET	15,5	11,7	0,5	62
5	28/05	Tarde	15:35	MEDIÇÃO	27,2	24,5	2,2	80,63
			15:00	IMMET	27,5	19	1,3	42
S	29/06	Tarde	14:30	MEDIÇÃO	27,2	22	2,24	64,43
			15:00	IMMET	23,2	17,5	0,7	55

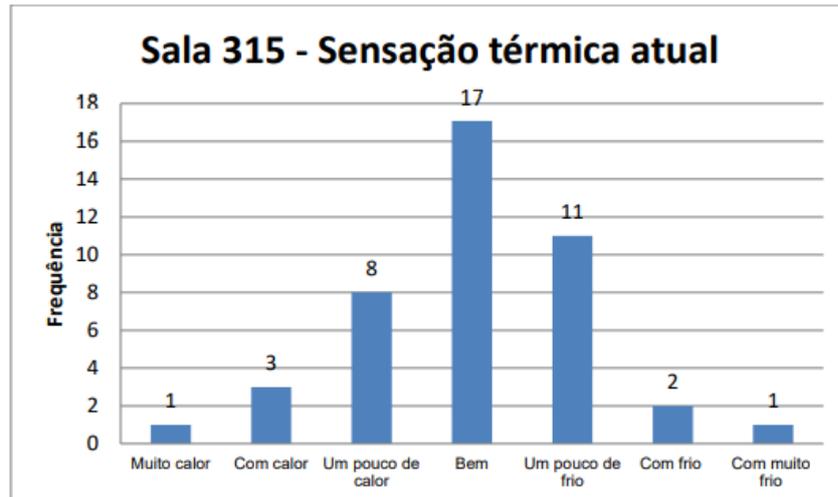
Fonte: Souza (2019).

Em relação ao questionário, Souza (2019) relata que os foram coletadas 189 respostas. Somente as respostas dos respondentes com saúde perfeita foram consideradas, totalizando 109 pessoas (66 mulheres e 41 homens). Os respondentes eram estudantes de graduação e pós-graduação e possuíam entre 17 e 42 anos. Em relação à vestimenta, o clo calculado com base nas respostas dos estudantes variou entre 0,2 e 0,62. Todos os participantes estavam sentados, correspondendo à taxa metabólica de 1,2 met (SOUZA, 2019).

Em relação à sensação térmica, na sala 315, 40% relataram voto de neutralidade térmica, 26% relataram sentir um pouco de frio e 19% um pouco de calor. Já na sala 410B, 47% relataram sensação térmica neutra, 22% relatam um pouco de calor e 10% um pouco de frio (SOUZA, 2019). As Figuras 25 e 26 mostram os resultados de

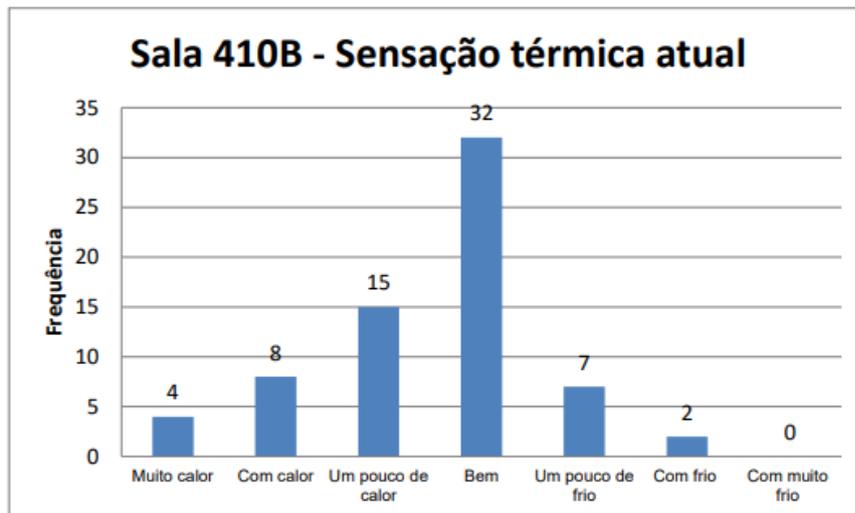
sensação térmica obtidos pelo questionário nas duas salas. Pela quantidade de respostas, é possível deduzir a densidade de ocupação dos ambientes, sendo aproximadamente 0,3 ocupantes/m² na sala 315 e 1 ocupante/m² na sala 410B.

Figura 25: Resultados de sensação térmica obtidos pelos questionários aplicados na sala 315 da Escola de Arquitetura da UFMG no estudo de Souza (2019) e Bitarães (2019)



Fonte: Souza (2019).

Figura 26: Resultados de sensação térmica obtidos pelos questionários aplicados na sala 410B da Escola de Arquitetura da UFMG no estudo de Souza (2019) e Bitarães (2019)



Fonte: Souza (2019).

A autora pontua que a maioria dos usuários demonstrou sensação térmica neutra, em situações nas quais as temperaturas do ar variaram entre 22,4 e 27,4 °C. Observou-se variabilidade nas respostas, o que, segundo a autora, mostra a subjetividade do conforto térmico para cada indivíduo (SOUZA, 2019). A partir da dedução da densidade de ocupação, percebe-se que a sala de aula com maior ocupação (410B) apresentou maior percentual de sensação térmica de pouco calor. Além disso, essa

sala não possuía ventilação cruzada. Não foi informado no trabalho se os ventiladores de teto estavam sendo utilizados no momento das medições.

Em relação à preferência térmica, na sala 315 35% dos usuários indicaram permanência das condições térmicas, enquanto 21% indicaram preferir o ambiente um pouco mais frio e 16% preferiram ambiente um pouco mais quente. Já na sala 410B, 47% indicaram preferência pela permanência das condições térmicas, enquanto 28% preferiam o ambiente um pouco mais frio e apenas 6% preferiam o ambiente um pouco mais quente. Percebe-se que, entre os estudantes que não preferiram a permanência das condições térmicas existentes, a maior parte preferiu o ambiente mais fresco do que o encontrado.

Em relação à satisfação térmica, Souza (2019) aponta que a sala 410B, mais densamente ocupada e sem ventilação cruzada, apresenta maiores níveis de insatisfação em relação à sala 315. A maior parte dos respondentes indicou nível de satisfação de 50%.

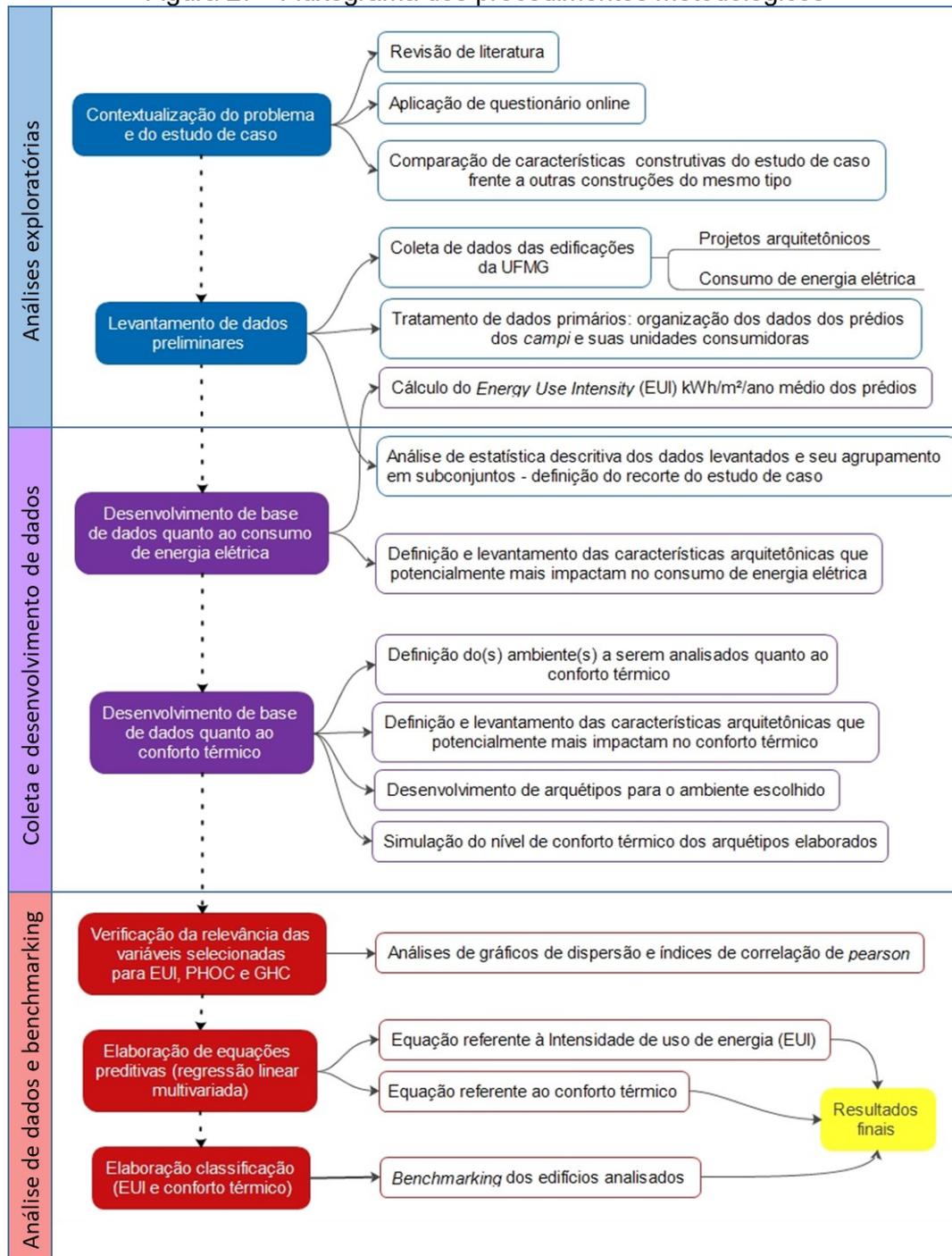
Também foram coletadas respostas referentes à memória de sensação térmica nas duas salas, referentes aos dias quentes e aos dias frios. Na sala 315 as respostas referentes aos dias quentes indicaram 28% “algumas vezes quente”, 30% “frequentemente quente” e 11% sempre muito quente. Já na sala 410B, 69% das respostas indicaram a sensação de “frequentemente quente”. Já para os dias frios, nas duas salas a maior parte dos respondentes indicou sensação neutra / confortável (39% na sala 315 e 35% na sala 410B).

Os resultados do estudo citado mostram que na sala com ventilação cruzada e menor densidade de ocupação a memória referente ao desconforto por calor é mais amena do que na sala com maior densidade de ocupação, sem ventilação cruzada e sem proteção solar, mesmo essa possuindo ventiladores de teto. Em relação às fontes de desconforto mais citadas pelos respondentes em ambas as salas, destacam-se a pouca movimentação de ar, incidência de sol, janela com defeito e sistema de ventilação ineficiente (SOUZA, 2019). A autora reitera que as medições foram realizadas no outono, próximo do início do inverno, período no qual as temperaturas são amenas em Belo Horizonte, e ainda assim houve respostas indicativas de desconforto térmico por parte dos participantes.

3. MATERIAIS E MÉTODO

Os procedimentos metodológicos foram divididos três etapas: 1) análises exploratórias, 2) coleta e tratamento de dados e 3) análise dos dados e elaboração do benchmarking, descritas nesta seção. A Figura 27 apresenta o fluxograma com o resumo das etapas metodológicas, que serão apresentadas posteriormente.

Figura 27 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.1. Contextualização do problema e do estudo de caso

O objetivo desta etapa foi desenvolver a caracterização do problema e contextualizar o estudo de caso em relação ao cenário nacional. Para isto, o primeiro passo foi a realização de uma revisão sistemática da literatura sobre o tema eficiência energética em universidades, a fim de contextualizar as principais abordagens de pesquisa nesta área e identificar a lacuna quanto ao tema relacionado ao *benchmarking* energético em universidades.

Buscou-se analisar os cenários internacional e nacional. Para o primeiro, realizou-se o mapeamento do conhecimento a partir do método ProKnow-C (*Knowledge Development Process-Constructivist*) de Ensslin, Ensslin e Pinto (2013). A base de dados utilizada para a pesquisa de trabalhos internacionais foi a Scopus® (SCOPUS, 2019). O mapeamento das publicações nacionais foi feito com o levantamento dos Anais dos eventos científicos ENCAC (Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído) e ENTAC (Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído) nos últimos dez anos. Esta etapa foi adotada a fim de analisar as produções nacionais, já que foram identificados poucos trabalhos brasileiros no portfólio de produções internacionais.

O levantamento no Scopus foi feito em fevereiro de 2019 e atualizado em janeiro de 2020. As palavras-chave utilizadas foram: "*energy efficien**" AND "*universit* building*" OR "*universit* camp**". Os trabalhos selecionados foram agrupados nas categorias: Diagnóstico, Otimização, Automação, Usuário e Outros. Cada uma delas foi dividida em subcategorias, nas quais o tema de *benchmarking* fez parte da categoria de Diagnóstico. Das produções identificadas em Diagnóstico, também foram verificados os tipos de condicionamento de ar relatados e as variáveis arquitetônicas analisadas nos estudos. Por fim, verificou-se uma lacuna de produções de trabalhos relacionados ao tema específico de *benchmarking* em universidades brasileiras. Os resultados desta etapa do trabalho são apresentados no Apêndice A.

A partir do entendimento de que edifícios eficientes energeticamente também devem apresentar condições térmicas confortáveis, conforme o conceito apresentado por Meier, Olofsson e Lamberts (2002), e da vivência da pesquisadora nos ambientes de universidades brasileiras, identificou-se a necessidade de contextualizar a experiência térmica dos ocupantes em edifícios universitários brasileiros e a utilização de sistemas

de condicionamento de ar destes edifícios. Para isto, foi aplicado um questionário *online*.

3.1.1. Aplicação do questionário para caracterização de conforto térmico e uso de sistemas de condicionamento de ar

O objetivo desta etapa metodológica foi caracterizar o contexto geral em relação aos sistemas de condicionamento de ar predominantemente adotados nos edifícios brasileiros de IES e relacionar esses modos de condicionamento à experiência térmica de seus ocupantes, considerando as diferenças climáticas e culturais do país, em instituições públicas e privadas. Esta etapa foi elaborada para subsidiar o desenvolvimento da metodologia de *benchmarking* desenvolvida na tese, auxiliando na identificação do problema e na definição do recorte da tipologia estudada dentro da complexa gama de edifícios existentes em *campi* universitários.

3.1.1.1. Coleta de dados

O questionário foi aplicado com a plataforma *online Google Forms* no período de julho de 2019 a fevereiro de 2020. O público-alvo foi composto por usuários de prédios de IES no país: estudantes, professores e funcionários. Os entrevistados foram contatados por *e-mail* e grupos de mídia social (Facebook e Instagram). Os *e-mails* foram coletados em sites de IES brasileiras e os grupos selecionados nas mídias sociais foram grupos normalmente frequentados por estudantes, pesquisadores e professores. Todas as respostas foram voluntárias e anônimas. As respostas foram consideradas válidas quando os entrevistados indicaram frequentar os edifícios das IES e o questionário foi respondido na íntegra, de maneira coerente (sem respostas de linguajar indevido). Com base no alto número de usuários de edifícios de IES, estatisticamente, o universo foi considerado infinito em relação à amostra. Portanto, para compor uma análise válida, buscou-se reunir pelo menos duas respostas de cada Zona Bioclimática Brasileira (ZBs).

A estrutura do questionário apresentou três partes: caracterização da amostra, caracterização do modo de condicionamento de ar das universidades e caracterização da experiência térmica. Um estudo piloto foi realizado com pesquisadores e alunos do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética no Ambiente Construído

(LABCON/UFMG), garantindo que as perguntas e o vocabulário fossem coerentes e de fácil entendimento. Considerando que os *campi* de IES possuem complexidade de uso predial (DING *et al.*, 2013), no que se refere à experiência térmica, o questionário foi direcionado aos edifícios onde ocorrem as atividades de ensino e aprendizagem. Esta escolha se justifica pelo fato de que são estes os edifícios nos quais a maior parte dos usuários passam a maior parte do tempo na universidade.

As questões relacionadas aos sistemas de ar-condicionado foram baseadas na revisão de literatura, onde verificou-se que sua adoção influencia no consumo de energia dos edifícios de IES e que a intensidade desta adoção varia de acordo com os tipos de uso dos espaços. As opções de respostas referentes aos modos de condicionamento de ar foram relativas à presença de: ventilação natural, ventiladores, unidades de ar-condicionado da janela, unidades de ar-condicionado split e/ou ar-condicionado central. No Brasil, o uso de aquecimento ativo é muito raro, por isso não foi incorporado na pesquisa. As perguntas foram relacionadas à percepção dos respondentes.

A análise da experiência térmica incorporou questões sobre os Votos de Sensação Térmica (VST), Votos de Preferência Térmica (VPT) e Votos de Aceitabilidade Térmica (VAT), com escalas homólogas às utilizadas por pesquisas anteriores (RUPP; GHISI, 2019 e TOE; KUBOTA, 2013), para duas estações: verão e inverno. A partir das respostas de VST, calculou-se o Percentual predito de pessoas desconfortáveis (PPD), de acordo com a ISO 7730 (2005).

A ASHRAE 55 (2017) indica que a satisfação térmica dos usuários pode ser estudada ao longo do tempo (três a seis meses). Estudos sobre a memória de experiência térmica dos usuários são encontrados em trabalhos anteriores (LENZHOLZER, 2010, GIAMALAKI; KOLOKOTSA, 2019 e CÓSTOLA *et al.*, 2019). Lenzholzer (2010) indica que estudos que envolvem a memória acerca da experiência térmica relacionam-se com o conceito de experiências “enraizadas”, também chamada de “*schemata*” perceptiva dos usuários. O conceito de *schemata* foi desenvolvido na área da psicologia e é utilizado pelas ciências comportamentais e psicologia ambiental. Pode ser entendido como “modelos” ou percepções “fixas” que os usuários desenvolvem sobre o ambiente, que são moldados por suas experiências reais de longo prazo (LENZHOLZER, 2010). Cóstola *et al.*, (2019), em seu estudo realizado em residências

brasileiras, propõem a métrica o *Seasonal Thermal Sensation Vote* para a indicação do voto de sensação térmica nas estações de inverno e verão.

A Tabela 1 mostra a estrutura de perguntas do questionário. As perguntas 6 e 7 apresentadas na tabela também foram feitas para outras tipologias de edifícios universitários além das Unidades Acadêmicas: laboratórios, prédios administrativos e prédios de serviços. Embora, para fins de síntese, a tabela apresente as perguntas 8 a 10 sobre o período de verão, o questionário completo também apresentou estas questões sobre o período do inverno e para cada tipo de uso de ambientes.

Tabela 1 - Estrutura do questionário

Sobre o respondente

- 1) Você frequenta edifícios de instituições de ensino superior no Brasil? ¹ Sim Não
- 2) Sexo: Masculino Feminino Não definido (ND)
- 3) A instituição que você frequenta é: Pública Privada Outro: _____
- 4) Que atividade você exerce nessa instituição?
- Professor Funcionário técnico/administrativo Est. graduação Est. pós-graduação Outro: _____
- 5) Qual instituição de educação superior você frequenta? _____

Sobre os sistemas de condicionamento de ar

- 6) Quais, ou qual, tipo(s) de sistema de condicionamento de ar você encontra nas Unidades Acadêmicas que você frequenta? (você pode escolher mais de uma alternativa). ²
- Ventilação natural Ventiladores Ar condicionado de janela Não sei/não se aplica
- Ar condicionado split Ar condicionado central
- 7) Indique qual tipo de sistema de condicionamento de ar você encontra predominantemente nos ambientes das Unidades Acadêmicas que você frequenta. ²
- Ventilação natural Ventiladores Ar condicionado de janela Não sei/não se aplica
- Ar condicionado split Ar condicionado central

Sobre a experiência térmica

- 8) Indique qual a sua percepção em relação à sua sensação térmica nos ambientes das Unidades Acadêmicas que você frequenta no verão, em geral. ^{2 3}
- Muito quente Quente Levemente quente Confortável Levemente frio
- Frio Muito frio Não sei/não se aplica
- 9) Indique qual a sua percepção em relação à sua preferência térmica nos ambientes das Unidades Acadêmicas que você frequenta no verão, em geral. ^{2 3}
- Mais quente Assim mesmo Mais frio
- 10) Indique qual a sua percepção em relação à sua aceitabilidade térmica nos ambientes das Unidades Acadêmicas que você frequenta no verão, em geral. ^{2 3}
- Aceitável Inaceitável

¹ Perguntas compulsórias. Respondentes só acessavam próximas perguntas se respondessem "Sim".

² Questões repetidas para cada tipo de uso dos espaços: Salas de aula, Bibliotecas, Laboratórios de pesquisa e informática, Laboratórios de equipamento e Gabinetes de professores/administrativos.

³ Questões também repetidas para a estação do inverno.

Os tipos de uso do espaço analisados foram: Salas de aula, Bibliotecas, Laboratórios de Pesquisa (aqueles em que os principais equipamentos são computadores ou outros de menor consumo energético), Laboratórios de Equipamentos Densos (onde as cargas são compostas principalmente por equipamentos que consomem mais energia que computadores) e Gabinetes de professores & Salas Administrativas. O questionário completo é apresentado no Apêndice B.

Entende-se que o questionário aplicado, por ser uma pesquisa de opinião pública sem a identificação dos participantes, se enquadrou no item I da Resolução nº01/2020 da Escola de Arquitetura da UFMG (Anexo 1). Sendo assim, a mesma pôde ser desenvolvida sem encaminhamento ao Comitê de Ética em Pesquisa (CEP).

3.1.1.2. Análise dos dados do questionário

Cada cidade informada nas respostas do questionário foi identificada de acordo com sua classificação das zonas bioclimáticas brasileiras, ZBs, conforme a NBR 15.220-3 (ABNT, 2003). Para permitir uma análise objetiva do conjunto de dados, o agrupamento das respostas foi simplificado, tendo sido divididos em três grupos climáticos: subtropical, tropical e tropical quente. Os critérios para o agrupamento foram as diferenças entre as temperaturas médias anuais de bulbo seco e as diferenças entre a porcentagem de horas de desconforto por calor e frio, de acordo com a faixa de conforto adaptativo da ASHRAE 55 (2017).

Dois tipos de análise de dados climáticos foram feitos: os dados resumidos na Figura 59a (capítulo de resultados) foram obtidos utilizando arquivos meteorológicos TMYx das cidades de onde houve respondentes e que estavam disponíveis no repositório *Climate One Building* (2020). Os dados resumidos na Figura 59b (capítulo de resultados) representam as cidades de onde houve respondentes e que também foram contemplados na plataforma *online* Projeteer (MME, 2020). Esta plataforma possui um banco de dados de cidades brasileiras para as quais o percentual de horas totais durante o ano que estão dentro ou fora da zona de conforto adaptativo da ASHRAE 55 (2017) (aceitabilidade de 80%) é automaticamente fornecido com base em dados meteorológicos.

O tratamento dos dados envolveu o agrupamento dos tipos de condicionamento de ar por tipo de instituição pública ou privada e, para a caracterização da experiência

térmica, agrupou-se os dados por ambientes condicionados e não condicionados artificialmente. As análises foram feitas tanto em relação aos grupos climáticos quanto estratificando as respostas referentes à UFMG. Assim, buscou-se comparar a similaridade da realidade do estudo de caso com o cenário nacional. Tal comparação também foi desenvolvida no que se refere a características arquitetônicas, descrito na seção seguinte.

3.1.2. Comparação de características arquitetônicas do estudo de caso frente a outras construções da mesma tipologia

Com o objetivo de contextualizar as características comumente encontradas nos prédios de universidades brasileiras e comparar o estudo de caso (edifícios da UFMG) frente ao cenário nacional, foi desenvolvida uma análise exploratória das características arquitetônicas dos edifícios de universidades em diferentes regiões do Brasil. Essa etapa foi feita a partir de análises visuais de fotografias dos sites das instituições e da plataforma *online Google Earth*®. Os aspectos analisados foram a quantidade de pavimentos, características volumétricas e tipos de condicionamento de ar encontrados nas fachadas e coberturas. Foram analisados 182 edifícios de universidades brasileiras, sendo 8 edifícios da UFMG e 174 edifícios de diferentes regiões do Brasil. Este estudo também está descrito em Garcia *et al.* (2021).

Em relação aos tipos de condicionamento de ar, considerou-se o edifício como ventilado naturalmente quando nenhum equipamento de ar-condicionado foi identificado nas imagens do *Google Earth*®. Considerou-se o condicionamento como misto quando aparelhos de ar-condicionado foram identificados nas fachadas, e como artificial quando unidades de VRF ou *chillers* foram identificados nas imagens aéreas. A Figura 28 mostra um exemplo da identificação do sistema de condicionamento de ar misto.

Figura 28 - Exemplo de identificação do tipo de condicionamento de ar: tipo misto (unidades de ar-condicionado *split*)



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Os levantamentos foram realizados em uma amostra aleatória de edifícios dos *campi* das universidades públicas de cada região do Brasil, considerando ao menos duas por região. As análises comparativas da amostra foram feitas a partir da comparação quantitativa dos dados levantados e de análises visuais das imagens coletadas.

3.2. Levantamento de dados primários

O levantamento de dados primários envolveu a coleta de informações referentes ao consumo de energia elétrica dos prédios dos *campi* da UFMG em Belo Horizonte e sua organização, assim como o levantamento das áreas dos edifícios. A métrica considerada para o tratamento dos dados primários foi EUI (kWh/m²/ano), tendo em vista sua ampla utilização na literatura internacional. Para a contabilização de prédios, foram desconsideradas guaritas, casas de máquina e prédios cujos a UFMG não é responsável pelo pagamento das contas de energia elétrica, como os Hospitais do *campus* Saúde.

A obtenção dos consumos anuais de energia elétrica deu-se a partir das contas da companhia distribuidora (CEMIG) junto à Pró-Reitoria de Administração (PRA/UFMG) e ao Departamento de Manutenção e Operação da Infraestrutura (DEMAI/UFMG). As contas de cinco anos (2015 a 2019) foram coletadas para a determinação de um consumo anual médio, para que o impacto de eventuais greves e paralizações fosse minimizado nas análises desenvolvidas. Os dados de 2020 e 2021 não foram considerados por conta da pandemia de COVID-19, que afetou o funcionamento de todos os edifícios da universidade.

Um dos prédios foi inaugurado em 2018 (CAD3), então seu consumo foi considerado apenas em 2019. Dois outros prédios passaram por *retrofit* do sistema de iluminação artificial a partir de editais da CEMIG (Medicina – 2017 e ICB -2018), com a troca de lâmpadas fluorescentes por LEDs em todo o prédio. Portanto, seus consumos foram considerados apenas no período após as intervenções. As áreas dos edifícios da UFMG foram obtidas por meio dos projetos arquitetônicos, cedidos pelo Departamento de Planejamento e Projetos (DPP/ UFMG).

Em um segundo momento, a contabilização e compatibilização das unidades consumidoras e dos seus respectivos edifícios foi feita, para que se pudesse posteriormente calcular o EUI de cada edifício. Tal etapa foi necessária pois, em alguns casos, houve prédios com mais de uma unidade consumidora e, em outros, unidades consumidoras que contabilizavam o consumo de mais de um prédio. Esta identificação foi realizada com o auxílio de funcionários do DEMA/UFMG. Em um terceiro momento, realizou-se o cálculo do EUI para os edifícios da amostra, nas quais foram considerados o consumo de energia anual médio e a área construída total obtida pelos projetos arquitetônicos.

Por fim, os dados levantados foram analisados estatisticamente e agrupados em subconjuntos. Foi feita a divisão de prédios por tipo de atividade e análise de sua representatividade dentro do consumo do conjunto de edificações da UFMG em Belo Horizonte. Considerando que a Universidade comporta em seus espaços grande variedade de atividades, cada prédio foi classificado por tipo de atividade. **Unidades Acadêmicas** referem-se aos prédios onde há atividade de ensino e aprendizagem tradicional (salas de aula com carteiras e quadro), **Laboratórios** referem-se aos prédios cuja atividade é a de laboratórios de pesquisa, **Administrativos** referem-se aos prédios cuja atividade é a administrativa e **Serviços/Outros** referem-se aos prédios cujas funções sejam diferentes das opções anteriores, como restaurantes universitários. Buscou-se agrupar usos que apresentariam consumo de energia similares entre si. O recorte do estudo de caso foi definido com a análise estatística dos dados primários agrupados por atividades.

A amostra final de EUI contou com 94% de toda a população de prédios dos *campi* da UFMG situados em Belo Horizonte. Não foram contemplados os edifícios das Moradias estudantis, o Espaço do Conhecimento e Centro Cultural (todos edifícios da categoria Serviços/Outros).

3.3. Desenvolvimento de base de dados quanto ao consumo de energia elétrica

Esta etapa se referiu ao levantamento de dados desenvolvido para os prédios da categoria Unidades Acadêmicas, que configuraram o foco da presente pesquisa. A definição das variáveis arquitetônicas a serem consideradas no desenvolvimento da base de dados se deu a partir da revisão de literatura. Os dados dos 27 prédios foram levantados, em grande parte, a partir dos projetos arquitetônicos, em plantas, cortes, fachadas e memoriais descritivos, obtidos com o DEMA/UFMG. A obtenção dos projetos representou um longo período da presente pesquisa. Foram necessárias autorizações e o intermédio de um funcionário para obter cada planta. Este processo iniciou-se em no final de 2018 e finalizou-se em 2021.

De julho de 2019 a fevereiro de 2020 foram realizadas visitas *in loco*, que visaram identificar a setorização dos projetos de acordo com os usos dos espaços internos, como será explicado a seguir. Estas visitas contaram com o auxílio de quatro estudantes de Iniciação Científica. Pretendia-se que todos os dados fossem levantados ou conferidos a partir de visitas no local, o que não foi possível devido a pandemia de COVID-19, declarada em março de 2020. A pandemia agregou desafios referentes ao levantamento de dados desta pesquisa, pois as visitas *in loco* foram suspensas para a preservação da saúde de todos os envolvidos. Assim, a obtenção dos dados precisou ser realizada de maneiras alternativas via *internet* e chamadas telefônicas. Ao todo, foram contactados aproximadamente 64 funcionários da UFMG por *e-mail* ou telefone. Em maio e junho de 2022 o processo de levantamento foi retomado com o auxílio de 2 bolsistas Iniciação Científica vinculadas ao projeto Oásis da UFMG. Estas bolsistas levantaram a presença de sistemas de condicionamento de ar e densidade de ocupação de salas de aula em unidades onde não havia levantamentos.

O Quadro 6 traz as variáveis levantadas e os métodos e fontes utilizados para seu levantamento.

Quadro 6 – Variáveis consideradas e os métodos utilizados para o levantamento de dados das Unidades Acadêmicas da UFMG em Belo Horizonte

Variável	Método de levantamento
<p>Geometria:</p> <p>Área construída (m²); Área de ocupação (projeção da cobertura) (m²); Área útil (m²); Área de permanência prolongada (m²); Pé direito (m); Número de pavimentos; Altura total (m²); Volume (m³).</p>	<p>Informações obtidas a partir dos dados arquitetônicos em plantas, cortes, fachadas e elevações dos prédios.</p> <p>Vetorização das plantas escaneadas para obtenção das informações desejadas.</p>
<p>Idade (ano de construção).</p>	<p>Dado obtido por meio do livro Territórios da Universidade (MALARD; MACIEL, 2013).</p>
<p>Proporções por tipos de uso (%) (Figura 29):</p> <p>Salas de aula (a); Outras áreas de estudo (b); Laboratórios de pesquisa e informática (c); Laboratórios de equipamentos densos (d); Gabinetes de professores/salas administrativas(e); Circulação (f); Outros (depósitos, sanitários etc.) (g).</p>	<p>Os espaços foram setorizados de acordo com as indicações nas plantas baixas e conferidas com visitas <i>in loco</i>.</p> <p>Foram consideradas as Unidades Acadêmicas do <i>campus</i> Pampulha, as Faculdades de Medicina e Enfermagem/Nutrição do <i>campus</i> Saúde e as Escolas de Arquitetura e Faculdade de Direito localizadas no centro da cidade de Belo Horizonte, que totalizam aproximadamente 414 mil m² de área total construída.</p> <p>Foram realizadas visitas em aproximadamente 330 mil m². Estima-se este valor, representativo de 80% da área total, pois algumas áreas dos prédios eram de acesso restrito, não podendo ser acessadas.</p> <p>As visitas <i>in loco</i> foram realizadas por quatro estudantes de Iniciação Científica no período de aproximadamente seis meses.</p>
<p>Percentual de abertura das fachadas (PAF) (%), separado pelas orientações solares Norte, Sul, Leste e Oeste.</p>	<p>Os percentuais de abertura das fachadas foram levantados a partir das elevações dos prédios feitas em arquivos CAD. Nos casos em que a orientação não correspondia às quatro orientações solares básicas, considerou-se a simplificação de quadrantes apresentada no INI-C (BRASIL, 2021).</p> <p>Nos casos das plantas escaneadas, realizou-se a vetorização para a realização dos cálculos.</p> <p>Como nem todos os prédios possuíam elevações atualizadas e completas, em alguns casos estimou-se este percentual a partir de visualização no <i>Google Street View</i>.</p>

<p>Transmitância térmica de paredes e coberturas (U) (W/m²K).</p>	<p>Esta variável foi levantada a partir de informações dos memoriais descritivos e/ou a partir dos detalhamentos em plantas e cortes executivos.</p> <p>As transmitâncias, quando não presentes na literatura, foram calculadas de acordo com o método da NBR 15220 (2005).</p> <p>No caso de prédios com mais de um tipo de envoltória, foi calculada a média ponderada das transmitâncias térmicas das diferentes composições de paredes e coberturas.</p> <p>Nos casos em que não havia informação sobre a conformação da envoltória, ela foi inferida de modo a considerar a mesma conformação de prédios construídos na mesma época.</p> <p>Também foi testado o agrupamento desta variável por níveis de acordo com os limites máximos estabelecidos para a ZB3 pelo RTQ-C (BRASIL, 2010) para classificação A. Para paredes considerou-se nível baixo quando $U \leq 3,7\text{W/m}^2\text{K}$ e para coberturas considerou-se nível baixo quando $U \leq 2,0\text{W/m}^2\text{K}$. Os valores acima dos limites citados foram considerados como nível alto.</p>
<p>Absortância solar de paredes e coberturas (α).</p>	<p>Esta variável foi levantada a partir da análise via <i>Google Street View</i>, com a identificação visual de cores de acordo com a tabela presente no RAC (2013), baseada em Dornelles (2008).</p> <p>Foram utilizados valores médios da absortância baseados nas categorias de cores desenvolvidas por Ribeiro (2017): brancos; amarelos; vermelhos e marrons; azuis e verdes; e cinzas e pretos (Tabela 2). Foram consideradas como pintura envelhecida aquelas de prédios com mais de 5 anos de construção.</p> <p>No caso de prédios com mais de uma cor de paredes ou cobertura, foi calculada a média ponderada das absortâncias solares das diferentes composições de paredes e coberturas.</p>
<p>Ar-condicionado:</p> <p>Proporção de área construída condicionada artificialmente (%);</p> <p>Proporção de área de permanência prolongada condicionada artificialmente (%);</p> <p>Proporção de área de permanência prolongada condicionada artificialmente no último pavimento (%);</p> <p>Proporção de área condicionada com aparelhos de janela; <i>split</i> ou central (VRF ou <i>Chiller</i>) (%);</p> <p>Tipo de ventilação</p>	<p>A existência de ar-condicionado nos ambientes e os tipos de equipamentos adotados foram levantados a partir de visitas <i>in loco</i> e análise de projetos. Os tipos de equipamentos considerados foram: unidades de janela, unidades tipo <i>split</i> ou ar-condicionado central (VRF ou <i>Chiller</i>).</p> <p>Como não foi possível finalizar este levantamento antes da pandemia, os tipos de condicionamento de alguns prédios foram levantados a partir de visualização de fachadas e coberturas com o <i>Google Street View</i> e/ou com conversas com funcionários dos prédios e engenheiro mecânico do setor de projetos DEMA/UFMG.</p> <p>As visitas relacionadas a esta variável também obtiveram apoio de duas alunas de Iniciação Científica do Projeto Oásis/UFMG.</p> <p>O Tipo de ventilação refere-se ao agrupamento do dado de proporção de área construída condicionada artificialmente. Para isso, considerou-se como “natural” aqueles prédios com percentual de área condicionada inferiores a 20% e, para valores superiores, considerou-se como “misto”.</p>

Horas de funcionamento (h).	Os horários de funcionamento foram verificados a partir dos <i>sites</i> das faculdades que ocupam cada prédio.
Densidade de ocupação (pessoas/m ²).	Os dados de densidade de ocupação foram obtidos a partir de entrevistas com funcionários dos edifícios realizadas por meio de telefonemas ou contato via <i>e-mail</i> . Nos casos em que não se conseguiu contato ou a pessoa não sabia informar a quantidade de ocupantes do edifício, o dado foi estimado com base na NBR 16401-3 (2008).
Orientação da maior fachada (N/S/L/O).	Dado obtido por meio do <i>Google Maps</i> e projetos arquitetônicos.
Proteção solar: existência e tipo da proteção solar (horizontal, vertical ou mista, Figura 30).	Dado obtido por meio do <i>Google Maps</i> e projetos arquitetônicos.
Número de elevadores.	Dado obtido por meio dos projetos arquitetônicos e ligações telefônicas.
Existência de central de processamento de dados com funcionamento 24h (CPD 24h).	Dado obtido por meio dos projetos arquitetônicos e ligações telefônicas.
Existência de ventiladores nas salas de aula.	Dado obtido por meio dos projetos arquitetônicos e ligações telefônicas.
Existência de lâmpadas LED.	Dado obtido por meio de ligações telefônicas e entrevista com eletricista da UFMG.
Densidade de Potência instalada de Iluminação artificial (W/m ²).	Dado obtido por meio dos projetos luminotécnicos. Nas ocasiões em que não se tinha o projeto para o edifício inteiro, o DPI de iluminação do prédio foi considerado como o DPI parcial do bloco onde havia projeto. Nos casos em que não havia nenhum projeto, realizou-se a inferência, adotando o DPI de prédios similares construídos em anos próximos.
Área do conhecimento.	Para cada prédio foi identificada a área do conhecimento de acordo com as grandes áreas de conhecimento da CAPES. Elas foram agrupadas em três classificações, que representariam atividades que possivelmente gerariam consumo de energia elétrica similar: 1) Ciências Humanas, Sociais Aplicadas e Linguística, Letras e Artes; 2) Ciências da Saúde, Biológicas e Agrárias; e 3) Ciências Exatas e da Terra e Engenharias.

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Figura 29 – Exemplos de tipos de uso dos espaços considerados para o levantamento de dados

(a) Salas de aula



Fonte: acervo próprio.

(b) Outras áreas de estudos



Fonte: UFMG (2018).

(c) Laboratórios de pesquisa e informática



Fonte: UFMG e DEMIN (201?).

(d) Laboratórios de equipamentos densos



Fonte: DF UFMG (201?).

(e) Gabinetes de professores / salas administrativas



Fonte: UFMG (2020).

(f) Circulação



Fonte: EA UFMG (202?).

(g) Outros



Fonte: UFMG (2016).

Tabela 2 - Valores médios de absorção à radiação solar

Categoria	Absorção para Pintura Nova		Absorção para Pintura Envelhecida	
	Lisa (%)	Rugosa (%)	Lisa (%)	Rugosa (%)
Branco	21,6	37,7	39,1	50,4
Amarelo	39,3	44,0	51,5	54,8
Vermelho e marrom	57,7	64,6	64,4	69,2
Azuis e verdes	60,2	63,8	66,1	68,7
Cinza e preto	73,9	77,7	75,8	78,8

Fonte: Elaborado pela autora com base em Ribeiro (2017).

Figura 30: Tipos de proteção solar considerados no levantamento de dados



Fonte: Elaborado pela autora com base em Google Street View.

3.4. Desenvolvimento de base de dados quanto ao conforto térmico

3.4.1. Definição dos ambientes analisados

A definição dos ambientes analisados quanto ao conforto térmico se deu a partir da análise dos resultados do questionário *online* aplicado em etapa anterior. Com o questionário, notou-se que há diferentes experiências térmicas de acordo com o tipo de uso dos ambientes. Assim, a análise do conforto térmico não foi feita considerando os edifícios como um todo, mas concentrou-se nas salas de aula que demonstraram ser ambientes com baixo desempenho térmico representando ainda ambientes de longa permanência no ambiente universitário, além de serem ambientes fundamentais para a função da universidade.

3.4.2. Definição e levantamento das variáveis arquitetônicas das salas de aula

O presente estudo envolveu a elaboração de uma base de dados com características de salas de aula existentes na UFMG, que, de acordo com a literatura, possuem influência mais significativa no conforto térmico interno. Reforça-se que, por sala de aula, foram considerados os ambientes de aulas com carteiras e quadros. Esta base de dados foi utilizada para embasar tanto o desenvolvimento dos arquétipos (modelos de referência), a serem apresentados no próximo item, como o planejamento do experimento de simulações paramétricas de conforto térmico. O Quadro 7 traz as variáveis consideradas para os estudos de conforto térmico e os métodos utilizados para seu levantamento.

Quadro 7 – Variáveis consideradas e métodos utilizados para o levantamento de dados das salas de aula da UFMG

Variável	Opções	Método de levantamento
Área (m ²)	-	Dado obtido a partir das plantas baixas.
Largura (m)	-	Dado obtido a partir das plantas baixas. Considerou-se para contabilização da largura as paredes perpendiculares à parede externa das salas de aula.
Comprimento (m)	-	Dado obtido a partir das plantas baixas. Considerou-se para contabilização do comprimento a parede externa das salas de aula.
Proporção (largura/comprimento)	-	Dado calculado a partir da largura e comprimento.
Pé direito (m)	-	Dado obtido a partir dos cortes.
Tipo de pavimento	Térreo, intermediário ou cobertura	Dado obtido a partir das plantas baixas (Figura 31).
Orientação da abertura	N, NE, L, SE, S, SO, O, NO	Dado obtido a partir das plantas baixas. Quando não discriminados em projeto, dado foi obtido a partir do Google Maps.
Existência de ventilação cruzada	Sim ou Não	Dado obtido a partir das plantas baixas e cortes.
Existência de proteção solar	Sim ou Não	Dado obtido a partir das plantas baixas, cortes e fachadas.
Tipo de proteção solar	Horizontal, vertical ou misto	Dado obtido a partir das plantas baixas, cortes e fachadas.
Ângulo da proteção solar (°)		Dado obtido a partir das plantas baixas, cortes e fachadas.
Tipo de janela	Correr, máximo-ar, guilhotina ou correr com basculante	Dado obtido a partir das plantas baixas, cortes e fachadas (Figura 32).
Percentual de abertura da fachada com janela (PAF) (%)	-	Dado calculado a partir de cortes e fachadas.
Percentual de abertura útil para ventilação (PAF _{vent}) (%)	-	Definido a partir do tipo de janela, conforme Tabela de desconto de esquadrias presente no Anexo II do Regulamento Técnico da Qualidade para Edificações Residenciais (RTQ-R) (BRASIL, 2012).
Altura do peitoril (m)	-	Dado calculado a partir de cortes e fachadas.
Altura da verga (m)	-	Dado calculado a partir de cortes e fachadas.

Existência de veneziana	Sim ou Não	Dado obtido a partir dos cortes, fachadas e visualização no Google Street View (Figura 33).
Densidade de ocupação (pessoas/m ²)	-	Dado obtido a partir das plantas de <i>layout</i> . Nos prédios em que não havia essa planta, foram feitas visitas <i>in loco</i> para a contabilização de cadeiras existentes nas salas de aula.
Absortância solar de paredes e coberturas (α)	-	Dado obtido a partir do levantamento anterior realizado, conforme descrito no Quadro 6. No caso das salas de aula, os valores de absortância referiam-se a cada ambiente e não à média ponderada do prédio inteiro.
Transmitância térmica de paredes e coberturas (W/m ² K)	-	Dado obtido a partir do levantamento anterior realizado, conforme descrito no Quadro 6. Neste caso não foram utilizados os dados de média ponderados, mas sim as informações referentes a cada ambiente.
Morfologia (forma de inserção no pavimento)	<ul style="list-style-type: none"> 1) Uma fachada exposta e outra sombreada por corredor fechado 2) Uma fachada exposta e outra sombreada por corredor aberto à pátio interno 3) Duas fachadas expostas (esquina) 4) Três paredes expostas 	Dado definido a partir da análise das plantas baixas (Quadro 8 e Figura 34).
Tipo de iluminação artificial	Fluorescente ou LED	Dado obtido a partir do levantamento anterior realizado, conforme descrito no Quadro 6 (projeto luminotécnico, ligações e <i>e-mails</i>).
Existência de ventilador	Sim ou Não	Dado obtido a partir do levantamento anterior realizado, conforme descrito no Quadro 6 (projeto, ligações e <i>e-mails</i>).

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Figura 31 - Tipos de pavimento considerados no levantamento de dados para as salas de aula.



Fonte: Elaborado pela autora com base em *Google Street View*, 2022..

Figura 32 - Tipos de janela considerados no levantamento de dados para as salas de aula



Fonte: Elaborado pela autora com base em *Google Street View*, 2022.

Figura 33 - Exemplos de janelas com venezianas no *campus* Pampulha, UFMG



Fonte: Elaborado pela autora com base em *Google Street View*, 2022.

Os tipos de janela considerados representam os tipos mais encontrados no *campus*, mas não esgotam todos os tipos de janela existentes no local. Entretanto, as variações são casos pontuais e não significativamente diferentes em termos de PAF. Em relação ao percentual de abertura útil para ventilação das janelas (PAF_{vent}), considerou-se: 40% para janelas de correr com bandeiras em basculante, 45% para janelas de correr, 50% para janelas do tipo guilhotina e 70% para janelas do tipo máximo-ar (abertura 45°), de acordo com o Manual do RTQ-R (BRASIL, 2012).

No que se refere às morfologias das salas de aula, além das quatro categorias indicadas no Quadro 7, foram consideradas subcategorias (Quadro 8). As categorias buscaram diferenciar a quantidade de fachadas expostas ao ar externo, enquanto as subcategorias buscaram identificar se a parede estaria exposta por fachada externa ou fachada interna (voltada à pátio interno). Esta variável foi considerada pois a exposição das fachadas interfere no ganho de calor, na incidência de ventilação natural e na possibilidade de existência de ventilação cruzada.

Quadro 8 - Morfologias consideradas para o levantamento de dados das salas de aula

Código	Paredes expostas	Descrição
1a	Uma parede	Uma parede externa e as demais adiabáticas.
1b	Uma parede	Uma parede voltada para pátio e as demais adiabáticas.
2a	Duas paredes opostas	Duas paredes externas, sendo uma delas sombreada por circulação.
2b	Duas paredes opostas	Duas paredes voltadas para pátio, sendo uma delas sombreada por circulação.
2c	Duas paredes opostas	Uma parede externa e outra voltada para pátio e sombreada por corredor.
3a	Duas paredes adjacentes	Duas paredes externas adjacentes.
3b	Duas paredes adjacentes	Duas paredes externas adjacentes, sendo uma voltada para pátio interno.
4a	Três paredes	Três paredes voltadas para pátio e sombreadas por corredor.
4b	Três paredes	Duas paredes externas adjacentes e outra voltada para pátio e sombreada por corredor.
4c	Três paredes	Três paredes externas.

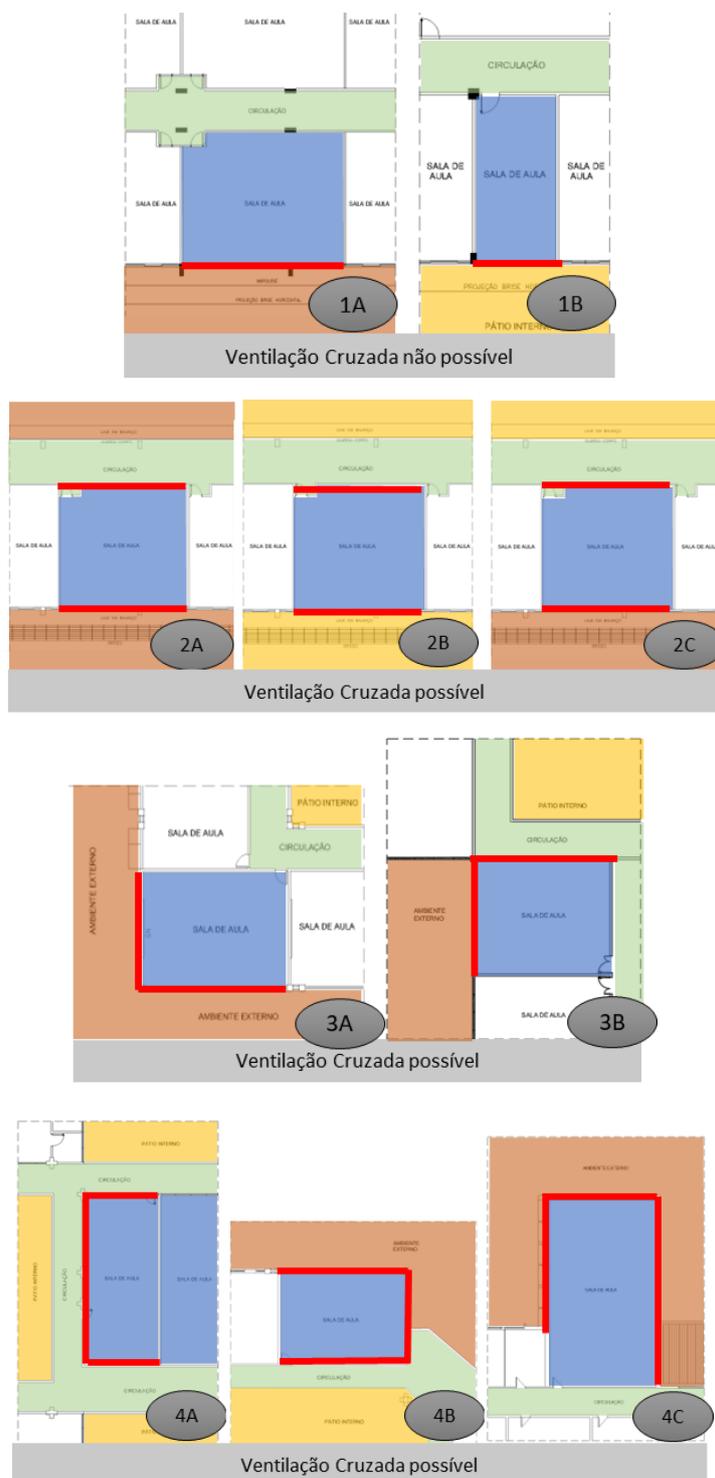
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A Figura 34 ilustra esquematicamente as morfologias descritas no Quadro 8, com base em plantas baixas do *campus* Pampulha. A observação sobre a possibilidade da existência de ventilação cruzada em cada grupo de morfologia considerou a hipótese da inserção de janelas. Não foram consideradas possibilidades de reformas

complexas ou instalação de equipamentos para viabilização da ventilação cruzada. As linhas em vermelho representam as paredes expostas ao ar externo.

Figura 34 - Morfologias consideradas para o levantamento de dados das salas de aula

Legenda:
 Área externa
 Pátio interno
 Circulação
 Paredes expostas



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Para o desenvolvimento da base de dados, foi realizado o cálculo da amostra mínima necessária de salas de aula a serem consideradas. Com base na etapa de setorização dos espaços internos, foram contabilizadas 687 salas de aula nos *campi* da UFMG em Belo Horizonte. Considerando a Equação 3, utilizada para o cálculo de amostra para populações finitas inferiores a 100.000 casos, o número mínimo de amostra de salas de aula foi calculado.

$$n = \frac{z^2 \times p(1-p) \times N}{(N-1) \times ME^2 + z^2 \times p(p-1)} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde n representa o número da amostra; z o nível de confiança; p a proporção populacional; N o universo de salas de aula; e ME a margem de erro. Considerando N de 687, nível de confiança de 95%, margem de erro de 5% e proporção amostral de 0,5; obteve-se a amostra mínima necessária de 247 salas de aula. No entanto, visando proporcionar uma análise mais completa possível das salas de aula dos *campi*, foram levantados dados de 527 salas. A amostra final correspondeu, então, a 77% do universo de salas de aula da UFMG em Belo Horizonte.

3.4.3. Desenvolvimento de arquétipos para as salas de aula

Os modelos de referência (arquétipos) das salas de aula foram desenvolvidos com o intuito de apresentar valores típicos de características geométricas de salas de aula da UFMG para embasar os estudos referentes ao conforto térmico nestes ambientes.

O desenvolvimento dos arquétipos se baseou em partes do procedimento descrito por Schaefer e Ghisi (2016) e pode ser resumido nos seguintes passos metodológicos: desenvolvimento da base de dados, desenvolvimento dos arquétipos e análise de desempenho dos arquétipos. A base de dados desenvolvida com as variáveis informadas no item anterior foi analisada por meio das estatísticas descritivas básicas, como frequência de ocorrência, valores máximos, mínimos, médios e dos quartis. Estas análises tiveram como fim o conhecimento das características da amostra, com a identificação das faixas de valores tipicamente encontrados de cada variável.

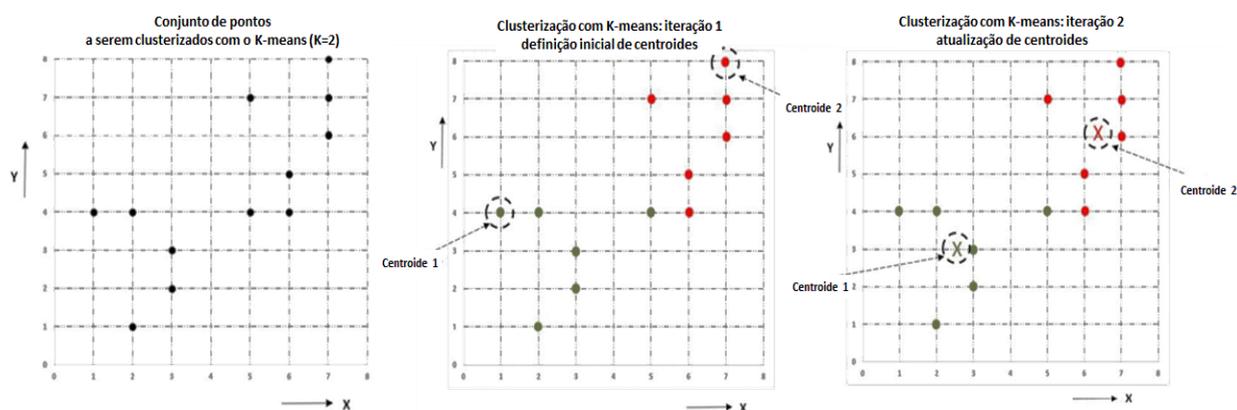
A base de dados foi então clusterizada utilizando o algoritmo *K-means* na linguagem de programação Python. A clusterização consiste no agrupamento de dados de modo que membros de um mesmo grupo sejam mais similares entre si e membros de grupos

distintos sejam diferentes entre si, com base em uma ou mais características. O *K-means* é um algoritmo amplamente utilizado em estudos de diferentes áreas do conhecimento e reconhecido como um dos dez principais algoritmos de mineração de dados (HUANG *et al.*, 2021; WU *et al.*, 2008), já tendo sido utilizado no campo da arquitetura e urbanismo para o desenvolvimento de modelos de referência de habitações de interesse social (SHAEFER; GHISI, 2016).

O funcionamento do *K-means* compreende um processo iterativo de definição e modificação de centros dos clusters (chamados centroides), na qual a distância euclidiana de cada observação até os centroides é calculada e cada observação é destinada ao grupo ao qual a distância seja menor. A quantidade de grupos desejada (K) deve ser previamente definida. A partir da segunda iteração, o centroide equivalerá à uma posição média entre os pontos constituintes de cada cluster. As iterações são desenvolvidas até que não haja modificação significativa entre os possíveis centroides de cada grupo, ou até que seja atingida a quantidade de iterações limite predefinida (DANGETI, 2017). A Figura 35 apresenta uma representação esquemática do funcionamento do algoritmo *K-means*.

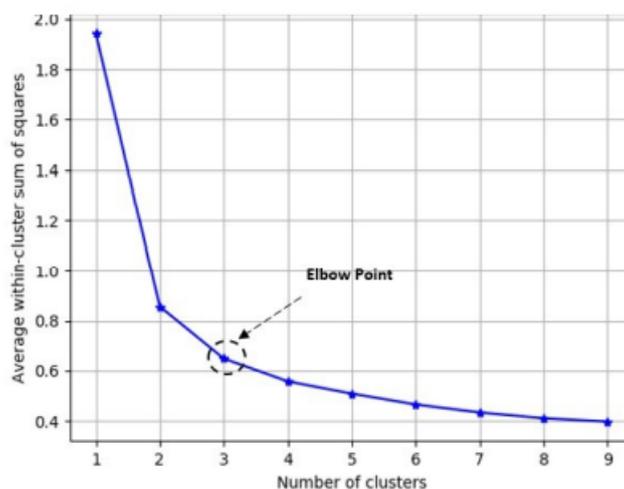
A quantidade ótima de *clusters* foi analisada a partir do *elbow method* (método do cotovelo). Este método utiliza a análise gráfica da inércia obtida com diferentes números de *clusters*. O valor de K (quantidade de *clusters*) no qual a inércia sofre maior redução é chamado de “cotovelo”, a partir do qual pode-se parar de dividir o conjunto em mais grupos (DANGETI, 2017). A Figura 36 ilustra a definição da quantidade ideal de clusters a partir da análise gráfica com o método do cotovelo.

Figura 35 - Representação esquemática do funcionamento da clusterização com o algoritmo *K-means*



Fonte: Traduzido de Dangeti (2017).

Figura 36 - Representação do método do cotovelo (*elbow method*) para definição da quantidade ótima de clusters



Fonte: Dangeti (2017).

Os modelos de referência foram desenvolvidos para possibilitar estudos de simulação paramétrica de cenários para análise de conforto térmico. Então, na etapa de clusterização, buscou-se utilizar como parâmetros de agrupamento apenas variáveis geométricas: área e proporção entre largura e comprimento. As demais variáveis sofreram variações nas análises paramétricas, como será descrito posteriormente. Conforme indicado por Schaefer e Ghisi (2017), os parâmetros considerados foram normalizados em scores Z conforme a expressão $Z_{xi} = (x_i - \bar{x})/s$, onde Z_{xi} é o valor normalizado de x_i , \bar{x} e s são, respectivamente, a média e o desvio padrão dos valores da variável. A normalização dos dados permite que diferenças entre escalas de valores das variáveis não influenciem em seu agrupamento.

A partir da normalização dos dados e da implementação do algoritmo *K-means*, as salas de aula foram agrupadas (clusterizadas). Os arquétipos foram definidos como salas de aula existentes cujas características de área e proporção estavam simultaneamente contidas entre o primeiro e terceiro quartis de cada *cluster*, estando preferencialmente o mais próximo possível do segundo quartil (mediana) (SCHAEFER; GHISI, 2017).

A análise de desempenho dos arquétipos envolveu a simulação computacional dos arquétipos e de uma amostra de salas reais de cada *cluster*, e análise dos resultados referentes às métricas de conforto térmico consideradas: PHOC e Graus Hora de Calor (GHC). De modo similar à definição dos arquétipos, verificou-se se eles teriam resultados dentro dos intervalos do primeiro e terceiro quartis dos resultados gerados

pela simulação da amostra de cada *cluster*, preferencialmente o mais próximo possível do segundo quartil (mediana), conforme indicado por Schaefer e Ghisi (2017). A amostra considerada neste estudo foi de 10% das salas pertencentes a cada *cluster*, escolhidas de maneira aleatória.

Por último, foi desenvolvido um estudo para contextualizar as salas de aula da UFMG e os arquétipos desenvolvidos em relação às salas de aula universitárias em outros locais do Brasil. Para isso, um levantamento de artigos dos eventos científicos ENCACs e ENTACs de 2010 a 2020 foi realizado, no qual foram buscados artigos que descrevessem características arquitetônicas de salas de aula universitárias existentes, considerando alguma das variáveis consideradas na construção da base de dados. Com este processo, foram identificados 41 artigos que, no total, reportaram características de 195 salas. Os dados obtidos com o levantamento de literatura foram comparados às estatísticas descritivas da base de dados construída com as salas de aula da UFMG.

3.4.4. Simulações computacionais para níveis de conforto térmico

As simulações computacionais para a análise de conforto térmico nas salas de aula foram desenvolvidas com o *software* EnergyPlus, com base em arquétipos e variações de cenários. Nestes estudos, foi considerado apenas o uso da ventilação natural. A ventilação natural foi considerada a partir da constatação de que a maior parte das salas de aula dos edifícios analisados são ventiladas naturalmente e que não há perspectivas para a inserção de equipamentos de ar-condicionado na instituição estudada. Pelo contrário, as IES públicas brasileiras vêm sofrendo cortes orçamentários por parte do governo (BRASIL, 2019; PODER360, 2022). Em 2019, a UFMG publicou comunicado orientando que os usuários não ligassem os aparelhos de ar-condicionado existentes para fins apenas de conforto térmico e informando também que a instalação de novos aparelhos estaria suspensa em toda a instituição, por ocasião de cortes de recursos orçamentários feitos pelo governo (PRA UFMG, 2019). Em 2021, o governo exigiu que os prédios públicos economizassem 10 a 20% de energia, o que também impactou a operação dos *campi* da UFMG (BRASIL, 2021). Entre as medidas para redução do consumo de energia, o governo recomendou o uso apenas de ventilação natural nos dias com temperaturas amenas. Desta forma, o

presente estudo buscou analisar as condições de conforto térmico considerando a ventilação natural e estratégias passivas de ventilação.

Programas de simulação computacional, como o EnergyPlus, possuem pacotes que são capazes de considerar a ventilação natural nas análises termo energéticas de seus modelos. No caso do EnergyPlus, no pacote *Air Flow Network* (AFN), um importante dado de entrada quando se trabalha com a ventilação natural é o dos coeficientes de pressão (Cps). Os Cps podem ser entendidos como um número adimensional resultado da razão entre a pressão dinâmica medida em um ponto da superfície do modelo (P_x) e a pressão dinâmica em um ponto do fluxo de ar não perturbado (P_d) (AMARAL, 2019). O modelo matemático implementado no EnergyPlus (SWAMI; CHANDRA, 1988) permite o cálculo de coeficientes de pressão médios das fachadas de modelos retangulares e sem obstruções externas (DOGAN; KASTNER, 2020).

Dentre diversos fatores, os Cps são influenciados pela geometria do edifício e pelo seu entorno. No âmbito da simulação computacional da ventilação natural, as simulações com *softwares* de Fluido Dinâmica Computacional (CFD) são consideradas mais precisas (DOGAN; KASTNER, 2020; VINCENT; UCHENNA; ROY, 2021). Estes tipos de *software* podem calcular os Cps de fachadas para diferentes pontos a partir de malhas tridimensionais. Deste modo, além da consideração de diferenças geométricas no modelo, podem ser gerados valores distintos para aberturas em diferentes andares, não apenas a média da fachada, como o EnergyPlus (AMARAL, 2019; DOGAN; KASTNER, 2020). Dogan e Kastner (2020) recomendam o uso de simulações em CFD para gerar listas de Cps para diferentes direções do vento a serem inseridas como dado de entrada no módulo *Air Flow Network* para simulações termo energéticas no EnergyPlus.

Os *campi* analisados possuem diversidade de tipos de fachadas, o que inclui a existência de pátios internos, varandas, corredores abertos e elementos de proteção solar. Estes aspectos podem influenciar no comportamento da ventilação natural e, por conseguinte, no cálculo das temperaturas operativas utilizadas para a computação das métricas de conforto térmico. Tendo em vista a variedade de tipos de fachadas existentes nos edifícios analisados e o fato de que o programa EnergyPlus considera apenas um Cp médio por fachada, sem estratificar os diferentes valores por alturas,

optou-se por fazer um estudo de simulação com CFD para estimar Cps de acordo com os tipos de fachadas mais frequentes nos *campi* analisados. Este estudo teve como objetivo tornar as simulações de conforto térmico realizadas no EnergyPlus mais refinadas.

3.4.4.1. Obtenção dos coeficientes de pressão das fachadas

Os coeficientes de pressão (Cps) das aberturas foram calculados por meio de simulações computacionais desenvolvidas com o programa ANSYS CFX versão 17.1 (ANSYS, 2022). O CFX é um *software* utilizado para simulações de ventilação natural com método CFD. Os experimentos desta etapa foram realizados sob orientação do arquiteto Msc. Daniel Amaral, especializado em simulações de ventilação natural com CFD e EnergyPlus.

Para a simulação dos diferentes tipos de fachada presentes nos *campi*, foi desenvolvido um modelo de geometria típica, no qual os mesmos pudessem ser representados.

Alguns dos tipos de fachadas encontradas nos *campi* podem ser vistos na Figura 37. Um levantamento das dimensões dos pátios internos foi realizado com base nos projetos arquitetônicos e o prédio do Instituto de Ciências Biológicas, ICB localizado no *campus* Pampulha foi selecionado para ser utilizado como geometria básica nas simulações (Figura 38).

A geometria do ICB foi utilizada como base para a elaboração de um modelo que representasse os diferentes tipos de fachadas dos arquétipos de salas de aula considerados no estudo, sendo eles:

- Salas com janela voltada para fachadas externas;
- Salas com janelas diretamente voltadas para pátios internos;
- Salas com janelas voltadas para pátios internos, com corredor aberto (varanda);
- Salas em diferentes pavimentos (térreo, intermediários e cobertura);
- Salas com proteção solar.
- Salas sem proteção solar

Cada uma das opções listadas foi representada no modelo, como pode ser visto na Figura 39.

Figura 37 - Fotografias de alguns dos tipos de fachadas de UA da UFMG consideradas para a elaboração do modelo de simulação CFD



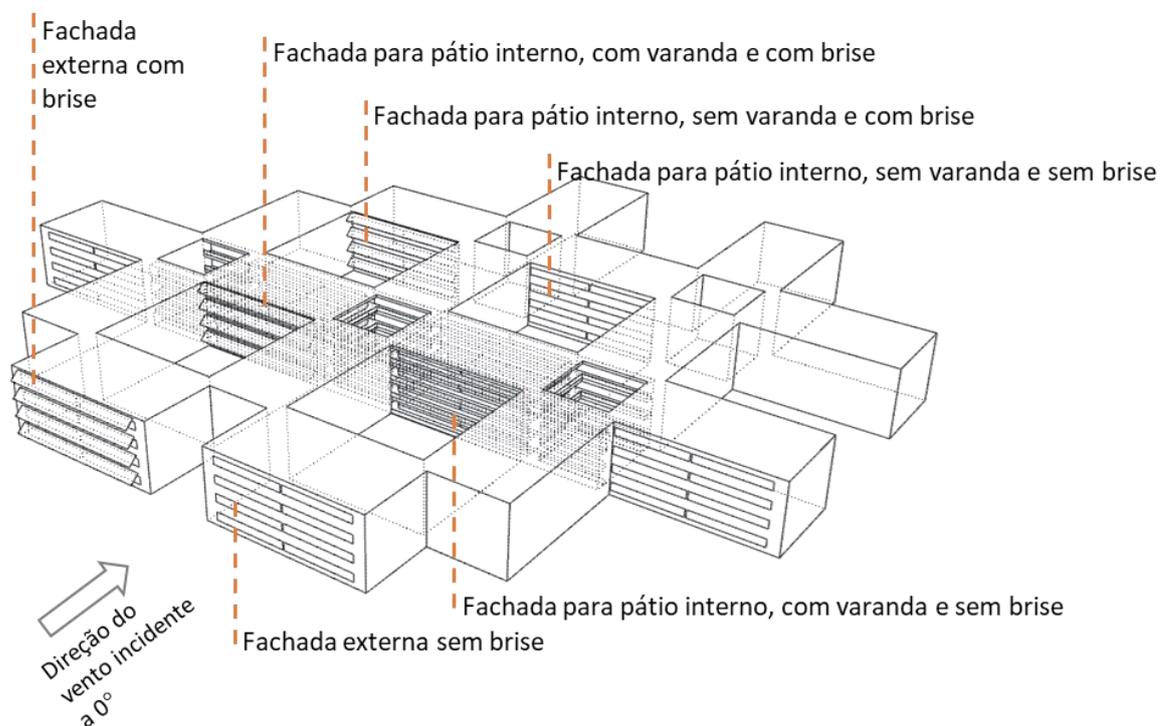
Fonte: Elaborado pela autora com base em *Google Street View*, 2022.

Figura 38 - Vistas aéreas do Instituto de Ciências Biológicas (ICB), utilizado como geometria básica para o estudo de obtenção dos Cps das fachadas



Fonte: Elaborado pela autora com base em *Google Earth*, 2022.

Figura 39 - Representação do modelo considerado para as simulações em CFD



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Como pode ser observado na Figura 37, existem diferentes tipos de proteção solar nos *campi* analisados. Para que se pudesse definir o tipo e o ângulo da proteção solar a ser utilizado nas simulações CFD, foi feita a análise da base de dados das salas de aula desenvolvida na etapa anterior, onde foi definido o tipo de proteção solar horizontal com ângulo α de 56° para representar, de forma média, os brises presentes nos edifícios. A largura de corredor considerada foi de 2,5m e as dimensões dos pátios internos foram de 32mx32m. A altura total do modelo foi de 16m, representando quatro andares: térreo, dois pavimentos intermediários e cobertura. As janelas apresentaram 1,1m de peitoril.

As simulações realizadas foram estacionárias, ou seja, consideraram uma direção de vento a cada simulação. As direções de vento analisadas foram de 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° e 315° . O dado de saída pedido no *software* CFX foi o C_p em cada superfície de janela.

- *Parâmetros de simulação*

- *Domínio*

O domínio é o volume que representa geometricamente o espaço no qual o fluido (ar) é simulado. A definição do dimensionamento do domínio foi feita com base nas recomendações existentes na literatura. Os principais guias de orientações para simulações em CFD (FRANKE *et al.*, 2007; TOMINAGA *et al.*, 2008; TAMURA, NOZAWA E KONDO, 2008) indicam que o domínio deve ter altura superior ou igual a $6H$, sendo H a maior dimensão vertical do modelo. O domínio utilizado foi cilíndrico, para que a alteração de direção do vento incidente não implicasse na necessidade de sua remodelagem. A recomendação da literatura é de que o limite do domínio cilíndrico deve estar a $15H$ de distância em relação aos limites do modelo 3D (AMARAL, 2017). O domínio do experimento foi modelado com 112m de altura e diâmetro de 1.352m, seguindo as recomendações da literatura citadas.

Para a garantia da qualidade do domínio, recomenda-se que seja feita a análise de blocagem (*blockage ratio*), que representa o percentual de obstrução do modelo (em elevação) em relação ao perfil do domínio. É recomendável que a obstrução máxima seja de 3% (AMARAL, 2017). Os índices de blocagem verificados para o experimento foram de 1,7 a 2,05% (Apêndice C), estando dentro dos limites indicados.

- *Geração e qualidade da malha*

A geração da malha tridimensional tetraédrica envolveu a utilização do domínio preparado na etapa anterior e a configuração dos parâmetros na aba "*Meshing*" do software CFX. O desenvolvimento da malha envolveu a alteração dos parâmetros *Relevance Center*, *Smoothing*, *Transition*, e *Number of cells across gap*, em um processo de tentativa e erro, de modo que a malha gerada alcançasse os requisitos de qualidade e estivesse dentro da capacidade de processamento do computador

utilizado. Os parâmetros recomendados para a verificação da qualidade da malha são as métricas *Skewness* e *Orthogonal Quality*. Para a primeira, o valor máximo não deve ser superior a 0,95, enquanto para a segunda, o valor mínimo deve ser maior ou igual a 0,10 (AMARAL, 2017). A máquina utilizada para o processamento dos dados foi um *notebook* com 32GB de memória RAM. Isto significa que a capacidade computacional

comportaria uma malha de, no máximo 64 milhões de elementos. O Quadro 9 mostra as configurações finais consideradas.

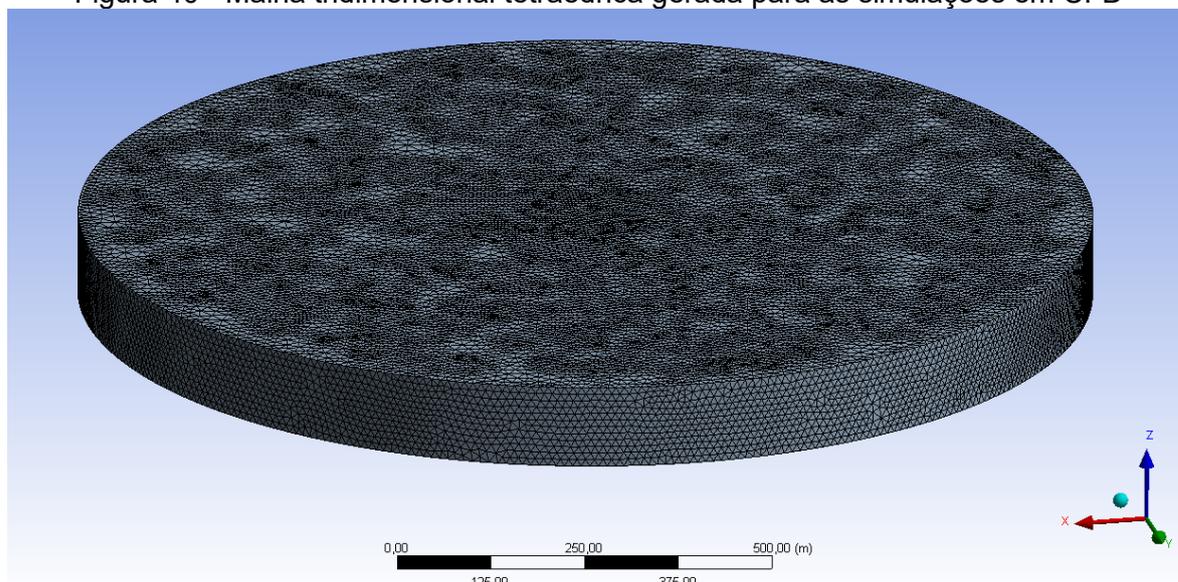
Quadro 9 - Parâmetros utilizados para geração de malha - simulações em CFD

Parâmetros	Configuração
<i>Physics Preference</i>	CFD
<i>Solver</i>	CFX
<i>Size Function</i>	<i>Proximity and Curvature</i>
<i>Relevance Center</i>	<i>Fine</i>
<i>Smoothing</i>	<i>High</i>
<i>Transition</i>	<i>Fast</i>
<i>Number of cells across gap</i>	12
<i>Min size</i>	0,1m
<i>Inflation Growth rate</i>	1,2

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

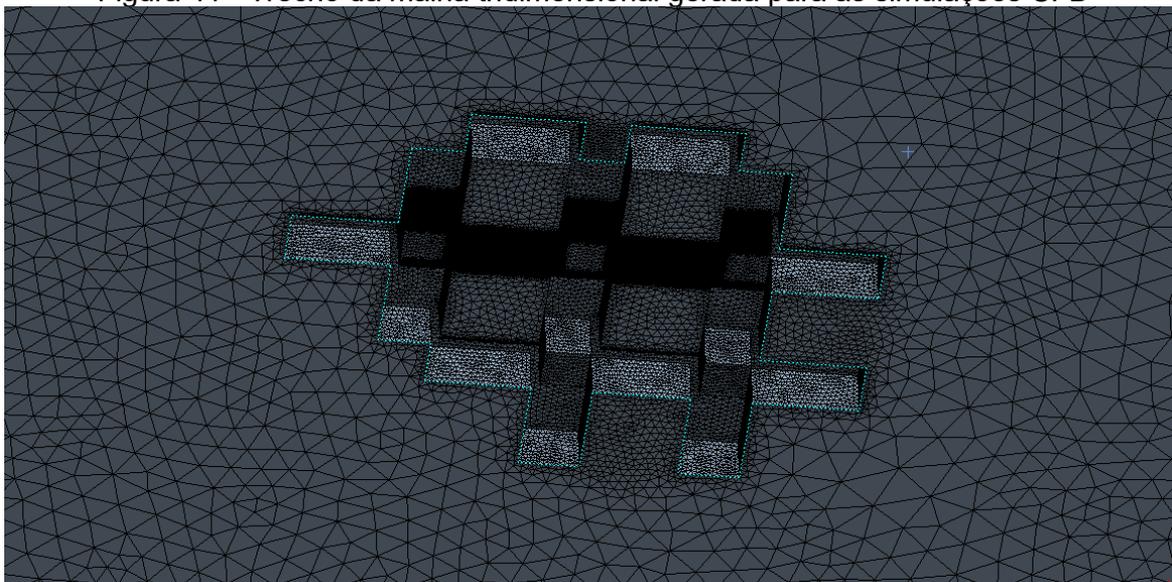
A malha gerada possuiu 55.391.339 elementos, com valor máximo de *Skewness* de 0,92 e valor mínimo de *Orthogonal Quality* de 0,099, ou seja, aproximadamente 0,1, estando dentro dos limites indicados pela literatura. As Figuras 40 e 41 mostram a malha desenvolvida.

Figura 40 - Malha tridimensional tetraédrica gerada para as simulações em CFD



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Figura 41 - Trecho da malha tridimensional gerada para as simulações CFD



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Após o desenvolvimento da malha, foi realizado o teste de independência de malha, conforme indicado pela Norma ASME V&V 20:2009 *Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer* (AMARAL, 2017). Este teste tem como finalidade identificar se a utilização de malhas menos robustas geraria resultados aceitavelmente similares. Desta forma, estuda-se a possibilidade de economia de tempo e de infraestrutura computacional para o processamento das demais simulações. A partir das Equações 4 e 5 (AMARAL, 2017), o número de elementos das malhas menos robustas a serem testadas é definido.

$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta V_i) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Equação 4})$$

$$R = \frac{h_{coarse}}{h_{fine}} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde N é o número de elementos da malha inicial e V é o volume do domínio. Uma vez calculado o h (*fine*), obtêm-se o h (*coarse*) considerando que o R (fator de refinamento) deve ser maior ou igual a 1,3. Neste estudo foi considerado o valor 1,3.

As malhas testadas neste teste possuíam 55, 25 e 11 milhões de elementos, sendo a primeira a malha originalmente dimensionada. Considerou-se que a diferença percentual entre os Cps gerados não poderia ser superior a 10% em nenhuma janela, conforme limite considerado por Amaral (2017). A partir da simulação de um caso para

cada dimensão de malha e do tratamento dos resultados, definiu-se permanecer com a malha de 55 milhões de elementos, pois as diferenças de resultados entre as demais malhas ultrapassaram o limite de 10% (Apêndice B).

Para a indicação da velocidade do ar, foi utilizada planilha com equação para cálculo de Perfil de Vento, com base em Grimmond *et al.* (1998). Este cálculo considera a altura média das edificações do contorno e forma da superfície urbana para fornecer a velocidade do vento a uma altura de 150 (vento não perturbado), considerada para a simulação. O tipo de terreno considerado para o cálculo foi de baixa altura e densidade, com altura média das edificações de 16m. A velocidade do vento calculada foi de 2,48m/s. O tipo de fluido considerado foi o ar a 25° C. O modelo de turbulência utilizado foi o *K-Epsilon* e não foi considerado o cálculo de transferência de calor.

Conforme citado anteriormente, as simulações em CFD utilizam uma malha de pontos tridimensional para a realização dos cálculos. Portanto, os resultados de Cp são fornecidos para cada ponto da malha utilizada presente em cada superfície indicada (no caso, as superfícies das janelas). Desta forma, o Cp final considerado para as simulações do EnergyPlus foi a média aritmética dos Cps informados nos pontos de malha das janelas, para cada morfologia analisada. Por exemplo, para as janelas localizadas no térreo de fachadas externas sem brise, o Cp final foi a média dos Cps obtidos nas janelas nesta situação morfológica. Os cálculos foram feitos desta maneira, para cada andar, a partir dos resultados em formato .csv, com o auxílio de um *script* desenvolvido em linguagem Python.

3.4.4.2. Simulações preliminares e comparação com dados medidos

Como etapa preliminar às simulações computacionais dos arquétipos desenvolvidos, foi realizado um estudo para a comparação de dados medidos e dados simulados, referentes a ambientes existentes na UFMG. Nesta pesquisa, pretendia-se realizar campanhas de medições *in loco* para validar as simulações computacionais. Como esta etapa do trabalho não foi possível por conta da pandemia de COVID-19, a validação das simulações computacionais ocorreu com base em dados medidos relatados em estudos anteriores em duas salas de aula da UFMG (SOUZA, 2019 e BITARAES, 2019). As salas 315 e 410B da Escola de Arquitetura da UFMG foram

simuladas e os resultados referentes à temperatura do ar interno foram comparados com os dados medidos de temperatura de bulbo seco (TBS).

As simulações foram realizadas com o *software* EnergyPlus v. 9.0.1, com o arquivo climático BRA_MG_Belo.Horizonte-Pampulha-Andrade.AP.835830_TMYx.2004-2018 obtido pelo *site Climate One Building* (CLIMATE ONE BUILDING, 2018). As temperaturas nos dias e horários medidos foram alteradas conforme as temperaturas do INMET indicadas por Souza (2019) (Figura 24). Assim, buscou-se que as temperaturas externas consideradas nas simulações se assemelhassem àquelas do momento das medições.

As salas de aula foram simuladas considerando o uso de ventilação natural com o módulo *Air Flow Network*, conforme orientações do “Manual De Simulação Computacional De Edifícios Naturalmente Ventilados No Programa Energyplus Versão 9.0.1” (LABEEE, 2020). Os Cps das fachadas utilizados foram os obtidos por meio do estudo com simulações em CFD da etapa anterior do trabalho. A Tabela 3 mostra os dados de entrada considerados para as simulações, com base em Souza (2019) e Bitarães (2019).

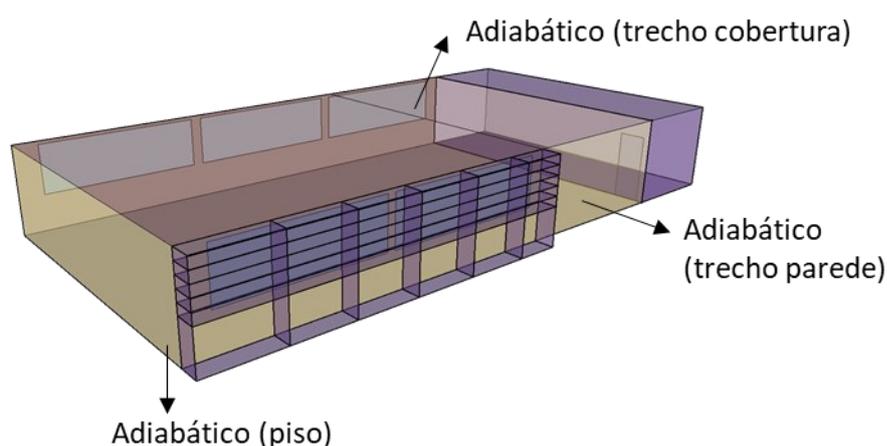
Tabela 3 - Dados considerados para a simulação computacional das salas de aula da Escola de Arquitetura da UFMG

	Sala 315	Sala 410B
Área (m ²)	154,85	68,05
Pé direito (m)	2,70	3,00
PAF (%)	34,00 / 51,00	61,00
Área útil de ventilação (m ²)	19,10	7,59
Transmitância térmica paredes (W/m ² K)	1,80	1,80
Transmitância térmica coberturas (W/m ² K)	3,74	2,06
Absortância solar paredes	0,40	0,50
Absortância solar cobertura	0,90	0,70
Tipo de vidro	Simplex, 3mm	Simplex, 3mm
Densidade de ocupação (pessoas/m ²)	1,03	0,36
DPI luz artificial (W/m ²)	10,10	7,42
DPI equipamentos (W/m ²)	3,94	11,3

Fonte: Elaborado pela autora com base em Souza (2019) e Bitarães (2019).

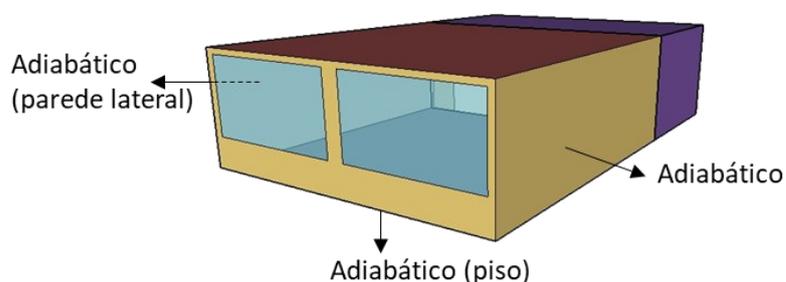
As paredes das salas de aula estudadas são compostas por tijolos de 8 furos nas dimensões 9x19x19 cm, com espessura total da parede de 24cm. A cobertura da sala 410B é composta por laje de concreto e telha de fibrocimento, enquanto a da sala 315 é composta por laje plana de concreto (SOUZA. 2019; BITARAES, 2019). Para a simulação da sala 315, um trecho da cobertura no qual há pavimento superior foi considerado como adiabático, assim como trecho da parede lateral onde há outra sala adjacente (Figura 42). No caso da sala 410B, as duas paredes laterais foram consideradas adiabáticas (Figura 43). No caso das duas salas, os pisos também foram considerados como superfícies adiabáticas. Os modelos foram simulados sem a consideração de sombreamento por entorno.

Figura 42 - Modelo do EnergyPlus para sala 315



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Figura 43 – Modelo do EnergyPlus para sala 410B

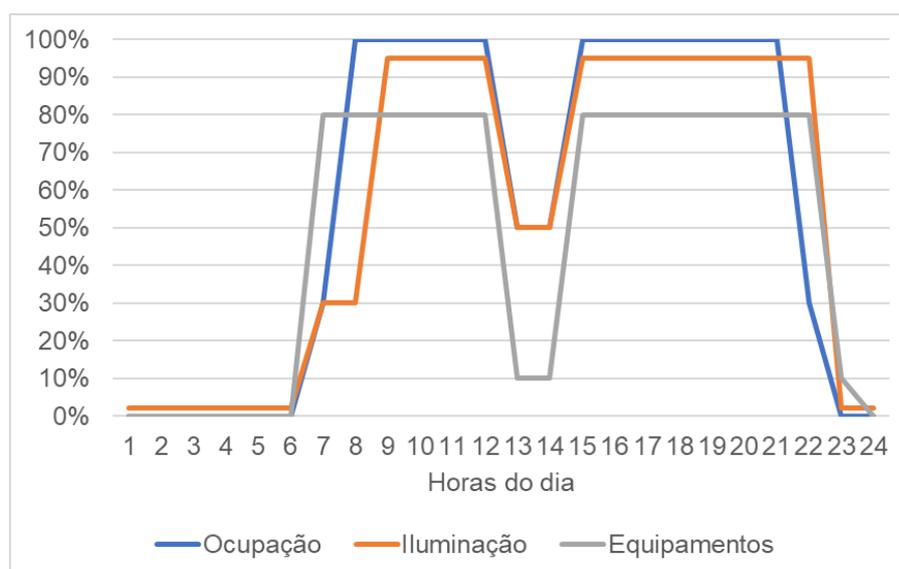


Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Os *schedules* considerados para as simulações foram baseados nos padrões de uso referentes à tipologia de escolas da plataforma brasileira S3E (LABEEE, 2009), apresentados em Garcia (2017). Foram feitas adaptações para a consideração do uso

noturno considerando aulas até as 22h. A Figura 44 mostra os *schedules* considerados para dias de semana. Não foram consideradas atividades de aula durante os finais de semana. Todas as demais configurações do *software* Energy Plus seguiram os *defaults* considerados nos arquivos .idf do projeto S3E. As simulações foram realizadas para o período de dois anos e os dados do último ano foram considerados para a comparação.

Figura 44 - *Schedules* considerados para as simulações no EnergyPlus.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

As métricas utilizadas para a comparação dos resultados foram o *Coefficient of variation of the Root Mean Squared Error* (CvRMSE) e o *Normalized Mean Bias Error* (NMBE), conforme equações indicadas por Guyot *et al.* (2020) (Equações 6 e 7).

$$NMBE (\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n M_i} \times 100 \quad (\text{Equação 6})$$

$$CvRMSE (\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{n}}}{\frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n}} \times 100 \quad (\text{Equação 7})$$

Onde M é o dado horário medido, S é o dado horário simulado e n é o número de observações (medições).

Conforme indicação da *ASHRAE Guideline 14* (ASHRAE, 2002), no caso de comparações de dados medidos e simulados horários, os valores esperados para o

CvRMSE e o NMBE são inferiores a 30% e 10%, respectivamente, para que se possa considerar que um modelo esteja aceitavelmente calibrado. As quatro medições de TBS realizadas em cada sala foram comparadas com os dados simulados de temperatura do ar e as métricas foram calculadas.

Após a verificação do CvRMSE e do NMBE, considerou-se que as configurações utilizadas nas simulações estavam adequadas e, assim, essas configurações foram utilizadas para as demais simulações do presente trabalho.

3.4.4.3. Simulações paramétricas: simulações preliminares, variações consideradas e configurações

- Simulações preliminares – análise de sensibilidade local

A primeira etapa para o planejamento do experimento das simulações paramétricas foi a realização de um estudo de simulações com variação *one-factor-at-a-time*, também chamada de análise de sensibilidade local. Esta análise ocorre de modo que apenas um fator é alterado, enquanto os demais permanecem fixos (WEI, 2013 e GARCIA *et al.*, 2020). O estudo de sensibilidade local foi conduzido para verificar se o *software* de simulação EnergyPlus seria sensível a alterações das variáveis consideradas para a construção da base de dados. Desta maneira, buscou-se otimizar a etapa de simulações paramétricas que foi desenvolvida posteriormente.

Foram simulados cenários de variação para cada variável e verificados os resultados referentes ao PHOC. Os valores considerados para as variações foram inspirados na base de dados com características arquitetônicas das salas de aula, desenvolvida em etapa anterior. A variabilidade relativa dos resultados obtidos foi medida pelo coeficiente de variação (desvio-padrão/média). As variáveis que apresentaram coeficiente de variação inferior a 5% foram desconsideradas para a etapa posterior de simulações paramétricas. A Tabela 4 traz o resumo dos estudos realizados nesta etapa.

Tabela 4 – Estudos realizados com variações *one-factor-at-a-time*

Variável	Nº de variações	Valores
Área (m ²)	4	30 / 53 / 84 / 115
Pé direito (m)	2	2,70 / 3,15
PAF (%)	2	15 / 38
PAFvent (%)	3	45 / 70
Altura de peitoril (m)	2	1,10 / 1,70
Densidade de ocupação (pessoas/m ²)	3	0,40 / 0,83 / 1,06
Absortância cobertura (%)	2	40 / 70
Absortância paredes (%)	2	20 / 70
Transmitância cobertura (W/m ² K)	3	0,47 / 2,10 / 3,44
Transmitância paredes (W/m ² K)	3	1,78 / 2,38 / 5,67
Orientação solar	3	N / NE / S
Existência de proteção solar	2	Sem / Com
Andar	3	Térreo / Intermediário / Cobertura
Morfologias (Quadro 8 e Figura 34)	10	1A / 1B / 2A / 2B / 2C / 3A / 3B / 4A / 4B / 4C
Existência de ventilação cruzada	2	Sem / Com
Existência de venezianas	2	Sem / Com
Iluminação artificial (W/m ²)	2	6 / 10

Obs.: Valores em negrito referem-se aos valores fixos considerados quando o parâmetro em questão não estava sendo variado.

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

No caso do estudo das morfologias, tendo em vista a grande quantidade de opções e o consequente impacto na quantidade de simulações paramétricas que seria gerado caso todas elas fossem consideradas, foi realizado um estudo comparativo para identificar a menor quantidade de morfologias possíveis de serem simuladas. Para isto, os quatro arquétipos desenvolvidos na etapa anterior foram simulados, considerando que a morfologia 1B seria representada pela morfologia 1A e que as morfologias 2B, 3A, 3B, 4A, 4B e 4C seriam representadas pela morfologia 2A. Os resultados de PHOC foram verificadas e o CvRMSE e o NMBE comparados. Assim, buscou-se que os estudos paramétricos contassem com a variação de apenas duas tipologias de morfologia para viabilizar o experimento. Os resultados deste estudo podem ser vistos no Apêndice D.

Os parâmetros fixos considerados para este experimento são indicados na Tabela 4 marcados em negrito.

- *Variações consideradas para o estudo paramétrico*

Uma vez eliminadas as variáveis para as quais o *software* de simulação teria baixa sensibilidade, foi feita a análise da base de dados e o projeto do experimento de simulações paramétricas. A análise considerou as estatísticas descritivas da base de dados e a análise das distribuições em histogramas, para que fossem escolhidos os valores de variação de cada variável. Ao menos dois níveis de variação foram determinados para cada variável, incorporando níveis “baixo” e “alto”, ou com presença ou ausência do elemento analisado (Tabela 5).

Conforme mostrado na Tabela 5, a partir das interações entre todos os níveis de variações possíveis, o total seria de aproximadamente 900 mil simulações computacionais. Um algoritmo na linguagem Python foi desenvolvido para auxiliar na operacionalização das simulações e um *script* com base na biblioteca *Pandas* foi escrito para o tratamento dos dados de saída, na mesma linguagem de programação. Assim, a cada acionamento dos *scripts*, foi possível realizar diversas simulações e seus tratamentos de dados, o que passa a ser referido como “rodadas” no texto. Ainda assim, a simulação de todos os cenários não seria viável em termos de capacidade de processamento e tempo. Portanto, foi desenvolvida uma estratégia para reduzir o número de simulações e viabilizar o presente experimento, como será explicado a seguir.

Com o algoritmo utilizado, foi possível automatizar a variação de parâmetros como o PAFvent, a densidade de ocupação, a DPI de iluminação e a orientação solar. Cada simulação contou com a modelagem de quatro zonas térmicas, uma em cada andar, de modo que em uma simulação foi possível obter os resultados para os diferentes tipos de pavimento. No entanto, as variações de PAF, morfologias e da presença de ventilação cruzada, de brises e venezianas não foram automatizadas, tendo sido configuradas manualmente para a geração de rodadas as quais simularam os cenários com as variações automatizadas.

Tabela 5 - Estatísticas descritivas e valores considerados para a variação das variáveis no estudo paramétrico

Variável	Estatísticas descritivas								Níveis de variação								Quantidade de variações
	Amostra	Média	Desv. Pad.	Mínimo	p25	p50	p75	Máximo	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	
Área (m ²) (Arquétipos)	527	60.1	27.5	10.3	38.6	55.7	79.0	154.9	37.0	43.0	75.0	115.0	-	-	-	-	4
PAF (%)	527	42	15	15	31	38	57	81	15	30	60	80	-	-	-	-	4
PAFvent (tipos de janela)	527	52	12	40	45	45	70	70	45	70	-	-	-	-	-	-	2
Absortância cobertura (%)	145	59	18	39	39	69	76	79	40	80	-	-	-	-	-	-	2
Absortância paredes (%)	527	47	11	22	39	50	52	69	40	70	-	-	-	-	-	-	2
Transmitância paredes (W/m ² K)	455	2.5	0.5	1.8	2.2	2.4	2.8	5,7	1.8	2.4	5.7	-	-	-	-	-	3
Transmitância coberturas (W/m ² K)	134	1.7	0.6	0.5	1.6	1.8	2.1	3.4	0.5	2.1	3.4	-	-	-	-	-	3
Densidade de ocupação (pessoas/m ²)	290	0.8	0.1	0.4	0.8	0.8	0.9	1.1	0.4	0.8	1.1	-	-	-	-	-	3
DPI Iluminacao (W/m ²)	-	10.3	2.6	6.1	8.2	10.6	12.1	15.4	10.6	6.1	-	-	-	-	-	-	2
Orientações									N	NE	L	SE	S	SO	O	NO	8
Proteção solar									Sem	Com	-	-	-	-	-	-	2
Morfologia									1A	2A	-	-	-	-	-	-	2
Ventilação cruzada									Sim	Não	-	-	-	-	-	-	2
Veneziana									Com	Sem	-	-	-	-	-	-	2
Andares (em apenas uma simulação)									T	I	C	-	-	-	-	-	1
Total de simulações possíveis no experimento paramétrico																884,736	

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Todas as combinações possíveis entre as três variações de transmitância térmica (U) de paredes e coberturas foram contempladas. Elas foram simuladas considerando envoltória em cores claras e escuras (Quadro 10). Os códigos N1, N2 e N3 citados no Quadro 10 referem-se aos valores dos níveis de variação apresentados na Tabela 5.

Quadro 10 - Tipos de combinações de envoltória utilizados para as simulações paramétricas

Combinações de envoltória	Tipos de absorvância solar	Combinações de transmitância térmica de paredes e coberturas
Combinação Envoltória Tipo 1	Absorvância clara ($\alpha = 0,4$)	Parede N1 + Cobertura N1
		Parede N2 + Cobertura N2
		Parede N3 + Cobertura N3
	Absorvância escura ($\alpha = 0,7$ para paredes e $\alpha = 0,8$ para coberturas)	Parede N1 + Cobertura N1
		Parede N2 + Cobertura N2
		Parede N3 + Cobertura N3
Combinação Envoltória Tipo 2	Absorvância clara ($\alpha = 0,4$)	Parede N1 + Cobertura N2
		Parede N2 + Cobertura N3
		Parede N3 + Cobertura N1
	Absorvância escura ($\alpha = 0,7$ para paredes e $\alpha = 0,8$ para coberturas)	Parede N1 + Cobertura N2
		Parede N2 + Cobertura N3
		Parede N3 + Cobertura N1
Combinação Envoltória Tipo 3	Absorvância clara ($\alpha = 0,4$)	Parede N1 + Cobertura N3
		Parede N2 + Cobertura N1
		Parede N3 + Cobertura N2
	Absorvância escura ($\alpha = 0,7$ para paredes e $\alpha = 0,8$ para coberturas)	Parede N1 + Cobertura N3
		Parede N2 + Cobertura N1
		Parede N3 + Cobertura N2

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Tendo em vista as automatizações viabilizadas e as variações que precisariam ser configuradas manualmente, foi desenvolvida uma tabela com as rodadas necessárias para contemplar todos os cenários (Apêndice E). As rodadas simuladas foram selecionadas de modo que contemplassem cenários de acordo com os seguintes critérios:

- Representação das situações com maior frequência de ocorrência: para isto, fez-se a análise das distribuições das variáveis na base de dados por meio de histogramas;

- Ao menos uma rodada representativa de cada arquétipo;
- Buscou-se que cada arquétipo apresentasse ao menos um exemplo dos cenários: com e sem proteção solar, com e sem ventilação cruzada, percentuais de abertura da fachada com janela de 30% e 60% (mais frequentes), com e sem veneziana e com as três combinações de envoltória;
- Ao menos uma rodada do item anterior para cada orientação solar.

A partir destes critérios, foram computadas 77 rodadas que geraram aproximadamente 63.000 simulações. Para isto, foram utilizados dois *notebooks* que requereram aproximadamente 470 horas de processamento.

Para a consideração dos ventiladores, buscou-se realizar o tratamento dos dados de ao menos uma rodada de cada arquétipo e que contemplasse cenários com e sem proteção solar, todas as orientações solares, com e sem veneziana, com todos os valores de PAF, combinações de envoltória, e com e sem ventilação cruzada. Com estes critérios, foi considerada a presença de ventiladores em 10.512 simulações.

- *Configurações dos dados de entrada para as simulações*

As simulações contemplaram os quatro arquétipos desenvolvidos na etapa anterior do trabalho, considerando o pé direito fixo de 3,15m. Os *schedules* considerados foram os mesmos referidos na etapa de simulações preliminares, baseados nos arquivos .idf proporcionados pela plataforma S3E. O arquivo climático utilizado também foi o mesmo, o BRA_MG_Belo.Horizonte-Pampulha-Andrade.AP.835830_TMYx.2004-2018 do tipo TMY, da estação meteorológica da Pampulha (CLIMATE ONE BUILDING, 2018).

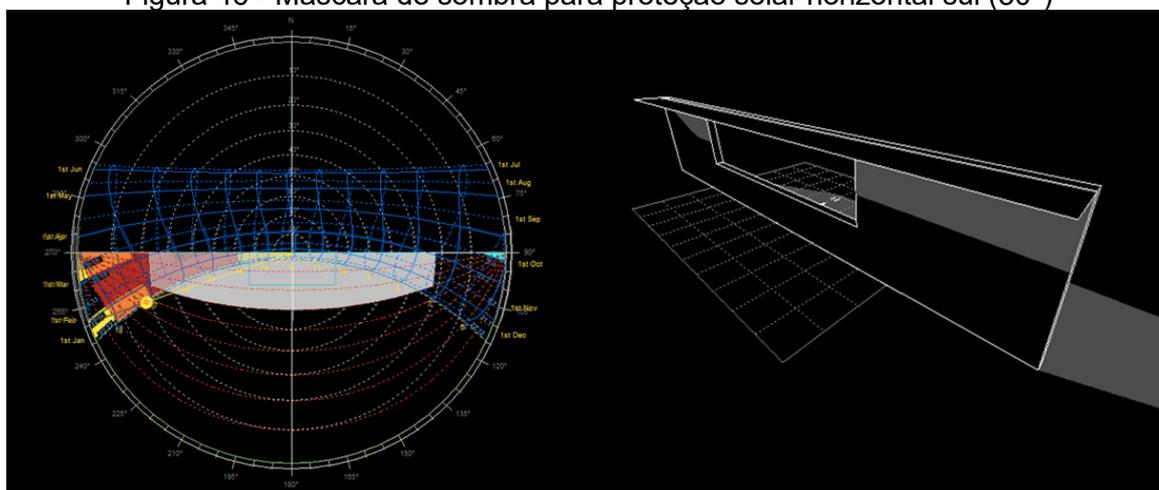
Em relação à proteção solar, o cenário com brise considerou brises horizontais com o ângulo α de 56° para todas as orientações, exceto para a orientação Sul, onde o ângulo α considerado foi de 30°. Estas características foram utilizadas por representarem o tipo de proteção solar mais presente (Gráfico 29, capítulo de Resultados) e os ângulos medianos tipicamente encontrados nas orientações de fachadas mais presentes dos edifícios estudados (Gráfico 30 e Tabela 19, capítulo de Resultados). As Figuras 45 a 47 ilustram as proteções solares representadas e suas máscaras de sombra.

Figura 45 - Exemplos de proteções solares tipicamente encontrados nos *campi* da UFMG em Belo Horizonte



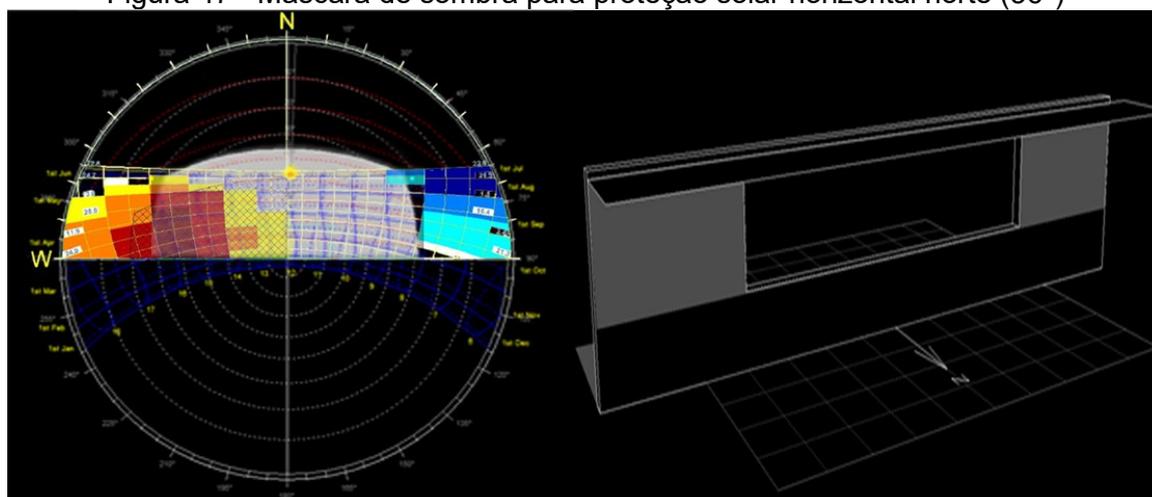
Fonte: Elaborado pela autora com base no *Google Street View*.

Figura 46 - Máscara de sombra para proteção solar horizontal sul (30°)



Fonte: Elaborado pela autora com The Solar Tool e carta solar de Belo Horizonte (LABCON, 2022).

Figura 47 - Máscara de sombra para proteção solar horizontal norte (56°)



Fonte: Elaborado pela autora com The Solar Tool e carta solar de Belo Horizonte (LABCON, 2022).

No que se refere às configurações para a simulação da ventilação natural, os Cps nas fachadas considerados no módulo *Air Flow Network* foram aqueles calculados para as situações com e sem proteção solar (*brise*) no experimento CFD da etapa anterior. Tendo em vista que as morfologias consideradas foram 1A e 2A, os Cps referiram-se aos obtidos pela fachada externa (Figura 39 e Tabela 6). No experimento paramétrico, a alteração de Cps foi configurada manualmente a depender do cenário previsto em cada rodada de simulações.

Tabela 6 - Coeficientes de pressão considerados nas simulações computacionais no EnergyPlus, por orientação, com base no experimento de simulações em CFD

	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Sem <i>brise</i> - Térreo	0,71	0,18	-0,10	-0,10	-0,17	-0,24	-0,39	0,28
Sem <i>brise</i> – 1° pavimento	0,74	0,19	-0,10	-0,13	-0,17	-0,28	-0,42	0,29
Sem <i>brise</i> – 2° pavimento	0,75	0,19	-0,11	-0,15	-0,17	-0,30	-0,43	0,31
Sem <i>brise</i> – Cobertura	0,58	0,07	-0,13	-0,12	-0,17	-0,28	-0,41	0,21
Com <i>brise</i> - Térreo	0,68	0,27	-0,39	-0,25	-0,15	-0,08	-0,13	0,16
Com <i>brise</i> – 1° pavimento	0,72	0,30	-0,41	-0,27	-0,15	-0,09	-0,13	0,18
Com <i>brise</i> – 2° pavimento	0,76	0,33	-0,43	-0,28	-0,15	-0,12	-0,13	0,19
Com <i>brise</i> – Cobertura	0,69	0,30	-0,44	-0,30	-0,16	-0,11	-0,13	0,15

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Conforme indicado na Tabela 5, o experimento paramétrico contou com a análise da presença de venezianas nas janelas. A inserção destes cenários considerou, nas fachadas com PAFs até 30%, que as venezianas seriam acrescentadas às paredes externas. Já nos casos de PAF maior que 30%, onde geralmente as janelas existentes possuem bandeiras basculantes, foi considerada a substituição das bandeiras por venezianas fixas. Assim, a inserção das venezianas simuladas se configurou conforme mostra a Figura 48.

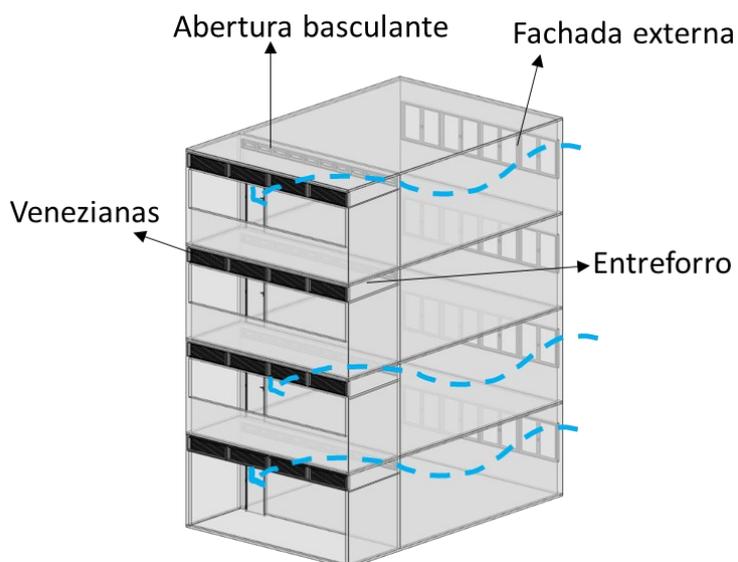
A presença de venezianas também foi considerada no cenário de ventilação cruzada. A estratégia de ventilação cruzada simulada considerou a existência de abertura superior em basculante de h=30cm na parede oposta à fachada (abertura 90°, PAFvent 90%), com a ventilação por meio de forro no corredor (Figura 49). Todas as venezianas consideradas nas simulações foram de aletas fixas, de 40cm de altura, com PAFvent de 36%, conforme cálculo realizado de acordo com o Manual do RTQ-R (BRASIL, 2012) (Figura 50).

Figura 48 - Esquemas de alteração do percentual de abertura das fachadas a partir da consideração da existência de venezianas. À esquerda o cenário sem venezianas e à direita o cenário com venezianas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Figura 49 - Perspectiva esquemática da estratégia de ventilação cruzada considerada no estudo paramétrico



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Figura 50 - Tipo de veneziana considerado nos estudos.



Fonte: Grupo MB, 202?.

Ressalta-se que a opção de ventilação cruzada foi simulada considerando exclusivamente a morfologia 2A (duas paredes expostas ao ar, sendo uma delas sombreada por corredor aberto), dado que a morfologia 1A (uma fachada externa e outra voltada para corredor fechado) não permite a ventilação cruzada sem a realização de maiores obras ou sem o prejuízo do desconforto acústico gerado pela passagem de pessoas pelo corredor. Portanto, esta solução não foi considerada razoável no presente estudo, tendo sido descartada.

Como visto na Figura 50, as venezianas proporcionam aberturas permanentes, mas possuem superfícies opacas. Nas simulações deste estudo, buscou-se representar a opacidade das venezianas a partir de um elemento de sombreamento.

No EnergyPlus, o modo de controle utilizado para a simulação da ventilação natural no objeto *AirflowNetwork:Multizone:Zone* foi o *Temperature*. Isto significa que as simulações consideraram que as janelas seriam abertas se todas as seguintes condições fossem atendidas: a) a temperatura da zona for maior que a temperatura externa, b) a temperatura da zona for maior que a temperatura do *schedule* de temperatura da zona, e c) a disponibilidade das janelas abrirem para ventilar é positiva (*venting availability schedule = 1*) (LABEEE, 2020). Neste estudo, considerou-se a temperatura da zona com o limite de 20°C para as 24h do dia. Para a disponibilidade de abertura das janelas, a rotina adotada foi para dias de semana, entre as 7h e as 22h. Já as venezianas foram consideradas permanentemente abertas.

A temperatura do solo considerada nas simulações foi obtida a partir do uso do pré-processador Slab presente no *software* EnergyPlus, conforme as indicações de LABEEE (2013) e Costa, Roriz e Chvatal (2017). As temperaturas de solo resultantes do pré-processamento e utilizadas nas simulações são apresentadas na Tabela 7. O estudo para obtenção destas temperaturas pode ser visto no Apêndice F.

Tabela 7 - Temperaturas do solo consideradas para as simulações no EnergyPlus, com base em pré-processamento com Slab

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago	Set.	Out.	Nov.	Dez.
T. (°C)	26,3	26,3	26,5	25,8	24,2	23,3	23,0	23,8	24,9	26,0	24,4	25,9

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A Tabela 8 mostra as composições de envoltória consideradas. Para a configuração no *software* EnergyPlus, foram utilizadas espessuras equivalentes, conforme indicado

por LABEEE (2017), de modo que os valores de U finais fossem condizentes com os valores apresentados na Tabela 8. O tipo de vidro utilizado para todas as simulações foi o vidro simples de 3mm, tendo em vista que a utilização de tipos de vidro diferentes é rara nas Unidades Acadêmicas estudadas. Considerou-se o uso do vidro sem cortinas.

Tabela 8 - Composições de envoltória consideradas nas simulações paramétricas com o EnergyPlus

Tipo de envoltória	Composição	U (W/m²K)
Parede N1	Bloco cerâmico de 8 furos de 9cmx19cmx29cm. Argamassa interna e externa 3cm. Espessura final 25cm.	1,78
Parede N2	Bloco cerâmico de 8 furos de 14cmx19cmx29 cm. Espessura final 17,5cm. Argamassa interna 1cm e argamassa externa 2,5cm.	2,30
Parede N3	Placa de fibrocimento. Espessura 6mm.	5,67
Cobertura N1	Telha de aço galvanizado, câmara de ar 84cm, laje de concreto 6cm, placa de poliestireno expandido 33cm e laje de concreto 6cm.	0,47
Cobertura N2	Telha metálica de aço galvanizado, câmara de ar e laje de concreto 10cm.	2,10
Cobertura N3	Laje maciça de concreto 10cm.	3,44

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Para a iluminação artificial, foram considerados dois cenários: o primeiro com lâmpada fluorescentes e o segundo com lâmpadas LED. A Tabela 9 mostra os dados de entrada para a simulação nos dois cenários.

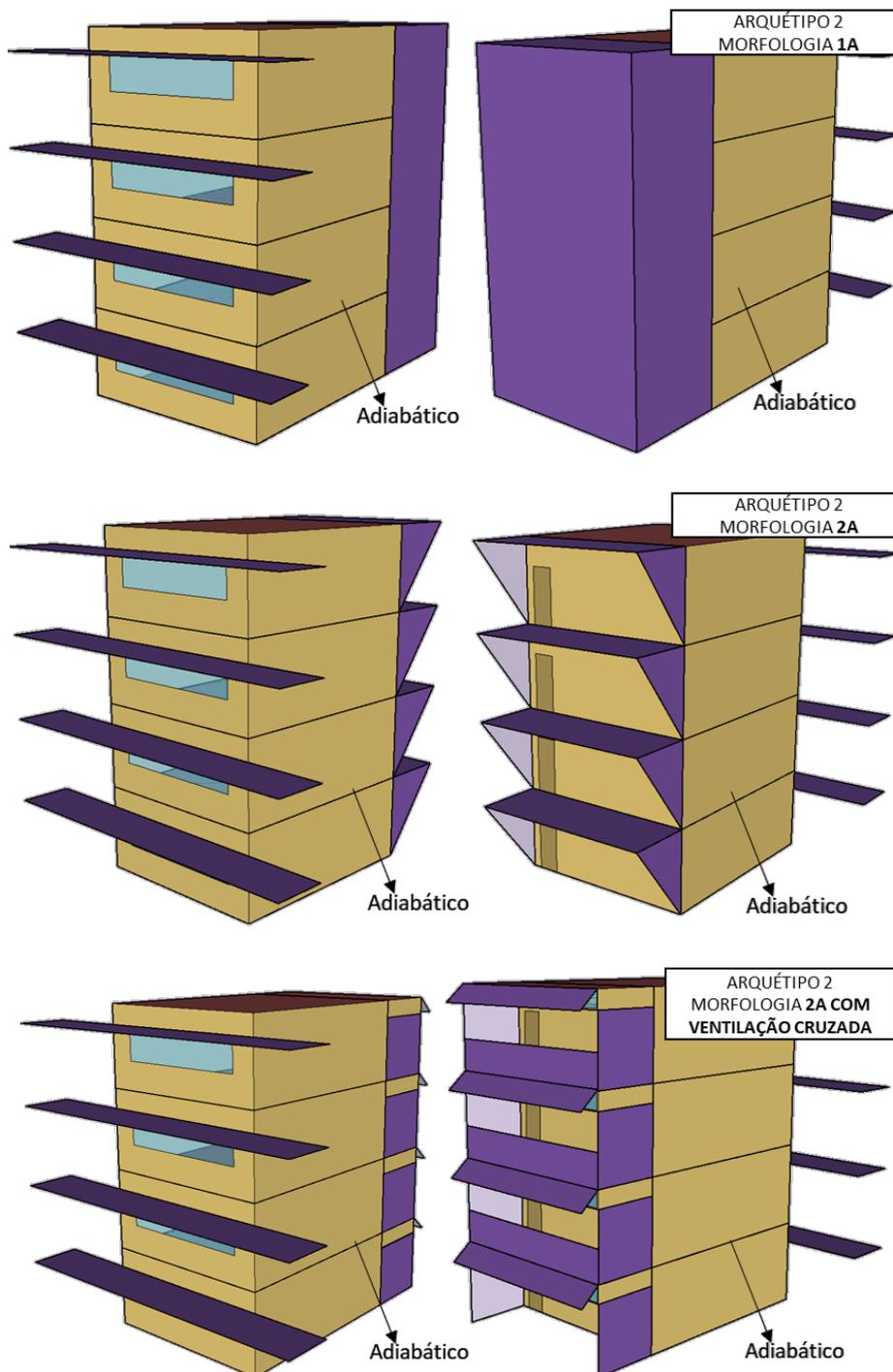
Tabela 9 - Configurações para os tipos de iluminação artificial considerados nas simulações

Tipo de lâmpada	DPI (W/m²)	Fração radiante
Fluorescente	10,63	37%
LED	6,06	0%

Fonte: U. S. Department of Energy (2007).

Por fim, a Figura 51 mostra exemplos dos modelos desenvolvidos com *plug-in* Euclid v. 0.9.4.1 no *software* SketchUp, e utilizados para as simulações com o EnergyPlus. Estão representados exemplos da modelagem das morfologias 1A, 2A sem ventilação cruzada e 2A com ventilação cruzada. As paredes laterais, que estariam em contato com salas de aula vizinhas, foram consideradas como adiabáticas.

Figura 51 - Exemplos de modelos geométricos das morfologias 1A, 2A sem ventilação cruzada e 2A com ventilação cruzada, considerados para as simulações.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Reitera-se que o uso de equipamentos de ar-condicionado não foi considerado nas simulações. Todas as demais configurações de entrada do *software* EnergyPlus seguiram os valores definidos no arquivo .idf obtido por meio da plataforma S3E,

considerando o tipo de uso de “escolas” (LABEEE, 2009). A Tabela 10 mostra algumas destas configurações.

Tabela 10 - Algumas configurações de entrada fixas utilizadas no *software* EnergyPlus

Campo	Configuração de entrada
<i>Terrain</i>	<i>City</i>
<i>Solar distribution</i>	<i>Full exterior</i>
<i>Surface Convection Algorithm (Inside e Outside)</i>	TARP
<i>Timestep per hour</i>	6
<i>Run period</i>	2 anos

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Salienta-se que o tipo de terreno foi considerado como *city* por haver, entre os prédios analisados, edifícios localizados no centro urbano de Belo Horizonte como a Escola de Arquitetura e a Faculdade de Direito. Sendo assim, esta configuração foi adotada para que as simulações computacionais pudessem abranger o pior cenário no que se refere ao cálculo de velocidade do vento incidente na fachada pelo EnergyPlus.

Como dado saída, foi solicitada a Temperatura Operativa (T_o) de cada zona térmica. A consideração da existência de ventiladores foi calculada a partir do tratamento dos dados de saída das simulações, descrito a seguir.

3.4.4. Tratamento dos dados de saída e criação da base de dados

Os ambientes considerados são naturalmente ventilados e os ocupantes possuem liberdade de adaptação de vestimenta de acordo com o clima. Então, para obtenção dos dados de PHOC, o tratamento dos dados de Temperatura Operativa (T_o) seguiu as indicações do modelo adaptativo da ASHRAE 55 (2017) e a revisão da NBR 16401-2 (Instalações de condicionamento de ar — Sistemas centrais e unitários Parte 2: Parâmetros de conforto térmico) (LABEEE, 2021), considerando os limites de aceitabilidade de 80% de usuários. O Cálculo dos limites de temperatura máximo e mínimo seguiu as Equações 1 e 2 (ASHRAE, 2017), conforme apresentado no capítulo de Revisão de literatura.

Para a consideração do efeito de ventiladores nas salas de aula, o limite superior de aceitabilidade da T_o foi acrescido em 1,2 °C. Este acréscimo corresponde ao acréscimo mínimo permitido pela ASHRAE 55 (2017) (Figura 52), referente à velocidade média do ar de 0,6 m/s. Esse valor de velocidade do vento foi adotado com

base no trabalho De Vecchi *et al.* (2015), que mediram a velocidade do ar em salas de aula universitárias com ventilação natural e ventiladores.

Figura 52 – Tabela da ASHRAE 55-2017 para acréscimo de limite para aceitabilidade de Temperatura operativa máxima a depender da velocidade do ar

Average Air Speed V_a 0.6 m/s (118 fpm)	Average Air Speed V_a 0.9 m/s (177 fpm)	Average Air Speed V_a 1.2 m/s (236 fpm)
1.2°C (2.2°F)	1.8°C (3.2°F)	2.2°C (4.0°F)

Fonte: ASHRAE 55 (2017).

A zona de adaptação de clo (vestimenta) proposta por De Vecchi *et al.* (2015) e adotada na revisão da NBR 16401-2 (LABEEE, 2021) (Figura 16) foi considerada para o cálculo do limite inferior de T_O . Assim, quando $T_O > 19,5$ °C ao mesmo tempo em que $t_{mpa(ext)} > 16,5$ °C, o limite inferior para aceitabilidade de 80% foi de 19,5 °C.

Os Graus Hora de Calor (GHC) foram calculados a partir da diferença entre T_O e a temperatura limite máxima ($T_{LIM.MÁX.}$), quando $T_O > T_{LIM.MÁX.}$ (Equação 8).

$$GHC = \sum(T_O - T_{LIM.MÁX.}) \quad (\text{Equação 8})$$

Os dados de saída das simulações continham informações para 8.760 horas do ano e foram filtrados de acordo com os horários e dias de funcionamento das salas de aula, com foco no uso das aulas de graduação. Foram considerados os dias de semana segunda à sexta, e os turnos manhã, tarde e noite, contabilizando o total de 15 horas por dia. Tendo em vista o histórico de possibilidades de alterações do calendário acadêmico, para que se pudesse ter uma análise mais completa, foram considerados todos os meses do ano. Ao todo, foram contabilizadas 3.900 horas do ano em cada simulação.

As T_O horárias de cada simulação foram tratadas de acordo com as equações indicadas neste item para a obtenção do PHOC e GHC. Além disso, foram calculados o Percentual de Horas Ocupadas em Desconforto (PHOD) por calor e por frio. No entanto, a partir da análise dos resultados, optou-se por permanecer com as métricas PHOC e GHC, pois a primeira indica o percentual de pertencimento à faixa de temperaturas limites, enquanto a segunda oferece noção acerca do quanto a

temperatura excede o limite, sendo assim mais adequada para o entendimento da intensidade de calor do que o PHOD. Não foi verificado desconforto considerável por frio, por isso o PHOD de frio foi descartado das análises.

Três zonas térmicas foram consideradas em cada simulação: a do térreo, a da cobertura e a do pavimento intermediário (zona térmica imediatamente abaixo do último andar). Uma base de dados foi desenvolvida, na qual cada linha correspondeu a um cenário de sala de aula simulado e cada coluna continha as variáveis consideradas para a simulação, além do PHOC e do GHC. A base de dados final contou com 219.996 observações (Figura 53).

Figura 53 - Estrutura da base de dados referente ao conforto térmico das salas de aula

```
Data columns (total 21 columns):
#   Column                Non-Null Count  Dtype
---  -
0   index                  219996 non-null int64
1   PAF                    219996 non-null int64
2   Lights                 219996 non-null object
3   People                 219996 non-null float64
4   Orientacao             219996 non-null object
5   Tipo_janela            219996 non-null int64
6   Brise                  219996 non-null object
7   Andar                  219996 non-null object
8   PHOC                   219996 non-null float64
9   PHOD_Calor             219996 non-null float64
10  PHOD_Frio              219996 non-null float64
11  Graus_Hora_Calor       219996 non-null float64
12  Morfologia             219996 non-null object
13  Arquetipo              219996 non-null int64
14  VentCruz               219996 non-null object
15  Ventilador             219996 non-null object
16  Ucob                   219996 non-null float64
17  Upar                   219996 non-null float64
18  AbsCob                 219996 non-null float64
19  AbsPar                 219996 non-null float64
20  Veneziana              219996 non-null object
dtypes: float64(9), int64(4), object(8)
```

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.5. Análise de dados e desenvolvimento do *benchmarking*

3.5.4. Análises de correlação

Uma vez construídas as duas bases de dados, referentes à intensidade do consumo de energia dos prédios e ao conforto térmico das salas de aula, a etapa seguinte foi a análise de correlação entre as variáveis independentes e as variáveis dependentes. No caso da energia, a variável dependente foi a EUI (kWh/m²/ano). No caso do conforto térmico, foram utilizadas duas variáveis dependentes: PHOC e GHC.

As análises de correlação foram feitas a partir de análises gráficas exploratórias bivariadas e multivariadas, com o uso de gráficos de dispersão e índices de correlação de Pearson. A análise gráfica permite a identificação visual de correlações não lineares, que podem indicar a pertinência da transformação de dados para linearizar a correlação. Além dos gráficos de dispersão, foram feitas matrizes de correlação para identificação da correlação linear entre variáveis independentes, que não poderiam estar simultaneamente na mesma equação por conta do efeito da multicolinearidade.

Geralmente, considera-se que valores de correlação inferiores a 0,35 representam correlações lineares fracas. Valores entre 0,36 e 0,67 representam correlações moderadas. Valores entre 0,68 e 1 representam correlações fortes, sendo valores maiores do que 0,9 muito fortes (TAYLOR, 1990).

As análises de correlação foram desenvolvidas para auxiliar a construção dos modelos de regressão múltiplos referentes ao EUI, ao PHOC e ao GHC. As variáveis independentes com baixas correlações com suas respectivas dependentes foram descartadas e aquelas com correlações médias e altas foram identificadas como candidatas para o processo de desenvolvimento dos modelos.

3.5.5. Elaboração das equações preditivas

As equações preditivas referentes ao EUI, ao PHOC e ao GHC foram elaboradas no ambiente R de modo que cada variável e cada interação entre variáveis foram inseridas manualmente no *software* e os resultados foram analisados a cada inserção. A inserção das variáveis e suas interações se deu em ordem decrescente, das que possuíam maiores a menores coeficientes de correlação de Pearson. A análise dos resultados envolveu a verificação do R² e da significância de cada termo a partir do valor-p. O valor-p é o resumo de um teste de hipóteses, que, no caso de modelos de

regressão, testa a hipótese de que o coeficiente de regressão é nulo (hipótese nula, H_0), ou seja, de que a variável independente associada a esse coeficiente não é significativa para a predição da variável resposta. Em geral, quando o valor-p é inferior a ao nível de significância adotado (probabilidade máxima de errar ao rejeitar a hipótese de nulidade do coeficiente de regressão), considera-se que existem evidências amostrais suficientes a favor da hipótese de não-nulidade do coeficiente de regressão. O valor mais comumente utilizado para o nível de significância é o de 5%. Quando há amostras pequenas, este corte pode ser feito para valores-p inferiores a 0,1, com nível de significância 10%. No processo de desenvolvimento dos modelos desta tese, em um primeiro momento, foram mantidos os termos que apresentaram valor-p < 0,2. Posteriormente, ao final da inserção de todas as variáveis, os modelos foram refinados e aquelas variáveis independentes com valores-p superiores a 0,05 ou 0,1, foram eliminados, como será indicado posteriormente.

Ao final do processo, foi realizado o teste de normalidade dos erros de Shapiro-Wilk. Este teste tem como objetivo analisar se a distribuição dos erros do modelo pode ser considerada normal (gaussiana), que é a hipótese nula desse teste. Se o valor-p do teste de Shapiro-Wilk for maior do que 0,05, considera-se que não há evidências amostrais contra a hipótese de normalidade dos erros do modelo de regressão linear. Buscou-se desenvolver os modelos com maior R^2 , que apresentassem coeficientes de regressão estatisticamente não-nulos, que passassem no teste de normalidade de Shapiro-Wilk e com maior grau de liberdade para a soma de quadrados dos resíduos, para maximizar a precisão e evitar o efeito de super ajuste. Também se buscou, quando possível, atingir coerência entre os efeitos esperados e o sinal das estimativas dos coeficientes de regressão, para favorecer a geração de modelos com coeficientes interpretáveis.

De modo similar ao trabalho de Federspiel, Zhang e Arens (2002), observou-se que os modelos referentes ao consumo de energia obtiveram melhores resultados quando as bases de dados foram separadas entre os prédios que possuíam mais de 5% de área de laboratórios de equipamentos densos e os que não possuíam. Portanto, para a predição de EUI, foram desenvolvidas duas equações: 1) prédios sem laboratórios de equipamentos densos, com amostra de 17 prédios; e 2) prédios com laboratórios de equipamentos densos, com amostra de 10 prédios. Para o Modelo 1, os termos foram considerados estatisticamente não-nulos se o valor-p de seus respectivos

testes de hipóteses fossem inferiores a 0,1. No caso do Modelo 2, considerou-se estatisticamente não-nulos termos com valores- $p < 0,05$.

Os modelos foram elaborados tendo em vista sua utilização por arquitetos e engenheiros da equipe de projetos e manutenção da UFMG, ou seja, usuários não leigos. Buscou-se que os modelos obtivessem variáveis que fossem passíveis de melhoria, para que o modelo fosse útil em indicar diretrizes para *retrofit* e para novos projetos. Por isso, deu-se prioridade em tentar manter principalmente variáveis referentes à iluminação artificial. A diferença na presença de condicionamento artificial do ar também foi notada nesta fase.

Ao todo, foram construídos quatro modelos preditivos:

- Modelo 1: EUI - prédios sem laboratórios de equipamentos densos e presença expressiva de condicionamento artificial do ar;
- Modelo 2: EUI – prédios com laboratórios de equipamentos densos e maior presença de condicionamento artificial do ar;
- Modelo 3: PHOC – salas de aula condicionadas naturalmente;
- Modelo 4: Graus Hora de Calor – salas de aula condicionadas naturalmente.

3.5.6. Elaboração do sistema de classificação

O sistema de classificação, tanto para a energia quanto para o conforto térmico, foi elaborado segundo algumas premissas. São elas:

- As classificações seriam feitas nas classes de A a E, pois são classificações já consolidadas no sistema de etiquetagem brasileiro, além de a classificação representada por letras ser recomendada pela ISO 52003-1:2017 (ISO, 2017);
- As classificações de energia e de conforto térmico deveriam ser visualizadas de forma integrada, com mesmo nível de importância e facilmente compreendidas pelos usuários.
- As classificações deveriam indicar uma escala de níveis de diagnóstico, para favorecer a análise de prioridade de intervenções para melhorias;
- As classificações e os modelos de regressão deveriam considerar características arquitetônicas e fatores passíveis de *retrofit*, para que eles pudessem ser válidos para identificação de possíveis de melhorias.

- O sistema desenvolvido seria para uso da instituição do estudo de caso, compreendendo um *benchmarking* interno conforme classificação de Chung (2011).

Os sistemas de classificação de A a E foram desenvolvidos de maneiras distintas para as análises de energia e para o conforto térmico, como explicado a seguir.

- *Classificação para a energia*

No caso da energia, a partir da setorização, identificou-se que os prédios possuíam diferentes proporções de tipos de espaços, incluindo diferentes quantidades de gabinetes e diferentes tipos e quantidades de laboratórios, que interferem de forma importante no consumo de energia. Assim, optou-se por não comparar os prédios entre si, já que não necessariamente um prédio com EUI menor que o outro significaria maior eficiência, podendo significar diferentes demandas pelas atividades exercidas. Portanto, optou-se por um método onde fosse possível identificar a eficiência do uso da energia de cada prédio utilizando como parâmetro de comparação o mesmo prédio, com valores de referência mais eficientes ou menos eficientes. Para isso, utilizou-se o método de classificação com base no cálculo de intervalos do RTQ-C (BRASIL, 2010) (Equação 9). Este índice foi escolhido pois ele já foi amplamente utilizado em escala nacional com a aplicação da ENCE. Utilizou-se a lógica do regulamento, porém o índice “i” foi trabalhado respeitando as bases de dados desenvolvidas na pesquisa.

$$i = \frac{EUI_{\text{máxD}} - EUI_{\text{mín}}}{4} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde $EUI_{\text{máxD}}$ representa o limite máximo do nível D e o $EUI_{\text{mín}}$ representa o nível mínimo. Com base neste índice, são definidos os intervalos de classificação de acordo com a Figura 54.

Figura 54 - Limites dos intervalos dos níveis de eficiência

Eficiência	A	B	C	D	E
Lim Mín	-	$IC_{\text{máxD}} - 3i + 0,01$	$IC_{\text{máxD}} - 2i + 0,01$	$IC_{\text{máxD}} - i + 0,01$	$IC_{\text{máxD}} + 0,01$
Lim Máx	$IC_{\text{máxD}} - 3i$	$IC_{\text{máxD}} - 2i$	$IC_{\text{máxD}} - i$	$IC_{\text{máxD}}$	-

Fonte: RTQ-C (BRASIL, 2010).

Para o Modelo 1, as variáveis passíveis de alteração para a definição do nível D foram aquelas que permaneceram estatisticamente significantes no modelo e eram de maior facilidade para realização de *retrofit*: DPI de iluminação artificial e proporção de salas

de aula com ventiladores. Para o Modelo 2, as variáveis foram: DPI de iluminação artificial, proporção de área condicionada com ar-condicionado tipo janela e proporção de área condicionada com ar-condicionado tipo *split*. O limite máximo do nível D para essas variáveis foi definido conforme a Equação 10.

$$L.máxD = Valor\ máximo - \left(\frac{Valor\ máximo - Valor\ mínimo}{5} \right), \quad (\text{Equação 10})$$

na qual o Valor máximo é o maior valor encontrado para a variável na base de dados e o Valor mínimo, o menor (Tabelas 11 e 12).

Tabela 11 – Valores máximo, mínimo e Limite máximo D considerados para o Modelo 1 (sem laboratórios de equipamentos densos e presença menos significativa de aparelhos de ar-condicionado)

	Valor máximo	Valor mínimo	L.máxD
$DPI_{ILUMINAÇÃO}$ (W/m ²)	14,4	5,8	12,7
$Prop.Ventiladores_{SALAS DE AULA}$ (%)	1,0	0,0	0,8

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Tabela 12 - Valores máximo, mínimo e Limite máximo D considerados para o Modelo 2 (com laboratórios de equipamentos densos e presença mais significativa de aparelhos de ar-condicionado)

	Valor máximo	Valor mínimo	L.máxD
$DPI_{ILUMINAÇÃO}$ (W/m ²) (sem CPD24h)	15,5	8,4	14,1
$DPI_{ILUMINAÇÃO}$ (W/m ²) (com CPD24h)	10,7	5,8	9,7
$Prop.AC_{JANELA}$ (%)	Variável*	Variável*	Variável*
$Prop.AC_{SPLIT}$ (%)	Variável*	Variável*	Variável*

* Explicação a seguir.

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Para as proporções de área condicionada do Modelo 2, considerou-se que o pior cenário seria aquele no qual 100% da área total condicionada do prédio fosse referente ao tipo de ar-condicionado de janela. Então, para o cálculo do valor Limite máximo para nível D considerou-se que 80% da área condicionada com aparelhos tipo *split* passariam a ser do tipo janela, conforme as Equações 11 e 12. Já para o cenário otimizado (limite mínimo), considerou-se que toda a área condicionada seria equipada com aparelhos tipo *split*.

$$L.máx.D_{PROP.AC.JANELA} = Prop.AC_{JANELA} + Prop.AC_{SPLIT} * 0,8 \quad (\text{Equação 11})$$

$$L.máx.D_{PRO.AC.SPLIT} = Prop.AC_{SPLIT} * 0,2 \quad (\text{Equação 12})$$

Os dados de EUI medidos foram comparados com a escala de EUI elaboradas a partir das equações e do EUI estimado, e assim foram definidas as classificações de A a E para cada prédio. Além da classificação obtida com os cálculos descritos, como condição básica de elegibilidade para o nível A no quesito de energia, foi proposto que a iluminação do prédio deveria ser do tipo LED.

- Classificação para o conforto térmico das salas de aula

No que se refere ao conforto térmico das salas de aula, foi possível desenvolver o sistema de comparação a partir da análise de distribuição das variáveis resposta consideradas (PHOC e GHC). A lógica de classificação seguiu a escala de A a E, na qual a divisão de níveis se deu a partir dos quintis (percentis 20, 40, 60 e 80) de cada distribuição, assim como foi feito no trabalho de Veloso, Souza e Santos (2020). Cada sala de aula foi classificada de acordo com essa distribuição.

Já para a classificação dos GHC, foi necessário realizar uma transformação para a escala logarítmica de base 10 para que a distribuição pudesse se assemelhar a uma distribuição normal. Este tipo de transformação também foi realizado no estudo de *benchmarking* de Veloso, Souza e Santos (2020).

Apesar da consideração de duas métricas para a análise do conforto térmico, a classificação de cada sala deveria ser unificada, para que posteriormente fosse integrada à avaliação de EUI. Para isso, foi realizada a integração gráfica bidimensional do PHOC e dos GHC, com a delimitação dos limites e áreas correspondentes para cada classe de acordo com os quintis.

Assim, cada sala teve seu PHOC e GHC estimados a partir dos modelos de regressão multivariada 3 e 4 e os resultados foram comparados com os limites indicados na Figura 75 (capítulo de Resultados) para a determinação do nível representativo do conforto térmico estimado do ambiente, de A a E.

Como o EUI refere-se à escala do prédio, foi proposta uma classificação de conforto térmico referente ao conjunto de salas de aula de cada prédio, para que as

classificações fossem integradas posteriormente. Assim, a classificação de conforto térmico do conjunto de salas de aula de um prédio foi calculada a partir da média ponderada pela área, de acordo com as Equações 13 e 14.

$$PHOC_{médio} = \frac{\sum_{i=1}^n (PHOC_n \times Área_n)}{\sum_{i=1}^n Área_n} \quad (\text{Equação 13})$$

$$GHC_{médio} = \frac{\sum_{i=1}^n (GHC_n \times Área_n)}{\sum_{i=1}^n Área_n} \quad (\text{Equação 14})$$

A partir do cálculo do PHOC e do GHC médios, os valores foram analisados frente aos limites dos quintis para a obtenção da classificação do conjunto de salas de aula de cada prédio.

Observou-se que a presença de ventiladores conformava um fator importante para as melhores classificações de conforto térmico. Tendo em vista o incômodo do uso de ventiladores do ponto de vista acústico (DIAS; SANTOS; MARIANO, 2019, LIBARDI *et al.*, 2006) e a fim de prover informações sobre a estimativa de conforto térmico sem a utilização de equipamentos consumidores de energia, também foram feitas classificações considerando o cenário sem a utilização de ventiladores. O procedimento seguiu os mesmos passos, somente se diferenciando pela consideração de ausência de ventiladores na predição de PHOC e GHC.

Para que a classificação da média de PHOC e GHC não camuflasse situações ruins, buscou-se, no *dashboard* do *benchmarking*, que também fosse possível visualizar os diferentes níveis de conforto térmico previstos para as salas de aula em cada prédio.

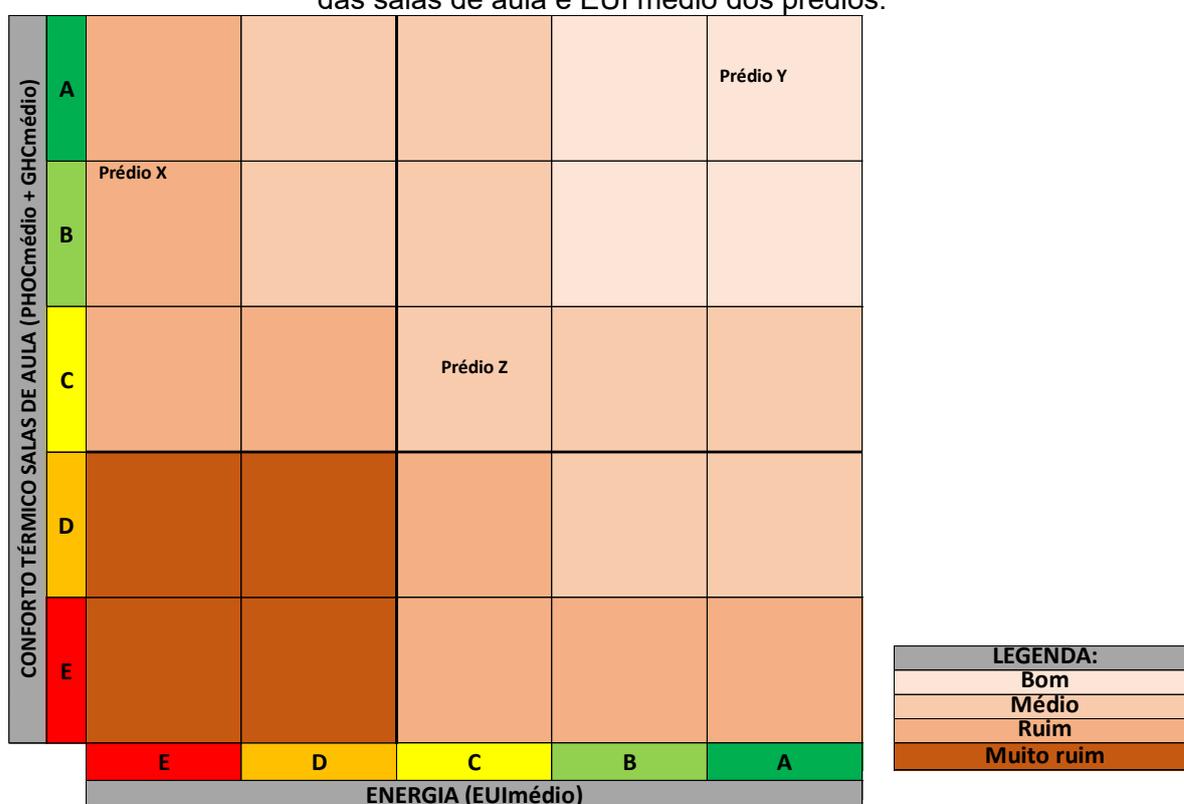
- Integração entre as classificações de energia e de conforto térmico

Tendo como base as premissas de que as classificações de energia e de conforto térmico deveriam ser visualizadas de forma integrada, com mesmo nível de importância e facilmente compreendidas pelos usuários; e de que as classificações deveriam indicar uma escala de prioridade de intervenções para melhorias, foi proposta uma integração bidimensional, que conforma um quadro de *benchmarking*, conforme mostra a Figura 55.

Este quadro compreende a integração gráfica das classificações de energia dos prédios e de conforto térmico das salas de aula, de A a E, de modo que os quadrantes

indicam um nível de diagnóstico a partir das cores, nos níveis: bom, médio, ruim e muito ruim. O nível “muito ruim” seria aquele no qual as intervenções de *retrofit* seriam mais benéficas. Uma vez aplicadas as classificações, o nome de cada prédio foi inserido no quadrante respectivo de interseção das classificações de energia e de conforto térmico. Não há diferença em relação à localização do nome do edifício dentro dos quadrantes, devendo ser analisados somente os níveis de eficiência aos quais ele se reporta e a escala de diagnóstico a partir da cor.

Figura 55 - Quadro de *benchmarking* das Unidades Acadêmicas - Conforto térmico médio das salas de aula e EUI médio dos prédios.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

No caso ilustrativo da Figura 55, o “Prédio X” representa uma classificação nível E para a energia e nível B para o conforto térmico das salas de aula, sendo seu nível de diagnóstico “Ruim”. O “Prédio Y” representa uma classificação de nível A tanto para a energia quanto para o conforto térmico das salas de aula, tendo um nível de diagnóstico “Bom”. O “Prédio Z” representa uma classificação de nível C tanto para a energia quanto para o conforto térmico das salas de aula, tendo um nível de diagnóstico “Médio”.

Foi desenvolvida uma planilha eletrônica no software Excel, na qual o quadro de *benchmarking* da Figura 55 foi disposto junto a gráficos para a visualização dos dados referentes ao EUI médio de cada prédio e seu conjunto (grupos com e sem laboratórios de equipamentos densos), assim como os níveis de PHOC e GHC médios das salas de aula atingidos por cada prédio com e sem o uso de ventiladores. Foi inserido um gráfico para visualização dos diferentes níveis de conforto térmico presentes nas salas de aula, para que casos extremos não fossem camuflados pela média ponderada. Também foram inseridas tabelas com os valores estimados de PHOC e GHC, com e sem a consideração da existência de ventiladores nas salas de aula, para que o usuário pudesse ter informação acerca da dependência de equipamentos em relação ao conforto térmico nestes ambientes.

3.6. Ambientes computacionais

O Quadro 11 traz um resumo acerca dos ambientes computacionais utilizados para cada etapa metodológica descrita neste capítulo.

Quadro 11 – Resumo dos ambientes computacionais usados

Procedimento metodológico	Ambiente computacional
Aplicação de questionários <i>online</i>	Google Forms
Levantamento de dados	E-mails, Google Maps e Google Street View
Elaboração dos arquétipos	<i>Script</i> em Python com biblioteca <i>K-means</i>
Modelagem tridimensional para simulações em CFD	Autocad 3D
Simulações em CFD para obtenção do coeficiente de pressão das fachadas	ANSYS CFX versão 17.1
Modelagem dos modelos para simulação	<i>Plug-in</i> Euclid para SketchUp
Simulações paramétricas para análise do conforto térmico	Energy Plus v. 9.0.1 e <i>script</i> em Python v. 3 (Jupyter Notebook)
Desenvolvimento das equações de regressão múltipla	RStudio v. 2021.09.1
Tratamento de dados e gráficos	Excel, R e Python v. 3 (Jupyter Notebook)

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

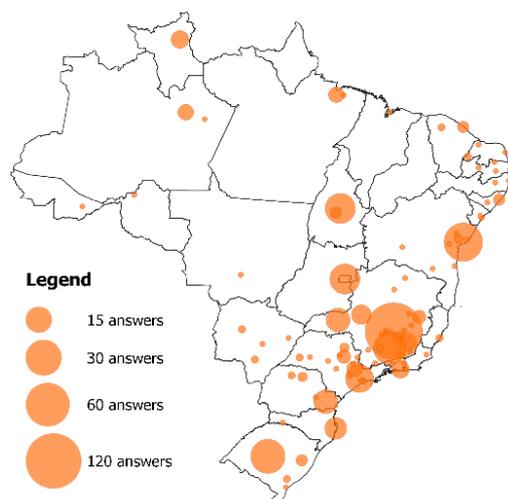
4. RESULTADOS

Os resultados referentes à revisão sistemática da literatura (Apêndice A) indicaram lacuna em relação ao desenvolvimento de sistemas de *benchmarking* energético de edifícios universitários no Brasil. Tal estudo foi publicado de forma resumida em Garcia *et al.* (2020).

4.1. Resultados do questionário para caracterização de conforto térmico e uso de sistemas de condicionamento de ar

A pesquisa obteve um total de 662 respostas. Após a verificação dos critérios de validade, o conjunto de dados final apresentou 600 respostas válidas, de 93 cidades (Figuras 56 e 57).

Figura 56 - Representação da densidade de respostas no território brasileiro.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Figura 57 - Representação da densidade

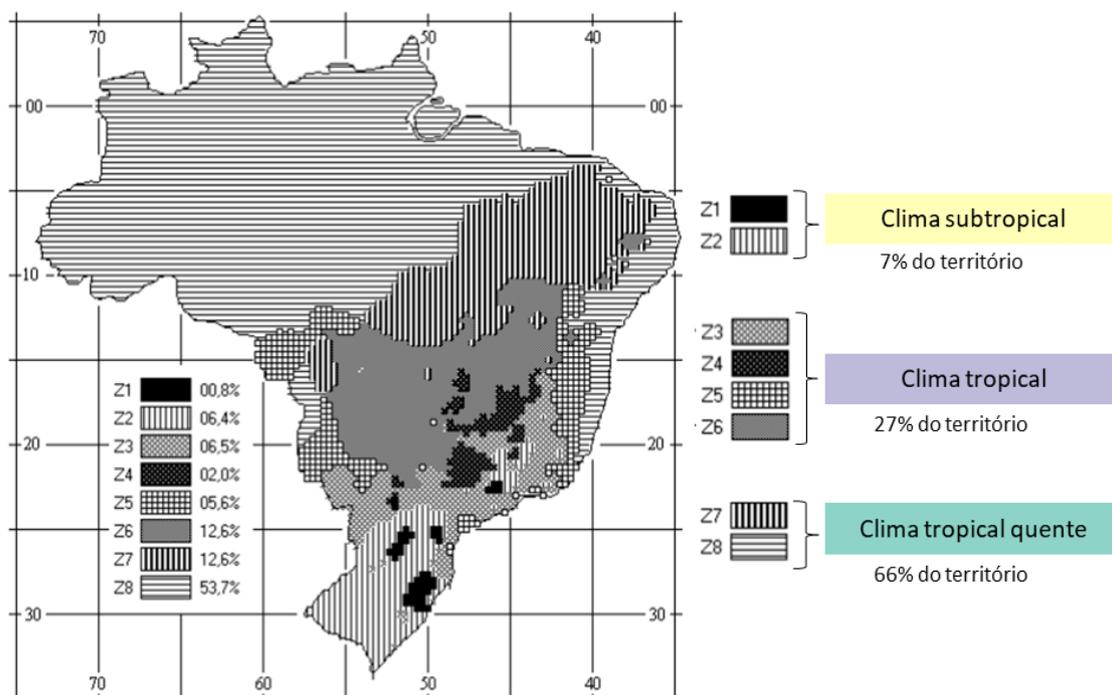


Fonte: IBGE (2010).

Comparando as Figura 56 e 57, fica claro que as regiões de onde houve respostas foram também as que possuem maior densidade populacional (mais concentrada ao longo da extensão costeira brasileira). Esse aspecto corrobora o entendimento de que os resultados apresentados refletem áreas representativas no país.

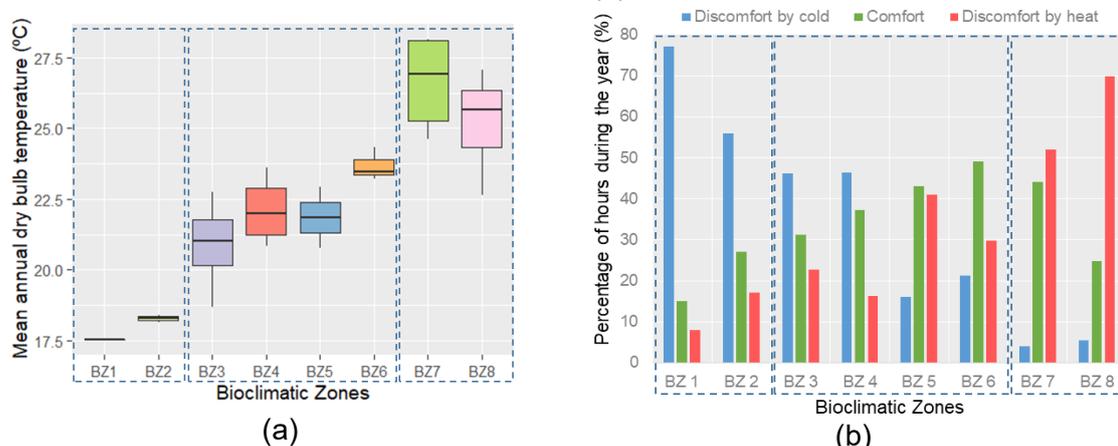
Para análises relativas ao clima, as cidades foram agrupadas da seguinte forma: as ZBs 1 e 2 foram reunidos no grupo "Clima Subtropical", as ZBs 3 a 6 foram reunidas no grupo "Clima Tropical", e as ZBs 7 e 8 foram reunidas no grupo "Clima Tropical Quente" (Figuras 58 e 59).

Figura 58: Zonas Bioclimáticas brasileiras e os grupos climáticos criados para a análise do conjunto de dados



Fonte: Adaptado da ABNT (2003).

Figura 59 - Comparação das temperaturas médias anuais de bulbo seco (a) e percentual médio das temperaturas anuais externas dentro e fora da zona de conforto adaptativo ASHRAE 55 (b), por ZBs



Fonte: Baseado em arquivos meteorológicos TMYx do *Climate One Building* (2020) ¹².

Fonte: Baseado em dados do Projeteer (2020).

¹² Lista de cidades dos entrevistados com arquivos meteorológicos TMYx disponíveis na WMO: **ZB1** – Curitiba; **ZB2** - Pelotas e Santa Maria; **ZB3** – Bauru, Belo Horizonte, Campinas, Chapecó, Dourados, Florianópolis, Juiz de Fora, Lavras, Londrina, , Maringá, Porto Alegre, Rio Grande, São Paulo, Uberlândia e Viçosa; **ZB4** - Brasília, Patos de Minas, Ribeirão Preto e São Carlos; **ZB5** – Santos e Vitória da Conquista; **ZB6** - Montes Claros, Presidente Prudente e Três Lagoas/MS; **ZB7** - Bom Jesus da Lapa, Cuiabá, Palmas, Porto Nacional e Sobral; **ZB8** - Aracaju, Belém, Boa Vista, Campina Grande, Campo Grande, Fortaleza, Ilhéus, Itacoatiara, João Pessoa, Maceió, Manaus, Natal, Porto Velho, Recife, Rio Branco (AC), Rio de Janeiro, Salvador, São Luís e Vitória (total de 51 cidades).

O conjunto de dados incluiu respostas de todas as ZBs brasileiras (Gráfico 1). A maior parcela de entrevistados foi do grupo clima Tropical (56%). Nesse grupo, existem algumas das maiores e mais importantes cidades do Brasil, como São Paulo (com aproximadamente 12 milhões de habitantes e o maior PIB do país) e Brasília (capital do Brasil, com 2,5 milhões de habitantes) (IBGE, 2020) O segundo grupo climático com mais respostas foi o Tropical Quente (27%), que representa os climas mais frequentes no Brasil (66% do território). Além disso, 17% das respostas foram do grupo clima Subtropical, que abrange aproximadamente 7% do território brasileiro.

Observou-se que 62% dos respondentes se declararam do sexo feminino e 78% frequentavam instituições de ensino públicas. O Gráfico 2 mostra a distribuição de gênero por grupo climático e tipo de instituição. Pode-se ver que a participação feminina foi predominante em todos os casos. A maior proporção de entrevistados foi de estudantes (39% de graduação e 26% de pós-graduação), seguidos por 29% de professores, 6% de trabalhadores administrativos e técnicos e 1% de pesquisadores (Gráfico 3).

Gráfico 1 - Número de respostas válidas por grupo climático

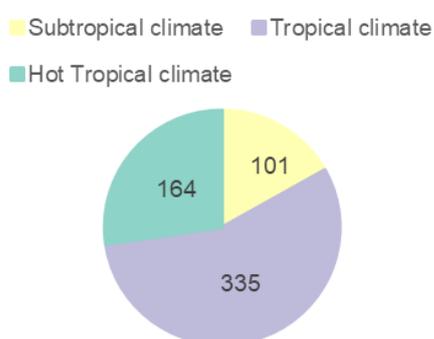


Gráfico 2 – Proporção e números totais de respostas válidas por sexo, grupo climático e tipo de instituição

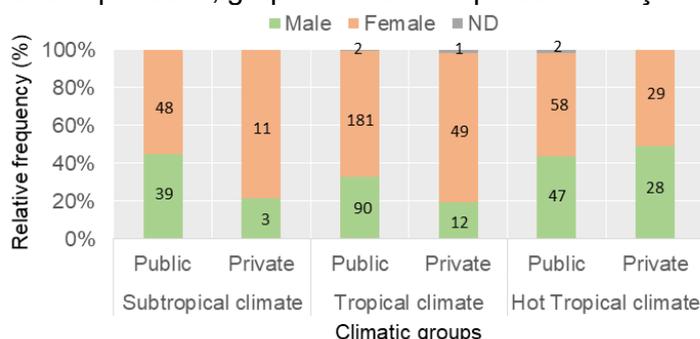
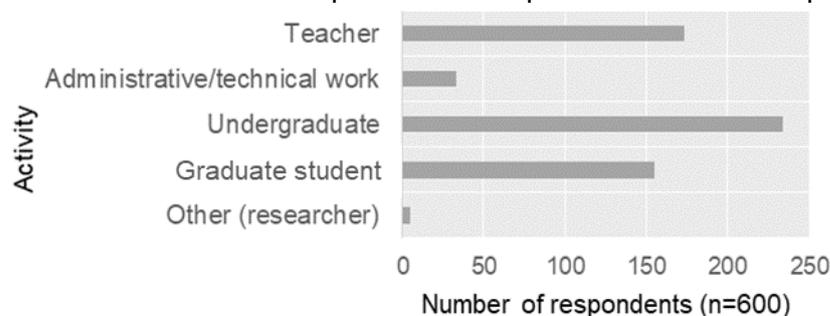


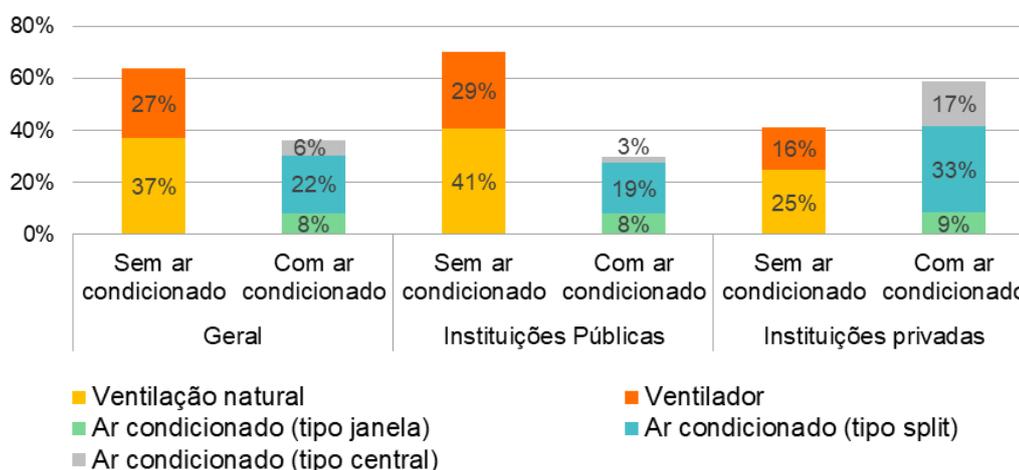
Gráfico 3 – Número total de respostas válidas por atividade dos ocupantes



4.1.1. Sistemas de ar-condicionado encontrados nas IES brasileiras

Esta seção irá apresentar os resultados referentes aos prédios de Unidades Acadêmicas. Os resultados referentes aos demais tipos de edifícios de *campi* universitários (Laboratórios, Administrativos e Serviços/Outros) podem ser vistos no Apêndice G. O Gráfico 4 apresenta os tipos de sistemas de ventilação indicados como existentes nas Unidades Acadêmicas de IES brasileiras.

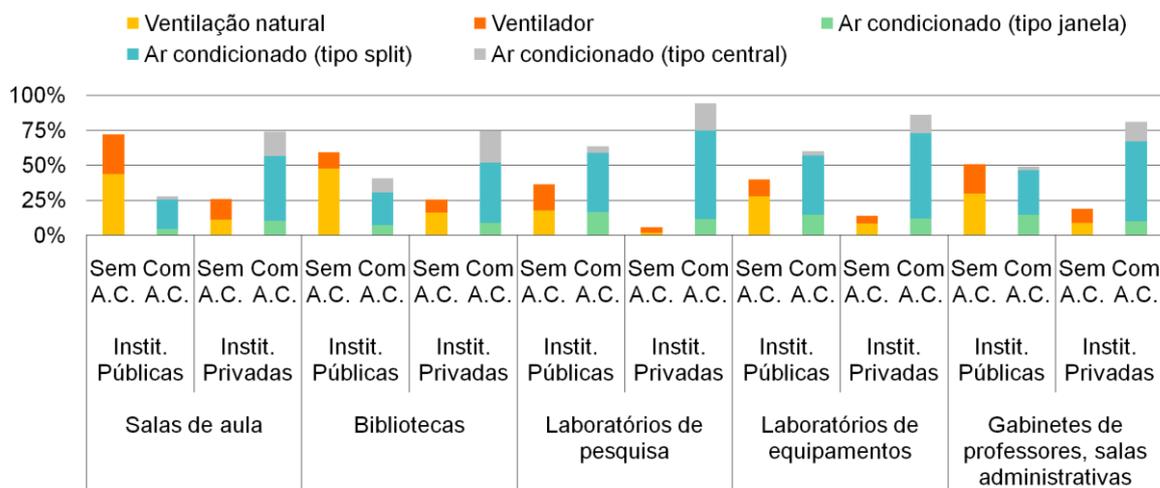
Gráfico 4 - Tipos de sistemas de ventilação em prédios do tipo Unidades Acadêmicas



Observa-se pelo Gráfico 4, que há diferenças em termos dos tipos de sistemas de condicionamento de ar encontrados nas instituições públicas e privadas. Nas primeiras, indicou-se maior presença de sistemas de ventilação natural ou uso de ventilador, enquanto na segunda, indicou-se maior uso de ar-condicionado, com predominância do tipo *split*. A diferenciação da predominância dos sistemas de ar-condicionado também foi encontrada para os demais tipos de edifícios, como pode ser visto no Apêndice F, entre as instituições públicas e privadas, sempre com maior presença de ar-condicionado nas instituições privadas.

O Gráfico 5 mostra os resultados em relação à existência de tipos de sistemas de ventilação encontrados em ambientes internos dos edifícios do tipo Unidades Acadêmicas: **Salas de aula, Bibliotecas, Laboratórios de pesquisa e informática** (onde há predominância de equipamentos com consumo energético similares aos de computadores), **Laboratórios de equipamentos densos** (onde há predominância de outros equipamentos que consomem mais energia do que computadores) e **Gabinetes de professores e salas administrativas**.

Gráfico 5 - Tipos de sistemas de ventilação encontrados em prédios do tipo **Unidades Acadêmicas, por tipo de ambiente**



Assim como observado em relação aos tipos de prédios, com o Gráfico 5, percebe-se discrepância entre os sistemas de ventilação encontrados nos ambientes internos das Unidades Acadêmicas das instituições públicas e privadas. A maior diferença foi percebida nas Salas de aula, nas quais os sistemas sem e com ar-condicionado somaram, respectivamente 72% e 28% das respostas em instituições públicas; enquanto nas instituições privadas, estes valores foram 26% e 74%, respectivamente. Nos ambientes de Laboratórios (ambos os tipos) houve predominância da presença de sistemas com ar-condicionado nos dois tipos de instituições, porém com proporção significativamente maior nas instituições privadas.

Nas instituições públicas, nos ambientes de Salas de aula, Bibliotecas e Gabinetes de professores e salas administrativas, o sistema de ventilação indicado com maior frequência foi a ventilação natural, enquanto nos ambientes de Laboratórios (de informática e de equipamentos), foi o ar-condicionado do tipo *split*. Já nas instituições particulares, a existência do ar-condicionado tipo *split* foi indicado com maior frequência para todos os tipos de ambientes.

Com base nestas respostas, considerou-se que o sistema de *benchmarking* a ser elaborado deveria distinguir entre os tipos de instituição pública e privada. No caso da instituição pública, entendeu-se que seria pertinente o foco no estudo da ventilação natural.

4.1.2. Respostas dos usuários de Unidades Acadêmicas da UFMG em relação ao tipo de sistema de condicionamento de ar sua experiência térmica no verão e no inverno

Para fins de síntese, este item apresenta os resultados referentes à experiência térmica dos usuários das Unidades Acadêmicas da UFMG, estudo de caso da presente pesquisa. Os resultados referentes à escala nacional agrupados por ZBs podem ser vistos no Apêndice G.

Ao todo, foram obtidas 108 respostas válidas de usuários da UFMG. Aproximadamente 70% dos respondentes se declararam mulheres e, em relação à atividade exercida na instituição, aproximadamente 6% indicaram ser professores, 47% alunos de graduação, 39% alunos de pós-graduação, 5% funcionários técnico administrativos e 2% outros (geralmente pesquisadores).

Em relação aos tipos de sistema de condicionamento de ar encontrados nas Unidades Acadêmicas da UFMG, a ventilação natural foi indicada como a mais encontrada (52% das respostas), sendo seguida pelo uso de ventiladores (35%). O uso de aparelhos de ar-condicionado foi pouco expressivo nas Unidades Acadêmicas da UFMG, representando 6%, 5% e 2% para aparelhos do tipo janela, split e central, respectivamente. Para a melhor compreensão a respeito da distribuição do uso de sistemas de ventilação nas edificações, o Gráfico 6 mostra os sistemas de condicionamento de ar indicados como encontrados predominantes em cada tipo de ambiente das Unidades Acadêmicas da UFMG.

Gráfico 6 - Sistemas de condicionamento de ar indicados como predominantes pelos usuários de Unidades Acadêmicas da UFMG, por tipo de ambiente.



A partir do Gráfico 6 percebe-se que, de acordo com a resposta dos usuários, a ventilação natural é predominante em aproximadamente 70% de salas de aula e bibliotecas, ambientes utilizados pela maioria dos alunos frequentadores destes edifícios. A utilização de aparelhos de ar-condicionado foi indicada como predominante por mais de 50% dos respondentes em laboratórios de pesquisa & informática, seguido pelos gabinetes de professores & salas administrativas e os laboratórios de equipamentos densos; que são ambientes de caráter mais restrito. Sabe-se que, assim como o projeto arquitetônico, o tipo de condicionamento de ar utilizado nos ambientes tem forte influência tanto no consumo de energia elétrica quanto no conforto térmico dos usuários (KHOSHBAKHT, GOU; DUPRE, 2018 e COSTA; FREIRE; KIPERSTOK, 2019). Assim, em seguida serão apresentados os resultados a respeito da experiência térmica dos usuários. Na Tabela 13 são apresentados os resultados de VST (variando de +3 a -3 para calor e frio respectivamente) e PPD (variando de 0 a 100%) médios calculados com base nos votos dos usuários de Unidades Acadêmicas da UFMG, por ambiente, separados entre verão e inverno.

Tabela 13 - Votos de Sensação Térmica (VST) e Percentual de Pessoas Desconfortáveis (PPD) médios calculados com base nos votos, dos usuários de Unidades Acadêmicas da UFMG, por ambiente

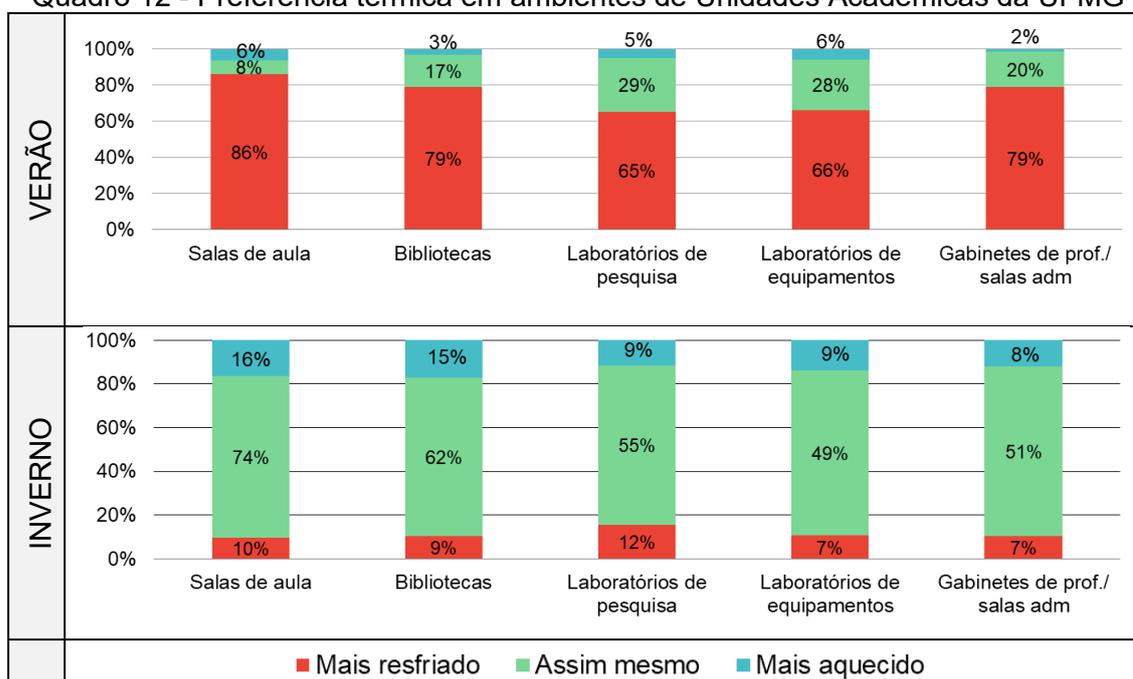
			Salas de aula	Bibliotecas	Laboratórios de pesquisa e informática	Laboratórios de equipamentos densos	Gabinetes de prof. / salas administrativas
UFMG	Verão	VST	2,4	1,7	1,4	1,3	1,5
		PPD	90,1	62,3	46,6	40,7	48,3
	Inverno	VST	-0,6	-0,5	-0,5	-0,5	-0,4
		PPD	11,6	10,6	9,5	10,9	8,0

*Em azul: valores de VST indicativos de desconforto por frio; Em vermelho: valores de VST indicativos de desconforto por calor; Em verde: valores de VST indicativos de neutralidade térmica.

Observando a Tabela 13 e considerando os limites indicados pela literatura para o conforto térmico, VSTs entre -0,5 e +0,5 (ASHRAE, 2013), nota-se que, no verão, há valores indicativos de forte desconforto térmico por calor em todos os ambientes da UFMG, sendo as Salas de aula os ambientes com situação mais crítica, seguidos pelas Bibliotecas, Gabinetes e, por fim, Laboratórios. O desconforto térmico por calor no nas Salas de aula no verão atingiu o máximo percentual de 90% de pessoas

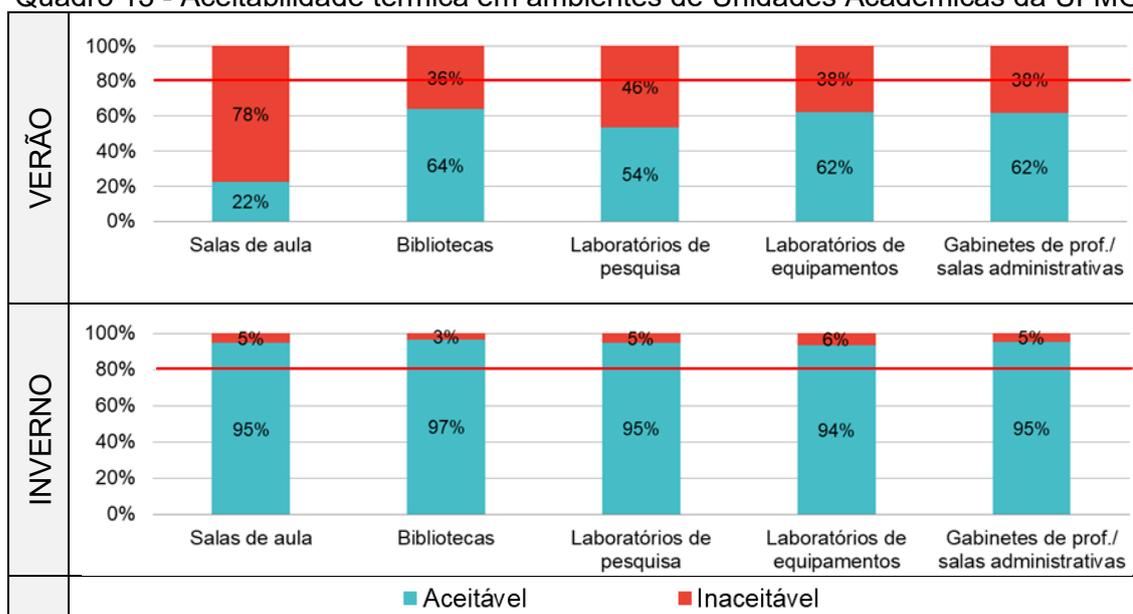
insatisfeitas, quando o recomendável pela literatura seria no máximo 10% (ASHRAE, 2013). No inverno, as respostas dos usuários indicaram leve desconforto por frio nas Salas de aula e valores indicativos de neutralidade térmica nos demais ambientes. Os valores de PPD para o período do inverno se aproximaram do limite indicado pela literatura em todos os ambientes. O Quadro 12 apresenta os resultados em relação à preferência térmica indicada pelos usuários para os períodos de verão e inverno, por tipo de ambiente.

Quadro 12 - Preferência térmica em ambientes de Unidades Acadêmicas da UFMG



Os usuários da UFMG indicaram preferir, em sua maioria, que todos os ambientes fossem mais resfriados durante o verão, com destaque para os ambientes de Salas de aula, Bibliotecas e Gabinetes de professores e salas administrativas. No inverno, a maioria dos usuários apontaram preferência pela manutenção das condições térmicas em todos os ambientes. O Quadro 13 apresenta os resultados referentes à aceitabilidade térmica, no verão e inverno, indicada pelos respondentes.

Quadro 13 - Aceitabilidade térmica em ambientes de Unidades Acadêmicas da UFMG



Já em relação à aceitabilidade térmica, observou-se, na UFMG, que nenhum ambiente alcançou o nível mínimo de 80% de aceitabilidade (ASHRAE, 2013) durante o verão. Pelo contrário, nas Salas de aula, aproximadamente 80% dos usuários responderam que a ambiente térmico é inaceitável neste período. Nos outros ambientes, os percentuais de inaceitabilidade variaram entre 36% e 46%. No inverno, todos os ambientes ultrapassaram o nível mínimo sugerido pela literatura, chegando a 90% de aceitabilidade térmica.

A Partir das respostas obtidas pelos usuários a respeito da experiência térmica em diferentes ambientes das Unidades Acadêmicas da UFMG, foi possível observar que as respostas acerca da sensação, preferência e aceitabilidade térmicas variaram de acordo com os tipos de usos dos espaços. Espaços onde apontou-se maior presença de aparelhos de ar-condicionado foram aqueles que obtiveram melhores respostas sobre a experiência térmica: laboratórios e gabinetes de professores e salas administrativas. De modo contrário, espaços nos quais apontou-se predominância de ventilação natural apresentaram predominância de respostas referentes ao desconforto por calor, principalmente nas salas de aula.

A partir das respostas do questionário, decidiu-se trabalhar com as Salas de aula, pois elas são ambientes de central importância para o uso-fim da Universidade, sendo os ambientes mais utilizados pelos estudantes e que apresentaram situações de experiência térmica mais críticas. Considerando as respostas do questionário

apresentadas e o fato de que não há perspectivas para a instalação de aparelhos de ar-condicionado nestes ambientes devido aos frequentes cortes orçamentários, considerou-se pertinente estudar o conforto térmico nas salas de aula para a realização do *benchmarking* integrado com o consumo de energia na presente tese. Neste caso, também com base no questionário, decidiu-se que o *benchmarking* para as salas de aula deveria focar no uso da ventilação natural.

4.2. Contextualização do estudo de caso em relação ao cenário nacional

Como resultado da análise exploratória em amostra aleatória de prédios universitários dos campi brasileiros, a Figura 60 mostra imagens de prédios de diferentes universidades públicas do país, enquanto a Figura 61 mostra imagens de edificações da UFMG em Belo Horizonte.

Figura 60 - Imagens de edifícios de universidades públicas do Brasil



(a) Prédio de Ciências Sociais Aplicadas – UFPR



(b) *Campus* Tancredo Neves – UFSJ.



(c) *Campus* Vitória da Conquista – UFBA.



(d) Instituto de Matemática e Estatística – UFBA.



(e) Centro de aulas Baru – UFG.



(f) Centro de Artes e Comunicação – UFPE

Figura 61 - Imagens de edifícios da UFMG



(a) Instituto de Ciências Exatas.



(b) Faculdade de Farmácia.



(c) Escola de Música.



(d) Escola de Veterinária.



(e) Faculdade de Ciências Econômicas.



(f) Faculdade de Odontologia.

A partir de uma análise visual das Figura 60 e 61, observa-se que os edifícios das universidades públicas brasileiras seguem certo padrão de volumetria horizontalizada (proporcionalmente poucos andares e grande área de projeção da cobertura). Percebe-se que muitos deles apresentam elementos de proteção solar em suas fachadas, sendo de diferentes tipos: brises verticais, horizontais ou mistos. Também se nota a presença de cores escuras em algumas fachadas e coberturas, mesmo em cidades de climas quentes. Nota-se ainda a presença de sistemas de condicionamento de ar em parte das fachadas dos edifícios (Figura 60f).

O Gráfico 7 mostra os resultados do levantamento de número de pavimentos da amostra e a Tabela 14 mostra as estatísticas descritivas da quantidade de pavimentos levantados. Percebe-se, com o Gráfico 7, que a característica mais comum das edificações de universidades públicas brasileiras, no que se refere ao número de pavimentos, é a existência de prédios baixos. Este comportamento ocorre tanto no cenário nacional como na UFMG. O Gráfico 8 mostra os tipos de condicionamento de ar identificados a partir da análise visual no Google Earth®.

Gráfico 7 - Números de pavimentos das Unidades Acadêmicas de universidades públicas brasileiras

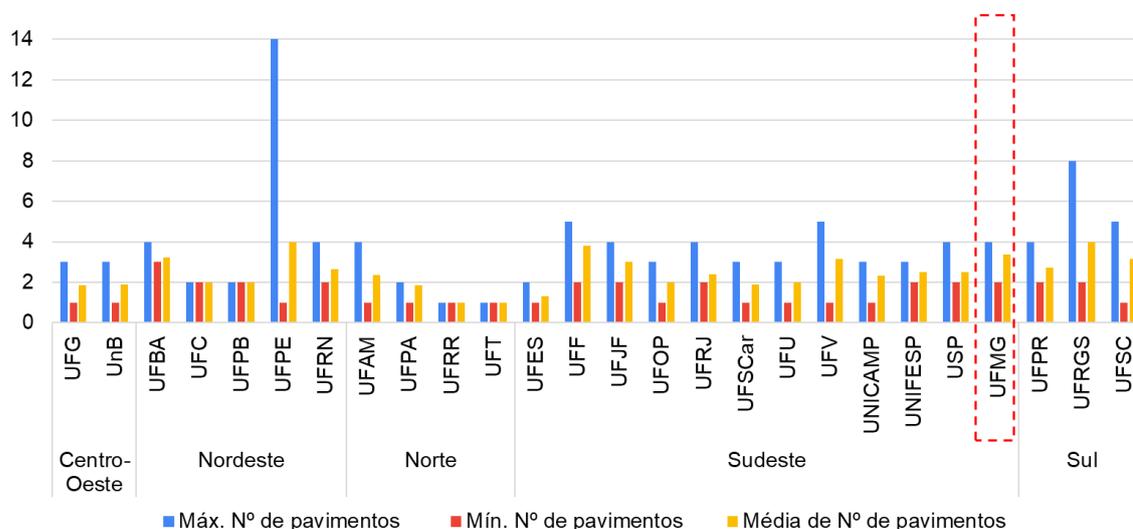
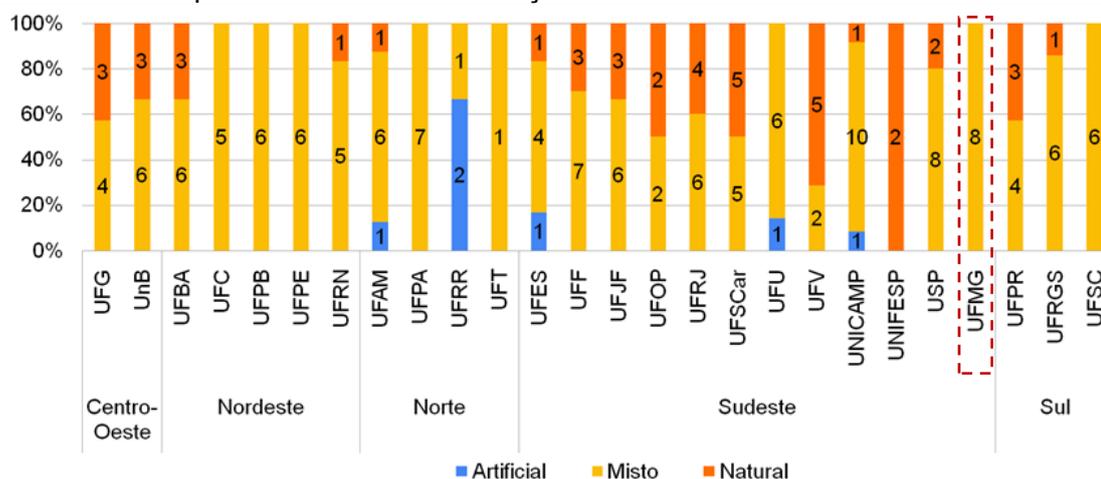


Tabela 14 - Número de pavimentos dos edifícios da amostra

	Máximo	Mínimo	Média	Mediana	Desvio-padrão	Coef. de variação
Brasil (n=174)	14	1	2,5	2	1,4	0,6
UFMG (n=8)	4	2	3,4	4	0,9	0,3

Gráfico 8 - Tipos de sistema de ventilação dos edifícios de universidades no Brasil



Com a Tabela 14, observa-se que o número de pavimentos dos edifícios teve mais variabilidade no cenário nacional do que na UFMG. No entanto, isto pode ter ocorrido por conta da amostra selecionada. A média e mediana do número de pavimentos da UFMG nesta amostra de prédios estiveram próximas dos valores das outras universidades: entre 2 e 4 pavimentos.

Pode-se observar que o sistema de condicionamento de ar predominante nos edifícios universitários do Brasil é o misto, e que este também é o tipo de sistema encontrado na amostra coletada da UFMG. Ressalta-se que, neste trabalho, a categoria de sistema de ventilação misto foi considerada para prédios nos quais foram identificados aparelhos condensadores de ar individuais nas fachadas ou cobertura.

Com base nesta análise exploratória, foi possível perceber que as edificações da UFMG possuem similaridade com as edificações universitárias de outras áreas do Brasil, tanto em termos volumétricos e de tratamento de fachadas, como na quantidade de pavimentos e no tipo de sistema de ventilação. Estas análises são um indício da representatividade dos edifícios da UFMG como estudo de caso para a tipologia de prédios universitários públicos.

4.3. **Benchmark simples baseado na intensidade de consumo de energia**

A Tabela 15 apresenta a quantidade de edifícios e de unidades consumidoras (UCs) dos *campi* da UFMG em Belo Horizonte, obtidos a partir das etapas de coleta e organização de dados primários. As Unidades Isoladas referem-se aos edifícios que se encontram fora do *Campus* da Pampulha ou do *Campus* Saúde, incluindo aqueles não destinados ao ensino.

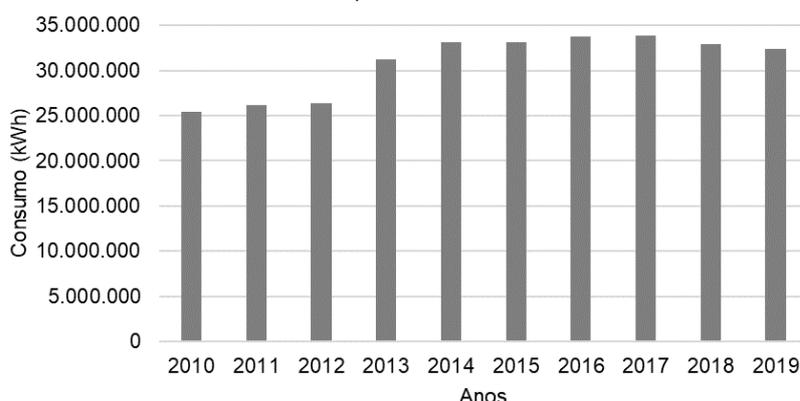
Tabela 15 - Quantidade de edifícios e unidades consumidoras da UFMG em Belo Horizonte

<i>Campus</i>	Quantidade de edifícios	Frequência relativa	Quantidade de UCs*
<i>Campus</i> Pampulha	66	58,9%	56
<i>Campus</i> Saúde	7	6,3%	5
Unidade Isoladas	39	34,8%	10
Total	112	100%	71

*UCs: Unidades Consumidoras.

No período da presente pesquisa, a energia utilizada na UFMG é predominantemente elétrica, com um caso de geração de energia solar fotovoltaica na biblioteca do *campus* Saúde. O Gráfico 9 mostra a evolução de consumo total de energia elétrica da UFMG em Belo Horizonte entre os anos 2010 e 2019. Reitera-se que os dados de 2020 e 2021 não foram considerados por conta da pandemia do COVID-19, que afetou o funcionamento de todos os edifícios.

Gráfico 9 - Evolução de consumo de energia elétrica anual nos *campi* da UFMG em Belo Horizonte, de 2010 a 2019.



O Gráfico 9 mostra aumento médio de consumo de energia elétrica de 3% ao ano entre 2010 e 2019. Houve aumento considerável entre 2012 e 2013, possivelmente ocasionado pelo programa governamental REUNI (Reestruturação e Expansão das Universidades Federais), a partir do qual houve o aumento do número de vagas e aberturas de cursos noturnos nas unidades acadêmicas; já que, na UFMG, o cronograma para realização das expansões viabilizadas pelo REUNI foi de 2008 a 2012. Entre 2013 e 2019, o aumento de consumo de energia elétrica foi de, em média, 1% ao ano; possivelmente influenciado pela desaceleração econômica do país entre 2015 e 2016, além de restrições orçamentárias governamentais que ocorrem até os dias atuais. Em 2018 e 2019, observou-se redução do consumo médio de 2%.

A partir da análise de relatórios cedidos à pesquisa pela Pró-Reitoria de Administração, PRA, observou-se que os custos relacionados ao consumo energético dos *campi* em Belo Horizonte representaram aproximadamente 71% das despesas de operação dos edifícios (considerando energia elétrica, água e esgoto), entre os anos de 2015 e 2018. Isto representou um custo médio de R\$ 18,8 milhões por ano. Tendo em conta a alta representação dos custos com energia elétrica para a operação dos *campi* e os recorrentes arrochos orçamentários (BRASIL, 2019) reforça-se a pertinência de estudos relacionados ao entendimento e melhoria acerca da eficiência energética das edificações universitárias. Os Gráficos 10 e 11 mostram o EUI (kWh/m²/ano) dos *campi* considerando o período de 2015 a 2019.

Gráfico 10 - Frequência de ocorrência de EUI médio (kWh/m²/ano) da amostra de edifícios da UFMG em Belo Horizonte (série temporal de 2015 a 2019)

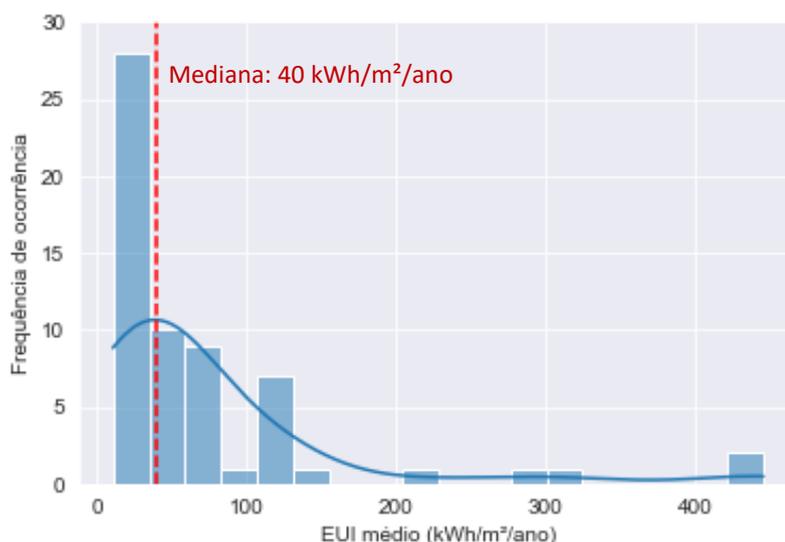
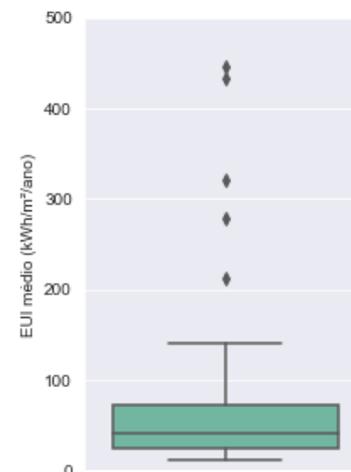
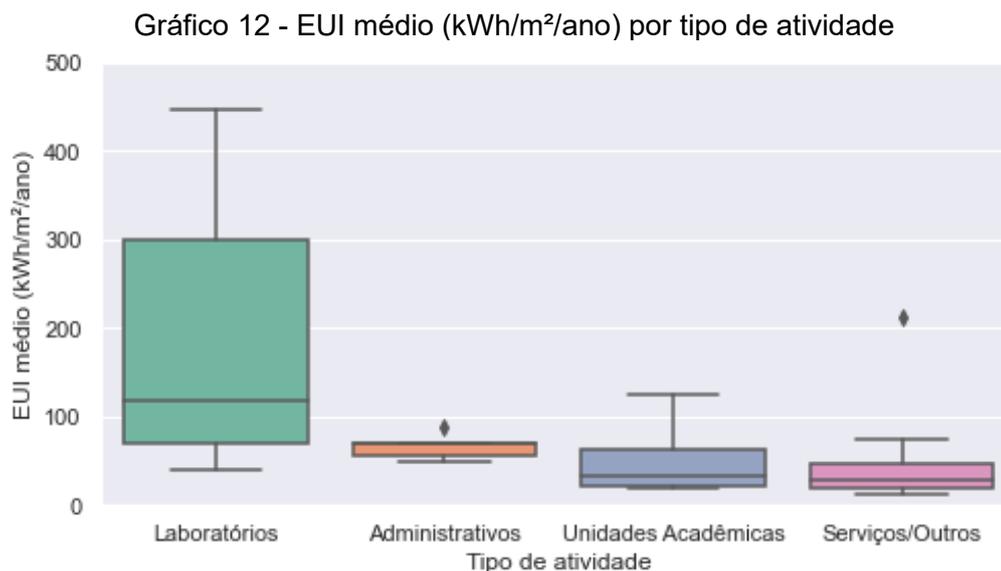


Gráfico 11 - EUI médio (kWh/m²/ano) *campi* UFMG em Belo Horizonte (série temporal de 2015 a 2019)



O maior EUI observado foi de 445 kWh/m²/ano (referente a um Laboratório) e o menor de 1,32 kWh/m²/ano (referente à Biblioteca do *campus* Saúde, onde houve instalação de sistema de geração de energia fotovoltaica) Esta edificação foi, portanto, retirada das análises posteriores. Também foi retirada da amostra o edifício da Praça de Serviços, pois o mesmo contém maior parte de sua área com lojas que cujas contas não são pagas pela UFMG. Assim, a média de EUI do conjunto de 61 prédios foi de 74 kWh/m²/ano e a mediana **40 kWh/m²/ano**. Como visto na literatura, o EUI mediano pode ser considerado como *benchmark* de consumo dos *campi* como um todo. No entanto, percebe-se que a distribuição de frequências de EUI médio é assimétrica com cauda à direita – existe maior concentração de prédios com EUI menores do que 100 kWh/m²/ano. Conforme comentado anteriormente, a Universidade comporta diversos tipos de atividades que apresentam diferentes intensidades do uso de energia. Por isso, o EUI dos edifícios analisados foi agrupado de acordo com as atividades exercidas nos mesmos (Gráfico 12).



A partir do Gráfico 12, pode-se observar, em relação à variabilidade de EUI, que a tipologia com maior uniformidade é a dos prédios Administrativos. Nota-se, como esperado, que a tipologia de Laboratórios possui a maior variabilidade e maiores EUI devido à existência de equipamentos de elevada carga elétrica nestes espaços. A variabilidade indica que existem diferentes tipos de laboratórios nos quais são exercidas atividades com diferentes demandas energéticas. De forma complementar, a Tabela 16 apresenta os valores totais de área construída e de consumo de energia elétrica anual médio de cada tipologia estabelecida. Os valores de EUI estabelecidos na Tabela 16 também podem ser considerados como *benchmarks* simples por tipo de uso, assim como observado na literatura.

Tabela 16 - Área construída total e consumo anual total de energia elétrica das edificações da UFMG em Belo Horizonte

Tipos	Qt.	Área Construída (m ²)	Prop. em relação à área total (%)	Consumo anual total médio (kWh/ano)	Prop. em relação ao consumo total (%)	EUI (kWh/m ² /ano) mediano (<i>benchmarks</i>)
Unidades Acadêmicas	27	398.740	75%	24.388.979	73%	33
Laboratórios	11	21.072	4%	3.243.586	10%	119
Administrativos	5	29.512	6%	2.070.012	6%	68
Serviços/Outros	67	85.334	16%	3.484.236	10%	28
Total	110	534.659	100%	33.186.813	100%	40

Percebe-se que, em relação ao EUI (kWh/m²/ano), os Laboratórios consomem, em média, de 2 a 5 vezes mais do que as demais tipologias (aproximadamente 4 vezes mais do que as Unidades Acadêmicas). No entanto, representam apenas 4% da área

total construída e 10% do consumo energético dos prédios analisados. Já as Unidades Acadêmicas apresentam 75% da área construída e 73% do consumo anual de energia elétrica. Tendo em vista a significativa influência das Unidades Acadêmicas no consumo geral de energia elétrica da UFMG, e, portanto, também no custo de operação, a presente tese estabeleceu as Unidades Acadêmicas como recorte do estudo de caso para os estudos posteriores.

4.4. Descrição da base de dados quanto ao EUI das Unidades Acadêmicas

Esta seção apresenta as descrições estatísticas dessa base de dados relativas às Unidades Acadêmicas em Belo Horizonte (UABH) analisadas. O Gráfico 13 mostra a área construída (a), a idade das edificações (b), o número de pavimentos (c) e as horas de funcionamento dos prédios (d). Trata-se de prédios da ordem de até 40 mil m², com idade mediana de aproximadamente 40 anos. Há na amostra apenas quatro prédios construídos após 2010. Nota-se que são edifícios majoritariamente horizontais, com mediana de 4 pavimentos, cujo funcionamento varia 10 a 17 horas, sendo a mediana 15h (equivalente aos turnos da manhã, tarde e noite). O conjunto de prédios apresentou média de 2 elevadores e 40% da amostra possui ao menos um ambiente para processamento de dados 24h (CPD24h).

O Gráfico 14 mostra os Percentuais de Abertura das Fachadas (PAF) médios. Observa-se que existe distribuição similar entre as aberturas das diferentes orientações de fachadas. Apesar de diferenças pouco expressivas, a fachada Oeste apresenta PAF inferior em relação às outras. A fachada com maior percentual médio de PAF foi a fachada Sul.

O Gráfico 15 mostra as características médias das envoltórias, considerando transmitância térmica e absorvância solar. Observa-se, em relação absorvância solar, que o campus possui predominância de cores claras principalmente para as paredes. Já as coberturas, apresentam cores mais escuras, com absorvância médias de 0,7 no percentil 75%. Já em relação à transmitância térmica, nota-se predominância de paredes da ordem de 2 a 3 W/m²K e coberturas mais isoladas, da ordem de 1 a 2 W/m²K.

Gráfico 13 – Dados das UABH: (a) área construída total; (b) Idade; (c) número de pavimentos e (d) horários de funcionamento

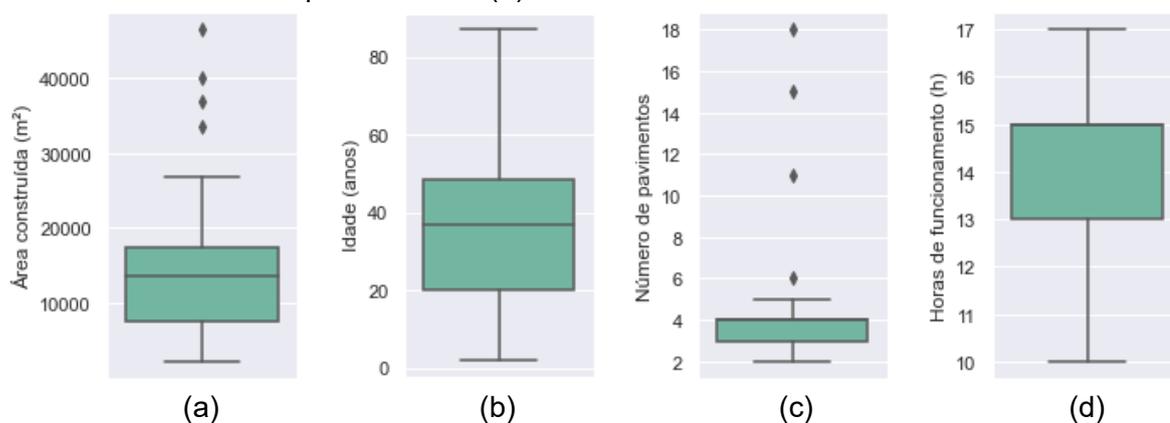


Gráfico 14 - Percentuais de Abertura das Fachadas (PAF) médios das UABH: (a) Norte, (b) Leste, (c) Sul e (d) Oeste

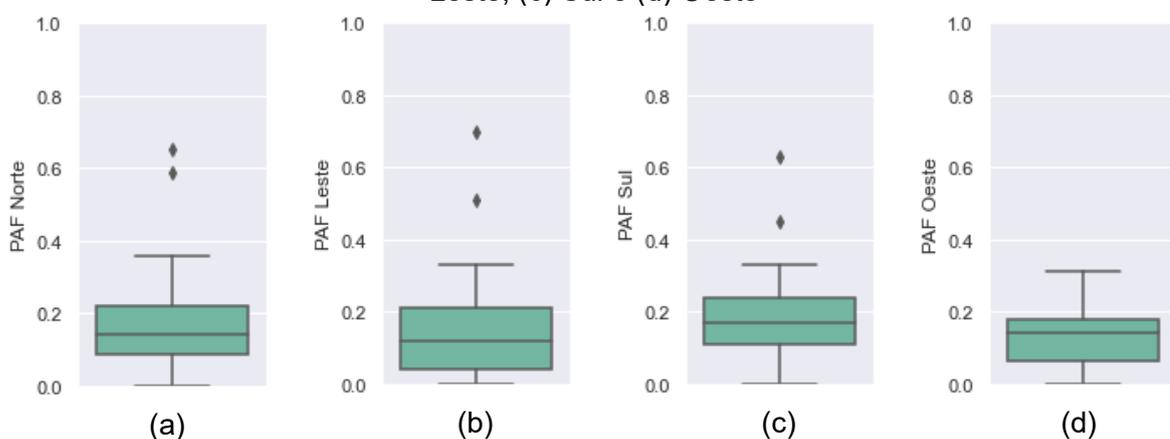
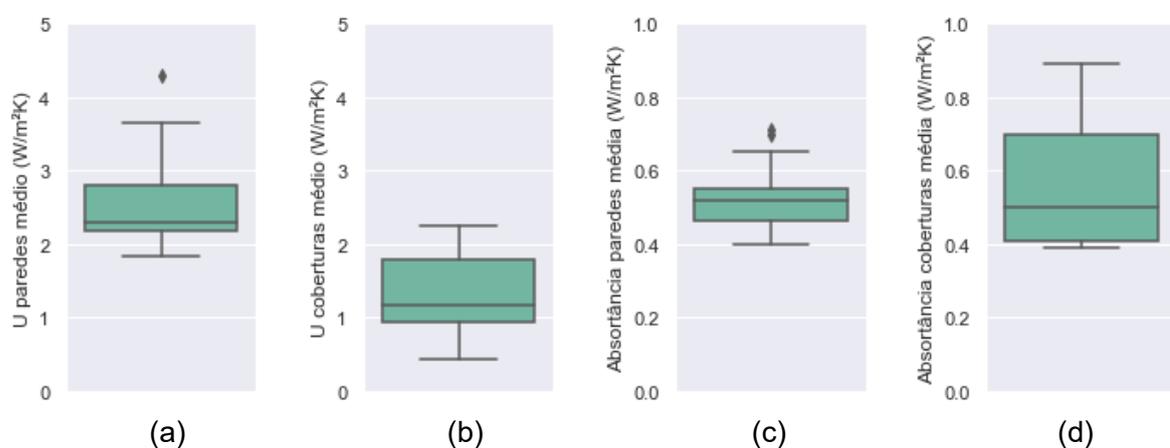


Gráfico 15 - Características médias das envoltórias das UABH: (a) U paredes; (b) U coberturas; (c) α paredes; (d) α coberturas;



Como visto anteriormente, edifícios acadêmicos comportam diferentes tipos de atividades em seus espaços. Os Gráficos 16 a 18 apresentam o EUI médio das Unidades Acadêmicas em Belo Horizonte (UABH) da UFMG, a setorização por tipo

de uso de cada edifício e o percentual de área condicionada artificialmente, respectivamente.

Gráfico 16 – EUI médio das UABH

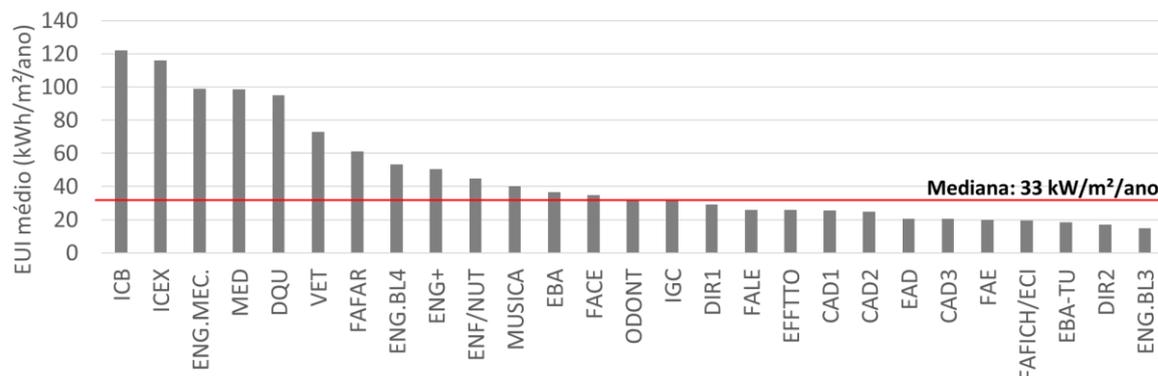


Gráfico 17 - Setorização de áreas por tipos de uso das UABH

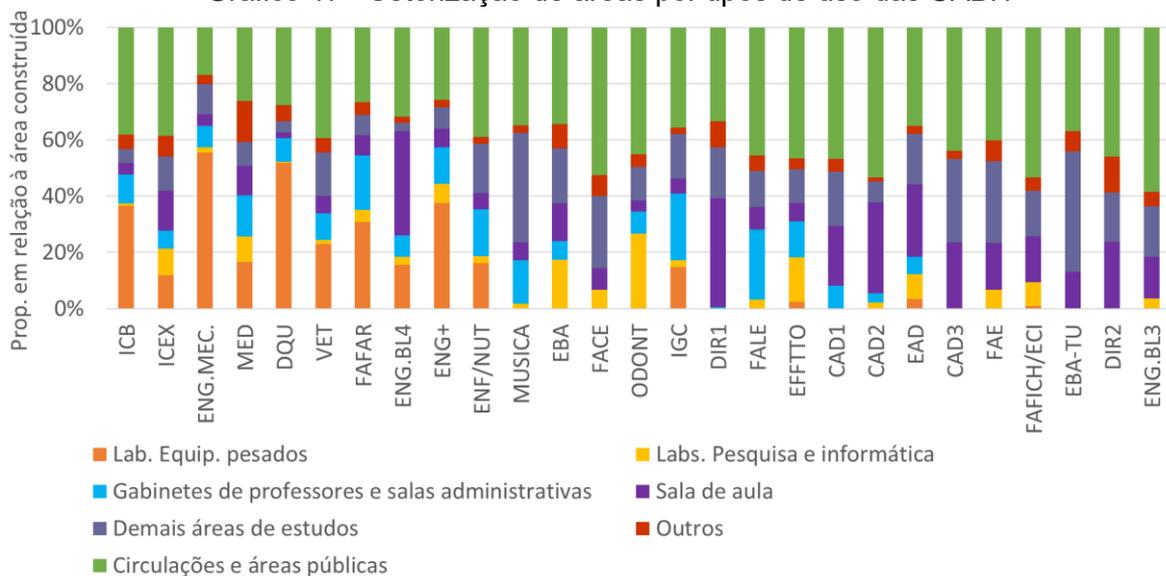
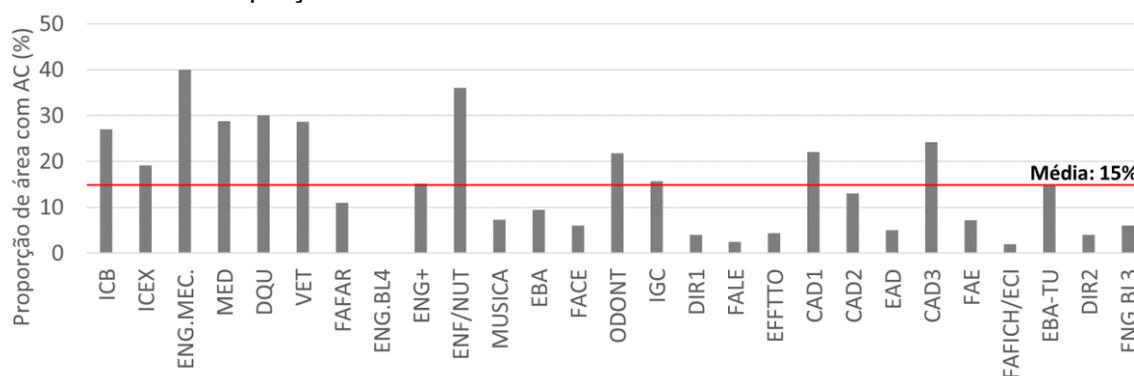


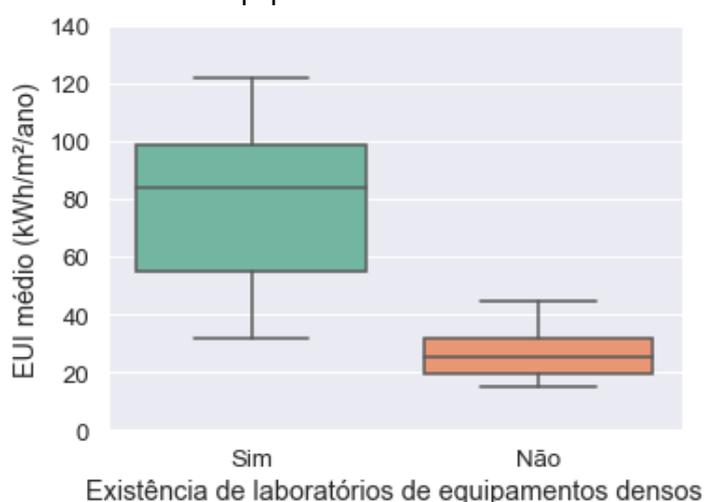
Gráfico 18 - Proporção de área construída condicionada artificialmente das UABH



Observa-se que os edifícios com maiores EUI são aqueles que possuem mais áreas de laboratórios e maior proporção de área condicionada, conforme o esperado. Em média, as UABH apresentam 15% de área condicionada. Estas duas constatações reforçam o entendimento dos resultados do questionário de que as salas de aula são ambiente raramente condicionados de forma artificial na instituição. Os casos em que há baixo EUI e proporção de área condicionada maior do que a média se referem a prédios com auditórios. Logo, seu baixo EUI pode ser ocasionado pelo uso eventual dos auditórios.

As UAs com EUI mais baixo também são aquelas que apresentam maiores proporções de salas de aula e outras áreas de estudos, como bibliotecas. Nas UABH, o maior setor refere-se às áreas de circulação e áreas comuns, representando uma proporção média de 38% da área construída de cada prédio. Em média, os prédios apresentam proporção de 14% de salas de aula, 16% de outras áreas de estudos, 12% de laboratórios de equipamentos densos, 5% de laboratórios de pesquisa e informática, 11% de gabinetes e salas administrativas, e 5% de outros. O Gráfico 19 mostra a distribuição dos EUI médios considerando a presença de laboratórios de equipamentos densos. Para a separação dos dados entre os dois grupos, considerou-se uma proporção mínima de 5% para identificar que uma UA possuía este tipo de espaço.

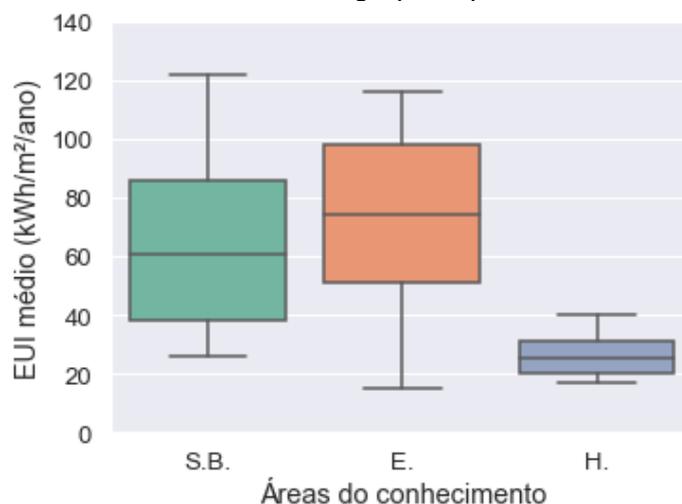
Gráfico 19 – EUI médio das UABH agrupado pela existência de Laboratórios de equipamentos densos



O Gráfico 20 mostra a distribuição dos EUI médios considerando a área do conhecimento, onde “S.B.” refere-se às Ciências da Saúde, Biológicas e Agrárias, “E.”

refere-se às Ciências Exatas e da Terra e Engenharias, e “H.” refere-se às Ciências Humanas, Sociais Aplicadas e Linguística, Letras e Artes.

Gráfico 20 - EUI médio das UABH agrupado por áreas do conhecimento



Confirma-se que, assim como visto em relação às atividades dos prédios como um todo, os EUI das UABH possuem influência em relação à área de laboratórios existentes. Com o Gráfico 20, percebe-se que, assim como o esperado, há relação entre as áreas do conhecimento e o EUI, nas quais os prédios das áreas de Saúde e Exatas consomem, em mediana, aproximadamente duas vezes mais do que os prédios da área de Humanas.

4.5. Construção da base de dados de conforto térmico das salas de aula

A seguir são apresentados os resultados para a determinação dos coeficientes de pressão das fachadas, as simulações, análise de sensibilidade e construção dos modelos de referência das salas de aula.

4.5.1. Coeficientes de pressão das fachadas

A partir do experimento de simulações em CFD com a representação de diferentes tipos de fachadas de acordo com os procedimentos descritos no item 3.4.4.1, foram obtidos os seguintes Cps (Tabela 17). As localizações das janelas referem-se aos posicionamentos, conforme mostrado anteriormente na Figura 39.

Tabela 17 - Cps das janelas calculados a partir das simulações com CFD

Localização da janela	Ângulos de direção do vento							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
FRENTE_TÉRREO_SEM BRISE	0,71	0,18	-0,10	-0,10	-0,17	-0,24	-0,39	0,28
FRENTE_1PAV_SEM BRISE	0,74	0,19	-0,10	-0,13	-0,17	-0,28	-0,42	0,29
FRENTE_2PAV_SEM BRISE	0,75	0,19	-0,11	-0,15	-0,17	-0,30	-0,43	0,31
FRENTE_COB_SEM BRISE	0,58	0,07	-0,13	-0,12	-0,17	-0,28	-0,41	0,21
FRENTE_TÉRREO_COM BRISE	0,68	0,27	-0,39	-0,25	-0,15	-0,08	-0,13	0,16
FRENTE_1PAV_COM BRISE	0,72	0,30	-0,41	-0,27	-0,15	-0,09	-0,13	0,18
FRENTE_2PAV_COM BRISE	0,76	0,33	-0,43	-0,28	-0,15	-0,12	-0,13	0,19
FRENTE_COB_COM BRISE	0,69	0,30	-0,44	-0,30	-0,16	-0,11	-0,13	0,15
PATIO_TÉRREO_SEM BRISE	-0,17	-0,05	-0,13	-0,25	-0,35	-0,22	-0,33	-0,26
PATIO_1PAV_SEM BRISE	-0,21	-0,10	-0,14	-0,25	-0,35	-0,24	-0,36	-0,26
PATIO_2PAV_SEM BRISE	-0,22	-0,10	-0,15	-0,25	-0,35	-0,24	-0,38	-0,26
PATIO_COB_SEM BRISE	-0,17	-0,03	-0,15	-0,26	-0,36	-0,24	-0,38	-0,26
PATIO_TÉRREO_COM BRISE	-0,20	-0,22	-0,27	-0,41	-0,23	-0,15	-0,10	-0,10
PATIO_1PAV_COM BRISE	-0,22	-0,23	-0,29	-0,42	-0,23	-0,15	-0,10	-0,14
PATIO_2PAV_COM BRISE	-0,24	-0,24	-0,29	-0,41	-0,24	-0,15	-0,10	-0,14
PATIO_COB_COM BRISE	-0,18	-0,23	-0,29	-0,42	-0,24	-0,15	-0,11	-0,13
CORREDOR_TÉRREO_SEM BRISE	-0,29	-0,27	-0,16	-0,18	-0,15	-0,15	-0,33	-0,25
CORREDOR_1PAV_SEM BRISE	-0,30	-0,30	-0,18	-0,20	-0,16	-0,20	-0,34	-0,32
CORREDOR_2PAV_SEM BRISE	-0,30	-0,33	-0,17	-0,19	-0,17	-0,23	-0,33	-0,36
CORREDOR_COB_SEM BRISE	-0,24	-0,28	-0,17	-0,19	-0,15	-0,24	-0,33	-0,29
CORREDOR_TÉRREO_COM BRISE	-0,24	-0,25	-0,28	-0,31	-0,15	-0,10	-0,15	-0,26
CORREDOR_1PAV_COM BRISE	-0,27	-0,32	-0,29	-0,30	-0,17	-0,10	-0,16	-0,27
CORREDOR_2PAV_COM BRISE	-0,27	-0,39	-0,30	-0,31	-0,19	-0,10	-0,16	-0,28
CORREDOR_COB_COM BRISE	-0,23	-0,40	-0,30	-0,32	-0,18	-0,10	-0,14	-0,28

Conforme citado no Capítulo 3, os Cps utilizados para as simulações referiram-se ao tipo de fachada com salas diretamente voltadas ao lado externo.

4.5.2. Simulações preliminares - comparação com dados medidos

Os Gráfico 21 e Gráfico 22 mostram os resultados das simulações preliminares e a comparação com os dados medidos (simulações nas quais foram considerados os Cps calculados na etapa anterior). A Tabela 18 mostra os índices NMBE e CvRMSE alcançados assim como os valores limites conforme a ASHRAE Guideline 14 (ASHRAE, 2002).

Gráfico 21 – Sala 410B: Temperatura média do ar (°C) medidos e simulados

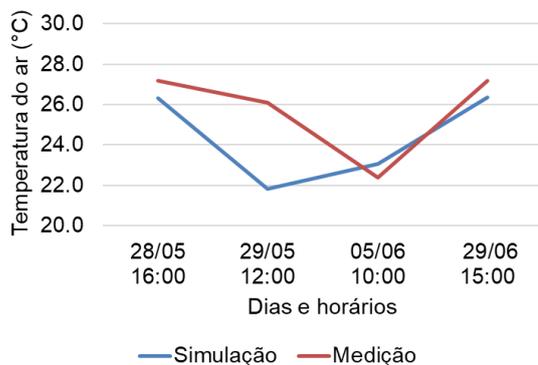


Gráfico 22 - Sala 315: Temperatura média do ar (°C) medidos e simulados

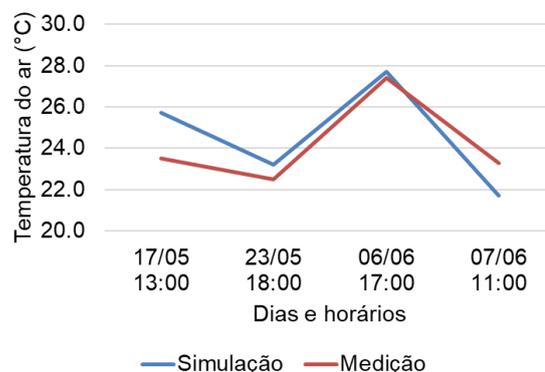


Tabela 18 – Estatísticas de validação dos modelos simulados frente aos dados medidos

Sala	NMBE (%)	CvRMSE (%)
Sala 410 B	-5,19	8,72
Sala 315	1,71	5,52
Limite ASHRAE Guideline 14 (ASHRAE 2002)	10	30

Observa-se que as simulações para ambas as salas atingiram estatísticas de validação conforme os intervalos recomendados pela diretriz da ASHRAE *Guideline* 14 (ASHRAE, 2002). No caso da Sala 410B, sem ventilação cruzada, a maior diferença de temperatura média do ar observada foi de subestimação de 4 °C da simulação em relação ao dado medido, e a menor diferença deu-se com a superestimação em 0,7 °C. Já no caso da Sala 315, modelo com ventilação cruzada, a maior diferença observada foi a de superestimação de aproximadamente 2 °C do modelo simulado em relação ao dado medido, e a menor deu-se com a superestimação em 0,3 °C.

A partir dos resultados obtidos com as simulações e a comparação com os dados medidos por Souza (2019) e Bitarães (2019), considerou-se que os parâmetros utilizados para a simulação, como os coeficientes de pressão calculados, o arquivo climático, as rotinas de uso, dentre outras configurações fixas no *software* EnergyPlus estavam suficientemente adequadas para a realização dos demais estudos de simulação computacional para as salas de aula.

4.5.1. Análise de sensibilidade local

Os Gráficos 23 e 24 mostram os resultados referentes ao PHOC com a modificação individual de variáveis.

Gráfico 23 - Resultados de PHOC a partir da modificação individual de variáveis

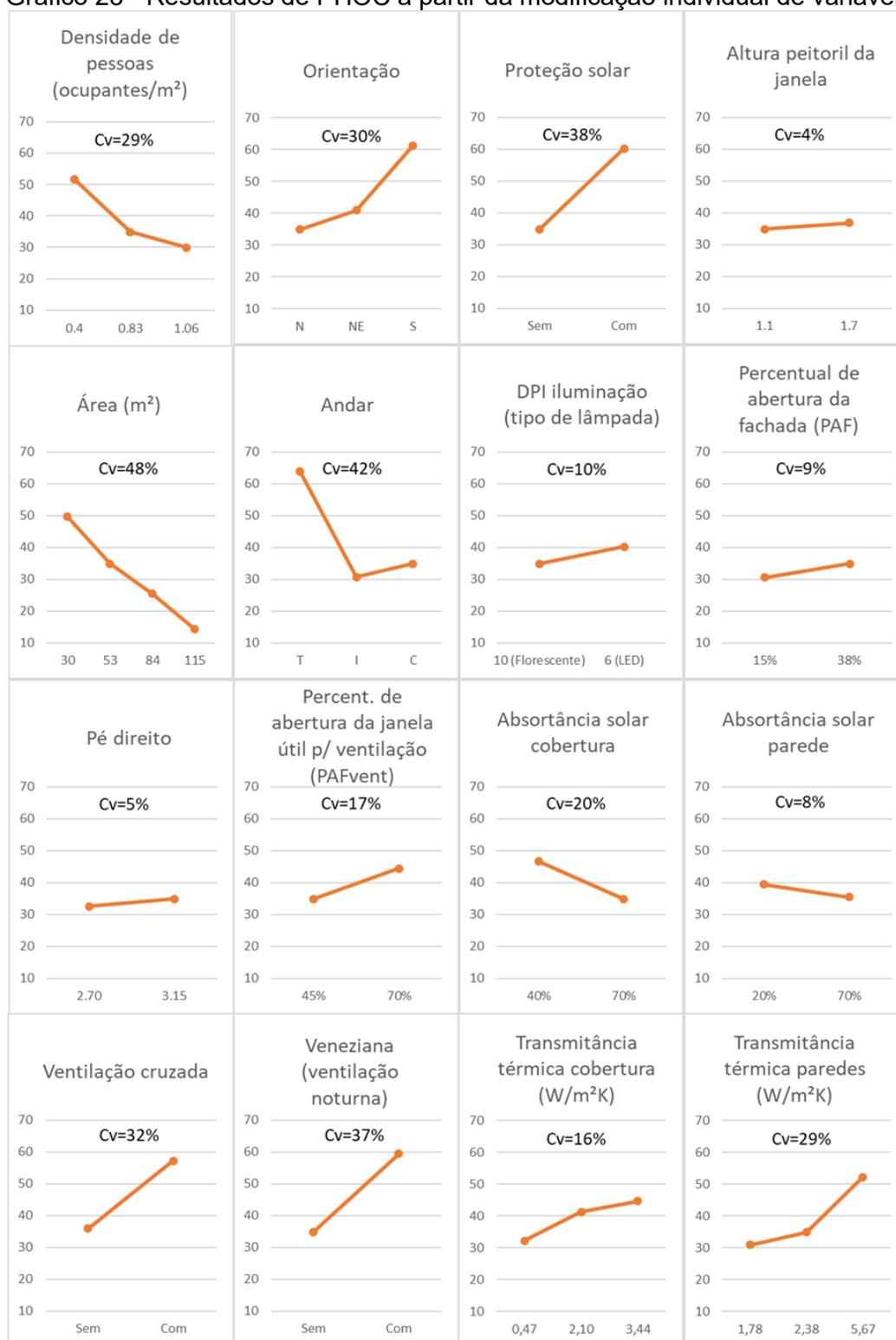
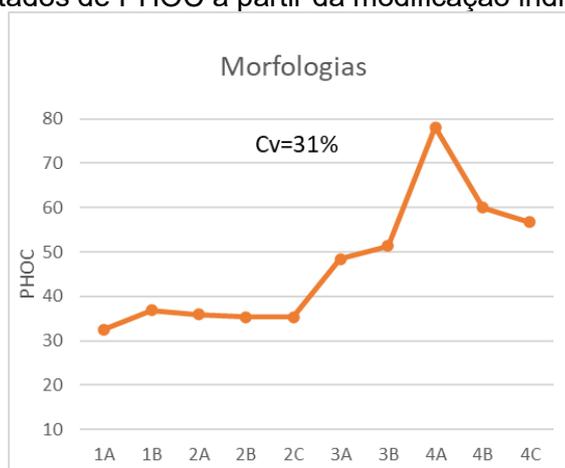


Gráfico 24 - Resultados de PHOC a partir da modificação individual da morfologia



Foi identificado aumento de horas de conforto com o aumento da transmissividade de paredes e coberturas. Acredita-se que tal fenômeno ocorra devido à alta densidade de ocupação das salas de aula ($0,83$ pessoas/m²) o que aumenta a carga térmica a ser dissipada. Nesse sentido, envoltórias com maiores transmissividade auxiliariam na perda de calor armazenado internamente. O mesmo fenômeno foi observado por Goulart e Labaki (2020) em estudo sobre o efeito da transmissividade térmica de elementos opacos em sala de aula com alta densidade de ocupação naturalmente ventilada e localizada em Campinas (ZB 3, assim como Belo Horizonte). O artigo sugere que as normativas brasileiras também indiquem valores limites mínimos de transmitância térmica a depender do tipo de uso e de ventilação do edifício, visto que no caso de ambientes com alta ocupação ventilados naturalmente, envoltórias isoladas podem exercer o efeito contrário ao desejado, contribuindo para o aumento da carga térmica acumulada no ambiente. A ventilação noturna é sugerida como estratégia para redução do desconforto térmico por calor (GOULART; LABAKI, 2020).

O mesmo fenômeno foi identificado na presente pesquisa nas simulações com variação do andar, onde o andar intermediário alcançou menor nível de PHOC do que a cobertura. Entende-se que a superfície da cobertura favoreceu a dissipação de calor do ambiente interno.

É possível observar no Gráfico 23 que as variáveis de altura do peitoril da janela e pé direito foram aquelas com menores coeficientes de variação (4 e 5%, respectivamente). Tal fato não significa que as variáveis não são válidas para a análise do conforto térmico, mas pode estar relacionado à limitação do módulo *Air Flow*

Network do software EnergyPlus em relação à consideração da circulação vertical de ar dentro de uma zona térmica (ENERGYPLUS, 2018). Por este motivo, as duas variáveis citadas não foram consideradas nos estudos paramétricos desenvolvidos neste trabalho. Todas as demais variáveis foram consideradas para os estudos paramétricos.

4.5.3. Modelos de referência das salas de aula

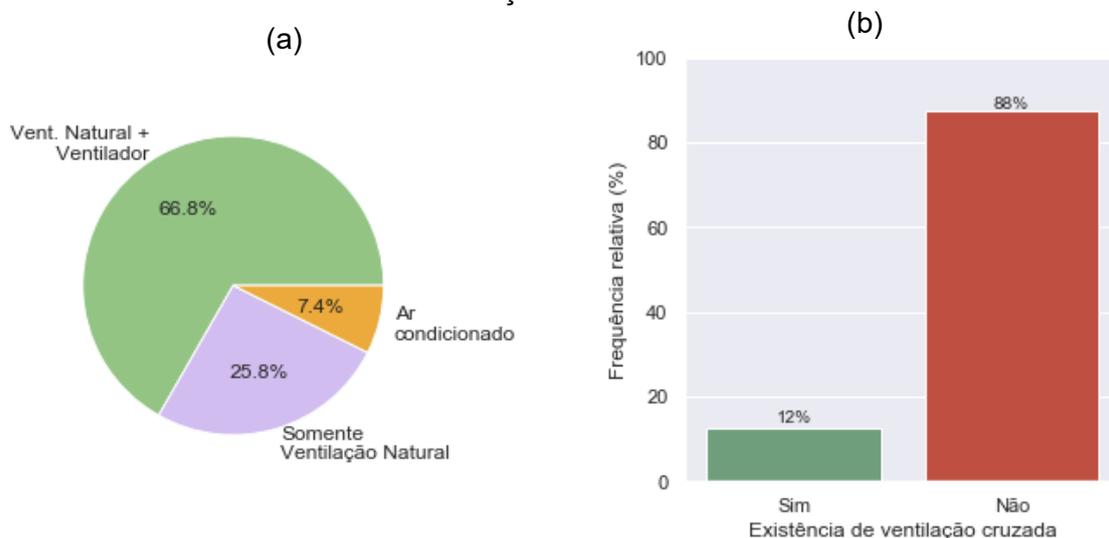
Este item descreve os resultados dos passos metodológicos realizados para a elaboração dos modelos de referência das salas de aula, descrevendo as principais características destes espaços e a definição dos arquétipos considerados.

4.5.3.1. Descrição das salas de aula dos *campi* da UFMG

A amostra final de salas de aula da UFMG em Belo Horizonte contou com 527 exemplares. Nesta seção são apresentados os resultados principais para descrição desta base de dados, que embasou o desenvolvimento dos arquétipos e o experimento de simulações paramétricas das salas de Aula (SA).

O Gráfico 25(a) mostra que mais de 90% das salas de aula da amostra são condicionadas de modo natural, sendo que aproximadamente 67% possuem ventiladores e quase 26% contam exclusivamente com a ventilação natural. Apesar disto, observa-se que aproximadamente 90% das salas não possuem ventilação cruzada, vide Gráfico 25(b).

Gráfico 25 - (a) Sistema de condicionamento de ar das salas de aula e (b) Presença de ventilação cruzada nas SA



O Gráfico 26 mostra a frequência relativa das morfologias das salas de aula da amostra. Considerando as morfologias para as quais seria possível a adoção da estratégia de ventilação cruzada sem a necessidade de obras complexas ou instalação de equipamentos (tipos 2 a 4), observa-se que 58% das salas de aula poderiam ser beneficiadas por esta estratégia. Já em relação aos tipos de esquadria (Gráfico 27), observa-se que a maior parte das salas de aula UFMG utiliza a janela de correr simples, sendo seguida pela máximo-ar. A utilização de venezianas, que permitem a ventilação permanente, é vista em apenas 7% da amostra. A utilização de janelas de correr com basculantes, que podem permitir a ventilação pelos basculantes superiores mesmo com as folhas de correr fechadas, é vista em 12% da amostra.

Gráfico 26 – Morfologias das SA (%). Em tracejado, as morfologias onde seria possível haver ventilação cruzada

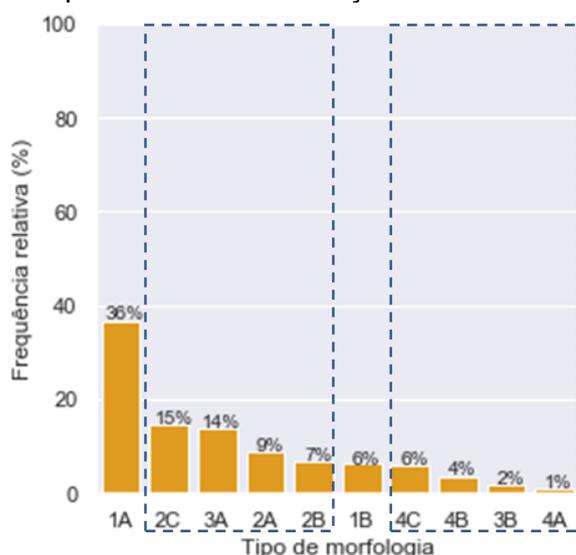
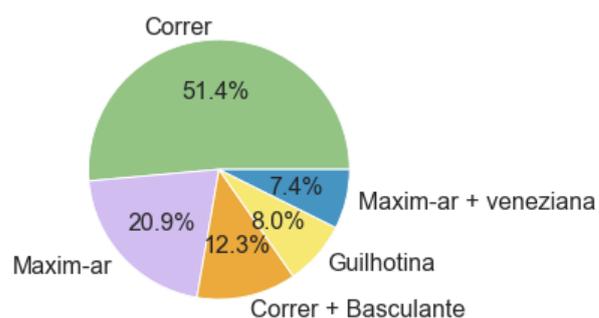
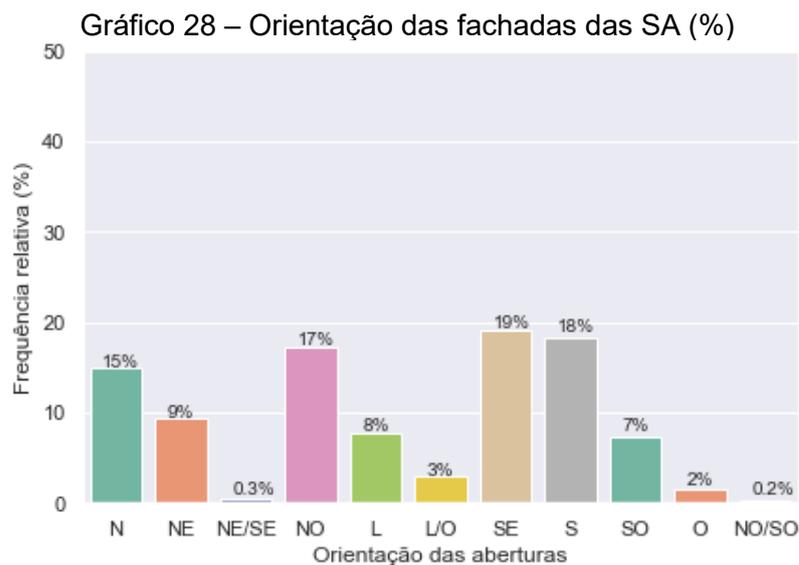


Gráfico 27 – Tipos de janelas das SA (%)



O Gráfico 28 mostra a frequência relativa da orientação das fachadas das salas de aula da amostra. Observa-se predominância das orientações Sudeste, Sul, Noroeste e Norte. A fachada Oeste, está presente em apenas 2% das salas de aula. No entanto, em alguns prédios como o da Escola de Arquitetura este percentual sobe para 45% das salas.



O Gráfico 29 mostra que mais de 70% das salas de aula da amostra possuem brise e que o tipo de brise utilizado é, em 90% dos casos, do tipo horizontal. O Gráfico 30 mostra os ângulos de brises horizontais utilizados de acordo com a orientação da fachada. As medianas (Tabela 19) mostram que, para as fachadas, com exceção da Sul, os ângulos α dos brises variam entre 46° e 64°. Já para a fachada Sul, a mediana é de 29°.

Gráfico 29 – Percentual (a) e tipos de brise (b) encontrados nas SA

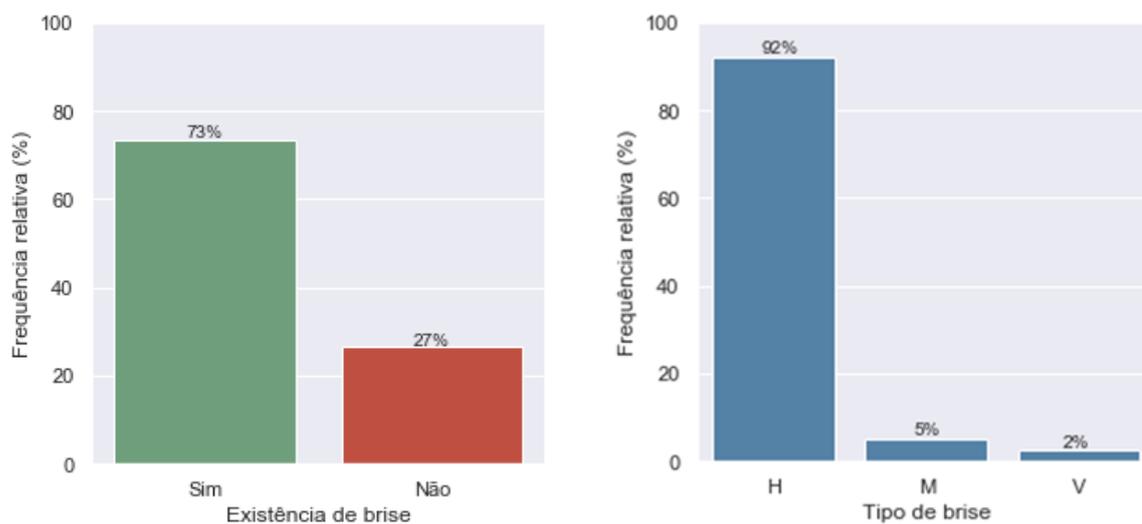


Gráfico 30 - Ângulos dos brises horizontais das SA por orientação de fachada

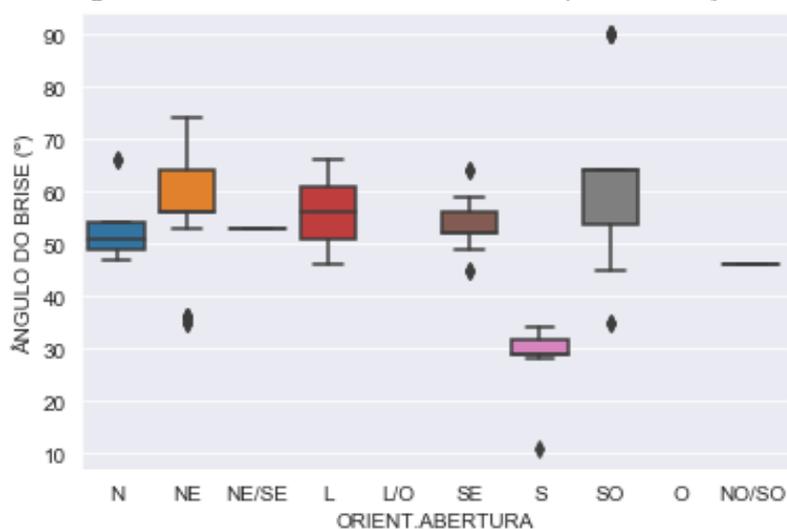


Tabela 19- Ângulos de brises horizontais por fachada - estatísticas descritivas

	L	N	NE	NE/NO	NE/SE	NO	NO/SO	S	SE	SO
N amostra	2	44	41	1	1	56	1	72	54	30
Média	56,00	51,70	56,07	53,00	53,00	63,52	46,00	30,17	53,30	63,50
Desv. Pad.	14,14	4,19	10,71			13,93		3,19	3,88	16,98
Mínimo	46,00	47,00	35,00	53,00	53,00	36,00	46,00	11,00	45,00	35,00
Quart. 25%	51,00	49,00	56,00	53,00	53,00	56,00	46,00	29,00	52,00	53,75
Quart 50%	56,00	51,00	56,00	53,00	53,00	56,00	46,00	29,00	52,00	64,00
Quart 75%	61,00	54,00	64,00	53,00	53,00	68,00	46,00	31,75	56,00	64,00
Máximo	66,00	66,00	74,00	53,00	53,00	90,00	46,00	34,00	64,00	90,00

O Gráfico 31 (a) e (b) mostra a distribuição de absorção solar de paredes e coberturas, indicando presença de coberturas claras e escuras e predominância de paredes claras, com α de aproximadamente 40%. O Gráfico 31 (c) mostra predominância de coberturas com transmitância térmica de aproximadamente 2,0 W/m²K e (d) a predominância de paredes com transmitâncias térmicas entre 1,8 e 3,0 W/m²K.

O Gráfico 32 mostra que 25% das salas de aula estão localizadas nos pavimentos de cobertura, 64% nos pavimentos intermediários e apenas 10% nos pavimentos térreos. Em relação ao PAF (Gráfico 33), observou-se predominância de PAF de 30% e 60%.

Gráfico 31 – Absortância e transmitância térmica de paredes e coberturas das SA

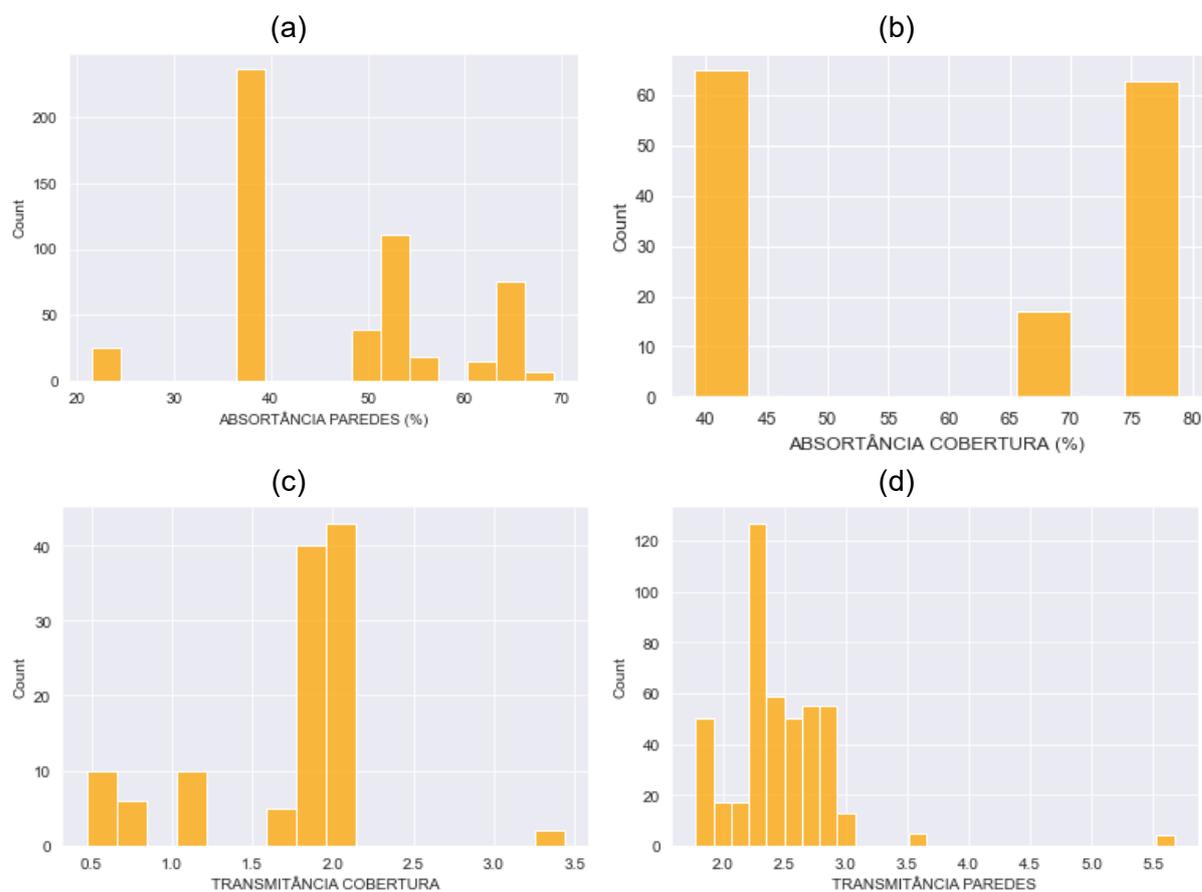


Gráfico 32 – Localização das AS por tipo de pavimento (T: térreo, I: intermediário e C: cobertura)

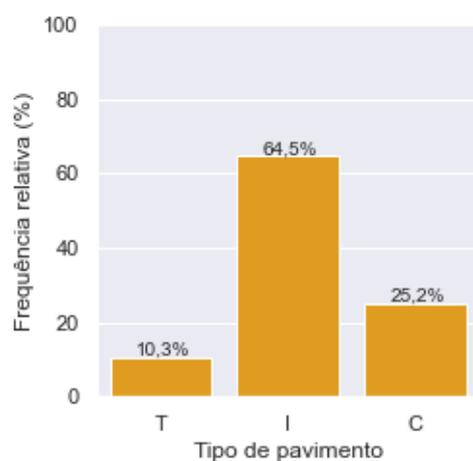
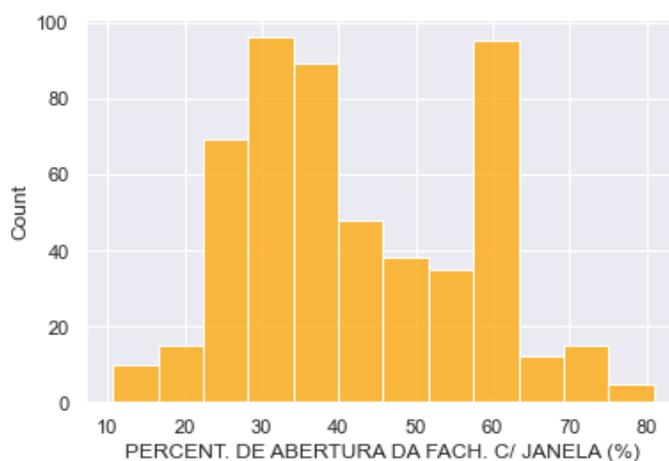


Gráfico 33 – Percentual de abertura da fachada (PAF) das SA



O pé direito mediano das salas de aula observado foi de 3,15 m, com altura do peitoril das janelas de 1,10 m. Já em termos de densidade de ocupação, foram observadas

densidades entre aproximadamente 0,4 e 1,1 pessoas/m², com maior concentração entre 0,8 e 0,9 (Gráfico 34 a Gráfico 36).

Gráfico 34 – Pé direito das SA

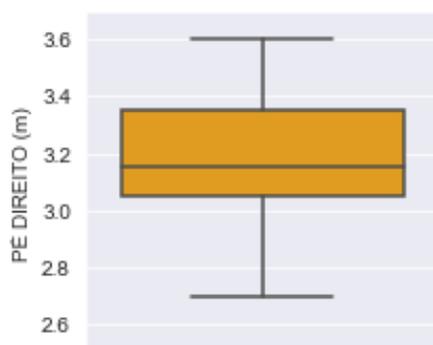


Gráfico 35 – Altura do peitoril das janelas das SA

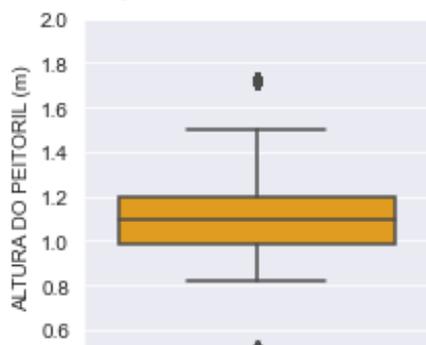
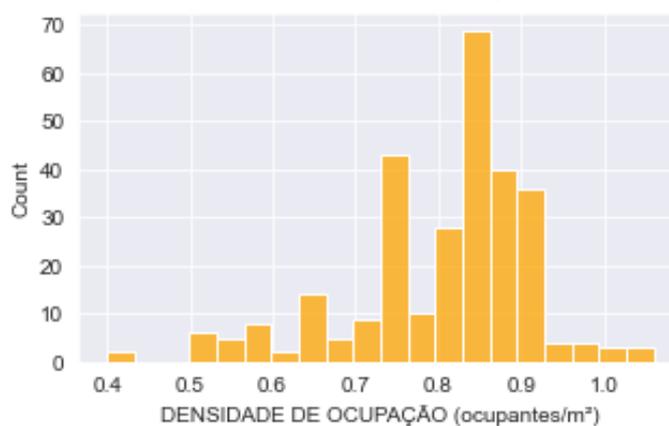


Gráfico 36 – Densidade de ocupação das SA

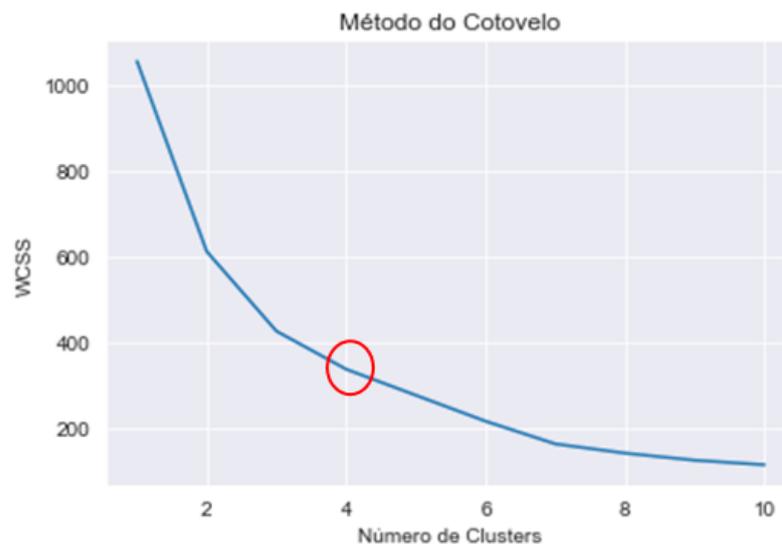


4.5.3.2. Arquétipos das salas de aula

Conforme citado no capítulo de metodologia, os parâmetros escolhidos para a determinação dos modelos de referência foram a área e a proporção entre comprimento e largura. Reforça-se que, por comprimento, considerou-se a dimensão da fachada externa das salas de aula. Os dados foram normalizados conforme indicação de Schaefer e Ghisi (2016) e o Gráfico 37

Gráfico 37 mostra o resultado para a análise do método do cotovelo.

Gráfico 37 – Número de arquétipos indicado pelo método do cotovelo



A partir da análise do

Gráfico 37 37, de acordo com o método do cotovelo mostrado na Figura 36, considerou-se a adoção de 4 grupos. A definição do número de *clusters* a ser utilizada pode ser alterada pelo usuário. Para fins de otimização, foi testada a possibilidade de adoção de três grupos, porém desta maneira o algoritmo excluiu um modelo representativo de salas com mais de 100m², o que não foi considerado pertinente para o estudo. Assim, para que os modelos também possuíssem um representante de salas com áreas grandes, confirmou-se a escolha de trabalhar com quatro *clusters*. A Tabela 20 mostra as áreas e proporções medianas de cada grupo, enquanto o Gráfico 38 (a) e (b) permite a visualização da distribuição com *Boxplot*.

A Figura 62 ilustra os arquétipos selecionados para representar cada *cluster* de acordo com a proximidade simultânea das medianas nos dois fatores (área e proporção). A Tabela 21 mostra as características específicas de cada arquétipo. Reforça-se que os arquétipos representam dimensões de salas reais da amostra. As aberturas representadas na figura são ilustrativas para indicação da face voltada para a fachada externa, já que os PAF foram variados no experimento de simulações paramétricas.

Tabela 20 - Áreas e proporções medianas de cada *cluster* de SA

Cluster	Área (m ²)	Proporção (comprimento / largura)
1	42,27	1,64
2	45,24	0,89
3	78,96	1,30
4	114,05	1,90

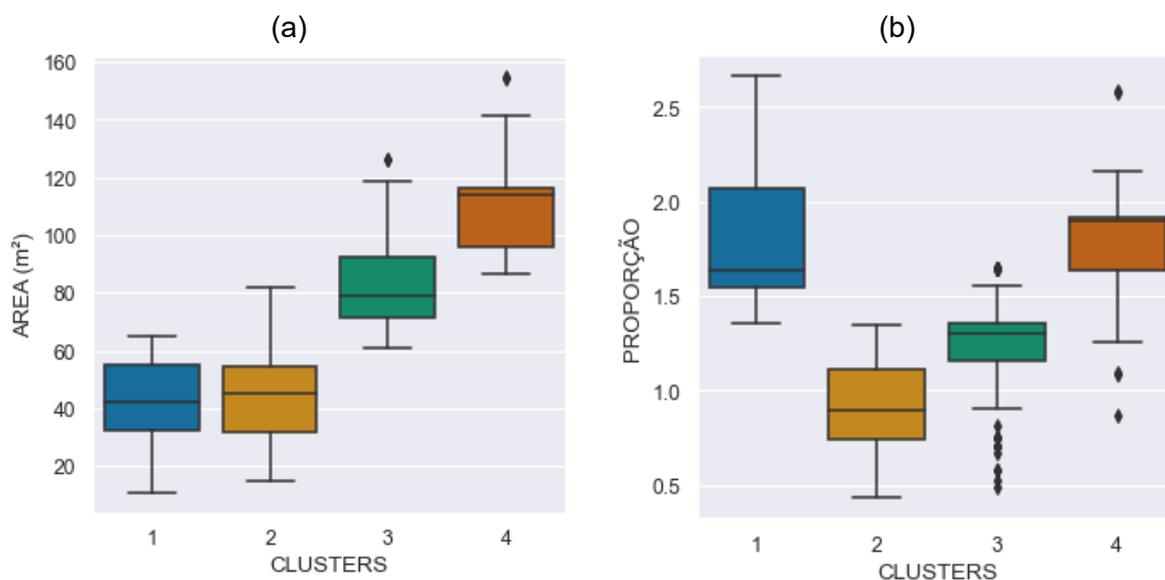
Gráfico 38 – Variáveis área e proporção para cada *cluster* de SA

Figura 62 – Representação gráfica dos quatro arquétipos para SA

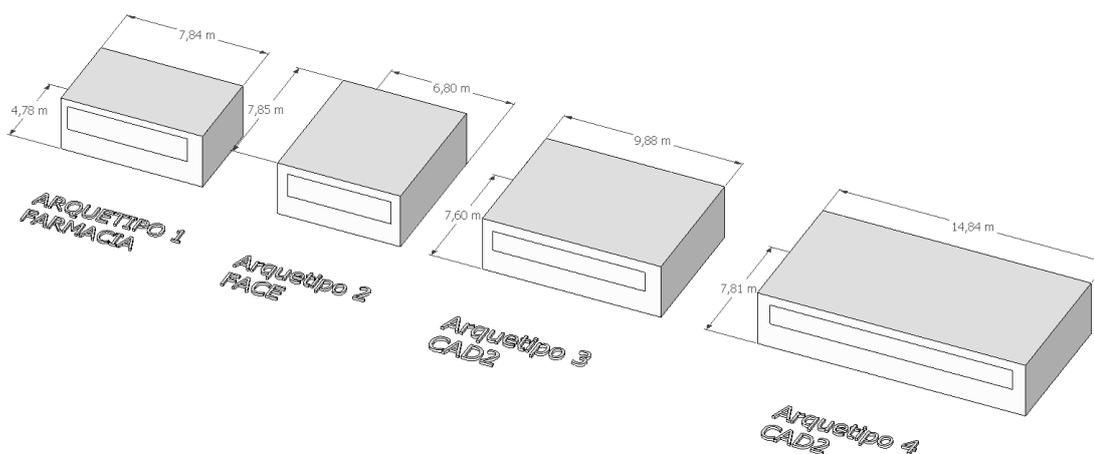


Tabela 21 – Descrição dos arquétipos para SA

Arquétipo	Prédio	Área (m ²)	Comp. (m)	Largura (m)	Proporção (comprimento / largura)
1	FAFAR	37	7,8	4,8	1,64
2	FACE	53	6,8	7,8	0,87
3	CAD2	75	9,9	7,6	1,30
4	CAD2	115	14,8	7,8	1,90

O Gráfico 39 mostra a frequência relativa de cada *cluster* na amostra de salas de aula da UFMG em Belo Horizonte e o Gráfico 40 mostra a localização dos arquétipos selecionados em relação à nuvem de pontos de toda a amostra, agrupada por *cluster*.

Gráfico 39 – Frequência de ocorrência relativa de cada *cluster* na amostra de SA

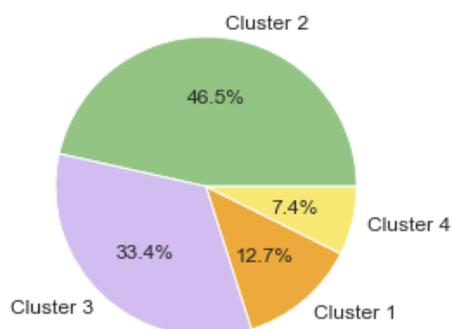
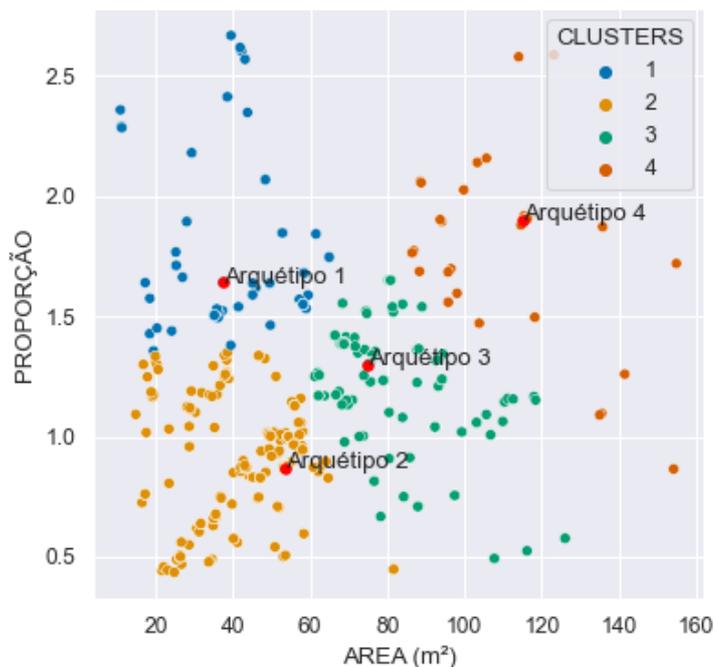
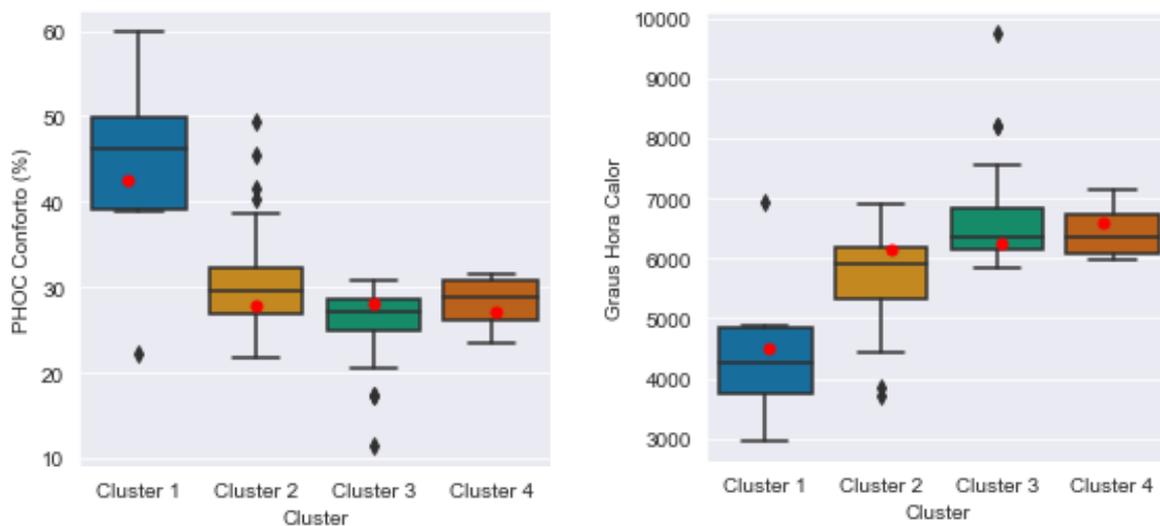


Gráfico 40 – Identificação de cada arquétipo na nuvem de pontos agrupada por *cluster* das SA



Conforme indicado por Schaefer e Ghisi (2016), foram realizadas simulações computacionais de salas existentes e comparação com os resultados gerados pelos arquétipos. As simulações envolveram a manutenção de todas as configurações, com a alteração apenas das áreas e proporções. A amostra de salas existentes simuladas foi de 10% para cada grupo, escolhidas de maneira aleatória (7, 25, 18 e 4 salas para os *clusters* 1, 2, 3 e 4, respectivamente). De acordo com Schaefer e Ghisi (2016), os resultados obtidos pelas simulações dos arquétipos deveriam figurar entre os percentis 25 e 75 dos resultados obtidos pela simulação da amostra de cada grupo. O Gráfico 41 mostra os resultados deste experimento.

Gráfico 41 - PHOC (a) e Graus-hora de calor (b) de amostra de SA existentes de cada *cluster* e os resultados dos arquétipos (pontos vermelhos)



Observa-se que os pontos vermelhos, que representam os valores para os arquétipos, incidiram entre os percentis 25 e 75 tanto para o PHOC quanto para os Graus-Hora de Calor. Assim, considerou-se que os arquétipos elaborados foram suficientemente adequados para representar seus grupos.

4.5.3.3. Comparação das salas de aula e dos arquétipos da UFMG em relação à literatura

A Figura 63 mostra a localização das salas de aula reais identificadas a partir do levantamento de literatura, enquanto os Gráficos 42 a 45 mostram a comparação entre os dados das salas de aula da UFMG e os da literatura.

Com a Figura 63, observa-se que a maior parte dos estudos identificados foram das regiões sul e sudeste do país. Apesar disso, também foram identificadas salas de aula das regiões nordeste e centro-oeste. Não foram identificados exemplares da região norte do país. A comparação dos dados mostra similaridade entre as características arquitetônicas entre as salas de aula da UFMG com as da literatura.

Figura 63 –Localização das SA reais identificadas a partir de levantamento na literatura

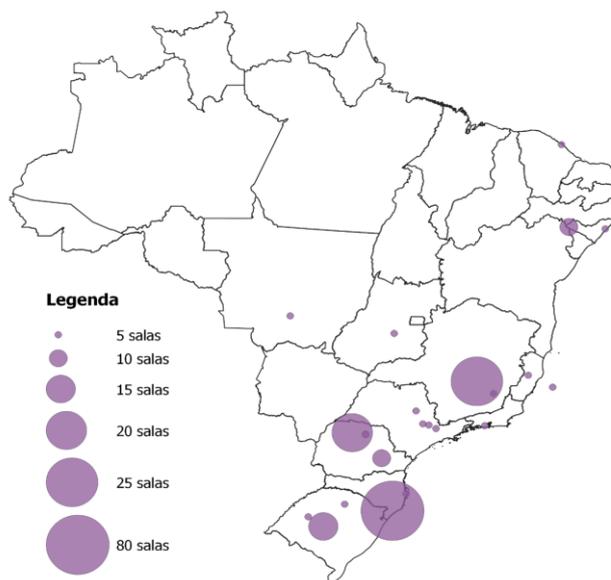


Gráfico 42 - Comparação entre dados das salas de aula reais da UFMG e da literatura

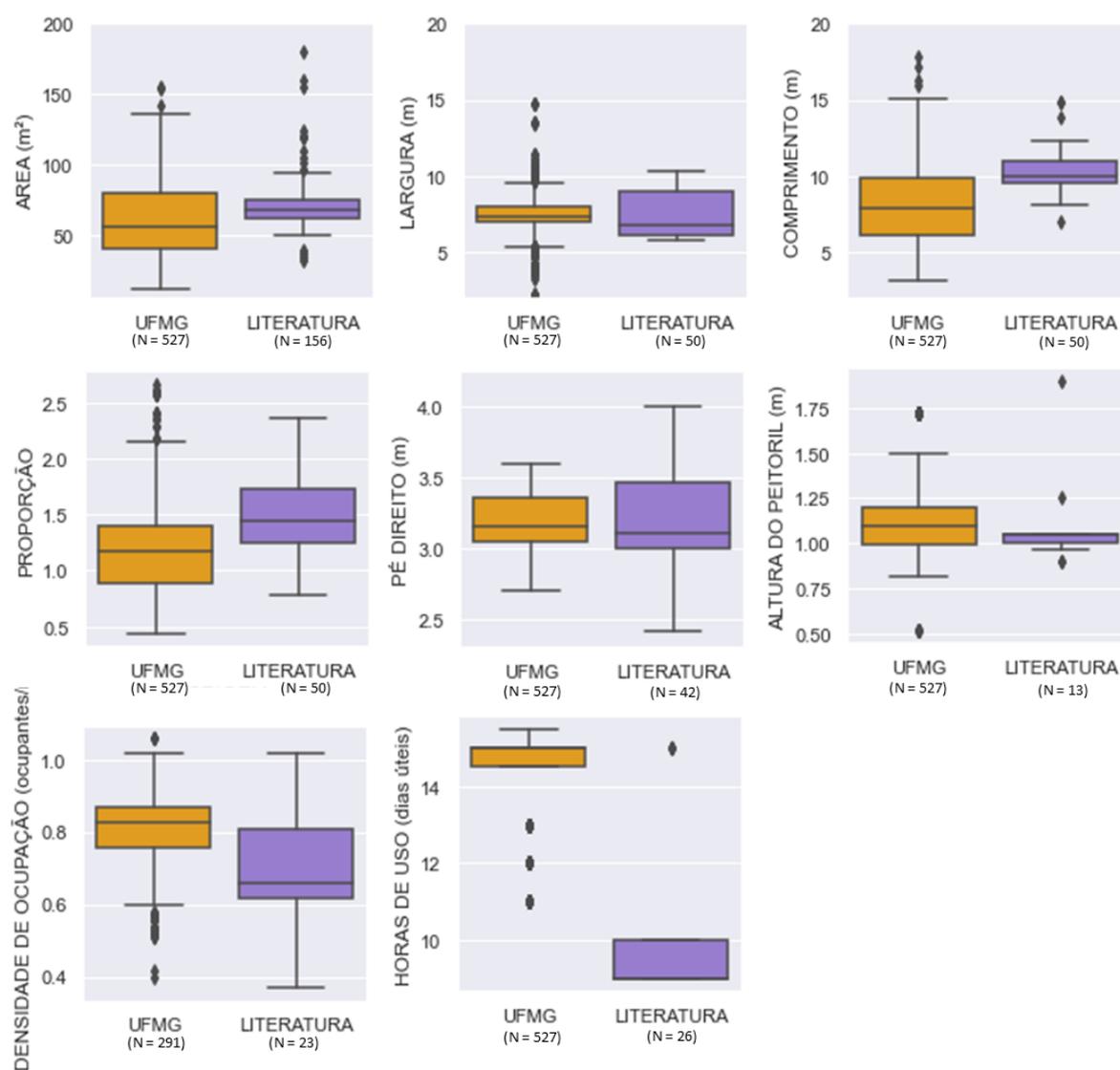


Gráfico 43 – Existência de ventilação cruzada nas SA da UFMG e da literatura

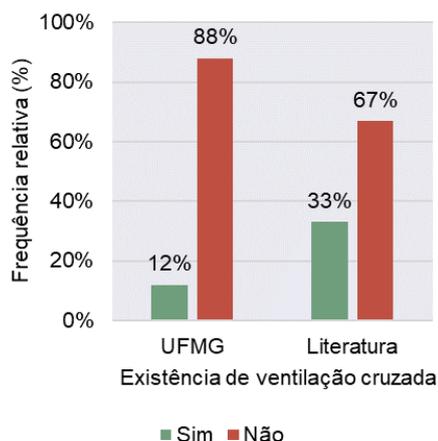


Gráfico 44 - Existência de proteção solar nas SA da UFMG e da literatura

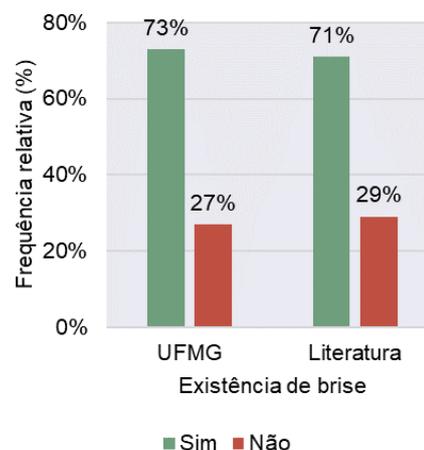
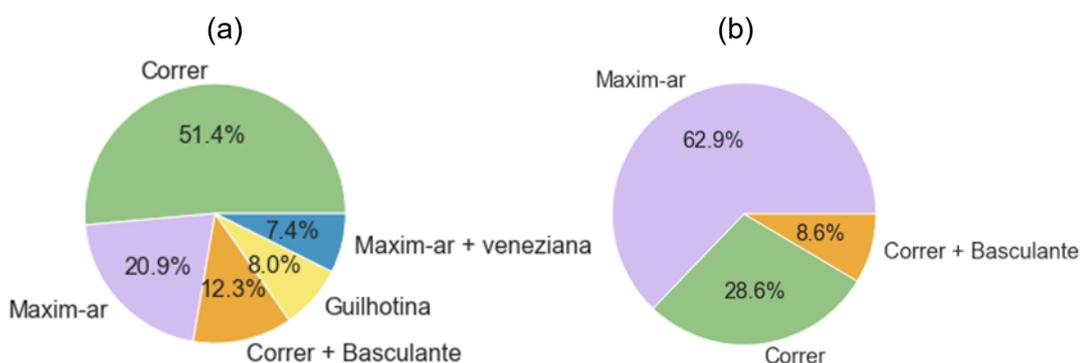


Gráfico 45 – Tipos de janela nas SA reais da UFMG (a) e da literatura (b)

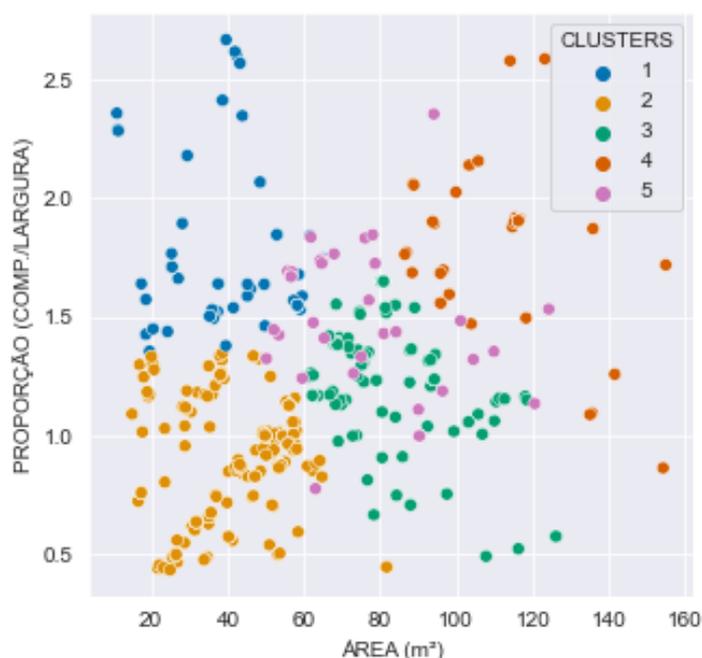


Como visto no Gráfico 42, na maior parte dos casos, os valores máximos e mínimos percebidos nas salas de aula das demais localidades do Brasil estavam dentro dos intervalos percebidos na amostra da UFMG. Tal comportamento foi notado para a largura, o comprimento, a proporção, a densidade de ocupação, a área e a altura do peitoril das janelas (os dois últimos com exceção de um *outlier*). Para a variável do pé direito, notou-se que na literatura foram encontradas salas com altura de aproximadamente 2,5 a 4,0 m, porém a mediana foi similar à das salas da UFMG, de 3,15 m. A maior diferença foi notada nas horas de uso, onde na UFMG identificou-se que as salas de aula são utilizadas pela manhã, tarde e noite (mediana de 15 horas), enquanto na literatura identificou-se uso mediano durante dois turnos (10 horas).

Em termos de existência de ventilação cruzada e proteção solar, as salas de aula da literatura apresentaram comportamento similar às da UFMG (maior parte sem ventilação cruzada e com proteção solar) (Gráficos 43 e 44). Em termos de tipos de

janelas, observou-se que foram identificados na literatura os três tipos citados como mais frequentes na UFMG, que foram as janelas de correr, máximo-ar e correr com basculante. No entanto, ao contrário do que na UFMG, na literatura o tipo mais frequente foi o máximo-ar, não as janelas de correr. Pontua-se que o tipo de janela influencia no potencial de abertura útil de ventilação, como identificado pela Tabela de desconto de esquadrias do RTQ-R (BRASIL, 2012). O Gráfico 46 mostra os dados de área e proporção das salas de aula da literatura (*cluster 5*) plotados sobre os dados da UFMG agrupados conforme os arquétipos 1 a 4.

Gráfico 46 – *Clusters* desenvolvidos a partir das SA da UFMG (1 a 4) e as SA reais identificadas a partir da literatura (5)

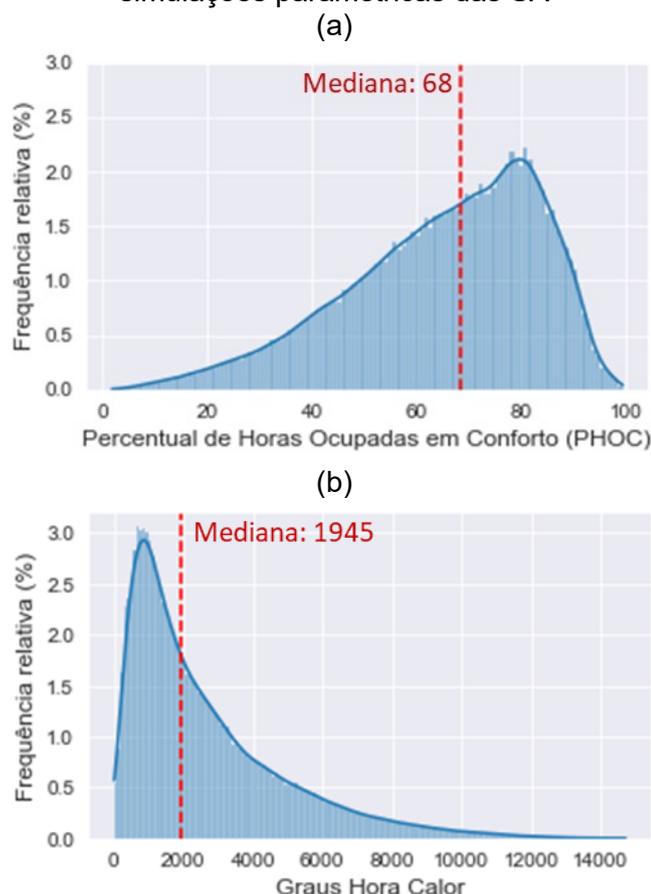


A partir da análise visual do Gráfico 46, é possível notar que a maior parte dos pontos referentes às salas de aula da literatura incidiram na região dos arquétipos 3 e 2, respectivamente. Apenas um ponto incidiu sobre a região do arquétipo 1 e dois pontos sobre a região do arquétipo 4. Assim, reforça-se que os valores notados na literatura em relação à área e proporção estiveram incluídos nos limites máximos e mínimos da UFMG. A partir do Gráfico 46, identificou-se que o arquétipo 3 - área mediana de 79m² e proporção mediana de 1,3 (comprimento/largura) - é o que possui maior representatividade em relação às salas de aula de outras regiões, considerando o levantamento realizado.

4.6. Descrição da base de dados quanto ao conforto térmico das salas de aula

A partir das simulações paramétricas, foi desenvolvida a base de dados referente ao conforto térmico das salas de aula. A base de dados contou com 219.996 elementos. O Gráfico 47 (a) e (b) mostra a distribuição das variáveis de saída, PHOC e Graus-Hora de Calor (GHC).

Gráfico 47 - Distribuição das variáveis de saída PHOC (a) e GHC (b) obtidas a partir das simulações paramétricas das SA



Observa-se que a base de dados possui maior concentração de PHOC na faixa dos 60 a 80%, e GHC na faixa de mil até 3 mil GHC. Os Gráficos 48 e 49 mostram a relação entre os valores de PHOC e os de GHC na base de dados. Observa-se que os maiores índices de PHOC (a partir dos 70%) corresponderam a pouca variação nos GHC. Já para os grupos com PHOC inferior a 60%, os GHC variaram mais, chegando à variação de 4 mil a aproximadamente 14 mil no caso de PHOC 20 a 30%. Tal constatação é um indício de que a alteração de algumas variáveis pode não gerar modificações consideráveis na métrica PHOC, mas gerar alterações consideráveis na

métrica GHC. Desta maneira, reafirma-se a pertinência de utilizar as duas métricas para a análise do conforto térmico das salas de aula nesta pesquisa.

Gráfico 48 – Relação entre PHOC e GHC

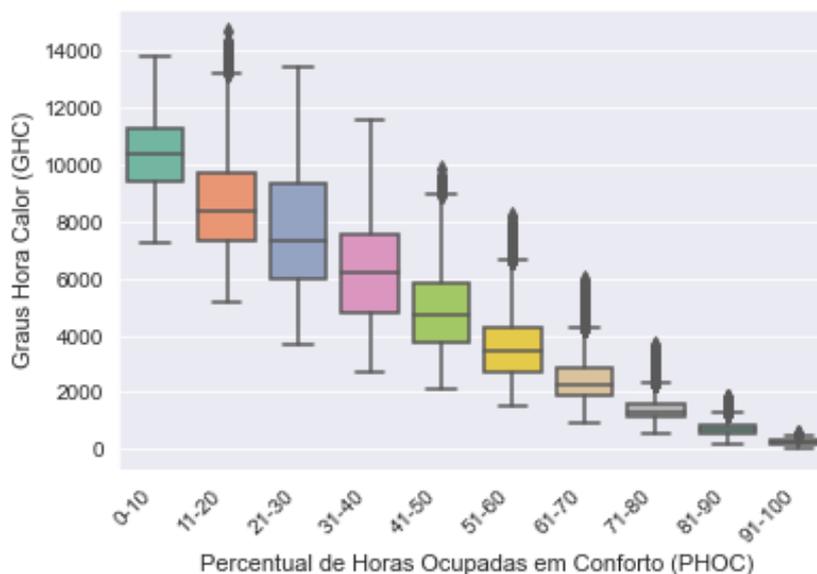
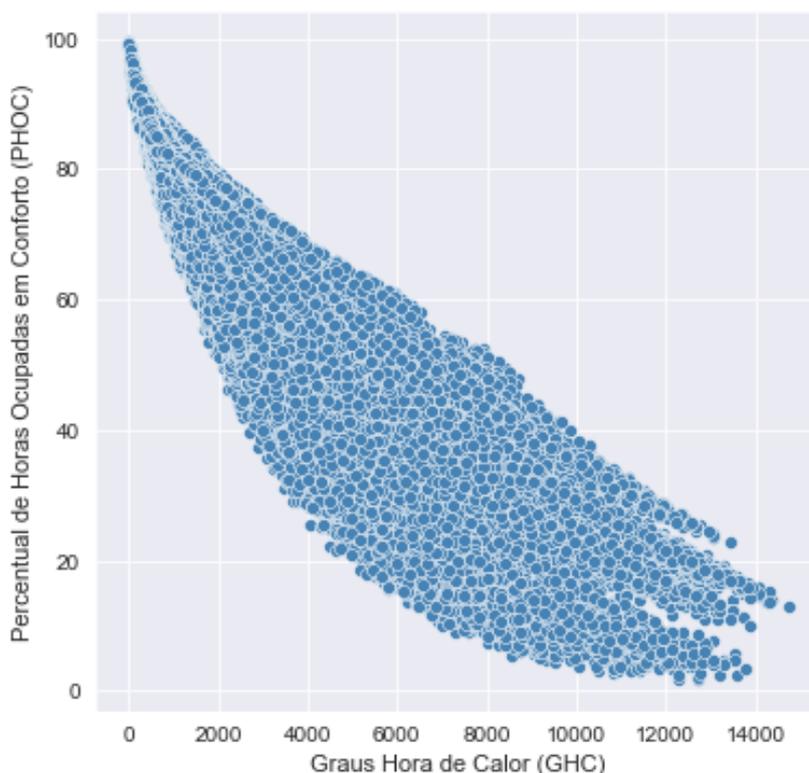
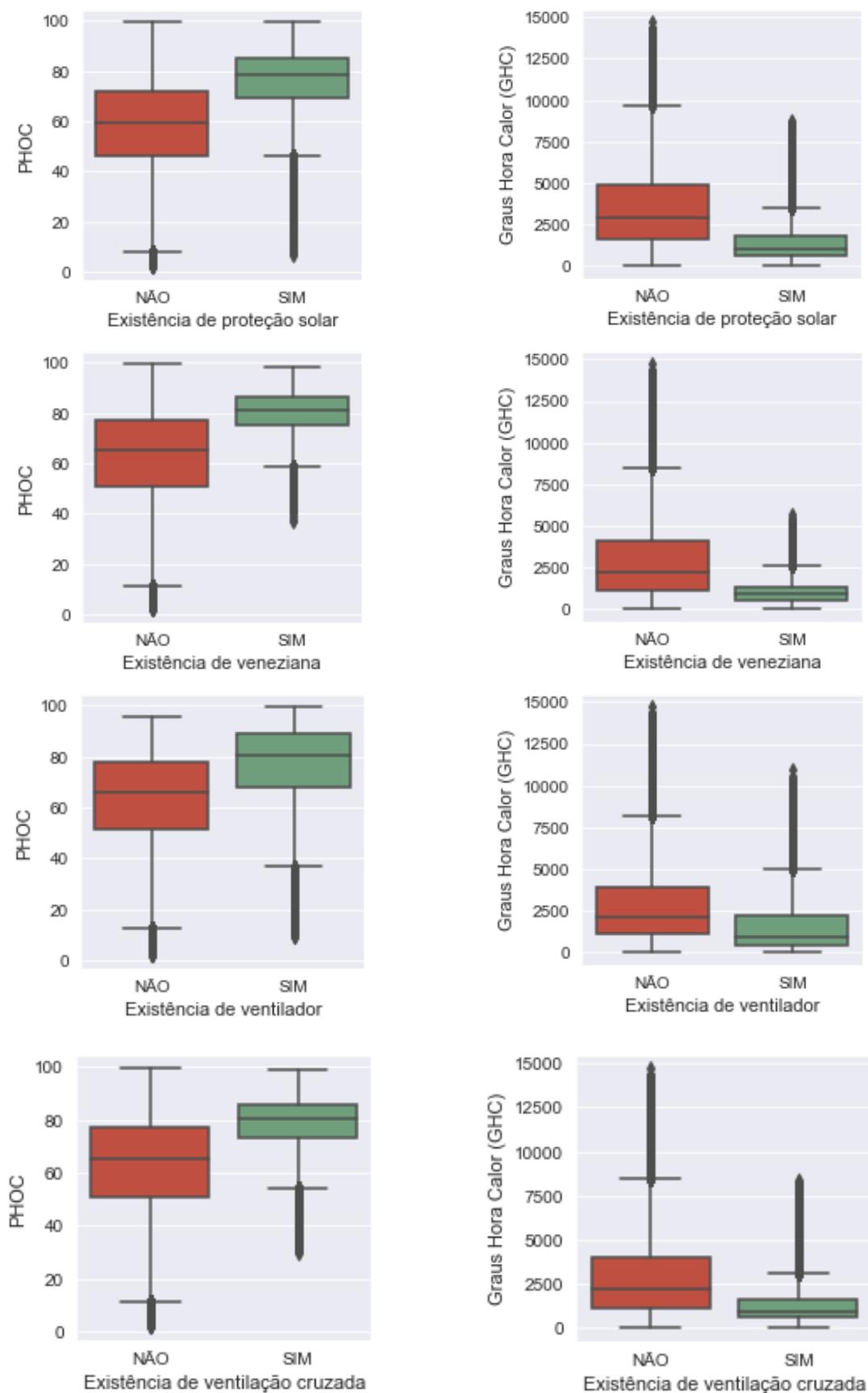


Gráfico 49 – Dispersão da relação entre PHOC e GHC



O Gráfico 50 mostra os resultados para as duas métricas a partir do agrupamento de dados considerando a existência ou inexistência de algumas variáveis relacionadas à proteção solar e ventilação: existência de proteção solar, existência de veneziana nas janelas, existência de ventiladores e existência de ventilação cruzada.

Gráfico 50 - Resultados de PHOC e GHC das SA a partir do agrupamento pela existência de variáveis arquitetônicas



Nota-se que a presença de elementos de proteção solar e a existência de estratégias de ventilação aumentam os níveis de conforto térmico, conforme o esperado. A variável que apresentou maior diferença entre os grupos “Não” e “Sim” foi a presença de proteção solar. A partir da observação das diferenças entre as medianas dos grupos para as duas métricas, observa-se que algumas variáveis, como a existência de ventilação cruzada ou ventiladores, geram maior diferença no PHOC do que nos GHC, indicando novamente a conveniência da utilização das duas métricas.

O Gráfico 51 mostra os valores de PHOC e GHC obtidos a partir das diferentes orientações de fachadas, com menores valores de PHOC e maiores valores de GHC para as fachadas Oeste e Noroeste, e menores para as fachadas Sul e Sudeste, conforme o esperado. Os valores de PHOC e GHC indicaram conforto térmico nas salas de pavimento térreo significativamente superior quando comparado aos valores obtidos com os pavimentos do tipo cobertura e intermediários (Gráfico 52).

Gráfico 51 – Valores de PHOC e GHC das SA a partir da orientação das fachadas

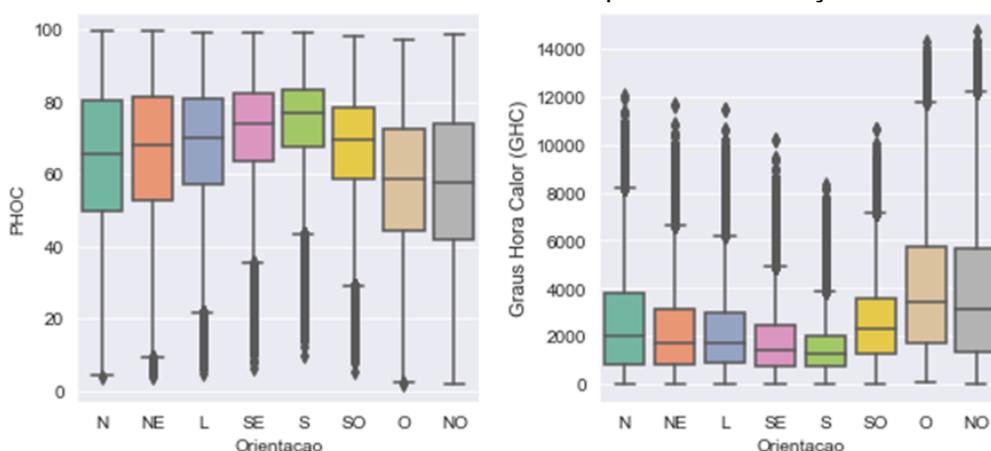
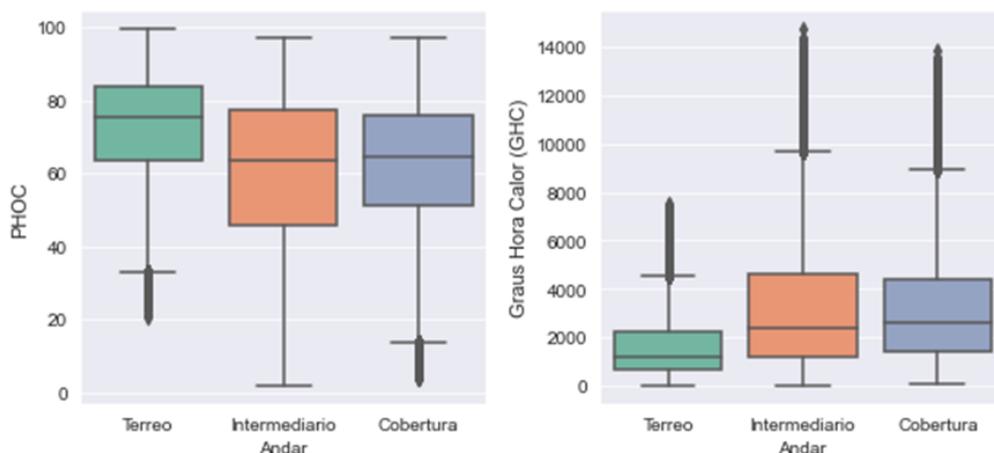
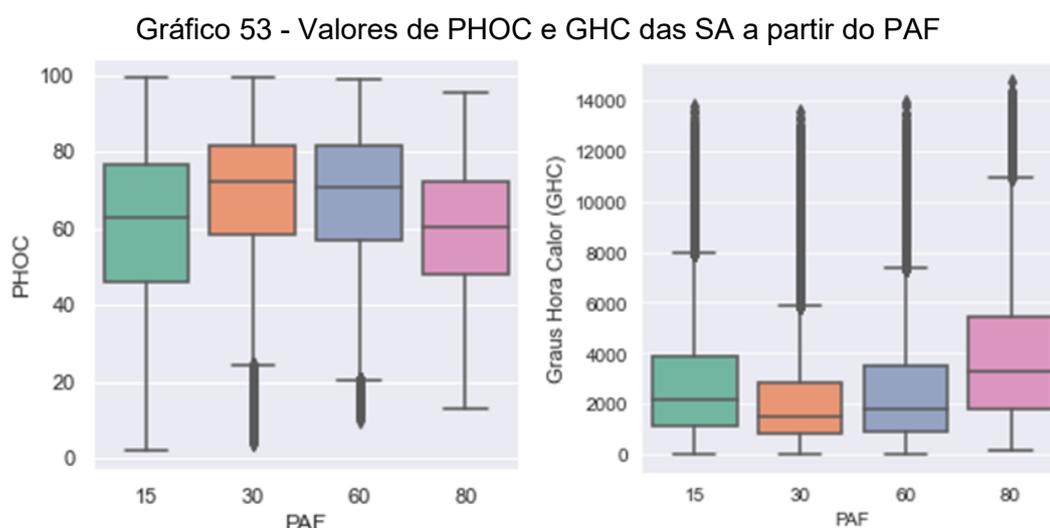


Gráfico 52 – Valores de PHOC e GHC das SA a partir do tipo de pavimento



O Gráfico 53 mostra o PHOC e o GHC obtidos com a variação de PAF. Observa-se que os melhores índices de conforto térmico para as duas métricas são observados nos casos de PAF de 30 e 60%. Tanto nos casos de PAF de 15% quanto de 80%, o conforto térmico é menor. Isto pode ser explicado, no primeiro caso, pela insuficiência de área de ventilação e, no segundo caso, pelo excesso de ganho de calor ocasionado por grande área envidraçada. O PAF que apresentou melhores resultados foi o de 60%.



4.7. Equações preditivas

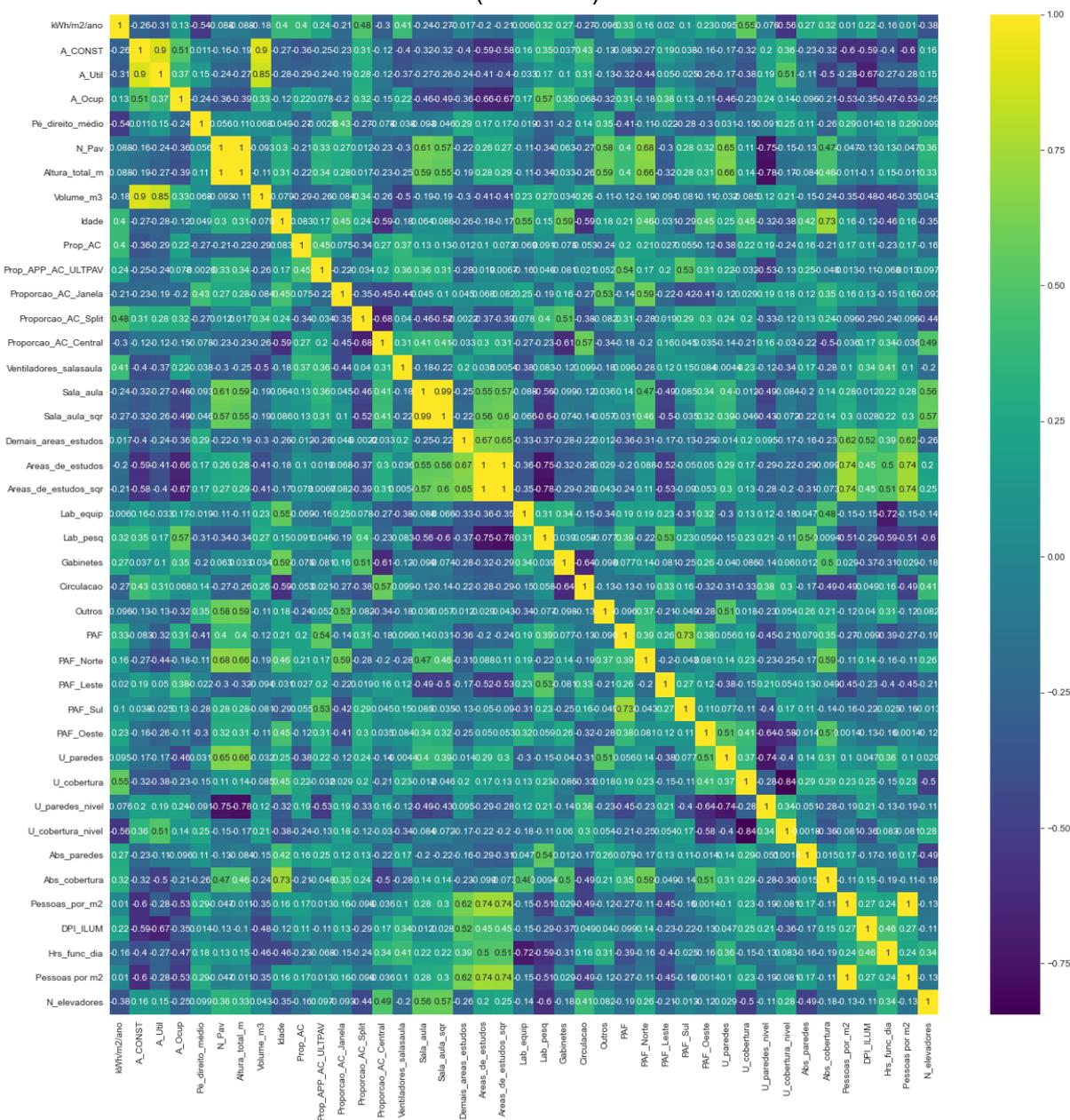
4.7.1. Equações preditivas de intensidade de uso da energia (EUI) das Unidades Acadêmicas

A partir dos procedimentos descritos no item 3.5.5, a separação da base de dados foi realizada entre os prédios que possuíam laboratórios de equipamentos densos em mais de 5% da área, e aqueles que não possuíam. Assim, o **Modelo 1** refere-se ao conjunto sem laboratórios de equipamentos densos e presença menos significativa de aparelhos de ar-condicionado e o **Modelo 2** refere-se ao conjunto de prédios com laboratórios de equipamentos densos e presença mais significativa de aparelhos de ar-condicionado. Por conta do reduzido tamanho das bases de dados (17 e 10 prédios, respectivamente), ambos os modelos não poderiam apresentar muitos termos. Os modelos construídos são apresentados a seguir.

4.7.1.1. Análises de correlação

O processo de desenvolvimento das equações preditivas envolveu as análises de correlação de Pearson (ρ) e gráficos de dispersão. Estas análises foram feitas para selecionar as variáveis candidatas e as interações mais promissoras, já que os modelos deveriam ter poucos termos. As interações analisadas foram bivariadas, ou seja, consideraram a interação entre dois termos. A Figura 64 mostra a matriz de correlação elaborada com a base de dados do **Modelo 1**.

Figura 64 – Matriz de correlação com dados das unidades acadêmicas sem laboratórios de equipamentos densos e presença menos significativa de aparelhos de ar-condicionado (Modelo 1)



Foram identificadas as variáveis com maiores índices ρ em relação ao EUI e aquelas que não funcionariam bem na mesma equação por conta do efeito da multicolinearidade. Identificou-se que a variável indicativa do nível de transmitância térmica da cobertura (U_cob_nivel) apresentou o maior coeficiente de Pearson, com $\rho = -0,56$. Observou-se que os tipos de ar-condicionado *split* ($Prop_AC_Split$) e central ($Prop_AC_Central$) não funcionariam bem no mesmo modelo, pois possuem $\rho = -0,68$ entre si. Da mesma maneira, as variáveis referentes aos Laboratórios de pesquisa e informática (Lab_pesq) e às Áreas de estudos ($Areas_de_estudos$ e $Areas_de_estudos_sqr$) também apresentara valores ρ de $-0,78$ e $-0,75$ entre si, indicando que não poderiam estar presentes no mesmo modelo. A listagem das demais variáveis que não funcionariam bem entre si são apresentadas no Apêndice H, juntamente com a listagem das interações identificadas como promissoras por meio da análise dos gráficos de dispersão. Os Gráficos 54 e 55 mostram exemplos de interações analisadas no desenvolvimento do Modelo 1.

Gráfico 54 – Modelo 1: EUI por proporção de salas de aula (raiz quadrada) agrupado por área do conhecimento

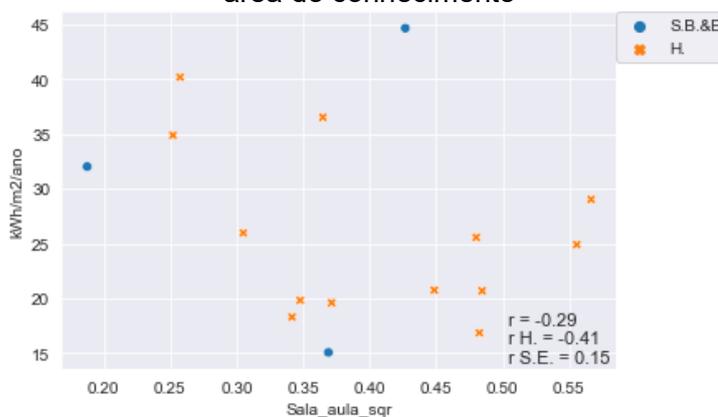
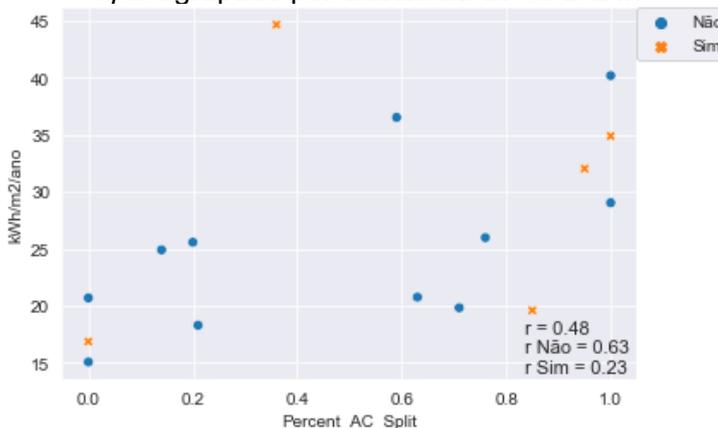
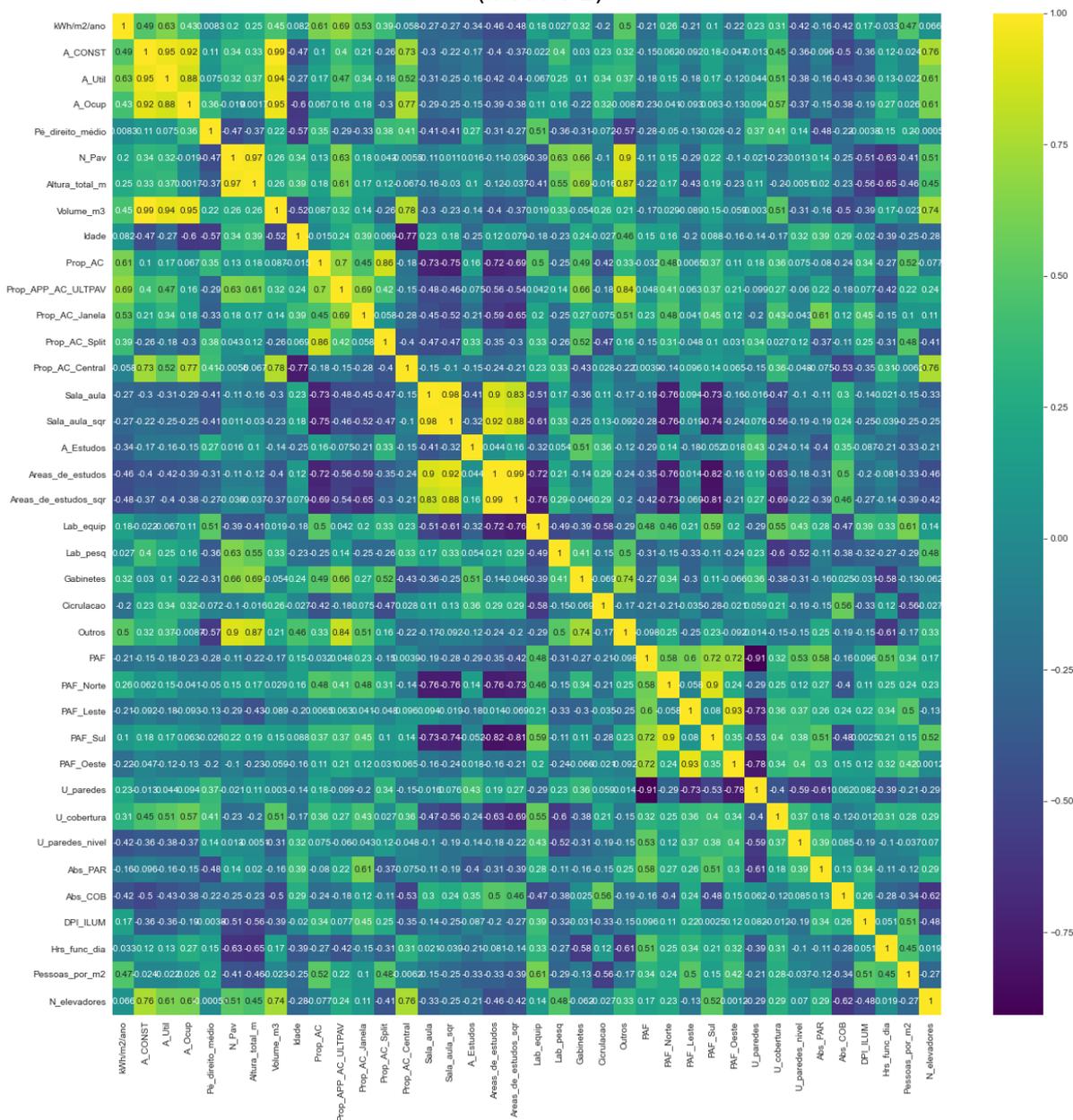


Gráfico 55 – Modelo 1: EUI por proporção de área condicionada com equipamentos tipo *split* agrupado por existência de CPD 24h



Da mesma maneira, a Figura 65 mostra a matriz de correlação feita com a base de dados do **Modelo 2** (unidades acadêmicas com laboratórios de equipamentos densos e presença mais significativa de aparelhos de ar-condicionado).

Figura 65 - Matriz de correlação com dados das unidades acadêmicas com laboratórios de equipamentos densos e presença mais significativa de aparelhos de ar-condicionado (Modelo 2)



tipos de usos dos espaços, observou-se que a soma das áreas de salas de aula com as demais áreas de estudos (*Areas_de_estudos*) gerou índice de Pearson maior do que a consideração destas áreas separadamente. Além disso, a correlação linear desta variável foi otimizada com sua transformação para raiz quadrada, alcançando o coeficiente de correlação de -0,48 (*Areas_de_estudos_sqr*).

Como variáveis que não funcionariam bem juntas, foram identificadas as que obtiveram os dois maiores índices de correlação linear (ρ): *Prop_APP_AC_ULTPAV* e *Prop_AC*, pois apresentaram $\rho = 0,7$ entre si. Além disso, *Prop_AC* e *Areas_de_estudos_sqr* e as variáveis indicativas dos tipos de uso de *Areas_de_estudos_sqr* e de laboratórios de equipamentos densos (*Lab equip*) também não funcionariam bem juntas, com $\rho = -0,69$ e $0,76$ entre si, respectivamente. Em relação às interações, os Gráficos 56 e 57 mostram exemplos de interações consideradas promissoras para serem testadas no processo de construção do Modelo 2. As listagens das demais interações selecionadas e das variáveis que não funcionariam bem juntas podem ser vistas no Apêndice I.

Gráfico 56 - Modelo 2: EUI por proporção de áreas de estudos (raiz quadrada) agrupado por existência de lâmpadas LED

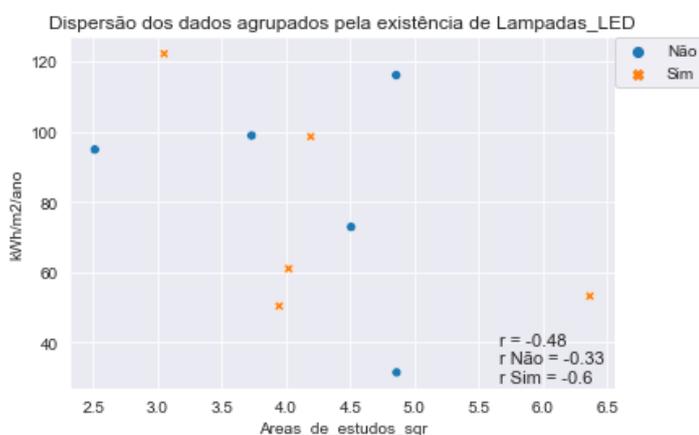
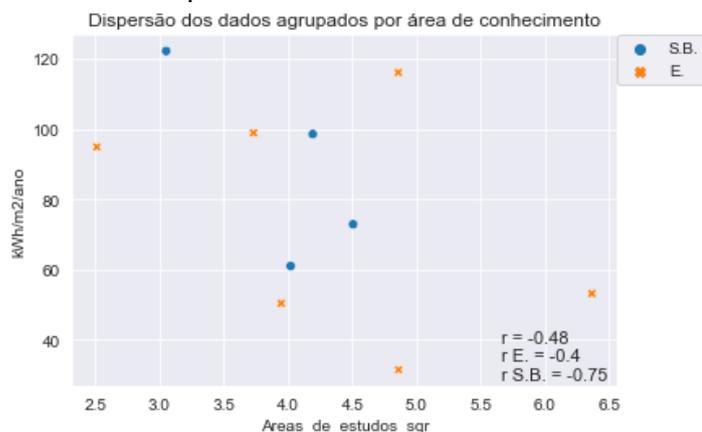


Gráfico 57 - Modelo 2: EUI por proporção de áreas de estudos (raiz quadrada) agrupado por área do conhecimento



4.7.1.2. Modelo 1: Equação preditiva para prédios sem laboratórios de equipamentos densos e presença menos significativa de aparelhos de ar-condicionado

$$\begin{aligned}
 EUI(kWh/m^2/ano) = & 51,41 + 1,09 \times DPI_{ILUMINAÇÃO} + \\
 & 5,18 \times Prop.Ventiladores_{SALAS DE AULA} - 0,08 \times Prop.GABINETES PROF. - \\
 & 38,14 \times A. Conhecimento_{SB\&EX} - 6,45 \times \sqrt{Prop.ÁREAS DE ESTUDOS} + 23,29 \times PAF_{SUL} + \\
 & 30 \times PAF_{LESTE} - 9,56 \times Nível U cobertura_{BAIXA} + \\
 & 1,6 \times Prop.GABINETES PROF. \times A. Conhecimento_{SB\&EX} \qquad \qquad \qquad (Equação 15)
 \end{aligned}$$

Onde:

$DPI_{ILUMINAÇÃO}$ é a densidade de potência instalada para iluminação artificial (W/m^2);

$Prop.Ventiladores_{SALAS DE AULA}$ é a proporção de salas de aula com ventilador (%);

$Prop.GABINETES PROF.$ é a proporção de área construída com gabinetes de professores (%);

$A. Conhecimento_{SB\&EX}$ indica se o prédio é das áreas de conhecimento da Saúde, Biológicas ou Engenharias ou de outras áreas do conhecimento (1 ou 0);

$Prop.ÁREAS DE ESTUDOS$ é a proporção de área construída com áreas de estudos (%);

PAF_{SUL} é o percentual de abertura da fachada na orientação sul (%);

PAF_{LESTE} é o percentual de abertura da fachada na orientação leste (%);

$Nível U cobertura_{BAIXA}$ indica se o nível de U da cobertura é baixa ($U < 2,0 W/m^2K$) (1 ou 0).

A Figura 66 traz a relação de coeficientes do Modelo 1, obtido com o *software* R.

Figura 66 - Coeficientes do Modelo 1 - Predição de EUI para prédios sem laboratórios de equipamentos densos e presença menos significativa de aparelhos de ar-condicionado

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	51.41161	10.77483	4.771	0.00203	**
DPI_ILUM	1.09087	0.55111	1.979	0.08826	.
Ventiladores_salasaulasim	5.17833	2.62879	1.970	0.08951	.
Gabinetes	-0.07832	0.14468	-0.541	0.60507	
Area_conhecimentos.B.&E	-38.13910	8.08666	-4.716	0.00217	**
Areas_de_estudos_sqr	-6.45201	1.40902	-4.579	0.00255	**
PAF_Sul	23.28796	6.62345	3.516	0.00978	**
PAF_Leste	30.00231	10.39957	2.885	0.02348	*
U_cobertura_nivelBaixa	-9.56449	2.14257	-4.464	0.00292	**
Gabinetes:Area_conhecimentos.B.&E	1.60305	0.31933	5.020	0.00153	**

Signif. codes: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 3.412 on 7 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.9308, Adjusted R-squared: 0.8418

F-statistic: 10.46 on 9 and 7 DF, p-value: 0.002682

Como visto na Figura 66, o limite aceitável para a significância do valor-p foi de 10%. O Gráfico 58 mostra a relação entre dados medidos e dados estimados, enquanto o Gráfico 59 mostra o gráfico para análise do teste de normalidade dos erros Shapiro-Wilk. O Modelo 1 obteve R^2 de 0,93 e o teste de Shapiro-Wilk apresentou valor de 0,56. Com a análise visual do Gráfico 59 e o valor de 0,56, considera-se que os erros do Modelo 1 apresentam comportamento que se aproxima suficientemente da distribuição normal. A Tabela 22 apresenta os limites de cada termo do Modelo 1.

Gráfico 58 – Modelo 1: dados medidos versus dados preditos

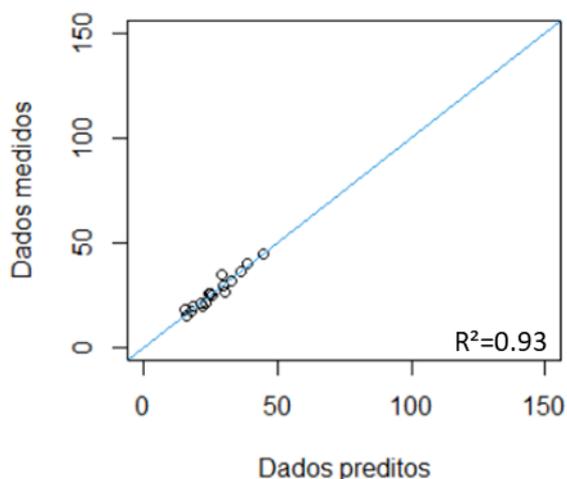


Gráfico 59 – Modelo 1: teste dos erros (Gráfico quantil-quantil)

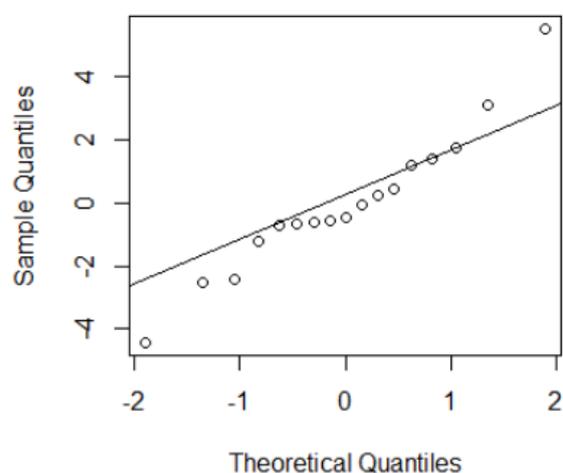


Tabela 22 – Limites de cada termo do Modelo 1 (prédios sem laboratórios de equipamentos densos e presença menos significativa de aparelhos de ar-condicionado)

Termo	Tipo	Limites
$DPI_{ILUMINAÇÃO}$ (W/m ²)	Contínua	5,8 a 14,4
$Prop.Ventiladores_{SALAS DE AULA}$ (%)	Contínua	0 a 1
$Prop.GABINETES PROF.$ (%)	Contínua	0 a 27,66
$Prop.ÁREAS DE ESTUDOS$ (%)	Contínua	15,38 a 53,92
$A. Conhecimento_{SB\&EX}$	Categórica	(0=Não / 1=Sim)
PAF_{SUL} (%)	Contínua	5 a 63
PAF_{LESTE} (%)	Contínua	0 a 70
$Nível U cobertura_{BAIXA}$ (U < 2 W/m ² K)	Categórica	(0=Não / 1=Sim)

A Figura 67 mostra a análise de variância (ANOVA) do Modelo 1. Pode ser observado, pela coluna de soma dos quadrados (“Sum Sq”), que os termos mais influentes para o Modelo 1 são a interação entre a proporção de área de gabinetes de professores e a área do conhecimento, seguido pelo nível de transmitância da cobertura e a proporção de ventiladores nas salas de aula.

Figura 67 - Análise de variância (ANOVA) do Modelo 1 - Predição de EUI para prédios sem laboratórios de equipamentos densos e presença menos significativa de aparelhos de ar-condicionado

Analysis of Variance Table

Response: kWh/m2/ano

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
DPI_ILUM	1	57.462	57.462	4.9354	0.061733	.
Ventiladores_salasaula_num	1	152.602	152.602	13.1071	0.008506	**
Gabinetes	1	172.983	172.983	14.8576	0.006255	**
Area_conhecimento	1	29.902	29.902	2.5683	0.153058	
Areas_de_estudos_sqr	1	33.379	33.379	2.8669	0.134249	
PAF_Sul	1	60.822	60.822	5.2240	0.056170	.
PAF_Leste	1	26.889	26.889	2.3095	0.172385	
U_cobertura_nivel	1	268.234	268.234	23.0389	0.001967	**
Gabinetes:Area_conhecimento	1	293.397	293.397	25.2002	0.001530	**
Residuals	7	81.499	11.643			

Signif. codes: 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

4.7.1.3. Modelo 2: Equação preditiva para prédios com laboratórios de equipamentos densos e presença mais significativa de aparelhos de ar-condicionado

$$EUI(kWh/m^2/ano) = -378,83 + 17,43 \times DPI_{ILUMINAÇÃO} + 3,33 \times Prop.AC_{JANELA} + 2,86 \times Prop.AC_{SPLIT} + 44,19 \times \sqrt{Prop.ÁREAS DE ESTUDOS} + 458,74 \times CPD_{24h} - 86,83 \times \sqrt{Prop.ÁREAS DE ESTUDOS} \times CPD_{24h} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

$DPI_{ILUMINAÇÃO}$ é a densidade de potência instalada para iluminação artificial (W/m^2);

$Prop.AC_{JANELA}$ é a proporção de área construída condicionada com AC do tipo janela (%);

$Prop.AC_{SPLIT}$ é a proporção de área construída condicionada com AC do tipo *split* (%);

$Prop.ÁREAS DE ESTUDOS$ é a proporção de área construída com áreas de estudos (%);

CPD_{24h} refere-se à existência de central de processamento de dados com funcionamento 24h (1 ou 0).

A Figura 68 traz a relação de coeficientes do Modelo 2, obtido com o *software* R.

Figura 68 - Coeficientes do Modelo 2 - Predição de EUI para prédios com laboratórios de equipamentos densos e presença mais significativa de aparelhos de ar-condicionado

```

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   -378.8285    68.2855  -5.548  0.01155 *
DPI_ILUM      17.4305     3.0227   5.767  0.01037 *
Prop_AC_Janela  3.3339     0.7588   4.394  0.02185 *
Prop_AC_Split  2.8641     0.3771   7.595  0.00474 **
Areas_de_estudos_sqr 44.1880     7.8525   5.627  0.01110 *
CPD_24hsim    458.7429    76.1450   6.025  0.00917 **
Areas_de_estudos_sqr:CPD_24hsim -86.8318    15.8563  -5.476  0.01197 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 8.7 on 3 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9728,    Adjusted R-squared:  0.9183
F-statistic: 17.87 on 6 and 3 DF,  p-value: 0.01901

```

Como visto na Figura 68, o limite aceitável para a significância do valor-p foi de 5%. O Gráfico 60 mostra a relação entre dados medidos e dados estimados, enquanto o Gráfico 61 mostra o gráfico para análise do teste de normalidade dos resíduos

Shapiro-Wilk. O Modelo 2 obteve R^2 de 0,97 e o teste de Shapiro-Wilk apresentou valor de 0,84. Com a análise visual do Gráfico 61 e o valor obtido, considera-se que os erros do Modelo 2 apresentam comportamento que se aproxima suficientemente da distribuição normal. A Tabela 23 apresenta os limites de cada termo do Modelo 2.

Gráfico 60 - Modelo 2: dados medidos versus dados preditos

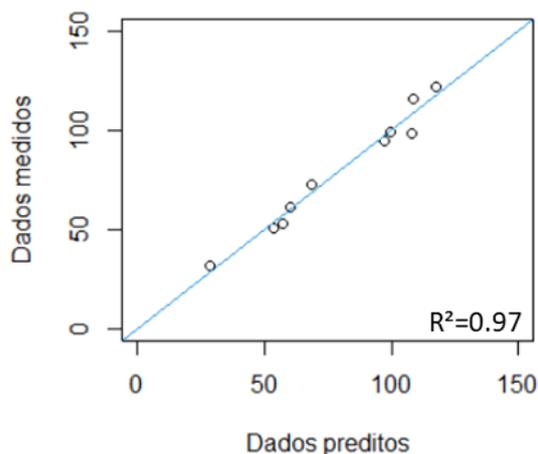
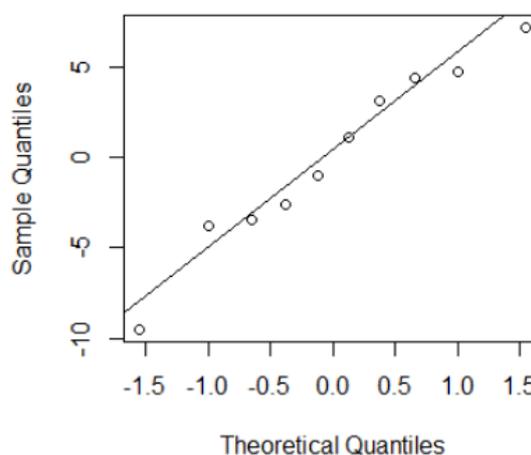


Gráfico 61 - Modelo 2: teste dos erros (Gráfico quantil-quantil)



A Tabela 23 apresenta os limites de cada termo do Modelo 2. A Figura 69 mostra a análise de variância (ANOVA) do Modelo 2.

Tabela 23 - Limites de cada termo do Modelo 2 (prédios com laboratórios de equipamentos densos e presença mais significativa de aparelhos de ar-condicionado)

Termo	Tipo	Limites
$DPI_{ILUMINAÇÃO}$ (W/m^2)	Contínua	Sem CPD _{24h} : 8,4 a 15,5 Com CPD _{24h} : 5,8 a 10,7
CPD_{24h}	Catagórica	(0=Não / 1=Sim)
$Prop.ÁREAS DE ESTUDOS$ (%)	Contínua	6,3 a 40,5
$Prop.AC_{JANELA}$ (%)	Contínua	0 a 18,6
$Prop.AC_{SPLIT}$ (%)	Contínua	0 a 38,8

Figura 69 - Análise de variância (ANOVA) do Modelo 2 - Predição de EUI para prédios com laboratórios de equipamentos densos e presença mais significativa de aparelhos de ar-condicionado

Analysis of Variance Table

Response: kwh/m2/ano

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
DPI_ILUM	1	254.82	254.82	3.3669	0.16386
Prop_AC_Janela	1	2149.29	2149.29	28.3986	0.01291 *
Prop_AC_Split	1	1239.38	1239.38	16.3760	0.02717 *
Areas_de_estudos_sqr	1	11.47	11.47	0.1515	0.72309
CPD_24h	1	2189.90	2189.90	28.9352	0.01258 *
Areas_de_estudos_sqr:CPD_24h	1	2269.62	2269.62	29.9885	0.01197 *
Residuals	3	227.05	75.68		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Pode ser observado, pela coluna de “*Sum Sq*”, que os termos mais influentes para o Modelo 2 são a existência de CPD24h (tanto em sua interação com a proporção de áreas de estudos quanto individualmente), seguido pela proporção de áreas condicionadas com os tipos de equipamento de janela e *Split*. Como esperado, os termos mais significativos são aqueles referentes a equipamentos com alto consumo energético.

4.7.2. Equações preditivas de conforto térmico das salas de aula (PHOC E GHC)

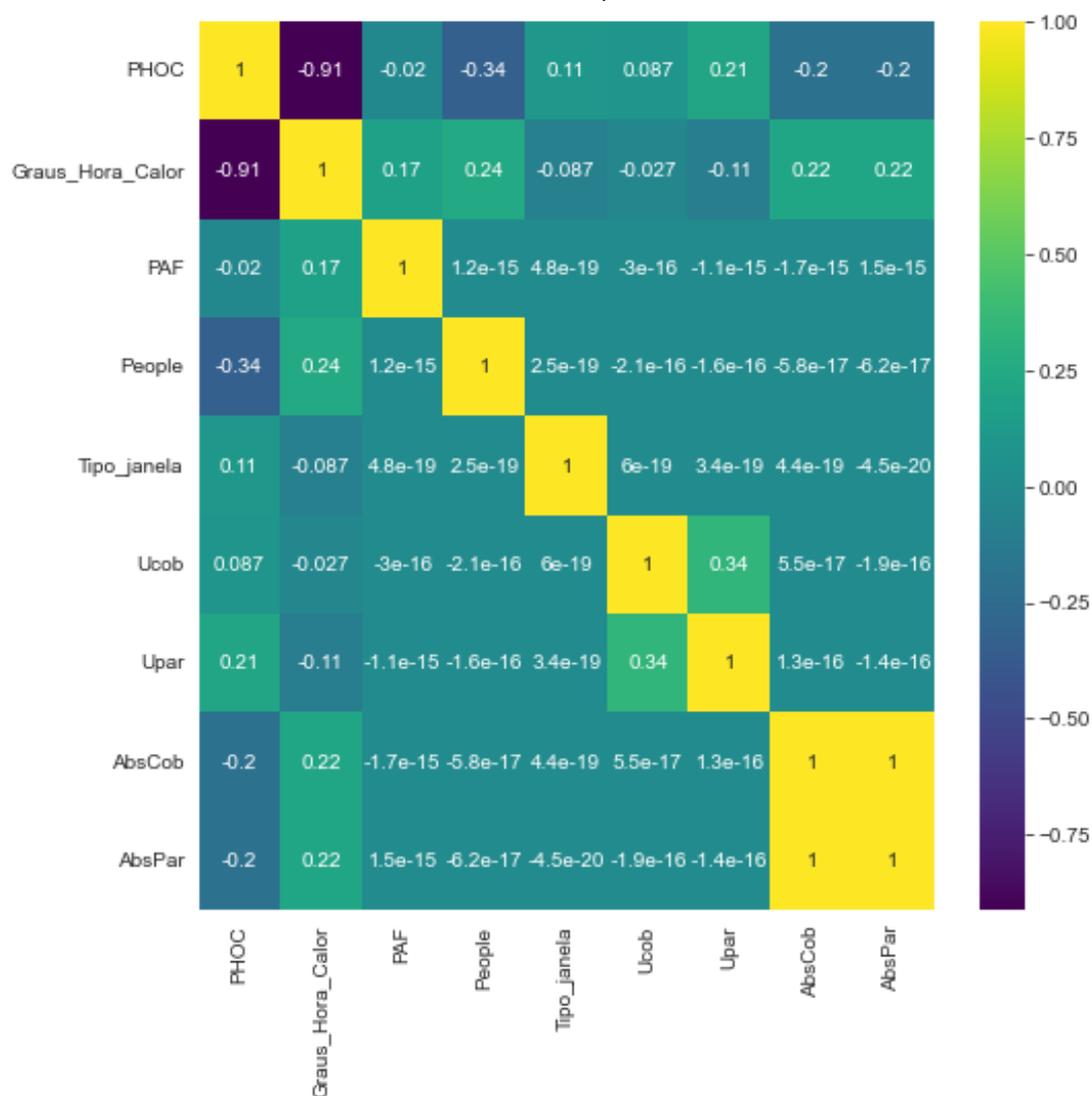
Diferentemente do caso dos Modelos 1 e 2, os modelos referentes ao conforto térmico (Modelos 3 e 4) contaram com base de dados com abundantes observações, da ordem de 220 mil. Assim, os modelos elaborados puderam obter muitos termos sem comprometer os graus de liberdade dos resíduos dos ajustes dos modelos. Como o público-alvo para a utilização dos modelos é de não leigos (arquitetos e engenheiros), considerou-se que a utilização de modelos mais complexos seria aceitável, de modo que esses seriam manuseados por planilhas em Excel elaboradas nesta pesquisa. O **Modelo 3** refere-se à predição do Percentual de Horas Ocupadas em Conforto (PHOC) e o **Modelo 4** refere-se à predição dos Graus-Hora de Calor (GHC).

4.7.2.1. Análises de correlação

A Figura 70 mostra a matriz de correlação para os Modelos 3 e 4. Tendo em consideração que a base de dados para estes modelos era grande, não foi necessária a seleção de variáveis e iterações promissoras, e consequente eliminação das não

promissoras. Assim, todas as variáveis foram testadas no desenvolvimento dos modelos, na ordem dos maiores coeficientes de Pearson para os menores.

Figura 70 - Matriz de correlação com dados das salas de aula simuladas (Modelo 3: PHOC e Modelo 4: GHC)



Observa-se, com a matriz de correlação, que a variável referente à densidade de ocupação (People) foi a que obteve maior coeficiente de Pearson tanto para PHOC quanto para GHC ($\rho=-0,34$, $\rho = 0,24$ e respectivamente). É possível notar que os coeficientes de Pearson para as absorções de paredes e coberturas foram idênticos, com correlação entre si igual a 1. Isto significa que não houve diferença entre as duas variáveis em relação aos resultados obtidos na base de dados. Tal fato ocorreu por conta da variação que se deu considerando a envoltória inteiramente (paredes e coberturas) claras ou escuras. Desta forma, para os modelos, bastaria a inserção de uma das variáveis para a indicação da cor da envoltória nos Modelos 3 e

4. Para as demais variáveis não se observou nenhuma correlação forte que pudesse causar problemas de multicolinearidade.

Para cada categoria das variáveis, foram calculados os valores medianos do PHOC e do GHC. A variabilidade desses valores medianos foi medida pelo coeficiente de variação (desvio-padrão/média), que foram posteriormente ordenados em ordem decrescente (Figura 71). O processo de inserção dos termos de interação para o desenvolvimento das equações priorizou os pares formados na ordem do ranqueamento.

Figura 71 - Ranqueamento dos coeficientes de variação das medianas do PHOC (a) e do GHC (b) nas categorias das variáveis explicativas

(a) PHOC		(b) Graus-Hora de Calor	
Variável	Coeficiente de variação	Variável	Coeficiente de variação
Brise	0,19	Brise	0,65
Ventilador	0,14	Veneziana	0,61
Veneziana	0,15	Ventilação cruzada	0,55
Ventilação cruzada	0,15	Ventilador	0,53
Densidade de ocupação	0,12	Orientação	0,38
Andar	0,10	Andar	0,37
Orientação	0,10	PAF	0,36
AbsCob	0,09	AbsCob	0,35
PAF	0,09	Densidade de ocupação	0,33
Upar	0,07	Morfologia	0,17
Morfologia	0,05	Arquétipo	0,11
Arquétipo	0,04	Tipo de janela (PAFvent)	0,11
Tipo de janela (PAFvent)	0,04	Upar	0,11
Ucob	0,03	Iluminação	0,08
Iluminação	0,02	Ucob	0,04

4.7.2.2. Modelo 3: Equação preditiva para PHOC das salas de aula

Considerando o fato de que a variável dependente desta equação é o PHOC, que representa um percentual, é esperado que seus resultados estejam entre 0 e 100%. Buscando o objetivo de que as estimativas não ultrapassassem o valor de 100, no processo de elaboração do Modelo 3, foi utilizada a transformação *arcosseno* / 100 para a variável dependente (ex.: $y = \text{arcosseno}(\text{PHOC}) / 100$). Portanto, para a obtenção do PHOC, foi necessário inverter a transformação com o cálculo do *seno* (ex.: $\text{PHOC} = \text{seno}(y) * 100$).

O modelo elaborado possui quantidade considerável de termos (aproximadamente 260) e está disponibilizado em Garcia (2022). A fim de apresentá-lo de modo mais

sucinto, a seguir é mostrado o comando utilizado para o cálculo da regressão multivariada do Modelo 3, contendo todas as variáveis consideradas.

Função utilizada para elaboração do Modelo 3:

```
teste_phoc_104 <- lm(asin(`PHOC`/100) ~
  People * Brise +
  People * Ventilador +
  People * Veneziana +
  People * VentCruz +
  People * Andar +
  People * Orientacao +
  People * AbsCob +
  People * (sqrt(PAF)) +
  People * Upar +
  People * Morfologia +
  People * Arquetipo +
  People * Tipo_janela +
  People * Ucob +
  Upar * Brise +
  Upar * Ventilador +
  Upar * Veneziana +
  Upar * VentCruz +
  Upar * Andar +
  Upar * Orientacao +
  Upar * AbsCob +
  Upar * (sqrt(PAF)) +
  Upar * Morfologia +
  Upar * Arquetipo +
  Upar * Tipo_janela +
  Upar * Ucob +
  Upar * Lights +
  AbsCob * Brise +
  AbsCob * Ventilador +
  AbsCob * Veneziana +
  AbsCob * VentCruz +
  AbsCob * Andar +
  AbsCob * Orientacao +
  AbsCob * (sqrt(PAF)) +
  AbsCob * Morfologia +
  AbsCob * Arquetipo +
  AbsCob * Ucob +
  Tipo_janela * Brise +
  Tipo_janela * Veneziana +
  Tipo_janela * VentCruz +
  Tipo_janela * Andar +
  Tipo_janela * Orientacao +
  Tipo_janela * (sqrt(PAF)) +
  Tipo_janela * Arquetipo +
  Tipo_janela * Ucob +
  Tipo_janela * Lights +
  Ucob * Brise +
```

```
Ucob * Ventilador +
Ucob * Veneziana +
Ucob * VentCruz +
Ucob * Andar +
Ucob * Orientacao +
Ucob * Morfologia +
Ucob * Tipo_janela +
(sqrt(PAF)) * Brise +
(sqrt(PAF)) * Ventilador +
(sqrt(PAF)) * Veneziana +
(sqrt(PAF)) * VentCruz +
(sqrt(PAF)) * Andar +
(sqrt(PAF)) * Orientacao +
(sqrt(PAF)) * Morfologia +
(sqrt(PAF)) * Arquetipo +
(sqrt(PAF)) * Lights +
Brise * Ventilador +
Brise * VentCruz +
Brise * Andar +
Brise * Orientacao +
Brise * Morfologia +
Brise * Arquetipo +
Brise * Lights +
Ventilador * Veneziana +
Ventilador * VentCruz +
Ventilador * Andar +
Ventilador * Orientacao +
Ventilador * Arquetipo +
Ventilador * Lights +
Veneziana * VentCruz +
Veneziana * Andar +
Veneziana * Orientacao +
Veneziana * Morfologia +
Veneziana * Arquetipo +
VentCruz * Andar +
VentCruz * Orientacao +
VentCruz * Arquetipo +
VentCruz * Lights +
Andar * Orientacao +
Andar * Morfologia +
Andar * Arquetipo +
Andar * Lights +
Orientacao * Morfologia +
Orientacao * Arquetipo +
Orientacao * Lights +
Morfologia * Arquetipo +
Morfologia * Lights +
Arquetipo * Lights
```

```
data=BD_CONFORTO_att26jan)
```

Onde:

People refere-se à densidade de ocupação (pessoas/m²);

Brise refere-se à existência ou não de brise (1 ou 0);

Veneziana refere-se à existência ou não de veneziana nas esquadrias (1 ou 0);

VentCruz refere-se à existência ou não de ventilação cruzada (1 ou 0);

Andar refere-se ao tipo de andar considerado (Térreo, Intermediário ou Cobertura);

Orientacao refere-se à orientação da fachada (N, NE, L, SE, S, SO, O ou NO);

AbsCob refere-se à absorvância solar da cobertura;

PAF refere-se ao Percentual de Abertura da Fachada com janela (%);

Upar refere-se à transmitância térmica das paredes (W/m²K);

Ucob refere-se à transmitância térmica da cobertura (W/m²K);

Morfologia refere-se ao tipo de morfologia de inserção no pavimento (1A ou 2A);

Arquetipo refere-se ao tipo de arquétipo considerado (1, 2, 3 ou 4);

Tipo_janela refere-se ao PAFvent da janela (%);

Lights refere-se ao tipo de iluminação artificial (Fluorescente ou LED).

O Gráfico 62 mostra os dados simulados versus os dados previstos por meio do Modelo 3. Observa-se que o Modelo alcançou R² de 0,97 e que os valores estimados não ultrapassaram o valor de 100. O Gráfico 63 embasa a análise do teste de normalidade dos resíduos de Shapiro-Wilk.

Gráfico 62 - Modelo 3: dados simulados versus dados preditos (PHOC)

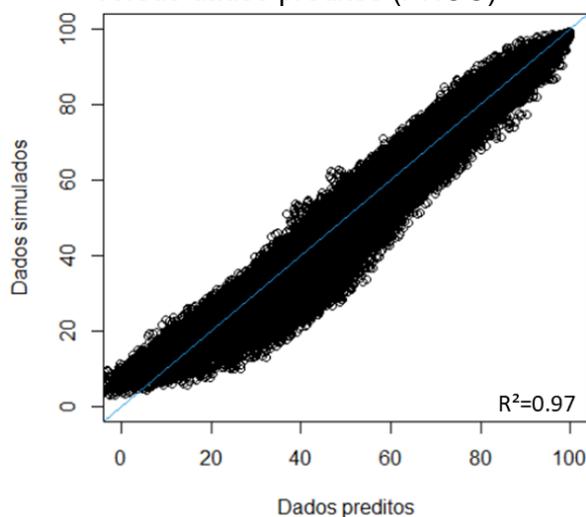
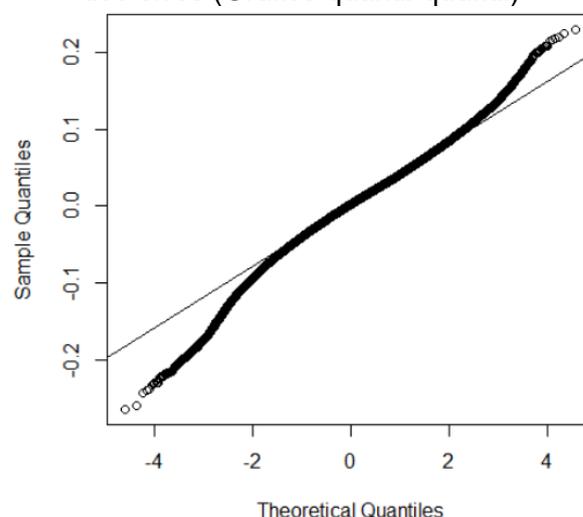


Gráfico 63 - Modelo 3: teste da normalidade dos erros (Gráfico quantil-quantil)



O teste numérico de Shapiro-Wilk só pode ser feito com amostras de até 5mil, por isso, esta análise se deu apenas pela análise visual do Gráfico 63. Observa-se que a linha de pontos se afasta da linha da normalidade nas caudas, indicando que a distribuição dos erros pode ser considerada simétrica, porém com caudas mais pesadas do que as da distribuição normal. Considerando o tamanho do conjunto de dados e a simetria da distribuição dos erros, os testes de hipóteses, principalmente o teste F, podem ser considerados robustos à falta de normalidade na distribuição dos erros. A Tabela 24 apresenta os limites de cada termo do Modelo 3.

Tabela 24 – Limites de cada termo do Modelo 3 (PHOC – salas de aula)

Termo	Tipo	Limites
Ventilador	Categórica	(0=Não / 1=Sim)
Brise	Categórica	(0=Não / 1=Sim)
Ventilação cruzada	Categórica	(0=Não / 1=Sim)
Veneziana	Categórica	(0=Não / 1=Sim)
Lights	Categórica	(0=Fluorescente / 1=LED)
Andar	Categórica	Térreo, Intermediário ou Cobertura
Orientação	Categórica	N, NE, L, SE, S, SO, O ou NO
Arquétipo	Categórica	1, 2, 3 ou 4
Morfologia	Categórica	1A ou 2A
Tipo de janela (PAFvent, %)	Contínua	45 a 70
Densidade de ocupação (pessoas/m ²)	Contínua	0,4 a 1,6
Upar	Contínua	1.8 a 5,7
Ucob	Contínua	0,4 a 3,4
AbsCob	Contínua	0,4 a 0,8
PAF (%)	Contínua	15 a 80

A Figura 72 mostra um trecho do resultado de análise de variância (ANOVA) do Modelo 3, com os quinze primeiros termos. O resultado completo pode ser visto no Apêndice J. Nenhum termo não representado na Figura 72 apresentou valor de “*Sum Sq*” superior aos representados na imagem. A partir da observação da soma dos quadrados (*Sum Sq*), é possível observar que os termos que exercem maior impacto para a predição do PHOC das salas de aula são, em ordem decrescente: a existência de brise, a orientação solar, a densidade de ocupantes, a existência de ventiladores e o andar.

Figura 72 - Análise de variância (ANOVA) do Modelo 3 (PHOC – salas de aula)
Analysis of Variance Table

Response: asin(PHOC/100)

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
People	1	1598.26	1598.26	8.4002e+05	< 2.2e-16	***
Brise	1	3090.73	3090.73	1.6244e+06	< 2.2e-16	***
Ventilador	1	1262.28	1262.28	6.6344e+05	< 2.2e-16	***
Veneziana	1	181.70	181.70	9.5499e+04	< 2.2e-16	***
VentCruz	1	288.53	288.53	1.5165e+05	< 2.2e-16	***
Andar	2	1253.69	626.85	3.2946e+05	< 2.2e-16	***
Orientacao	7	1540.85	220.12	1.1569e+05	< 2.2e-16	***
AbsCob	1	521.31	521.31	2.7399e+05	< 2.2e-16	***
sqrt(PAF)	1	0.18	0.18	9.2967e+01	< 2.2e-16	***
Upar	1	455.98	455.98	2.3966e+05	< 2.2e-16	***
Morfologia	1	142.60	142.60	7.4950e+04	< 2.2e-16	***
Arquetipo	3	279.08	93.03	4.8893e+04	< 2.2e-16	***
Tipo_janela	1	141.84	141.84	7.4547e+04	< 2.2e-16	***
Ucob	1	2.31	2.31	1.2135e+03	< 2.2e-16	***
Lights	1	64.63	64.63	3.3967e+04	< 2.2e-16	***

Para o Modelo 3, o erro médio (preditos / simulados) foi de 4,8%. O erro mediano foi de 2,8% e o erro do percentil 75 foi de 5,5%.

4.7.2.3. Modelo 4: Equação preditiva para GHC das salas de aula

Conforme mostrado na descrição da base de dados quanto ao conforto térmico das salas de aula (item 4.6), os resultados de GHC apresentavam distribuição concentrada à esquerda com calda à direita (Gráfico 47). Por isso, tanto para a definição dos níveis de classificação quanto para o desenvolvimento da equação preditiva, foi realizada a transformação de \log_{10} na variável dependente (ex.: $\log_{10} \text{GHC} = x$). Assim, para obter o valor de GHC, após o cálculo dos preditores lineares, é necessário inverter a transformação elevando 10 ao valor obtido (ex.: $\text{GHC} = 10^x$).

Do mesmo modo que o Modelo 3, o Modelo 4 possui quantidade considerável de termos (aproximadamente 260) e é disponibilizado em Garcia (2022). Esses termos são apresentados a seguir de maneira sucinta a partir do comando utilizado para o cálculo da regressão multilinear. Os significados das abreviações são os mesmos apresentados para o Modelo 3, assim como os tipos e limites das variáveis (Tabela 24).

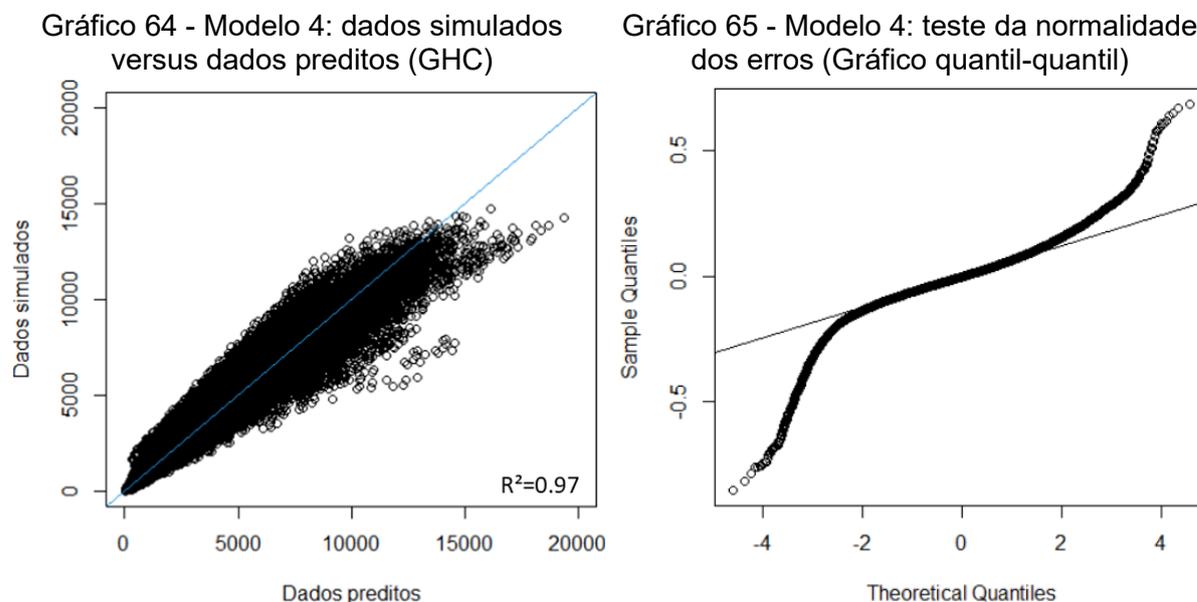
Função utilizada para elaboração do Modelo 4:

```
teste106 <- lm(log10(`Graus_Hora_Calor`) ~
People * Brise +
  People * VentCruz +
  People * Ventilador +
  People * Orientacao +
  People * Andar +
  People * PAF +
  People * AbsCob +
  People * Morfologia +
  People * Arquetipo +
  People * Tipo_janela +
  People * Upar +
  People * Lights +
  People * Ucob +
  AbsCob * Brise +
  AbsCob * Veneziana +
  AbsCob * VentCruz +
  AbsCob * Ventilador +
  AbsCob * Orientacao +
  AbsCob * Andar +
  AbsCob * PAF +
  AbsCob * Morfologia +
  AbsCob * Tipo_janela +
  AbsCob * Upar +
  AbsCob * Lights +
  AbsCob * Ucob +
  PAF * Brise +
  PAF * Veneziana +
  PAF * VentCruz +
  PAF * Ventilador +
  PAF * Orientacao +
  PAF * Andar +
  PAF * Morfologia +
  PAF * Arquetipo +
  PAF * Tipo_janela +
  PAF * Lights +
  PAF * Ucob +
  Upar * Brise +
  Upar * Veneziana +
  Upar * VentCruz +
  Upar * Ventilador +
  Upar * Orientacao +
  Upar * Andar +
  Upar * Morfologia +
  Upar * Arquetipo +
  Upar * Tipo_janela +
```

```
Upar * Lights+
Upar * Ucob +
Tipo_janela * Brise +
Tipo_janela * Veneziana +
Tipo_janela * VentCruz +
Tipo_janela * Ventilador +
Tipo_janela* Orientacao +
Tipo_janela * Andar +
Tipo_janela * Morfologia +
Tipo_janela * Arquetipo +
Tipo_janela * Ucob +
Ucob * Brise +
Ucob * Veneziana +
Ucob * Ventilador +
Ucob * Orientacao +
Ucob * Andar +
Ucob * Morfologia +
Ucob * Arquetipo +
Brise * VentCruz +
Brise * Ventilador +
Brise * Orientacao +
Brise * Andar +
Brise * Morfologia +
Brise * Arquetipo +
Brise * Lights +
Veneziana * VentCruz +
Veneziana * Ventilador +
Veneziana * Orientacao +
Veneziana * Andar +
Veneziana * Morfologia +
Veneziana * Arquetipo +
Veneziana * Lights +
VentCruz * Ventilador +
VentCruz * Orientacao +
VentCruz * Andar +
VentCruz * Arquetipo +
VentCruz * Lights +
Ventilador * Orientacao +
Ventilador * Andar +
Ventilador * Arquetipo +
Ventilador * Lights +
Orientacao * Andar +
Orientacao * Morfologia +
Orientacao * Arquetipo +
Orientacao * Lights +
Andar * Morfologia +
Andar * Arquetipo +
Morfologia * Arquetipo +
Arquetipo * Lights
, data=BD_CONFORTO_att26jan)
```

O Gráfico 64 mostra os dados simulados versus os dados previstos por meio do Modelo 4. Observa-se que o R^2 alcançou o valor de 0,97. O Gráfico 65 mostra que a linha de pontos se afasta da linha da normalidade nas caudas, indicando que a distribuição dos erros pode ser considerada simétrica, porém com caudas mais

pesadas do que as de distribuição normal. Do mesmo modo que no Modelo 3, considerando o tamanho do conjunto de dados e a simetria da distribuição dos erros, os testes de hipóteses (principalmente o teste F) podem ser considerados robustos à falta de normalidade na distribuição dos erros.



A Figura 73 mostra um trecho do resultado de análise de variância (ANOVA) do Modelo 4. O resultado completo pode ser visto no Apêndice K. É possível observar que os termos que exercem maior impacto para a predição do GHC das salas de aula são, em ordem decrescente: a existência de brise, a orientação solar, o andar, a densidade de ocupantes e a existência de ventiladores. Estas são as mesmas variáveis mais impactantes para o Modelo 3, apenas com diferença na ordem.

Figura 73 - Análise de variância (ANOVA) do Modelo 4 (GHC – salas de aula)
Analysis of Variance Table

Response: log10(Graus_Hora_Calor)

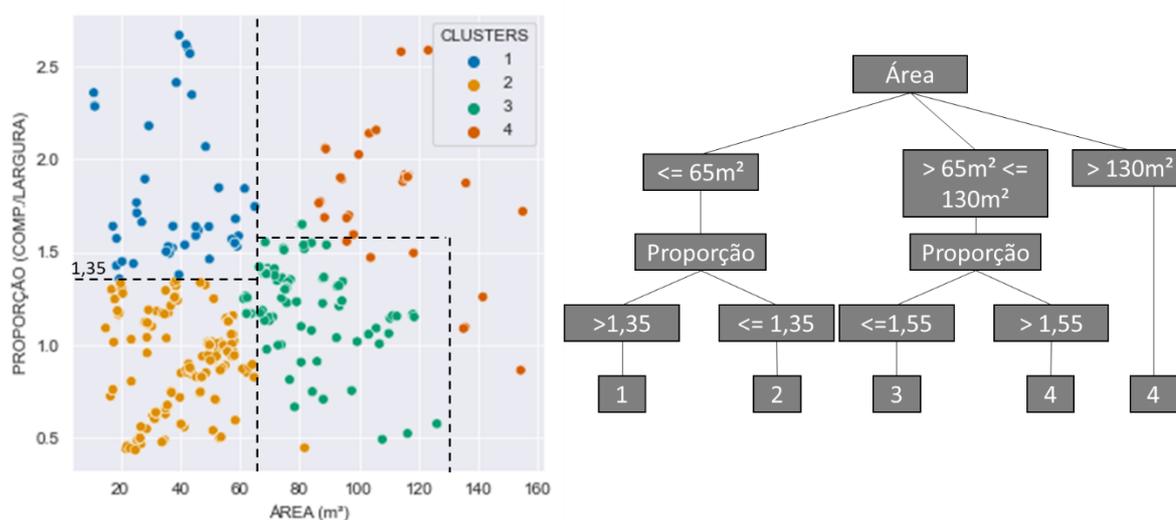
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
People	1	3566.3	3566.3	6.8791e+05	< 2.2e-16	***
Brise	1	9063.9	9063.9	1.7484e+06	< 2.2e-16	***
VentCruz	1	635.8	635.8	1.2265e+05	< 2.2e-16	***
Ventilador	1	4232.1	4232.1	8.1634e+05	< 2.2e-16	***
Orientacao	7	4883.3	697.6	1.3456e+05	< 2.2e-16	***
Andar	2	4863.3	2431.7	4.6905e+05	< 2.2e-16	***
PAF	1	622.8	622.8	1.2013e+05	< 2.2e-16	***
AbsCob	1	1882.6	1882.6	3.6314e+05	< 2.2e-16	***
Morfologia	1	317.6	317.6	6.1269e+04	< 2.2e-16	***
Arquetipo	3	236.0	78.7	1.5174e+04	< 2.2e-16	***
Tipo_janela	1	241.6	241.6	4.6605e+04	< 2.2e-16	***
Upar	1	96.4	96.4	1.8591e+04	< 2.2e-16	***
Lights	1	193.0	193.0	3.7237e+04	< 2.2e-16	***
Ucob	1	10.8	10.8	2.0899e+03	< 2.2e-16	***
Veneziana	1	247.0	247.0	4.7649e+04	< 2.2e-16	***
People:Brise	1	147.9	147.9	2.8538e+04	< 2.2e-16	***

Para o Modelo 4, o erro médio (preditos / simulados) foi de 12%. O erro mediano foi de 9,5% e o erro do percentil 75 foi de 16,9%.

4.7.3. Identificação dos arquétipos para salas de aula além da amostra

Como visto anteriormente, as equações preditivas dos Modelos 3 e 4 (PHOC e GHC, respectivamente) necessitam como dado de entrada o tipo de arquétipo a ser considerado. Tendo em vista a possibilidade da análise de salas de aula diferentes das amostradas e utilizadas para a clusterização, foi desenvolvida uma regra simplificada para a identificação do arquétipo a ser considerado a partir do comprimento e da largura de uma sala de aula. A Figura 74 ilustra esta regra, que foi automatizada em planilha Excel para a utilização das equações.

Figura 74 – Regra simplificada para identificação do tipo de arquétipo para salas de aula além das consideradas na amostra



Entende-se que a regra estabelecida compreende uma simplificação, porém considera-se que esta simplificação seja pertinente para que seja possível utilizar as equações em salas de aula além da amostra (por exemplo, salas de novos prédios ainda não construídos), de modo que não seja necessário realizar novos experimentos de clusterização na ocasião da atualização da base de dados.

4.8. Sistema de classificação

4.8.1. Classificação quanto ao EUI

A classificação de EUI seguiu as equações indicadas no capítulo de Metodologia. Os resultados para cada prédio serão apresentados junto à classificação de conforto térmico médio das salas de aula no quadro de *benchmarking* que será apresentado posteriormente.

4.8.2. Classificação de conforto térmico das salas de aula

O Gráfico 66 mostra a distribuição da variável dependente PHOC e os limites de classificação obtidos a partir do cálculo dos quintis. O Gráfico 67 mostra a distribuição dos GHC depois da transformação em escala logarítmica, e os limites de classificação a partir dos quintis.

Gráfico 66 - Percentis de classificação para o PHOC das salas de aula

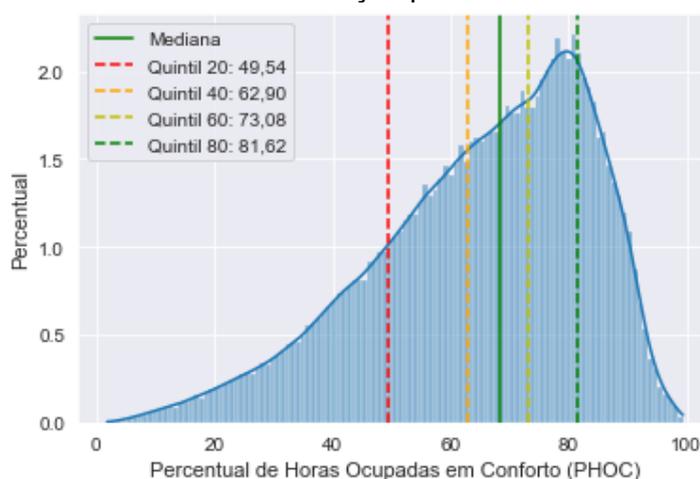
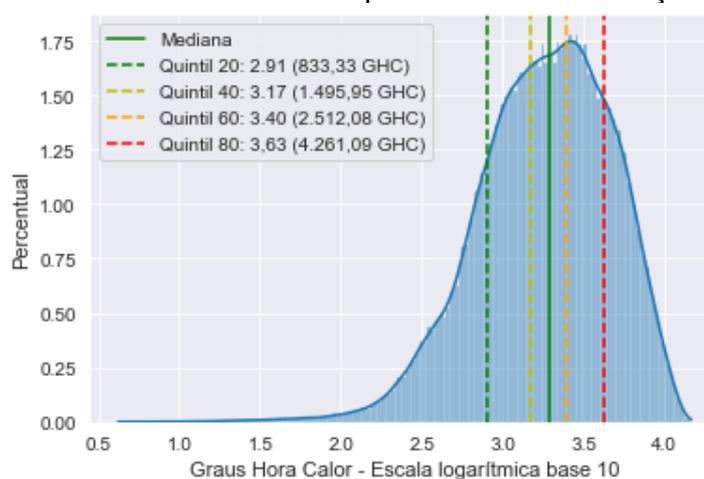
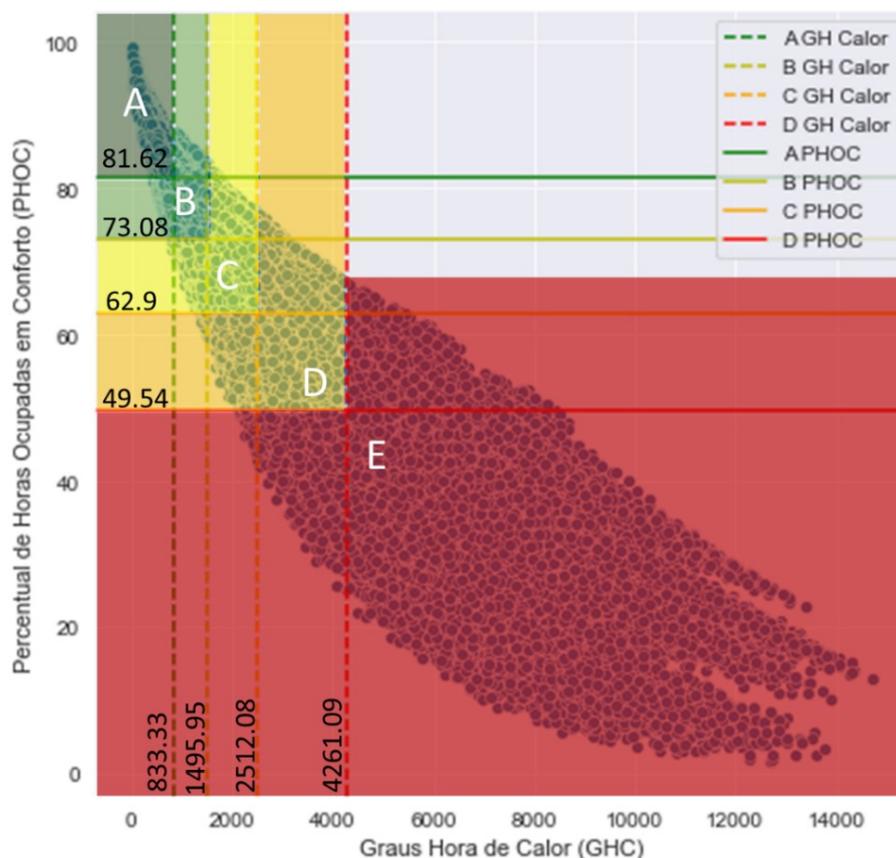


Gráfico 67 - Distribuição em escala logarítmica de base 10 dos Graus Hora de Calor das salas de aula e seus percentis de classificação



A Figura 75 mostra a nuvem de pontos de PHOC e GHC com a inserção dos limites identificados para ambas as variáveis. A partir disto, são identificadas áreas para cada nível de classificação, de A a E.

Figura 75 - Limites de classificação para PHOC e GHC das salas de aula.



4.8.2.1. Análise dos PHOC e GHC de acordo com níveis de classificação

A análise de PHOC e GHC de acordo com os níveis de classificação foi feita para obter, além do dado numérico, exemplos de como os níveis indicados se comportam ao longo do ano e as características arquitetônicas relacionadas a eles. Os Gráficos 68 a 72 a seguir ilustram casos escolhidos que representam as situações observadas em cada nível de conforto, de A a E, nos pontos indicados na Figura 76.

Figura 76 - Indicação dos pontos de classificação de conforto térmico dos exemplos analisados

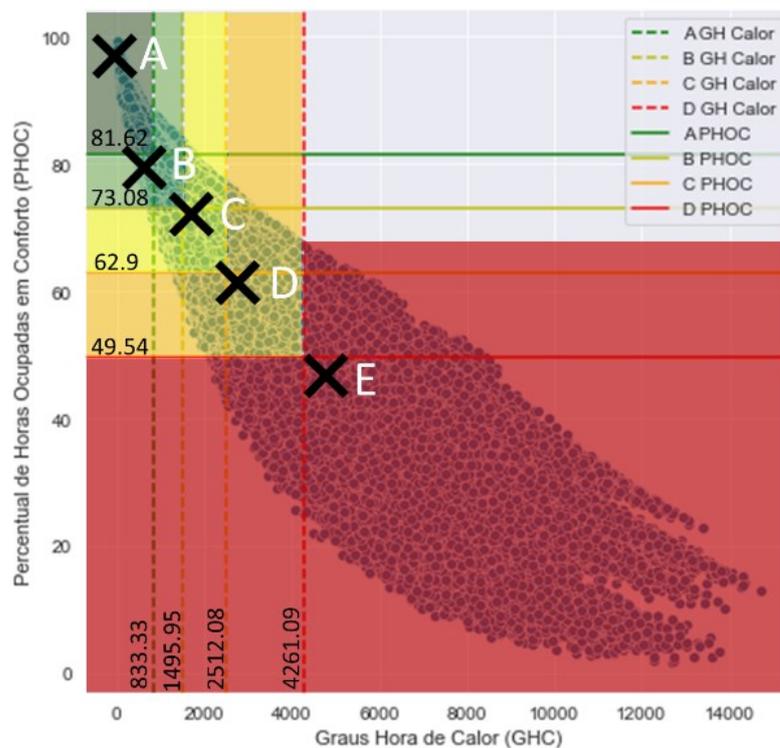
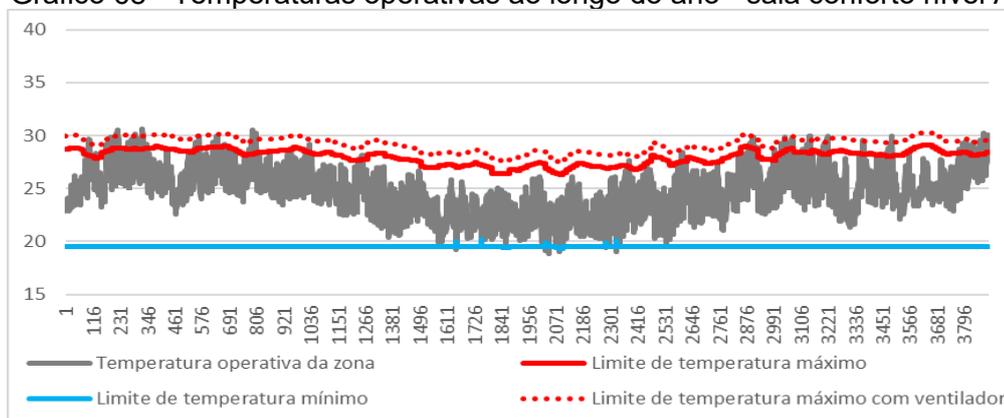
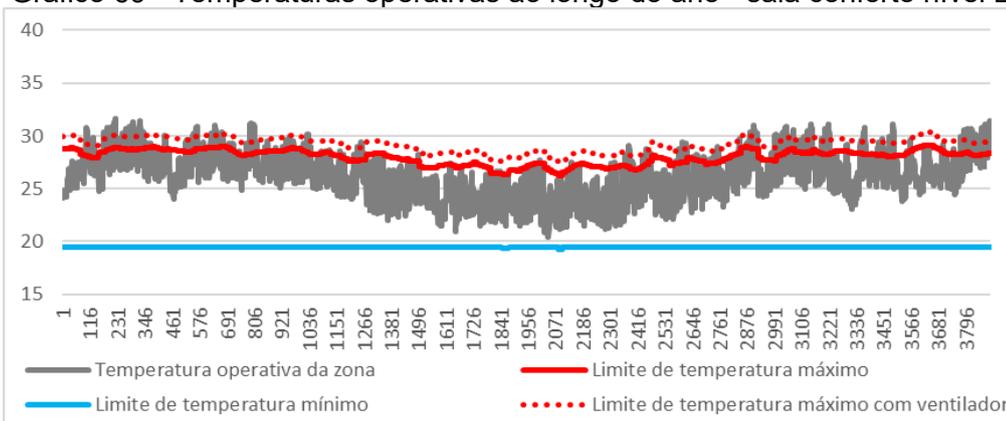


Gráfico 68 - Temperaturas operativas ao longo do ano - sala conforto nível A



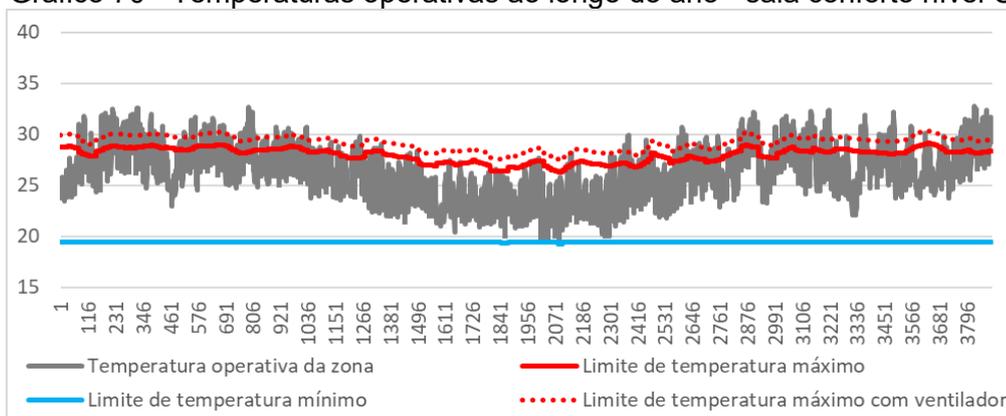
Nível A: PHOC: 98,3% / GHC: 20 / Orientação: Nordeste / Existência de brise: Sim / Existência de ventilação cruzada: Sim / **Existência de ventilador: Sim** / Existência de veneziana: Sim / Densidade de pessoas: 0,4 pess./m² / Andar: Térreo / PAF: 60% / PAF_{VENT}: 45% / Arquétipo: 2 / Morfologia: 2A / U_{COB}: 0,47 W/m²K / U_{PAR}: 1,78 W/m²K / α_{Cob}: 0,4 / α_{Par}: 0,4 / Iluminação: LED.

Gráfico 69 - Temperaturas operativas ao longo do ano - sala conforto nível B



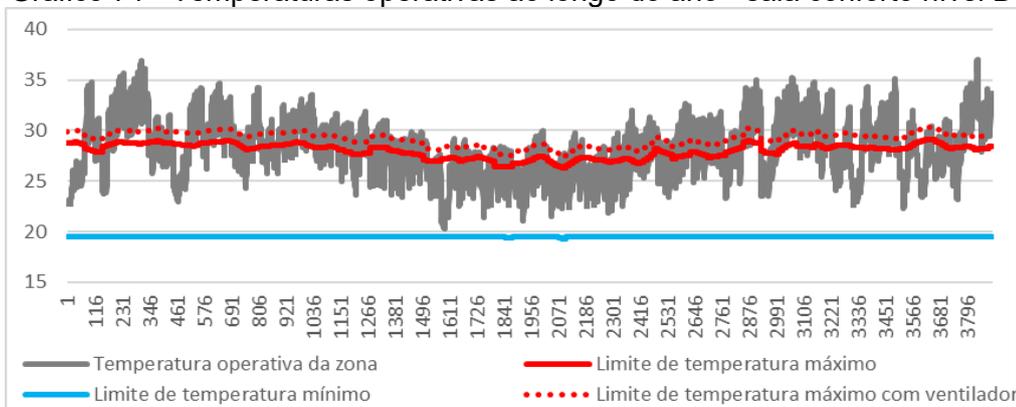
Nível B: PHOC: 79,7% / GHC: 802 / Orientação: Sul / Existência de brise: Sim / Existência de ventilação cruzada: Não / **Existência de ventilador: Não** / Existência de veneziana: Sim / Densidade de pessoas: 0,83 pess./m² / Andar: Térreo / PAF: 60% / PAF_{VENT}: 45% / Arquétipo: 2 / Morfologia: 1A / U_{COB}: 2,1 W/m²K / U_{PAR}: 2,4 W/m²K / α_{Cob}: 0,8 / α_{Par}: 0,7 / Iluminação: LED.

Gráfico 70 - Temperaturas operativas ao longo do ano - sala conforto nível C



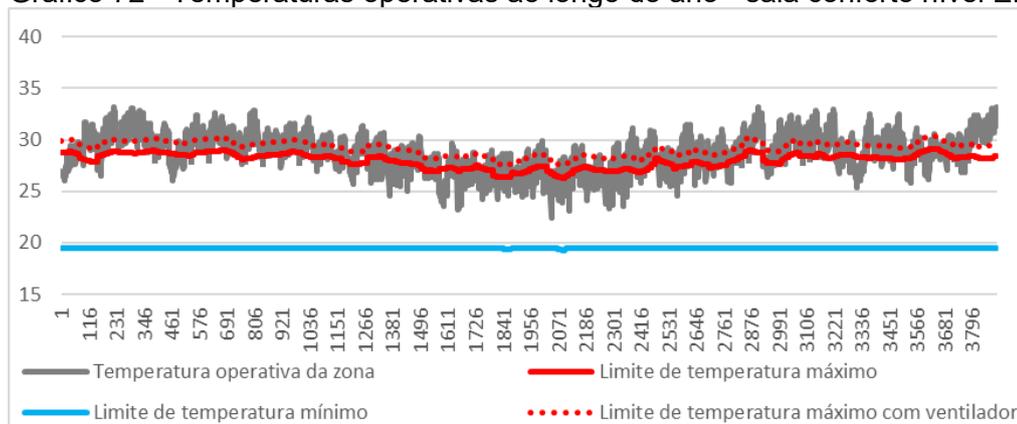
Nível C: PHOC: 71,5% / GHC: 1495 / Orientação: Leste / Existência de brise: Não / Existência de ventilação cruzada: Não / **Existência de ventilador: Não** / Existência de veneziana: Não / Densidade de pessoas: 0,83 pess./m² / Andar: Térreo / PAF: 60% / PAF_{VENT}: 70% / Arquétipo: 2 / Morfologia: 1A / U_{COB}: 3,4 W/m²K / U_{PAR}: 4,3 W/m²K / α_{Cob}: 0,8 / α_{Par}: 0,7 / Iluminação: LED.

Gráfico 71 - Temperaturas operativas ao longo do ano - sala conforto nível D



Nível D: PHOC: 61,3% / GHC: 2986 / Orientação: Nordeste / Existência de brise: Sim / Existência de ventilação cruzada: Não / **Existência de ventilador: Sim** / Existência de veneziana: Não / Densidade de pessoas: 1,06 pess./m² / Andar: Cobertura / PAF: 30% / PAF_{VENT}: 70% / Arquétipo: 2 / Morfologia: 1A / U_{COB}: 3,44 W/m²K / U_{PAR}: 1,78 W/m²K / α_{Cob}: 0,8 / α_{Par}: 0,7 / Iluminação: Floresc.

Gráfico 72 - Temperaturas operativas ao longo do ano - sala conforto nível E.



Nível E: PHOC: 30,3% / GHC: 4320 / Orientação: Nordeste / Existência de brise: Sim / Existência de ventilação cruzada: Não / **Existência de ventilador: Não** / Existência de veneziana: Não / Densidade de pessoas: 1,06 pess./m² / Andar: Cobertura / PAF: 15% / PAF_{VENT}: 70% / Arquétipo: 2 / Morfologia: 1A / U_{COB}: 0,43 W/m²K / U_{PAR}: 1,78 W/m²K / α_{Cob}: 0,4 / α_{Par}: 0,4 / Iluminação: Floresc.

No Gráfico 68, pode ser visto um exemplo de classificação A. Observa-se que as temperaturas operativas se enquadram nos limites máximos considerando a utilização de ventiladores. Esta característica está aliada à presença de venezianas nas janelas, proteção solar da fachada e baixa densidade de ocupação (0,4 pessoas/m²). Além disso, a sala localiza-se no andar térreo e possui paredes claras. Caso não possuísse ventiladores, a sala teria temperaturas operativas acima do limite superior nos meses de janeiro, fevereiro, setembro, outubro e dezembro.

O Gráfico 69 apresenta um exemplo de classificação B. Diferentemente do exemplo anterior, esta sala não possui ventilador. Possui média densidade de ocupantes (0,83 pessoas/m²) e paredes escuras encontra-se no andar térreo e possui venezianas, que permitem a ventilação natural de maneira permanente. Observa-se extrapolação das temperaturas limite em aproximadamente 3°C nos meses de janeiro a março, setembro, outubro e dezembro.

O Gráfico 70 mostra um exemplo de classificação C. Neste caso, a amplitude de extrapolação das temperaturas limites foi superior ao do caso B, da ordem de aproximadamente 5°C. Os períodos foram similares, janeiro a março, também com desconforto mais acentuado em agosto, setembro, outubro e dezembro. Este caso também não possuía ventiladores, com o agravante de não apresentar proteção solar para aberturas na fachada leste. Também não apresenta venezianas para ventilação natural permanente.

No exemplo de nível D (Gráfico 71) a temperatura operativa da sala de aula ultrapassa os 35 °C em janeiro, setembro, outubro e dezembro. Esta sala de aula possui ventiladores, porém tem alta densidade de ocupação (1,06 pessoas/m²) e se localiza na cobertura, possuindo envoltória escura e pouco isolada junto à ausência de estratégia de ventilação cruzada ou venezianas.

Por último, o exemplo de classificação E (Gráfico 72) mostra um caso para o qual as temperaturas operativas fora da faixa de conforto são de 3 a 4°C, porém ocorrem ao longo de todo o ano, incluindo todos os meses do semestre letivo. O resultado representa uma sala com proteção solar, localizada na cobertura, com envoltória de cor clara. Apesar de ter cobertura mais isolada do que os exemplos anteriores, a sala possui alta densidade de ocupação, poucas aberturas para ventilação natural e não possui venezianas. Desta forma, o calor gerado no ambiente não consegue ser dissipado. Observa-se, no Gráfico 72, que, mesmo se houvesse uso de ventiladores, as temperaturas operativas estariam acima do limite de temperatura (pontilhado em vermelho) em todo o ano.

4.9. *Benchmarking* das Unidades Acadêmicas dos campi: EUI médio e conforto térmico médio das salas de aula

O método descrito neste trabalho foi aplicado nas Unidades Acadêmicas da UFMG. A análise de energia foi contemplada em todos os edifícios, enquanto a análise do conforto térmico das salas de aula, até o momento, foi aplicada a 17 das 27 Unidades Acadêmicas. Os resultados são apresentados na Figura 77, nos Gráficos 73 a 75 e nas Tabelas 25 e 26.

Figura 77 – Quadro de *benchmarking* das unidades acadêmicas da UFMG: EUI médio e conforto térmico médio das salas de aula

QUADRO DE BENCHMARKING DAS UNIDADES ACADÊMICAS DA UFMG - CONFORTO TÉRMICO DAS SALAS DE AULA E EUI MÉDIOS						
CONFORTO TÉRMICO SALAS DE AULA	A	ICEX CAD1	CAD2 FAE	CAD3	FAFAR ENG FAFICH/ECI	
	B	EMU	ENF/NU	FACE	ENG-BL.4 VET	
	C			ODT ENG-BL.3		MED
	D				EAD	
	E					
		E	D	C	B	A
ENERGIA (EUI MÉDIO)						

LEGENDA:	
Bom	Prédios do grupo sem laboratórios de equipamentos pesados e sem consideração do ar condicionado
Médio	Prédios do grupo com laboratórios de equipamentos pesados e com consideração do ar condicionado
Ruim	
Muito ruim	

Gráfico 73 – EUI médio das UAs da UFMG

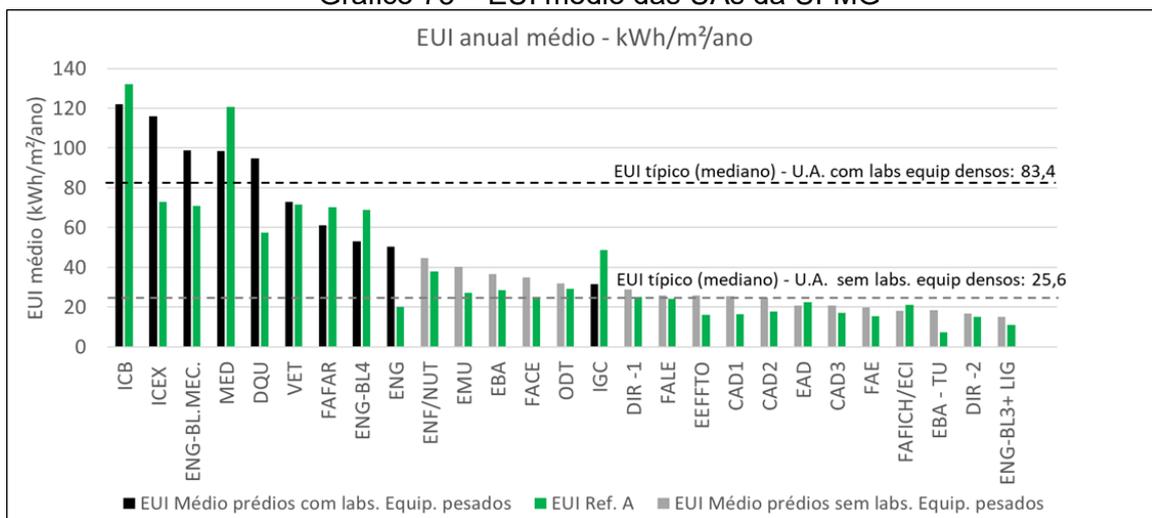


Gráfico 74 – PHOC e GHC anuais médios das UAs da UFMG

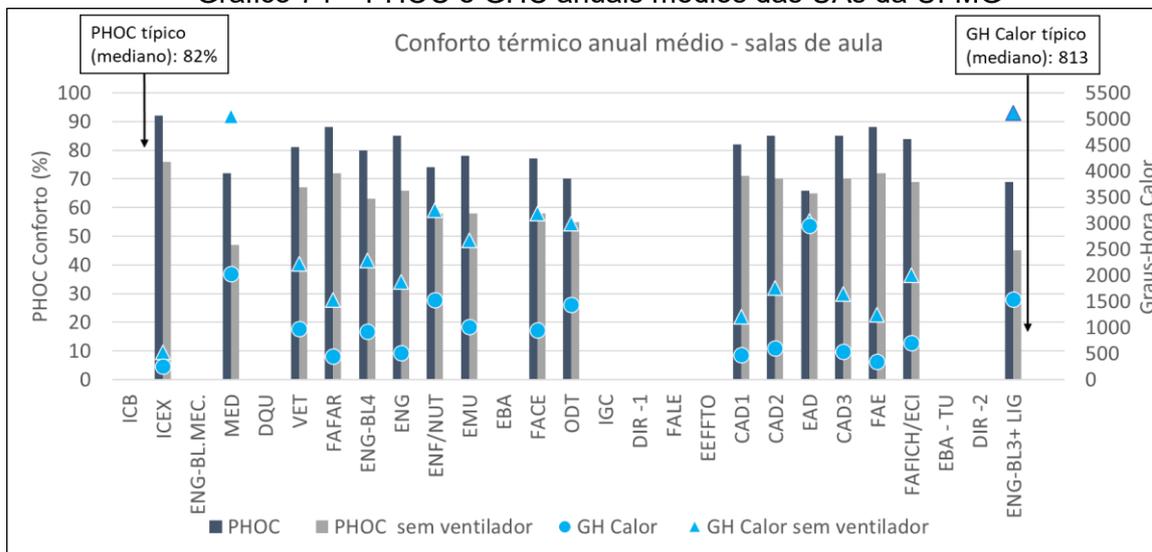


Gráfico 75 – Proporções de classificações de conforto térmico das salas de aula por UA

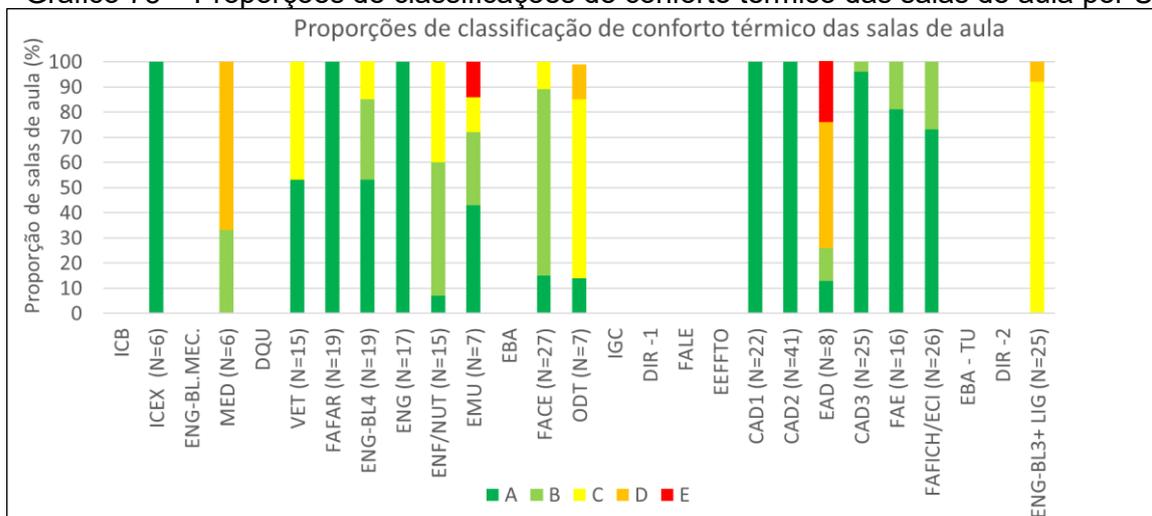


Tabela 25 – Resumo de valores e classificações: EUI médio e conforto térmico

TABELA RESUMO						
PRÉDIO	EUI Médio	EUI Ref. A	Classificação EUI	PHOC médio	GHC médio	Classificação Conforto
ICB	122.12	131.05	A			
ICEX	116.02	77.27	E	92	261.43	A
ENG-BL.MEC.	98.85	70.76	D			
MED	98.51	120.71	A	72	2035.60	C
DQU	94.86	57.31	D			
VET	72.89	71.61	B	81	973.07	B
FAFAR	61.02	70.15	B	88	444.78	A
ENG-BL4	53.22	68.79	B	80	919.08	B
ENG	50.41	20.04	B	85	508.78	A
ENF/NUT	44.63	38.07	D	74	1535.24	B
EMU	40.17	27.16	E	78	1016.30	B
EBA	36.50	28.57	D			
FACE	34.87	25.32	C	77	950.12	B
ODT	32.01	29.09	C	70	1443.65	C
IGC	31.55	48.67	A			
DIR -1	29.02	25.07	C			
FALE	25.96	24.22	D			
EEFFTO	25.84	16.12	D			
CAD1	25.56	16.47	E	82	481.40	A
CAD2	24.89	17.69	D	85	603.86	A
EAD	20.75	22.59	B	66	2954.15	D
CAD3	20.68	17.00	C	85	536.34	A
FAE	19.82	15.47	D	88	341.17	A
FAFICH/ECI	18.17	21.02	B	84	707.45	A
EBA - TU	18.29	7.49	D			
DIR -2	16.86	14.99	B			
ENG-BL3+ LIG	15.07	11.03	C	69	1536.63	C

A partir do Quadro de *benchmarking* (Figura 77), é possível notar que existem prédios distribuídos nas diferentes escalas de classificação. Considera-se que esta é uma indicação de que os sistemas de classificação estão aptos a ranquear os edifícios de acordo com os critérios utilizados. Entre os prédios analisados, 18% se localizam na zona de diagnóstico “Ruim”, 53% se localizam na zona de “Médio” e 29% na zona de “Bom”. Estas classes de diagnóstico podem ser utilizadas para o embasamento da tomada de decisão em relação a estratégias de melhoria da eficiência energética dos edifícios. Observa-se que houve prédios com avaliação A ou B em energia, mas que apresentaram níveis C ou D no conforto térmico das salas de aula, como os prédios da Medicina (MED) e Arquitetura (EAD). Isso é um indício de que existem casos em

que há boas condições de consumo energético, porém más condições de conforto térmico nos ambientes de salas de aula, reforçando a pertinência da análise integrada dos dois aspectos.

O Gráfico 73 apresenta os EUI médio de cada prédio junto ao EUI de referência para o nível A, que considera os fatores de alteração (DPI de iluminação, a presença de ventiladores e os tipos de ar-condicionado, a depender do Modelo utilizado), otimizados em seus valores mínimos. São apresentados também os EUI típicos por grupos: os prédios com laboratórios de equipamentos densos possuem EUI médio típico de 83,4 kWh/m²/ano e os prédios que não possuem estes tipos de laboratórios possuem EUI médio típico de 25,6 kWh/m²/ano. Estes valores podem ser considerados *benchmarks* simples, assim como foi visto na literatura. Esta informação é válida para que se possa comparar tanto os prédios do estudo de caso, como os prédios da UFMG frente a outros estudos da literatura.

Em relação à energia, é possível perceber que os prédios que passaram por reformas no sistema de iluminação com a troca de lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED alcançaram nível A (ICB e MED). Os demais prédios alcançaram níveis variados de classificação, onde os principais fatores de impacto foram o DPI de iluminação, a presença de ventiladores e os tipos de ar-condicionado adotados. O uso do ar-condicionado tipo *split* foi considerado mais eficiente do que o de janela, como visto nos estimadores do Modelo 2.

Observa-se que o IGC se conforma como um *outlier* do grupo de prédios com laboratórios densos. Este *outlier* não foi retirado do grupo pois era desejado que todos os prédios do conjunto pudessem ser analisados tanto em energia como em conforto térmico. Além disso, tendo em vista a pouca quantidade de edifícios nesta amostra, a redução de um indivíduo causaria importante impacto para a elaboração dos modelos. De fato, foram realizados testes de elaboração dos Modelos 1 e 2 considerando o IGC como pertencente ao grupo dos prédios sem laboratórios densos. Ambos os modelos apresentaram desempenho inferior aos modelos originais apresentados neste trabalho.

Em relação ao conforto térmico, percebeu-se a maioria dos edifícios atingiu classificações A e B. Isto pode ser justificado pelo fato de as salas de aula, em sua maioria, possuírem ventiladores, sendo essa uma variável importante para o limite

superior de temperaturas aceitáveis. Os prédios que alcançaram níveis C de conforto térmico apresentam salas de aula com altas densidades de ocupação, com média de 0,9 o Bloco 3 da Engenharia (ENG-BL3), por exemplo, de modo que mesmo a presença de ventiladores não é suficiente para elevar os níveis estimados de conforto térmico. No caso da EAD, observou-se o nível médio de conforto térmico mais baixo. Verificou-se, nas salas amostradas analisadas, que a maioria não apresentava ventiladores de teto nem proteção solar.

Para que fosse possível a visualização do cenário de conforto térmico das salas de aula sem o uso de equipamentos para ventilação, o Gráfico 74 e a Tabela 26 mostram o cenário sem o uso dos ventiladores.

Tabela 26 – Cenário de classificações de conforto térmico das salas de aula sem a consideração de ventiladores

CENÁRIO - SEM VENTILADOR			
PRÉDIO	PHOC sem ventilador médio	GH C sem ventilador médio	Classificação Conforto
ICB			
ICEX	76	528.57	B
ENG-BL.MEC.			
MED	47	5056.69	E
DQU			
VET	67	2229.75	C
FAFAR	72	1525.70	C
ENG-BL4	63	2283.00	C
ENG	66	1870.98	C
ENF/NUT	58	3252.93	D
EMU	58	2677.19	D
EBA			
FACE	58	3189.11	D
ODT	55	2992.38	D
IGC			
DIR -1			
FALE			
EEFFTO			
CAD1	71	1206.45	C
CAD2	70	1755.82	C
EAD	65	3040.31	D
CAD3	70	1640.05	C
FAE	72	1251.40	B
FAFICH/ECI	69	2004.34	C
EBA - TU			
DIR -2			
ENG-BL3+ LIG	45	5111.58	E

Observa-se que os níveis tanto de PHOC como de GHC sofrem significativa piora sem estes equipamentos, apresentando maioria de classificações C e D. Percebe-se, com o Gráfico 74, que no caso em que houve pouca diferença entre os cenários com e sem ventiladores de teto, a diferença de classificação foi de apenas um nível, como ocorreu no edifício ICEX (Tabelas 25 e 26). Tal fato aponta que o projeto das salas nessa Unidade Acadêmica está mais adequado a fornecer níveis aceitáveis de conforto térmico sem o uso de equipamentos do que nos edifícios onde a diferença se mostrou grande, como no ENG-BL3, que passou de C para E. Observou-se que no ICEX, além de haver janelas máximo-ar, a média de densidade de ocupação foi de 0,7 pessoas/m². Tal constatação sugere que os projetos arquitetônicos podem ser aprimorados para que alcancem melhores condições de conforto térmico de forma passiva. Os valores típicos de PHOC e GHC indicados no Gráfico 74 podem ser considerados *benchmarks* simples para o conforto térmico das salas de aula, servindo como base para comparação.

A partir do Gráfico 75, pode-se perceber que, apesar de haver uma classificação média de conforto térmico para o conjunto de salas de aula de cada prédio, existem salas com diferentes classificações dentro do mesmo prédio. Portanto, este gráfico compõe o sistema de *benchmarking* para que os distintos níveis de conforto térmico médio anual nas salas de aula de um prédio possam ser visualizados e, assim, casos críticos possam ser mais facilmente identificados. Por exemplo, o prédio EMU (Escola de Música) apresentou C como classificação média de conforto térmico das salas de aula, porém uma de suas salas possui classificação E (sala no pavimento de cobertura). O mesmo efeito foi verificado no prédio da EAD. Tal fato confirma a pertinência da identificação dos diferentes níveis de conforto térmico das salas de aula existentes em cada edifício.

5. DISCUSSÃO

O trabalho envolveu pesquisas de contextualização acerca do tema de eficiência energética em universidades e obteve seu corte do estudo de caso e metodologia baseados em respostas de um questionário *online* aplicado em todo o território nacional. Verificou-se a pertinência do estudo do conforto térmico junto ao *benchmarking* energético de edifícios, assim como indicado por Borgstein e Lamberts (2014), Borgstein, Lamberts e Hensen (2016) e Gnecco *et al.* (2022). No âmbito das universidades, verificou-se diferentes características de tipos de condicionamento de ar e experiências térmicas entre universidades públicas e privadas. No que tange às instituições públicas, verificou-se a predominância do tipo de ventilação natural e situações de experiência térmica mais crítica nas salas de aula. Assim, o estudo de caso envolveu uma universidade pública brasileira, na qual foi analisado o EUI por tipos de edifício e o sistema de *benchmarking* integrado entre EUI e conforto térmico se deu para as Unidades Acadêmicas, com foco da parte de conforto térmico das salas de aula.

O *benchmarking* é considerado um caminho inicial para a promoção do uso eficiente de energia, a partir da avaliação do desempenho dos edifícios existentes. Os resultados de um *benchmarking* podem ser utilizados para encorajar os responsáveis por edifícios com baixo desempenho a adotar medidas de otimização, auxiliando no gerenciamento do uso de energia. No presente trabalho, foram utilizadas as abordagens *top-down* e *bottom-up* para o desenvolvimento do *benchmarking*, conforme definições de Hong *et al.* (2013) e Burman *et al.* (2014). Considera-se que as duas abordagens foram utilizadas pois, tanto o EUI dos edifícios foi comparado, como houve o levantamento de dados referente às características dos edifícios para subsidiar o desenvolvimento das equações de regressão linear. Assim como citado por Veiga *et al.* (2021) e Veloso, Souza e Santos (2021) a etapa de levantamento de dados e construção das bases de dados foi a mais dispendiosa em termos de tempo, durando aproximadamente três anos.

Os estudos de contextualização, com o levantamento de características arquitetônicas e a aplicação do questionário, sugerem que os cenários arquitetônicos dos edifícios, de predominância da ventilação natural e de sensação, preferência e aceitabilidades térmicas observados na UFMG também podem ser encontrados em outras

universidades, principalmente em climas similares (ZB3). Ademais, os levantamentos de literatura realizados para contextualizar as características arquitetônicas das salas de aula mostraram que as salas de aula da UFMG apresentaram maior variabilidade em termos de área, comprimento e largura do que as salas de outros locais do país. A maior diferença percebida entre as salas de aula da UFMG e as de demais localidades foi o tempo de funcionamento dos ambientes, onde as primeiras funcionavam em três turnos e as segundas em dois turnos.

5.1. Quanto ao consumo de energia (EUI)

Em relação à elaboração da base de dados, pode-se considerar que as amostras utilizadas de 63 prédios para os *campi* como um todo e de 27 prédios para as Unidades Acadêmicas têm tamanhos similares e, em vezes, superiores aos utilizados por trabalhos anteriores, como os de Li e Chen (2021), Wang (2016) e Chung e Rhee (2014), que utilizaram 24, 51 e 11 prédios, respectivamente. A escala da área construída dos edifícios analisados da UFMG (aproximadamente 2 mil a 40 mil m²) também foi similar à utilizada por Chung e Rhee (2014), que analisaram prédios de 3,5 a 40 mil m². A revisão de literatura de Khoshbakht, Gou e Dupre (2018) mostrou que os estudos de *benchmarking* em edifícios educacionais consideraram a média de consumos anuais de 1 a 4 anos. De maneira similar, o presente estudo utilizou o consumo médio de 5 anos. A Tabela 27 mostra os EUI médios da UFMG em Belo Horizonte junto a outros indicados na literatura.

Em relação a edifícios de mesmo tipo de uso, o EUI geral dos *campi* da UFMG em Belo Horizonte é aproximadamente 4 vezes inferior comparado ao EUI do *campus* na Austrália (KHOSHBAKHT; GOU; DUPRE, 2018) e 2 vezes inferior aos EUI de *campus* em Taiwan (WANG, 2016), e da China (DING *et al.*, 2018). Em relação aos tipos de uso dos prédios, as Unidades Acadêmicas da UFMG apresentaram EUI médio aproximadamente 4 vezes inferior às do estudo de Khoshbakht, Gou e Dupre (2018) e 4,5 vezes inferior às indicadas por Chung e Rhee (2014). Percebe-se como principal diferença, além do clima, o tipo de condicionamento dos edifícios. Enquanto nos estudos internacionais os *campi* são condicionados de forma artificial, na UFMG a maior parte dos edifícios é ventilada naturalmente. Em relação a todos os estudos elencados, o EUI médio total da UFMG foi mais próximo ao do estudo em Taiwan, onde havia prédios em cidade com a mesma classificação climática de Belo Horizonte.

Tabela 27 – Valores de EUI médios medianos calculados para a UFMG, os valores de EUI relatados por pesquisas anteriores, seus climas e amostras consideradas

Fonte	País	Clima Köppen (KOTTEK <i>et al.</i> , 2006)	Cond. de ar	Amostra	EUI médio mediano (kWh/m ² /ano)
UFMG	Brasil	Cwa			
TOTAL			CA, VN e M	61	40
UNID. ACADÊMICAS			VN e M	27	33
LABORATÓRIOS			-	11	119
ADMINISTRATIVOS			-	5	68
SERVIÇOS/OUTROS			-	19	24
Wang (2016)	Taiwan	Cwa, Cfa, Cwb, Am e Aw	CA	51	72
Sekki, Airaksinen e Saari (2015)	Finlândia	Dfb	CA	13	229
Li e Chen (2021)	Canada	Dfc	CA	24	389
Ding <i>et al.</i> (2018)	China	Cfa	CA	18	91
Khoshbakht, Gou e Dupre (2018)	Australia	Cfa			
TOTAL			CA	80	170
UNID. ACADÊMICAS			CA	-	145
LABORATÓRIOS			CA	-	379
Shukri, Jailani e Hauashdh (2022)	Malásia	Af	CA	13	108
Chung e Rhee (2014)	Coréia do Sul	Dwa			
TOTAL			CA	11	223
UNID. ACADÊMICAS			CA	-	151
UNID. ACADÊMICAS			CA	-	273
COM LABS.					

CA: Condicionamento artificial (aquecimento ou refrigeração), VN: Ventilação Natural, M: Misto e N/A: Não informado.

Fonte: Elaborado pela autora, 2022

No estudo de Khoshbakht, Gou e Dupre (2018), os prédios de laboratórios apresentaram EUI médio aproximadamente 2,5 vezes maior do que os prédios de unidades acadêmicas. No caso da UFMG, esta proporção foi de 3,6 vezes. Sartor *et al.* (2000) indicaram que prédios de laboratórios podem consumir de 4 a 100 vezes mais por área do que outros edifícios. Portanto, a diferença percebida no presente estudo está congruente com trabalhos anteriores da literatura.

O desenvolvimento do *benchmarking* envolveu abordagem similar à de Federspiel, Zhang e Arens (2002), com a separação das bases de dados entre prédios com e sem laboratórios de equipamentos densos para maior precisão dos modelos. A análise da

utilização dos tipos de uso dos espaços para a construção das equações também se mostrou útil, assim como visto por Chung e Rhee (2014), Li e Chen (2021) e CBCS, PROCEL e INMETRO (2021a e 2021b). Ressalta-se que os tipos de usos dos espaços da universidade estudada sofrem alterações ao longo do tempo. Por isso, considera-se que a presença de variáveis que indiquem a relação do EUI médio à utilização dos espaços nos modelos preditivos é válida para auxiliar a predição de EUI a partir da alteração de usos em ambientes de edifícios existentes à medida que haja reformas de alteração de usos ou na construção de novas edificações.

Em relação aos modelos preditivos, estudos que desenvolveram *benchmarking* utilizando o método de regressão linear alcançaram valores de R^2 de 13% em *benchmarking* de agências bancárias (BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014), 89% para *benchmarking* de universidades (LI; CHEN, 2021) e 98% para *benchmarking* local de creches em Florianópolis (GNECCO *et al.*, 2022). Os valores alcançados pelos modelos desta pesquisa foram de 93% e de 97% para os Modelos 1 e 2 (sem e com laboratórios de equipamentos densos e consideração de ar-condicionado), respectivamente, estando de acordo com os valores referenciados por pesquisas recentes.

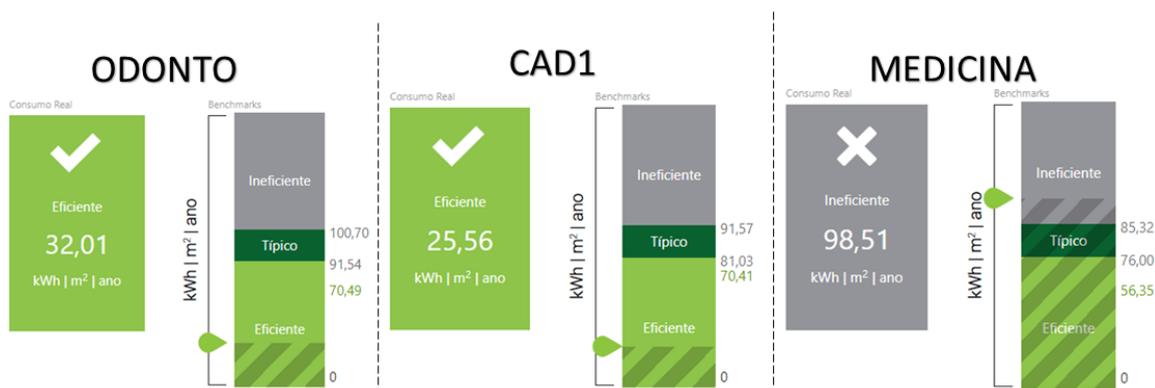
Para a realização da classificação de A a E referente ao EUI de edifícios universitários que abrigavam diferentes tipos de usos dos espaços internos, Ding *et al.* (2018) compararam os EUI medidos com o EUI mediano da amostra. Tendo em vista a complexidade dos prédios analisados, a presente pesquisa adotou a abordagem do regulamento brasileiro RTQ-C (BRASIL, 2010), no qual o edifício é comparado a uma referência com as suas próprias características, considerando a otimização de algumas variáveis. Desta forma, considera-se que a classificação se torna mais justa em relação ao conjunto amostral, pois nele há edifícios com diferentes demandas energéticas. Para nível de comparação simplificada, foram fornecidos os EUI típicos para os grupos de prédios com e sem laboratórios de equipamentos densos.

Em relação ao modelo de regressão desenvolvido pelo CBCS (CBCS; PROCEL; INMETRO, 2021), foram notadas semelhanças e diferenças em relação ao sistema desenvolvido nesta pesquisa. Como semelhanças, tem-se a consideração do tipo de uso de ambientes e do DPI de iluminação. Como diferença, tem-se que o referido sistema desenvolveu equações separadas para o edifício como um todo e outra para gabinetes de professores, além de informar não serem considerados laboratórios

específicos e centrais de processamento de dados. Já na presente pesquisa, os modelos desenvolvidos buscaram representar toda a complexidade de usos das unidades acadêmicas da universidade estudada, que por vezes apresentam estes tipos de espaços não considerados pelo *benchmarking* citado. Outra diferença compreende a consideração do ar-condicionado. Os modelos desenvolvidos pelo CBCS adotam um único tipo de condicionamento para todo o prédio, enquanto no Modelo 2 desta pesquisa é possível indicar a proporção de área condicionada por tipo de equipamento. Diferenças adicionais consistem na adoção de outras variáveis pelo presente estudo, como a área do conhecimento e características arquitetônicas.

Considerando as diferenças entre os modelos, compreende-se que eles podem gerar resultados diferentes. A Figura 78 mostra a classificação de três prédios da amostra da UFMG conforme a plataforma brasileira. Observa-se que dois deles, que fazem parte do Modelo 1 (sem laboratórios de equipamentos densos e sem consideração de ar-condicionado) (Odontologia e CAD 1), obtiveram classificação Eficiente, com EUI menor do que a metade do valor considerado como valor típico. Estes prédios obtiveram classificação de energia C e E conforme a metodologia deste trabalho. Já o prédio da Medicina, que faz parte do grupo do Modelo 2 (com laboratórios de equipamentos densos e sem consideração de ar-condicionado), obteve classificação na plataforma brasileira como Ineficiente, enquanto no presente trabalho obteve classificação de EUI de nível A.

Figura 78 – Aplicação de três Unidades Acadêmicas da UFMG no *benchmarking* do CBCS



As discrepâncias nas classificações resultantes com as duas metodologias advêm das diferenças dos modelos, citadas anteriormente, além dos aspectos que foram considerados como melhores ou piores cenários, conforme indicado em CBCS, PROCEL e INMETRO (2021a). Por exemplo, o sistema de condicionamento de ar da

plataforma CBCS refere-se ao uso de ar-condicionado VRF, enquanto nesta pesquisa o valor mínimo para o Modelo 1 refere-se à utilização exclusiva da ventilação natural, sendo o pior cenário para o EUI a existência de ventiladores em todas as salas de aula. No caso do edifício da Medicina, entende-se que foi considerada ineficiente pela plataforma do CBCS pois este apresenta significativa quantidade de laboratórios, enquanto, na classificação desta pesquisa, foi classificada como A porque foi um prédio onde houve a troca de todas as lâmpadas para a tecnologia LED, reduzindo seu DPI de iluminação, fator que é importante para a classificação desenvolvida.

A partir da observação das semelhanças e diferenças entre os modelos do CBCS e os deste trabalho, reforça-se que o presente estudo buscou desenvolver o sistema de *benchmarking* com foco na universidade pública estudada, que possuía complexidade de usos internos e predominância de ventilação natural, assim como indicado pela lacuna identificada por Garcia *et al.* (2020). Reitera-se que, de acordo com CBCS (2021), o arquétipo desenvolvido apresentou maior foco em instituições particulares, onde considerou-se uso de condicionamento de ar em todas as salas de aula. Portanto, assim como comentado por Gnecco *et al.* (2022), recomenda-se que o sistema de *benchmarking* interno seja utilizado pela instituição estudada, já que os prédios apresentam aspectos singulares como as complexidades de uso e tipo de condicionamento de ar, como citados anteriormente.

5.2. Quanto ao conforto térmico

No caso da UFMG, a partir das respostas do questionário sobre a experiência térmica, foram observados problemas de acentuado desconforto por calor no verão em todos os ambientes, principalmente nas Salas de aula. Estes resultados estão de acordo com as pesquisas de Krüger e Zannin (2004), Singh *et al.* (2019) e com os resultados de satisfação térmica apontados pela aplicação de questionários em prédio da UFMG em Belo Horizonte de Souza (2019) referente aos dias quentes. Considerando que o ensino e aprendizagem fazem parte da missão das Universidades, que estas atividades requerem elevado nível de concentração (SINGH *et al.*, 2019) e que ocorrem principalmente nas Salas de aula, os resultados deste trabalho apontam para a necessidade do planejamento de ações corretivas para a melhoria do conforto térmico, e assim, a saúde e desempenho dos usuários das Salas de aula.

Pesquisadores recomendam uma efetiva ventilação, a qual garanta a renovação de ar como uma das formas de reduzir os riscos de contágio no caso de eventos extremos de saúde pública, como a pandemia de COVID-19. Tendo em vista essas recomendações e o fato de que as Salas de aula da UFMG (ambientes que possuem maior densidade de ocupação) possuem predominante uso da ventilação natural, os resultados deste estudo apontam para a necessidade de análises mais aprofundadas a respeito das condições de ventilação natural nestes ambientes. Observou-se que 88% das salas de aula não possuem ventilação cruzada e que esta estratégia poderia ser adotada em 58% destes espaços.

Considerando a proibição de instalação de novos aparelhos de ar-condicionado para conforto térmico nos ambientes da universidade estudada, o aumento de temperaturas externas observados nos últimos anos (IPCC, 2019), e a forte indicação de preferência térmica por ambientes menos quentes obtida pelos questionários, infere-se que, caso não haja uma estratégia para a melhoria da ventilação natural dos espaços da UFMG, haverá significativa demanda pela instalação de aparelhos de ar-condicionado nos prédios. Este aumento poderá impactar os custos de operação dos edifícios e a gestão da universidade como um todo.

De modo a contribuir para a melhor utilização dos recursos públicos, minimizar os impactos ambientais e garantir o adequado conforto térmico aos usuários, se faz pertinente que estratégias de adaptação considerem estratégias arquitetônicas para o sombreamento e a melhoria da ventilação natural dos ambientes.

Os Modelos preditivos 3 e 4 desenvolvidos na presente pesquisa indicaram que as principais variáveis de impacto nos valores de PHOC e GHC são: a existência de proteção solar, a orientação geográfica (azimute), a densidade de ocupantes, a existência de ventiladores e o andar. Estes resultados estão de acordo com as variáveis indicadas em estudos da literatura (RACKES *et al.*, 2016, GAGNON; GOSSELIN; DECKER, 2018, CHEN; HWANG; HUANG, 2019). As variáveis de maior impacto no conforto térmico observadas no presente estudo também foram citadas no trabalho de Rackes *et al.* (2016) entre as variáveis de maior importância para escolas, com exceção da orientação. No referido trabalho, a orientação foi citada como pouco influente (RACKES *et al.*, 2019). No entanto, tendo em vista tanto os resultados desta tese como o fato de que a exposição solar direta gera impacto no desempenho motor-cognitivo, conforme citado por (PIIL *et al.*, 2020), entende-se que a consideração da

orientação junto ao dimensionamento adequado de proteções solares seja relevante para o conforto térmico nas salas de aula.

Apesar de apresentarem grande número de termos, os Modelos 3 e 4 devem ser vistos como uma alternativa simplificada ao processo de simulação computacional, que é muito mais complexo. A interface de uso dos modelos desenvolvidos pôde ser configurada em uma planilha eletrônica, facilitando a sua utilização.

Foram identificadas diferenças em relação à análise do conforto térmico deste trabalho com o de Rackes *et al.* (2016). A principal diferença é que a presente tese considera o conforto térmico de um tipo de ambiente, e não a média de todo o edifício, considerando seus diferentes usos internos. Decidiu-se por esta abordagem a partir da análise das respostas do questionário, onde percebeu-se que há diferentes sensações térmicas em diferentes tipos de uso dos espaços, e que também havia diferenças entre a adoção de tipos de condicionamento de ar entre eles. Portanto, considerou-se a análise do conforto térmico de um tipo de ambiente seria adequada no caso do presente estudo, tendo em vista a complexidade de usos e de tipos de condicionamento encontrados nos edifícios da UFMG. Além disso, foi identificado por Rackes *et al.* (2016) que a consideração de um valor médio de conforto térmico para o prédio seria uma limitação para a identificação de casos extremos. Como um dos objetivos do *benchmarking* da presente tese é auxiliar a tomada de decisões para medidas de melhoria, foi incorporada à avaliação um gráfico com as proporções de diferentes classificações de cada prédio, conforme visto no Gráfico 75.

Ainda em relação à avaliação, endente-se que o trabalho de Geraldi e Ghisi (2022b) evidencia a importância e atualidade da incorporação da avaliação do conforto térmico em sistemas de *benchmarking* energético. Como principais diferenças em relação ao trabalho citado, tem-se que o método desenvolvido nesta tese aborda características arquitetônicas e o método de regressão linear. Deste modo, é viável a identificação de aspectos de melhoria para o conforto térmico do ambiente analisado.

A análise dos resultados dos gráficos que mostram as temperaturas operativas ao longo do ano mostra que há casos nos quais há temperaturas acima dos limites aceitáveis por 80% dos usuários, mesmo com o uso de ventiladores, em todo o ano, ou seja, incluindo todo o semestre letivo. Os meses mais críticos foram os de janeiro a março, setembro, outubro e dezembro. Considera-se que a análise para o período

do ano inteiro foi válida, tendo em vista as possíveis flexibilizações de calendário ocasionadas por imprevistos como paralizações ou a própria pandemia. Com o conhecimento a respeito das situações ao longo do ano, pode-se adotar estratégias em relação ao uso dos espaços de acordo com o período.

Assim, sugere-se que as salas nas quais haja situações de desconforto térmico mais acentuadas, como as das classificações D e E, sejam consideradas como prioridades para medidas de retrofit. Recomenda-se a melhoria dos parâmetros arquitetônicos identificados como influentes para o conforto térmico, como a instalação de proteção solar, a instalação de ventiladores, adequação da envoltória e a adoção de adaptações para melhoria de estratégias de ventilação natural, como a adoção de venezianas, o aumento do percentual de abertura para ventilação das janelas e a adoção de ventilação cruzada, quando possível. Nas situações em que as medidas de *retrofit* não forem suficientes, recomenda-se a instalação de aparelhos de ar-condicionado, que podem ter seu uso controlado pela instituição de modo a não serem utilizados nos dias de temperatura amena. Caso não seja possível a instalação destes equipamentos, entende-se que o uso desses ambientes específicos deve ser evitado nos dias e horários mais críticos, quando possível. Como visto nas Figuras 2 e 3, na cidade de Belo Horizonte, são os meses de novembro a março nos horários de 14h às 17h, com pior situação entre as 15 e as 16h. Tal indicação é corroborada pela pesquisa de Gui, Gou e Lu (2021) em *campi* da Austrália, que sinalizam que o padrão de ocupação dos edifícios universitários deve ser levado em consideração na gestão energética e nas políticas de redução da pegada de carbono dos *campi*.

Em relação aos ventiladores, percebeu-se, na avaliação considerando cenários com e sem estes equipamentos, a piora de até dois níveis na avaliação quando os ventiladores não eram utilizados (por exemplo, passar do nível A para o nível C). No entanto, reforça-se que a instalação de ventiladores não deve ser considerada como estratégia isolada para melhoria do conforto térmico, tendo em vista que sua utilização pode ocasionar o aumento do nível de ruído das salas de aula. Como pontuado por Libardi *et al.* (2006) e Dias, Santos e Mariano (2019), o alto nível de ruído nestes ambientes ocasiona prejuízos nas atividades de ensino e aprendizagem, assim como na saúde dos usuários, principalmente os professores.

Espera-se que os produtos desta tese possam embasar tomadas de decisão a respeito do direcionamento de verbas para melhorias dos *campi* da universidade

estudada. Além disso, metodologia desenvolvida pode ser aplicada a outras instituições públicas com edifícios ventilados naturalmente localizadas em climas similares ao da cidade da instituição investigada, Belo Horizonte.

Hoje a INI-C, sistema do governo brasileiro que avalia a eficiência energética do projeto de edificações, desconta as horas em conforto térmico do consumo previsto em edificações condicionadas artificialmente, o que leva a crer que haverá instalação de aparelhos de ar-condicionado nos espaços mais desconfortáveis o que não é fato nas Universidades públicas brasileiras.

5.3. Limitações do trabalho e sugestões para trabalhos posteriores

Dados de algumas variáveis foram coletados via internet, telefonemas ou estimados devido à interrupção dos levantamentos de dados *in loco* e pela suspensão de atividades presenciais na Universidade durante a pandemia de COVID-19.

Também devido à pandemia, foram utilizados dados previamente medidos *in loco* para a validação das simulações realizadas no experimento paramétrico, uma vez que houve a suspensão das atividades presenciais no período da pesquisa após o exame de qualificação.

Entende-se que o modelo representado na etapa de simulações em CFD é uma simplificação. No entanto, buscou-se embasar as simulações com Cps mais precisos do que aqueles considerados no EnergyPlus (Cp médio para toda a fachada), tendo em vista as limitações para simulação de ventilação natural deste *software*.

Para a estimativa de EUI, foi considerada a existência ou não dos equipamentos de ar-condicionado e ventiladores, não o seu tempo de uso. Isto se deu por conta da paralização de atividades ocasionada pela pandemia, que impossibilitou o levantamento de dados referente ao uso desses equipamentos. Trabalhos futuros podem incorporar variáveis referentes ao tempo de uso de ar-condicionado e ventiladores. Outra possibilidade para trabalhos futuros nesse sentido é a estimativa do conforto térmico das salas de aula e a consideração de que, quando desconfortável, os equipamentos seriam utilizados. Então, poderiam ser deduzidas estimativas de tempo de uso de ventiladores e ar-condicionado. No entanto, essa abordagem levaria em conta somente a estimativa de conforto das salas de aula e

não do edifício como um todo, enquanto as estimativas de EUI consideraram todo o edifício.

Além das sugestões já citadas, para trabalhos futuros sugere-se:

- ❖ Refinar a base de dados incluindo novos dados, por exemplo dos COPs dos aparelhos de ar-condicionado existentes.
- ❖ Em relação às análises de conforto térmico, desenvolver modelo para a obtenção dos Cps das fachadas considerando a existência de pilotis, que não foi abordada neste estudo;
- ❖ Incorporar ao sistema de *benchmarking* proposto para a UFMG a existência de fontes renováveis de energia previstas para futura instalação pelo Projeto Oasis;
- ❖ Além do *benchmarking* de energia e conforto térmico das salas de aula apresentado neste trabalho, estudos futuros podem agregar a análise de conforto térmico de outros tipos de ambientes e de fatores como a presença e integração com a iluminação natural.
- ❖ Verificar a aplicabilidade da metodologia proposta para outros climas do Brasil e para outras instituições.

6. CONCLUSÕES

Essa tese teve como objetivo desenvolver um sistema de *benchmarking* interno para edifícios universitários prioritariamente ventilados naturalmente, que considerasse o consumo de energia elétrica e o conforto térmico, utilizando como estudo de caso as edificações da Universidade Federal de Minas Gerais.

A partir deste objetivo, foi desenvolvido um método que possibilitou integrar classificações de EUI médio e conforto térmico das salas de aula com as métricas Percentual de Horas Ocupadas em Conforto (PHOC) e Graus Hora de Calor (GHC). Quatro modelos preditivos com base em regressão linear múltipla foram desenvolvidos, obtendo R^2 de 93 a 97%. A separação de bases de dados entre prédios que possuíam laboratórios de equipamentos densos e os que não possuíam gerou resultados mais precisos para as equações preditivas de EUI. Os edifícios da amostra foram classificados em escalas A a E. A integração entre as classificações do *benchmarking* de energia e conforto térmico foi feita a partir de uma matriz, com a indicação de escala de diagnóstico de “Bom” a “Muito ruim”. Um total de 29% dos prédios analisados se localiza na zona de diagnóstico “Bom”, 53% na zona de diagnóstico em “Médio” e 18% na zona de diagnóstico “Ruim”. Assim, entende-se que o objetivo geral desta tese foi alcançado.

Acredita-se que a principal contribuição do presente trabalho foi a indicação de que as horas de conforto térmico nos espaços internos deva ser agregada, mas em separado, na análise de desempenho energético de espaços condicionados preferencialmente de forma natural. Tem-se ainda que, a partir da análise de conforto térmico dos espaços, a universidade poderá adotar estratégias mitigadoras para o desconforto antes de optar pelo uso de sistemas de condicionamento artificial. A contextualização do estudo de caso sugere que a metodologia desenvolvida no presente trabalho pode ser replicada para outras universidades públicas do país, aspecto que poderá ser abordado por trabalhos futuros. Por fim, acredita-se ainda que o método de integração das análises de consumo de energia e conforto térmico desenvolvido na presente pesquisa possa ser utilizado para compor políticas de *benchmarking* de outras tipologias de edifícios.

REFERÊNCIAS

- AGDAS, D.; SRINIVASAN, R. S.; FROST, K.; MASTERS, F. J. Energy use assessment of educational buildings: Toward a campus-wide sustainable energy policy. **Sustainable Cities and Society**, v. 17, p. 15–21, 2015.
- ALLAB, Y.; PELLEGRINO, M.; GUO, X.; NEFZAOU, E.; KINDINIS, A. Energy and comfort assessment in educational building: Case study in a French university campus. **Energy and Buildings**, v. 143, p. 202–219, 2017.
- ALVES, T.; MACHADO, L.; SOUZA, R.V.G.; WILDE, P. A methodology for estimating office building energy use baselines by means of land use legislation and reference buildings. **Energy and Buildings**, v. 143, p. 100-113, 2017.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **ASHRAE Guideline 14-2002**: Measurement of Energy and Demand Savings. 2002.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **ANSI/ASHRAE Standard 55-2017**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. 20017.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **ANSI/ASHRAE Standard 55**: thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2017.
- ANDRÉ, M. *et al.* Conforto térmico em ambientes internos no Brasil e o desenvolvimento da base brasileira de dados. In: (ANTAC, Org.) XV ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E XI ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2019, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa p. 1136–1145.
- ANSYS. **Ansys CFX**. 2022. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>>. Acesso em: jul. 2022.
- ARAÚJO, V. M. D. Parâmetros de Conforto Térmico para Usuários de Edificações Escolares no Litoral Nordeste Brasileiro. 1996. 179 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996
- ASENSIO, O. I.; DELMAS, M. A. The effectiveness of US energy efficiency building labels. **Nature Energy**, v. 2, n. 4, p. 1–8, 2017.
- ASSIS, E. S. D. Método integrado de análise climática para arquitetura aplicado à cidade de Belo Horizonte, MG. In: VI ENCONTRO NACIONAL E III ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2001, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 1–8.
- ASSIS, E. S. D.; FIGUEIREDO, A. M.; GARCIA, M. S.; MASCARELLO, A. V. S. Análise da percepção de variáveis climáticas urbanas por residentes da cidade de Belo Horizonte, Brasil. In: PLURIS 2016, 2016, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 1–12.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220-3 - Desempenho térmico de edificações**. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16 16401-3 – Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários**. Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SUSTAINABILITY IN HIGHER EDUCATION (AASHE). **History of AASHE**. 2019. Disponível em: <<https://www.aashe.org/about-us/aashe-history/>>. Acesso em: mar. 2019.

AULICIEMS, A. Psycho-Physiological Criteria for Global Thermal Zones of Building Design. **International Journal of Biometeorology**, 1981.

BEN-DAVID, T.; RACKES, A.; WARING, M. S. Simplified daily models for estimating energy consumption impacts of changing office building ventilation rates. **Building and Environment**, v. 127, n. June 2017, p. 250–255, 2018.

BEZERRA, S. A.; SANTOS, F. J.; PINHEIRO P. R.; BARBOSA, F. R. Dynamic evaluation of the energy efficiency of environments in Brazilian university classrooms using DEA. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 12, p. 1–14, 2017.

BHAGAT, R. K.; DAVIES WYKES, M. S.; DALZIEL, S. B.; LINDEN, P. F. Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19. **Journal of Fluid Mechanics** v. 903, p. 1–18, 2020.

BITARÃES, T. G. **Retrofit de sistemas**: Escola de Arquitetura e Design da UFMG. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Arquitetura, UFMG. Belo Horizonte, p. 68, 2019.

BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS, R. Developing energy consumption benchmarks for buildings: Bank branches in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 82–91, 2014.

BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. L. M. Evaluating energy performance in non-domestic buildings: A review. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 734–755, 2016.

BRAGER, G. S.; DE DEAR, R. J. Thermal adaptation in the built environment: A literature review. **Energy and Buildings**, v. 27, n. 1, p. 83–96, 1998.

BRASIL. **Decreto nº 10.779, de 25 de agosto de 2021**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 25 ago. 2021. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.779-de-25-de-agosto-de-2021-340742061>>. Acesso em: jul. 2022.

BRASIL. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **Portaria n.º 372, de 17 de setembro de 2010**. Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/Port372-2010_RTQ_Def_Edificacoes-C_rev01.pdf>. Acesso em: jan. 2017.

BRASIL. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **Portaria n.º 18, de 16 de janeiro de 2012**. Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/RTQR.pdf>>. Acesso em: jan. 2017.

BRASIL. MINISTÉRIO DA ECONOMIA. INMETRO. **Portaria n.º 42, de 24 de fevereiro de 2021**. Aprova a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de

Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C). 2021. Disponível em: < <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002707.pdf>>. Acesso em: jul. 2022.

BRASIL. MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **Nota oficial:** Bloqueio total do MEC nas universidades foi de 3,4%. 2019. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/component/content/index.php?option=com_content&view=article&id=75781:bloqueio-total-do-mec-nas-universidades-foi-de-3-4&catid=33381&Itemid=86>. Acesso em: maio 2019.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Energia 2030.** Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Brasília: MME: EPE, 2007, v.2. Projeções.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Construção Sustentável.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/urbanismo-sustentavel/constru%C3%A7%C3%A3o-sustent%C3%A1vel>>. Acesso em: fev. 2017.

BRE, F.; SILVA, A. S.; GHISI, E; FACHINOTTI, V. D. Residential building design optimization using sensitivity analysis and genetic algorithm. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 853-866, 2016.

BUONOCORE, C.; ANDRÉ, M.; RAMOS, G.; DE VECCHI, R.; CANDIDO, C. M.; LAMBERTS, R. Exploring the Brazilian Thermal Comfort Database: an overview on the main contributions. In: PROCEEDINGS OF 11TH WINDSOR CONFERENCE 2020 2020, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 1052–1064.

BUONOCORE, C.; DE VECCHI, R.; SCALCO, V.; LAMBERTS, R. Thermal preference and comfort assessment in air-conditioned and naturally ventilated university classrooms under hot and humid conditions in Brazil. **Energy & Buildings**, v. 211, p. 109783, 2020.

BURMAN, E.; HONG, S. M.; PATERSON, G.; KIMPIAN, J.; MUMOVIC, D. A comparative study of benchmarking approaches for non-domestic buildings: Part 2 – Bottom-up approach. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 3, n. 2, p. 247–261, 2014.

CÂNDIDO, C.; DE DEAR, R.; LAMBERTS, R.; BITTENCOURT, L. Natural ventilation and thermal comfort: Air movement acceptability inside naturally ventilated buildings in Brazilian hot humid zone. In: PROCEEDINGS OF CONFERENCE: AIR CONDITIONING AND THE LOW CARBON COOLING CHALLENGE - WINDSOR 2008 CONFERENCE 2008, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 1–8.

CAO, X.; DAI, X.; LIU, J. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 198–213, 2016.

CARVALHO, J.P.; BARROSO, B.I.L.; DA SILVA, L.B.; NEVES, A.I.A.; TORRES, M.G.L.; FALCÃO, C.A.; SIQUEIRA, J.C.F.; SOUZA, A.G.L.; SOUZA, E.L.; DA SILVA, J.F. Students blood pressure and heart rate in learning environments with thermal changes. **International Journal of Occupational and Environmental Safety**, v. 2, p. 29-37, 2018.

CHEN, C. F. *et al.* The impacts of building characteristics, social psychological and cultural factors on indoor environment quality productivity belief. **Building and Environment**, v. 185, 2020.

CHEN, C. H.; HSIAO, C. M. Higher Education Expansion and Credit Risk: Evidence from China Universities Panel Data. **International Journal of Public Administration**, v. 123, n. 3, p. 1–12, 2020.

CHEN, J.; AUGENBROE G.; WANG Q.; SONG X. Uncertainty Analysis of Thermal Comfort in a Prototypical Naturally Ventilated Office Building and Its Implications Compared to Deterministic Simulation. **Energy and Buildings**, v. 146, p. 283-294, 2017.

CHUNG, M.H.; RHEE, E.K. Potential opportunities for energy conservation in existing buildings on university campus: A field survey in Korea, **Energy Build.**, v. 78, p. 176–182, 2014.

CHUNG, W. Review of building energy-use performance benchmarking methodologies. **Applied Energy**, v. 88, n. 5, p. 1470–1479, 2011.

CHUNG, W.; HUI, Y. V.; LAM, Y. M. Benchmarking the energy efficiency of commercial buildings. **Applied Energy**, v. 83, n. 1, p. 1-14, 2006.

CLIMATE ONE BUILDING. **Repository of free climate data for building performance simulation**. 2018. Disponível em: <<https://climate.onebuilding.org/>>. Acesso em: jul. 2022.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (CBCS). **Capacitação em auditoria energética e benchmarking** (evento *online*). 25 e 26 de março de 2021.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (CBCS); PROCEL; ELETROBRAS. **Ficha técnica: Equações de benchmark – Tipologia Universidade e Instituição de Ensino Técnico**. 2021a. Disponível em: <<https://plataformadeo.cbcs.org.br/universidade-e-instituicao-de-ensino-tecnico-geral/>>. Acesso em: jun 2022.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (CBCS); PROCEL; ELETROBRAS. **Universidade e Instituição de Ensino Técnico - Gabinete dos Professores**. 2021b. Disponível em: <<https://plataformadeo.cbcs.org.br/universidade-e-instituicao-de-ensino-tecnico-gabinete-dos-professores/>>. Acesso em: jun 2022.

COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR (CAPES). **Tabela das Áreas de Conhecimento (CAPES)**. 2017. Disponível em: <http://www.capes.gov.br/images/documentos/documentos_diversos_2017/TabelaAreasConhecimento_072012_atualizada_2017_v2.pdf>. Acesso em: ago. 2019.

COSTA, M. L.; FREIRE, M. R.; KIPERSTOK, A. Strategies for thermal comfort in university buildings - The case of the faculty of architecture at the Federal University of Bahia, Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 239, n. March, p. 114–123, 2019.

COSTA, V. A. C.; RORIZ, V. F.; CHVATAL, K. M. S. Modeling of slab-on-grade heat transfer in EnergyPlus simulation program. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 117–135, 2017.

CÓSTOLA, D.; CARREIRA, G.; FERNANDES, L. O.; LABAKI, L. C. Seasonal Thermal Sensation Vote – An indicator for long-term energy performance of dwellings with no HVAC systems. **Energy and Buildings**, v. 187, p. 64–76, 2019.

- DANGETI, P. **Statistics for machine learning**. Birmingham, UK: Packt, 2017.
- DE ABREU-HARBICH, L. V.; CHAVES, V. L. A.; BRANDSTETTER, M. C. G. O. Evaluation of strategies that improve the thermal comfort and energy saving of a classroom of an institutional building in a tropical climate. **Building and Environment**, v. 135, n. March, p. 257–268, 2018.
- DE DEAR, R. J.; BRAGER, G. S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. **ASHRAE Transactions**, v. 104, n. 1, p. 1–18, 1998.
- DE DEAR, R. J.; BRAGER, G. S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and Buildings**, v. 34, p. 549–561, 2002.
- DE SÁ JÚNIOR, A. **Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do estado de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2009, 133 p.
- DE SÁ JÚNIOR, A.; CARVALHO, L. G.; SILVA, F. F.; ALVES, M. C. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 108, p. 1–7, 2012.
- DE VECCHI, R.; CÂNDIDO, C.; LAMBERTS, R. O efeito da utilização de ventiladores de teto no conforto térmico em salas de aulas com condicionamento híbrido em um local de clima quente e úmido. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 189–202, 2013.
- DE VECCHI, R.; LAMBERTS, R.; CANDIDO, C. M. The role of clothing in thermal comfort: how people dress in a temperate and humid climate in Brazil. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 69–81, 2017.
- DE VECCHI, R.; SORGATO, M. J.; PACHECO, M.; CÂNDIDO, C.; LAMBERTS, R. ASHRAE 55 adaptive model application in hot and humid climates: The Brazilian case. **Architectural Science Review**, v. 58, n. 1, p. 93–101, 2015.
- DELVAEYE, R.; RYCKAERT, W.; STROOBANT, L.; HANSELAER, P.; KLEIN, R.; BREESCH, H. Analysis of energy savings of three daylight control systems in a school building by means of monitoring. **Energy and Buildings**, v. 127, n. June, p. 969–979, 2016.
- DEPARTAMENTO DE FÍSICA UFMG (DF UFMG). **Laboratório de Cristalografia** – LabCri. 201?. <<https://www.fisica.ufmg.br/laboratorios/cristalografia-labcri/>>. Acesso em: jul. 2022.
- DEPARTAMENTO DE PROJETOS DA UFMG (DP). **Comunicação Pessoal**, 2022.
- DEPARTMENT FOR COMMUNITIES AND LOCAL GOVERNMENT (DCLG). **Display Energy Certificate**: Software Specification. Londres, 2008. Disponível em: <<https://www.gov.uk/government/publications/display-energy-certificate-software-specification>>. Acesso em: jun. 2022.
- DEPARTMENT OF ENERGY & CLIMATE CHANGE (DECC). **DECC Display Energy Certificate**. 2011. Disponível em: <<https://www.gov.uk/government/publications/display-energy-certificate>>. Acesso em: junho 2022.
- DIAS P. L.; RAIMONDO, D.; CORGNATI, S. P.; GAMEIRO DA SILVA, M. Energy consumption in schools – A review paper. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 911–922, 2014.

DIAS, F. A. M.; DOS SANTOS, B. A.; MARIANO, H. C. Sound pressure levels in classrooms of a university and its effects on students and professors. **Codas**, v. 31, n. 4, 2019.

DING, Y.; ZHANG, Z.; ZHANG, Q.; et al. Benchmark analysis of electricity consumption for complex campus buildings in China. **Applied Thermal Engineering**, v. 131, p. 428–436, 2018.

DOGAN, T.; KASTNER, P. Streamlined CFD simulation framework to generate wind-pressure coefficients on building facades for airflow network simulations. **Building Simulation**, n. 1988, 2020.

DOGAN, T.; SARATSIS E.; REINHART, C. Towards an Energy Simulation-Informed Design Process: A 3-Phase Approach for a Performative Interdisciplinary Laboratory Building. In: BUILDING SIMULATION 2015 (BS 2015), 2015, Hyderabad. **Anais...** Hyderabad: 2015, dezembro 07-09, p. 1419-1425. Disponível em: <<http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2015/p2265.pdf>>. Acesso em: out. 2018.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex, acrílica e PVA**. [Tese de Doutorado] Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2008.

DOU - DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, Publicado em: 29/03/2019 | Edição: 61-A | Seção: 1 - Extra | Página: 1, Órgão: Atos do Poder Executivo. **Decreto nº 9.741, de 29 de março de 2019**.

DUARTE, J. G. C. L. M.; ZEMERO, B. R.; SOUZA, A. C. D. B.; TOSTES, M. E. L.; BEZERRA, U. H. Building Information Modeling approach to optimize energy efficiency in educational buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 43, , p. 1–14, 2021.

EA UFMG. **Escola de Arquitetura da UFMG**. 201?. <<https://sites.arq.ufmg.br/ea/>>. Acesso em: jul. 2022.

ELECTRICAL AND MECHANICAL SERVICES DEPARTMENT (EMSD). **Benchmark results compared with your peer group**. Hong Kong. 2022. Disponível em: <<https://ecib.emsd.gov.hk/index.php/en/report?rid=8817&gid=137>>. Acesso em: maio 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2021**: Ano base 2020. 2021a. Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>>. Acesso em: jul. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **BEN Relatório síntese 2021**: ano base 2020. 2021b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_S%C3%ADntese_2021_PT.pdf>. Acesso em: jul. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **BEN Relatório síntese 2022**: ano base 2021. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf>. Acesso em: jul. 2022.

ENERGYPLUS. Documentation: **Input Output Reference** (version 9.0.1). [s.i.]: Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), 2018.

FEDERSPIEL, C.; ZHANG, Q.; ARENS, E. Model-based benchmarking with application to laboratory buildings. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 3, p. 203–214, 2002.

FEREIDOUNI, S.; ROUHANI, S. Higher education expansion policy in Iran and its impact on educational justice. **Quarterly Journal of Research and Planning in Higher Education**, v. 25, n. 2, p. 1–21, 2019.

FRANKE *et al.* **Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment**. Brussels: COST, 2007. 52p.

GAGNON, R.; GOSSELIN, L.; DECKER, S. Sensitivity analysis of energy performance and thermal comfort throughout building design process. **Energy & Buildings**, v. 164, p. 278–294, 2018.

GALVÃO, J.; BERMANN, C. Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas. 2015. **Estudos Avançados**, São Paulo, vol. 29, n.84, p. 43-68, maio/ago. 2015.

GARCIA, M. S. **Arquivos complementares**. Disponível em: <<https://www.dropbox.com/sh/bijqd98n056jyfz/AAAbrBxIYr-tBAV4kBIMZbeba?dl=0>>. Acesso em: jul. 2022.

GARCIA, M. S. **Eficiência energética em edifícios: investigação do S3E como interface de simulação simplificada**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura, Belo Horizonte, 141 p., 2017.

GARCIA, M. S.; BITARÃES, T. G.; OLIVEIRA, I. C. F.; FERREIRA, D. C. M.; EULÁRIO, D. M. S.; SOUZA, R. V. G. Eficiência energética e benchmarking em *campi* universitários: oportunidades de pesquisa a partir de análise bibliométrica. *In: XVIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2020*, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre p. 1–8.

GARCIA, M. S.; SOUZA, R. V. G.; MARTINS, M. L.; VELOSO, A. C. O. Integrando simulação de iluminação natural no processo de projeto: análise comparativa entre duas plataformas computacionais. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 15, n. 2, p. 69–83, 2020.

GARCIA, M. S.; OLIVEIRA, I. C. F.; SOUZA, R. V. G.; REIS, I. A. Eficiência energética e conforto térmico em edifícios universitários: a importância de uma perspectiva integrada para a adaptação aos novos tempos. **Rev. UFMG**, v. 28, n. 1, p. 148–179, 2021.

GERALDI, M. S.; GHISI, E. Data-driven framework towards realistic bottom-up energy benchmarking using an Artificial Neural Network. **Applied Energy**, v. 306, n. PA, p. 117960, 2022a.

GERALDI, M. S.; GHISI, E. Integrating evidence-based thermal satisfaction in energy benchmarking: A data-driven approach for a whole-building evaluation. **Energy**, v. 244, p. 123161, 2022b.

GIAMALAKI, M.; KOLOKOTSA, D. Understanding the thermal experience of elderly people in their residences: Study on thermal comfort and adaptive behaviors of senior citizens in Crete, Greece. **Energy & Buildings**, v. 185, p. 76–87, 2019.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, p. 11–23, 1992.

GNECCO, V. M.; GERALDI, M. S.; FOSSATI, M.; TRIANA, M. A. Comparison between national and local benchmarking models: The case of public nursery schools in Southern Brazil. **Sustainable Cities and Society**, v. 78, n. December 2021, p. 103639, 2022.

GOKARAKONDA, S.; VAN TREECK, C.; RAWAL, R. Influence of building design and control parameters on the potential of mixed-mode buildings in India. **Building and Environment**, [S. l.], v. 148, n. October 2018, p. 157–172, 2019.

GONÇALVES, W. B. **Estudo de Índices de Conforto Térmico Avaliados com Base em População Universitária na Região Metropolitana de Belo Horizonte**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

GOULART, M. F. LABAKI, L. C. A influência da transmitância térmica de superfícies opacas no desempenho de um edifício naturalmente ventilado com alta ocupação. In: XVIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2020, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2020, p. 1-8.

GREENERU. **ENERGY STAR's Portfolio Manager now easier for campus-wide data collection and benchmarking**. 2020. Disponível em: <<https://www.greeneru.com/articles/energy-stars-portfolio-manager-now-easier-for-campus-wide-data-collection-and-benchmarking/>>. Acesso em: maio 2022.

GREGÓRIO-ATEM, C.; APARICIO-FERNÁNDEZ, C.; COCH, H.; VIVANCOS, J. L. Opaque ventilated façade (OVF) thermal performance simulation for office buildings in Brazil. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 18, 2020.

GUILLÉN, E. E.; SAMUELSON, H. W.; LAURENT, J. G. C. Comparing energy and comfort metrics for building benchmarking. **Energy and Buildings**, v. 205, 2019.

HOFFMANN S.; LEE E. Potential energy savings with exterior shades in large office buildings and the impact of discomfort glare. In: FOURTH BEST CONFERENCE BUILDING ENCLOSURE SCIENCE & TECHNOLOGY (BEST4). Kansas City, Missouri, 2015, **Anais...** Missouri, 2015.

HONG, S. M.; PATERSON, G.; BURMAN, E.; STEADMAN, P.; MUMOVIC, D. A comparative study of benchmarking approaches for non-domestic buildings: Part 1 – Top-down approach. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 2, n. 2, p. 119–130, 2013.

HOPFE, C. J.; AUGENBROE, G. L. M.; HENSEN, J. L. M. Multi-criteria decision making under uncertainty in building performance assessment. **Building and Environment**, v. 69, p. 81–90, 2013.

HUANG, S.; KANG, Z.; XU, Z.; LIU, Q. Robust deep k-means: An effective and simple method for data clustering. **Pattern Recognition**, v. 117, p. 1–10, 2021.

HUMPHREYS, M. Outdoor Temperatures and Comfort Indoors. **Building Research & Information**, v. 6, n. 2, p. 92, 1978.

ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA (IES). **Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)**. New York: IES. ISBN: 978-0-87995-272-3, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), **Densidade demográfica**. 2010. Disponível em: <

<https://brasilemsintese.ibge.gov.br/territorio/densidade-demografica.html>>. Acesso em: abril 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Números do Censo 2020**. 2020. Disponível em: <<https://censo2020.ibge.gov.br/sobre/numeros-do-censo.html>>. Acesso em: abril 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA (INEP), MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO (MEC). **Censo da Educação Superior 2018**: notas estatísticas. Brasília, 2019. Disponível em: <https://download.inep.gov.br/educacao_superior/censo_superior/documentos/2019/censo_da_educacao_superior_2018-notas_estatisticas.pdf>. Acesso em: abril 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Tabelas de consumo/eficiência energética**: Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas. 2021. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/edificacoes.asp>>. Acesso em: jul. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **2018 Global Status Report**: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector. 2017. Disponível em: <https://webstore.iea.org/download/direct/2408?fileName=2018_Global_Status_Report.pdf>. Acesso em: mar. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Tracking buildings 2021**. 2021a. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/tracking-buildings-2021>>. Acesso em: jul. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2021**. 2021b. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>>. Acesso em: jul. 2022.

ISO. **ISO 52003-1:2017**: Energy performance of buildings — Indicators, requirements, ratings and certificates — Part 1: General aspects and application to the overall energy performance. 2017.

ISO. **ISO 7730:2015**: Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Última publicação: 2005.

JAFARY M.; WRIGHT M.; SHEPHARD L.; GOMEZ J.; NAIR R. U. Understanding campus energy consumption—people, buildings and technology. In: GREEN TECHNOLOGIES CONFERENCE (GreenTech), 2016 IEEE, 2016, **Anais...**, 2016, p. 68–72.

KAMINSKA, A.; OZADOWICZ, A. Lighting control including daylight and energy efficiency improvements analysis. **Energies**, v. 11, n. 8, 2018.

KHOSHBAKHT, M.; GOU, Z.; DUPRE, K. Energy use characteristics and benchmarking for higher education buildings. **Energy and Buildings**, v. 164, p. 61–76, 2018.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259–263, 2006.

KRÜGER A, E. L.; ZANNIN, P. H. T. Acoustic, thermal and luminous comfort in classrooms. **Building and Environment**, v. 39, p. 1055–1063, 2004.

LABORATÓRIO DE CONFORTO AMBIENTAL E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (LABCON/UFMG). **Cartas solares**. 2022. Disponível em: <<https://sites.arq.ufmg.br/tau/labcon/cs/>>. Acesso em: jul. 2022.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (LABEEE). **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. UFSC, Florianópolis, 2017.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (LABEEE). **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus versão 9.0.1**. UFSC, Florianópolis, 2020.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (LABEEE). **Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do pré-processador Slab no programa EnergyPlus**. UFSC, Florianópolis, 2013.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (LABEEE). **Projeto S3E**. UFSC, Florianópolis, 2009. Disponível em: <<https://labeee.ufsc.br/projetos/s3e>>. Acesso em: jul. 2022.

LEE, E.; PANG X.; MCNEIL A.; HOFFMANN S; THANACHAREONKIT A; LI Z; YONG D. Assessment of the potential to achieve very low energy use in public buildings in China with advanced window and shading systems. **Buildings**, v. 5, n.2, p. 668-699, 2015.

LEE, S.H.; AUGENBROE, G. Energy Performance Evaluation of Campus Facilities. In: COBRA 2007, Londres. **Anais...** Londres: RICS, 2007. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/01c9/3c94fb74b7d5ef5dd18572a37e07ee079455.pdf>>. Acesso em: mar. 2019.

LENZHOLZER, S. Engrained experience-a comparison of microclimate perception schemata and microclimate measurements in Dutch urban squares. **International Journal of Biometeorology**, v. 54, n. 2, p. 141–150, 2010.

LI, S.; CHEN, Y. Internal benchmarking of higher education buildings using the floor-area percentages of different space usages. **Energy & Buildings**, v. 231, p. 1–9, 2021.

LIBARDI, A.; GONÇALVES, C.; VIEIRA, T.; SILVERIO, K.; ROSSI, D.; PENTEADO, R. Z. O ruído em sala de aula e a percepção dos professores de uma escola de ensino fundamental de Piracicaba. **Distúrbios da Comunicação**, v. 18, n. 2, p. 167–178, 2006.

LUCA, F; DOGAN, T; KURNITSKI, J. Methodology for Determining Fenestration Ranges for Daylight and Energy Efficiency in Estonia. In: SYMPOSIUM ON SIMULATION FOR ARCHITECTURE AND URBAN DESIGN (SIMAUD), 2018, Delft. **Anais...** Delft: 2018, jun 04-07, p. 63-70. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/324331332_Methodology_for_determining_fenestration_ranges_for_daylight_and_energy_efficiency_in_Estonia>. Acesso em: out. 2018.

MA, Y. T.; LU, M. Y.; WENG, J. T. Energy Consumption Status and Characteristics Analysis of University Campus Buildings. In: 5th International Conference on Civil Engineering and Transportation (ICCET 2015) 2015, **Anais...**, p. 1240–1243.

MALARD, M. L.; MACIEL, C. A. **Territórios da Universidade**. Belo Horizonte: UFMG – UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 2013.

MEIER, A.; OLOFSSON, T.; LAMBERTS, R. What Is an Energy-Efficient Building? In: IX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2002, **Anais...**, p. 3–12.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO (MEC). UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. **Relatório de gestão do exercício de 2016**. Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <https://www.ufmg.br/proplan/wp-content/uploads/idSisdoc_12585090v1-85-RelatorioGestao.pdf>. Acesso em: mar. 2019.

MOHAMMADALIZADEHKORDE, M.; WEAVER, R. Universities as Models of Sustainable Energy-Consuming Communities? Review of Selected Literature. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 9, p. 1–17, 2018.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Rio de Janeiro, Grupo Editorial Nacional, 5ª edição. 2012.

MONTS, J.K.; BLISSETT, M. Assessing energy efficiency and energy conservation potential among commercial buildings: a statistical approach, **Energy**, v. 7, n.10, p. 861–869, 1982.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivos de desenvolvimento sustentável**. 2019. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: jul. 2022.

NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A. Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 563-572, jul. 2002.

OLGYAY, V. **Design with climate** – bioclimatic approach to architectural regionalism. 4ª ed. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, EUA, 1973.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). **Aquecimento global de 1,5°C**. 2019. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf>>. Acesso em: jul. 2022.

PATI, D.; PARK, C. S.; AUGENBROE, G. Roles of quantified expressions of building performance assessment in facility procurement and management. **Building and Environment**, v. 44, n. 4, p. 773–784, 2009.

PEREIRA, I. M.; ASSIS, E. S. Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 1, p. 31–51, 2010.

PEREIRA, I. M.; SOUZA, R. V. G. Proteção solar em edificações residenciais e comerciais - desenvolvimento de metodologia. In: ENTAC 2008 - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2008, Fortaleza. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2008. v. 1. p. 1-2000.

PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; GONZÁ LEZ, R.; MAESTRE, I. R. A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. **Energy and Buildings**, v. 41, p. 272–278, 2009.

PIIL, J. F.; CHRISTIANSEN, L.; MORRIS, N. B.; MIKKELSEN, C. J.; IOANNOU, L. G.; FLOURIS, A. D.; LUNDBYE-JENSEN, J.; NYBO, L. Direct exposure of the head to

solar heat radiation impairs motor-cognitive performance. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–10, 2020.

PODER360. **Governo Bolsonaro corta R\$ 3,2 bilhões do MEC**. 2022. Disponível em: <<https://www.poder360.com.br/economia/governo-bolsonaro-corta-r-32-bilhoes-do-mec/>>. Acesso em: jul. 2022.

PRITONI, M.; SALMON, K.; SANGUINETTI, A.; MOREJOHN, J.; MODERA, M. Occupant thermal feedback for improved efficiency in university buildings. **Energy and Buildings**, v. 144, p. 241–250, 2017.

PROCEL EDIFICA. **Eficiência Energética nas Edificações**: Apresentação. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMIDC46E0FFDBD124A0197D2587926254722LUMISADMIN1PTBRIE.htm>> Acesso em: ago. 2017.

PRÓ-REITORIA DE ADMINISTRAÇÃO DA UFMG (PRA UFMG). **OF. PRA-231/2019**. Belo Horizonte, 2019.

RACKES, A.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Naturally comfortable and sustainable: Informed design guidance and performance labeling for passive commercial buildings in hot climates. **Applied Energy**, v. 174, p. 256–274, 2016.

REDE UNIVERSITÁRIA DE PROGRAMAS DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL (RUPEA). **Histórico**. 2019. Disponível em: <<http://www2.uefs.br/rupea/apresentacao.htm>>. Acesso em: mar. 2019.

REZAEI, R.; BROWN, J.; HAYMAKER, J.; AUGENBROE, G. A new approach to performance-based building design exploration using linear inverse modeling. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 12, n. 3, p. 246–271, 2018.

RIBEIRO, N. F. **Procedimentos simplificados para a avaliação da envoltória pelo método prescritivo do RTQ-C, com foco em edificações existentes**. [Dissertação de Mestrado] Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

ROCHA, A. P. A.; REYNOSO-MEZA, G.; OLIVEIRA, R. C. L. F.; MENDES, N. A pixel counting based method for designing shading devices in buildings considering energy efficiency, daylight use and fading protection. **Applied Energy**, v. 262, 2020.

RUPP, R. F.; GHISI, E. Avaliação de modelos preditivos de conforto térmico em escritórios no clima subtropical brasileiro. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 2, p. 91–107, 2019.

RUPP, R. F.; GHISI, E. Predicting thermal comfort in office buildings in a Brazilian temperate and humid climate. **Energy and Buildings**, v. 144, p. 152–166, 2017.

SAIDEL, M.; DA SILVA, R. S.; DO NASCIMENTO, L. M. The permanent program for efficient use of energy at university of São Paulo - PURE-USP. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 25, n. 3, p. 361–372, 2014.

SAKIYAMA, N. R. M.; CARLO, J. C.; MAZZAFERRO, L.; GARRECHT, H. Building optimization through a parametric design platform: Using sensitivity analysis to improve a radial-based algorithm performance. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 10, 2021b.

SAKIYAMA, N. R. M.; MAZZAFERRO, L.; CARLO, J. C.; BEJAT, T.; GARRECHT, H. Natural ventilation potential from weather analyses and building simulation. **Energy and Buildings**, v. 231, 2021a.

- SALLEH, M. N. M.; KANDAR, M. Z.; SAKIP, S. R. M. Benchmarking for Energy Efficiency on School Buildings Design: A Review. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 222, p. 211–218, 2016.
- SANTAMOURIS, M.; BALARAS, C.; DASCALAKI, E.; ARGIRIOU, A.; GAGLIA, A. Energy consumption and the potential for energy conservation in school buildings in Hellas. **Energy**, vol. 19, n. 6, p. 653–660, 1994.
- SARTOR, D.; PIETTE, M. A.; TSCHUDI, W.; FOK, S. Strategies for energy benchmarking in cleanrooms and laboratory-type facilities. *In: PROCEEDINGS ACEEE SUMMER STUDY ON ENERGY EFFICIENCY IN BUILDINGS 2000*, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 1–13.
- SCHAEFER, A.; GHISI, E. Method for obtaining reference buildings. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 660–672, 2016.
- SEKKI T.; AIRAKSINEN M.; SAARI A. Measured energy consumption of educational buildings in a Finnish city. **Energy Build**, v. 87, p. 105–115, 2015.
- SHARP, T.R. Energy benchmarking in commercial office buildings. *In: ACEEE SUMMER STUDY*, **Anais...**, p. 4321-4329, 1996.
- SHEHABI A; DEFOREST N; MCNEIL A; MASANET E; GREENBLATT J; LEE E; MASSON G; HELMS, B. A; MILLIRON D. U.S. Energy savings potential from dynamic daylighting control glazings. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 415-423, 2013.
- SHUKRI, M. A. M.; JAILANI, J.; HAUASHDH, A. Benchmarking the Energy Efficiency of Higher Educational Buildings: A Case Study Approach. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 12, n. 2, p. 491–496, 2022.
- SIGNOR, R.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. Regression analysis of electric energy consumption and architectural variables of conditioned commercial buildings in 14 Brazilian cities. SEVENTH INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE - BUILDING SIMULATION. **Anais...** p.1373–1380, 2001.
- SILVA, A. S.; ALMEIDA, L. S. S.; GHISI, E. Decision-making process for improving thermal and energy performance of residential buildings: A case study of constructive systems in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 270-286, 2016.
- SILVA, H. L. N.; SANT ANA, P. H. M.; LOURENÇO, S. R. Energy benchmarking in a portfolio of educational buildings in Brazil using support vector machine and data envelopment analysis. **International Journal of Development Research**, v. 9, n. 3, p. 26692–26696, 2019.
- SILVA, O. A. V. O. L.; NETO, J. M. M.; LIRA, M. A. T. An analysis of energy efficiency in multicampi higher education institutions and a novel environmental labeling proposal. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, p. 1–19, 2020.
- SINGH, M. K. OOKA R.; RIJAL, H. B; KUMAR, S. KUMAR A.; MAHAPATRAG S. Progress in thermal comfort studies in classrooms over last 50 years and way forward. **Energy and Buildings**, v. 188-189, p. 149-174, 2019.
- SIQUEIRA, J. C. F.; SILVA, L. B.; COUTINHO, A. S.; RODRIGUES, R. M. Analysis of air temperature changes on blood pressure and heart rate and performance of undergraduate students. **WORK-A Journal of Prevention Assessment & Rehabilitation**, v. 57, p. 43-54, 2017.

SORGATO, M.J., MELO, A.P., LAMBERTS, R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 133, p.1–13, 2016.

SOUZA, H. A.; RODRIGUES, L. S. Ventilação natural como estratégia para o conforto térmico em edificações. **REM: R. Esc. Minas**, v. 65, n. 2, p. 189–194, 2012.

SOUZA, M. T. F. **Análise do conforto térmico e percepção do usuário**: estudo de caso de salas de aula da Escola de Arquitetura da UFMG. Monografia (Curso de Especialização em Sistemas Tecnológicos e Sustentabilidade Aplicada ao Ambiente Construído) – Escola de Arquitetura, UFMG. Belo Horizonte, p. 151, 2019.

SUN, C.; ZHAI, Z. The efficacy of social distance and ventilation effectiveness in preventing COVID-19 transmission. **Sustainable Cities and Society**, v. 62, n. July, p. 1–10, 2020.

SWAMI, M. V.; S. CHANDRA. Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow, **ASHRAE Transactions**, v. 94 (Pt 1), p. 243–266, 1988.

TAMURA, T.; NOZAWA, K.; KONDO, K. AIJ guide for numerical prediction of Wind loads on buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2008; (96) 1974-1984.

TAYLOR, R. Interpretation of the correlation coefficient: a basic review. **Journal of Diagnostic Medical Sonography**, v. Jan/Feb, p. 35–39, 1990.

TOE, D. H. C.; KUBOTA, T. Development of an adaptive thermal comfort equation for naturally ventilated buildings in hot-humid climates using ASHRAE RP-884 database. **Frontiers of Architectural Research**, v. 2, n. 3, p. 278–291, 2013.

TOMINAGA *et al.* AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2008; (96) 1749-1761.

U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Thermal Management of White LEDs**. 2017. Disponível em: <https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/thermal_led_feb07_2.pdf>. Acesso em: out. 2021.

UNITED NATIONS (UN). **Glasgow Climate Pact**. 2021. Disponível em: <<https://unfccc.int/documents/310475>>. Acesso em: jul. 2022.

UNITED NATIONS GLOBAL COMPACT (UNGC). **Rio+20**: Statement by the Higher Education Sustainability Initiative, 2012. Disponível em: <<https://www.unglobalcompact.org/news/248-06-20-2012>>. Acesso em: mar. 2019.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS (UNICAMP). **Campus Sustentável**. 2022. Disponível em: <<https://www.campus-sustentavel.unicamp.br/>>. Acesso em: jul. 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS (UFMG). **Avaliação de desempenho dos servidores técnico-administrativos é suspensa**. 2020. <<https://www.medicina.ufmg.br/avaliacao-de-desempenho-dos-servidores-tecnico-administrativos-e-suspensa/>>. Acesso em: jul. 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS (UFMG). **Comemoração dos dez anos da Biblioteca 24h da Face**. 2018. <

<https://ufmg.br/comunicacao/eventos/comemoracao-dos-dez-anos-da-biblioteca-24h-da-face>>. Acesso em: jul. 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS (UFMG). DEMIN. **Pesquisa mineral e planejamento de mina I**. 201?. <<https://demin.ufmg.br/labdet.php?numaut=20>>. Acesso em: jul. 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS (UFMG). **Nova gestão melhora controle de estoque do Nupad**. 2016. <<https://www.nupad.medicina.ufmg.br/nova-gestao-melhora-controle-de-estoque-do-nupad/>>. Acesso em: jul. 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS (UFMG). **UFMG Sustentável**. Disponível em: <<https://www.ufmg.br/sustentabilidade/>>. Acesso em: jul. 2022.

VAISI, S.; PILLA, F.; MCCORMACK, S. J. Recommending a thermal energy benchmark based on CIBSE TM46 for typical college buildings and creating monthly energy models. **Energy and Buildings**, v. 176, p. 296–309, 2018.

VAN DOREMALEN, N.; BUSHMAKER, T.; MORRIS, D. H.; HOLBROOK, M. G.; GAMBLE, A.; WILLIAMSON, B. N.; TAMIN, A. Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. **The new England journal of medicine**, [S.n.], p. 1–3, 2020.

VEIGA, R. K.; VELOSO, A. C.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Application of machine learning to estimate building energy use intensities. **Energy and Buildings**, v. 249, p. 111219, 2021.

VELOSO, A. C. O.; SOUZA, R. V. G; KOURY, R. N. N. Research of design features that influence energy consumption in office buildings in Belo Horizonte, Brazil. **Energy Procedia**, v. 111, p. 101-110, 2017.

VELOSO, A. C. O.; SOUZA, R. V. G; SANTOS, F. N. Energy benchmarking for office building towers in mild temperate climate. **Energy and Buildings**, v. 222, p. 12–14, 2020.

VETTORAZZI, E.; FIGUEIREDO, A.; REBELO, F.; VICENTE, R.; GRALA DA CUNHA, E. Optimization of the passive house concept for residential buildings in the South-Brazilian region. **Energy and Buildings**, v. 240, p. 1-19, 2021.

VINCENT, O. C.; UCHENNA, O.; ROY, O. O. CFD Analysis of Wind-Driven Natural Ventilation in Building Models. **International Journal of Engineering Research and Advanced Technology**, v. 07, n. 11, p. 01–08, 2021.

WANG, J. C. A study on the energy performance of school buildings in Taiwan. **Energy & Buildings**, v. 133, p. 810–822, 2016.

WEI, T. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 411–419, 2013.

WONG, I. L.; KRÜGER, E.; LOPER, A. C. M.; MORI, F. K. Classification and energy analysis of bank building stock: A case study in Curitiba, Brazil. **Journal of Building Engineering**, v. 23, n. February, p. 259–269, 2019.

WONG, I. L.; LOPER, A. C. M.; KRÜGER, E.; MORI, F. K. Energy performance evaluation and comparison of sampled Brazilian bank buildings with the existing and proposed energy rating systems. **Energy and Buildings**, v. 225, 2020.

WU, X. et al. Top 10 algorithms in data mining. **Knowledge and Information Systems**, v. 14, n. 1, p. 1–37, 2008.

XAVIER, A. A. P. Condições de Conforto Térmico para Estudantes de 2º Grau na Região de Florianópolis. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

ZHANG Y.; ALGEBBROE G. Optimal demand charge reduction for commercial buildings through a combination of efficiency and flexibility measures. **Applied Energy**, v. 221, p. 180-194, 2018.

APÊNDICE A: Revisão sistemática da literatura sobre eficiência energética e *benchmarking* em universidades

Esta etapa do trabalho pode ser encontrada em formato resumido em

GARCIA, M. S.; BITARÃES, T. G.; OLIVEIRA, I. C. F.; FERREIRA, D. C. M.; EULÁRIO, D. M. S.; SOUZA, R. V. G. Eficiência energética e benchmarking em *campi* universitários: oportunidades de pesquisa a partir de análise bibliométrica. *In: XVIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2020*, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre p. 1–8.

O objetivo desta seção do trabalho foi analisar a produção científica acerca do tema Eficiência Energética em Edifícios de *Campi* Universitários, a fim de contextualizar o tema de *benchmarking* neste cenário geral. Dada a ampla produção científica relacionada, realizou-se uma revisão sistemática da literatura por meio de análise bibliométrica.

Buscou-se analisar os cenários internacional e nacional. Para o primeiro, realizou-se o mapeamento do conhecimento a partir do método ProKnow-C (*Knowledge Development Process-Constructivist*) de Ensslin, Ensslin e Pinto (2013). A partir deste método foram desenvolvidas as etapas de seleção de portfólio de artigos sobre o tema da pesquisa e a análise bibliométrica do portfólio. Para a seleção do portfólio de artigos, foi utilizada a base de dados Scopus®. Esta foi escolhida por contemplar publicações de outras bases unificadas e ser, segundo o seu site, a maior base de dados de produções científicas revisadas por pares (SCOPUS, 2019). Um primeiro levantamento foi feito em fevereiro de 2019 e este foi atualizado em janeiro de 2020. As palavras-chave utilizadas foram: "*energy efficien**" AND "*universit* building*" OR "*universit* camp**". Os critérios de pesquisa usados foram: período de busca livre, todos os tipos de documentos, todas as áreas do conhecimento e língua inglesa para títulos, resumos e palavras-chave. Obteve-se uma amostra inicial com 364 trabalhos, de 1982 a 2019. Realizada a filtragem dos artigos selecionados para a eliminação de duplicidades e de trabalhos não relacionados ao tema estudado, o portfólio final contou com 347 publicações.

Para ampliar a análise do cenário de publicações, também foi verificada a evolução numérica das produções científicas e os países e as instituições com maior número de publicações. Posteriormente, as publicações de 2015 a 2019 foram filtradas, tendo em vista a identificação das tendências de pesquisa e oportunidades para pesquisa.

A partir da leitura e análise dos títulos, resumos e palavras-chave do portfólio elaborado, realizou-se uma análise qualitativa com o estabelecimento de categorias relacionadas aos principais temas de pesquisa encontrados. As categorias estabelecidas foram: Diagnóstico, Otimização, Automação, Usuário e Outros. Cada categoria foi dividida em subcategorias e cada artigo foi classificado em uma subcategoria.

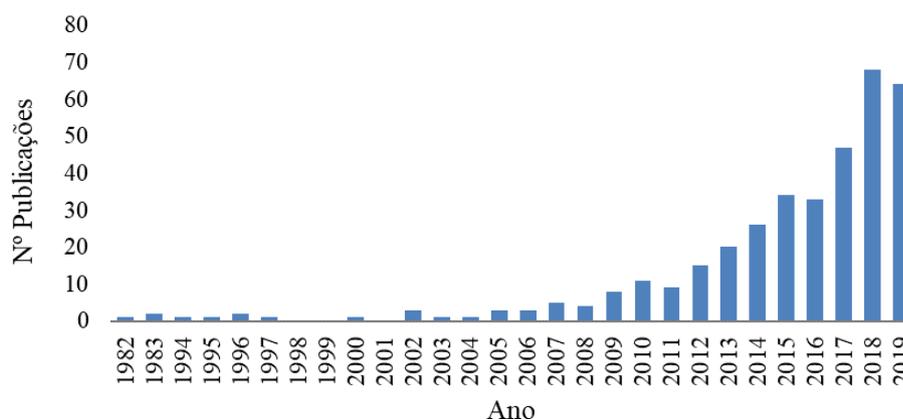
A categoria Diagnóstico foi dividida em: *Benchmarking*, Consumo energético, Qualidade do ambiente interno (foco em análises de conforto térmico, luminoso e qualidade do ar) e Sustentabilidade (abordagens mais gerais, como sistemas de pontuação para construções sustentáveis). A categoria Otimização foi subdividida em: Implantação de fontes renováveis de energia, Geração distribuída, Sistemas (condicionamento de ar, iluminação e envoltória) e *Retrofit* energético. Na categoria Automação, tem-se: Sensores e Sistemas de informação. A categoria Usuários refere-se a publicações com foco na percepção e comportamento dos usuários. Por fim, a categoria Outros abrange temas variados e menos recorrentes.

O mapeamento das publicações nacionais foi feito a partir do levantamento dos Anais dos eventos científicos ENCAC e ENTAC nos últimos dez anos (2009 a 2019). Esta etapa metodológica foi adotada a fim de analisar as produções nacionais de forma mais abrangente, já que foram identificados poucos trabalhos brasileiros no portfólio de produções internacionais. Estes eventos foram selecionados por serem considerados os principais encontros científicos nacionais relacionados ao tema estudado. Os títulos, resumos e palavras-chave dos artigos foram examinados, obtendo-se 79 publicações. As mesmas foram categorizadas usando-se os mesmos grupos dos artigos internacionais.

As análises das produções tiveram foco na categoria de Diagnóstico, tendo em vista a verificação da existência de lacunas a serem preenchidas na produção científica no que se refere ao benchmarking energético em universidades. Das produções identificadas nesta categoria, foram verificados os tipos de condicionamento de ar relatados nos artigos assim como as variáveis que foram analisadas. Ao final, foi feita a comparação do cenário nacional frente ao cenário internacional, identificando tendências e possíveis direcionamentos de pesquisa.

A evolução temporal das publicações acerca do tema é mostrada na Figura A.1. É possível notar o crescimento progressivo do número de publicações na área nos últimos dez anos, com significativo aumento entre os anos de 2017 e 2018, evoluindo de 38 para 68 publicações. Por meio da análise da evolução histórica de publicações, reforça-se a pertinência do estudo do tema eficiência energética em campi universitários.

Figura A.1: Número de publicações por ano sobre o tema Eficiência Energética em *Campi* Universitários

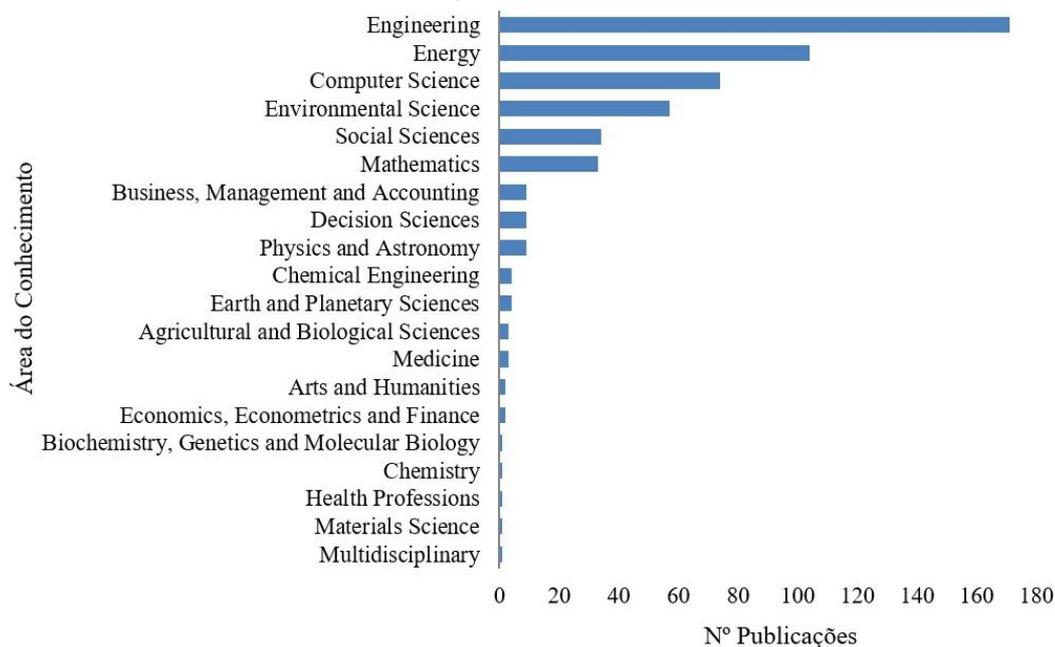


Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Tendo em vista o caráter interdisciplinar do tema e do Programa de Pós-graduação no qual o presente trabalho se insere, realizou-se o levantamento das áreas de conhecimento envolvidas nas publicações (Figura A.2).

A partir da Figura A.2 pode-se observar que as áreas de Engenharia e de Energia são líderes em relação à quantidade de publicações, assim como esperado. Notou-se também grande quantidade de publicações da área de Ciência da Computação, o que atesta a influência das pesquisas de tecnologias computacionais relacionadas ao assunto explorado, que vêm obtendo crescente destaque nos últimos anos. Apesar da pouca quantidade de publicações na área Multidisciplinar, a existência de diferentes áreas do conhecimento na amostra, como Medicina e Física, aponta que o tema pode ser explorado por variadas abordagens e propicia a relação entre diversas áreas do conhecimento sendo um assunto transversal e do campo da Interdisciplinaridade.

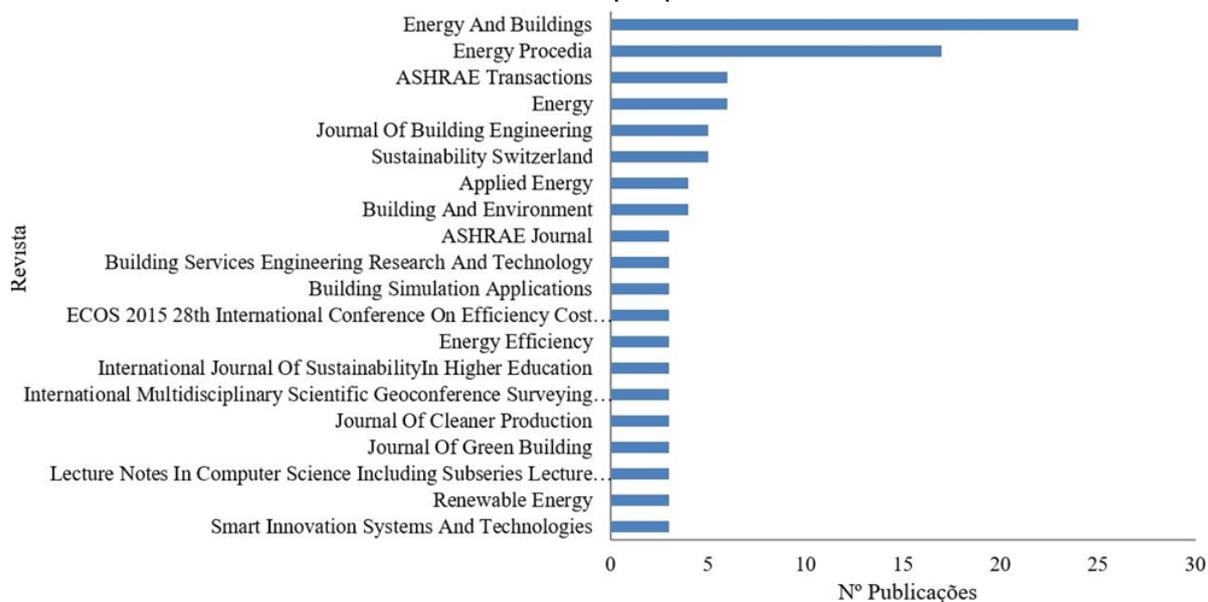
Figura A.2: Número de publicações no tema Eficiência Energética em Campi Universitários por área do conhecimento



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Na Figura A.3 são apresentados os principais periódicos de publicações científicas relacionadas ao tema.

Figura A.3: Número de publicações sobre o tema Eficiência Energética em Campi Universitários por periódico



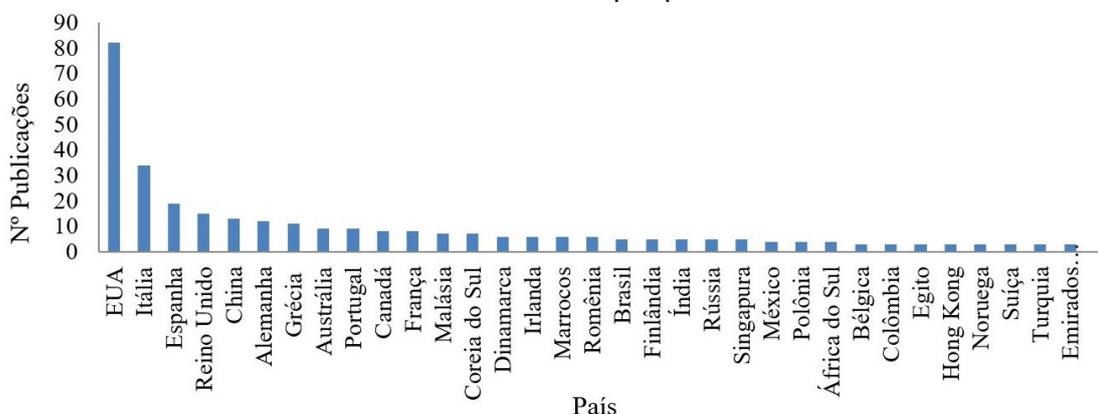
Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Nota-se que o veículo mais relevante de publicações foi o periódico *Energy and Buildings*, sendo seguido pelo *Energy Procedia*. Este, por sua vez, destina-se à publicação de anais de eventos internacionais. Assim, sua presença entre os

periódicos com maiores quantidades de publicações aponta a existência de conferências sobre o tema, mostrando sua presença nas agendas mundiais. As demais revistas apresentam números similares de publicações.

Na Figura A.4 estão relacionados os números de publicações por país. Houve liderança no número de publicações nos Estados Unidos, na Itália e na Espanha. O Brasil apresentou 8 publicações em periódicos internacionais neste período. Os 58 demais países listados apresentam em média 3 artigos. A listagem inclui não só países desenvolvidos, mas também países em desenvolvimento, como Coreia do Sul, Romênia, Índia, entre outros. Em relação ao número de publicações por filiação, há liderança da universidade *Politecnico de Torino* (8 publicações), seguido pelo *Politecnico di Milano*, pela *Arizona State University* (6), pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* e pelo *Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen* (5). Considera-se que o conhecimento acerca dos países e instituições mais influentes pode embasar a busca de parcerias, por parte de pesquisadores brasileiros, relacionados ao assunto explorado.

Figura A.4: Número de publicações sobre o tema Eficiência Energética em Campi Universitários por país



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

A Figura A.5 apresenta a análise de similaridades feita com o *software* IRAMUTEQ®¹³, a partir dos resumos dos artigos. Esta análise foi feita para identificar nichos de estudos relacionados a eficiência energética em *campi* universitários, e se o tema *benchmarking* estaria entre os mais citados nas publicações internacionais.

¹³ O *software* IRAMUTEQ® se baseia na percepção de palavras utilizadas em um mesmo contexto e na associação das mesmas, correlacionando-as de acordo com uma proximidade lexical (SALVIATI, 2017). Utilizou-se como base para pesquisa, os resumos dos artigos da amostra e foram consideradas as palavras citadas mais de 50 vezes.

análise dos resumos, cada artigo foi destinado a apenas uma categoria e subcategoria, representativa de seu foco.

A Figura A.6 apresenta um quadro resumo do estado da arte internacional no tema Eficiência Energética em Edificações e Campi Universitários, mostrando, por categorias, as quantidades de publicações e os três países com maior contribuição nos últimos cinco anos.

Figura A.6: Quadro resumo de publicações por categoria nos últimos 5 anos

CATEGORIAS	FA	FR	PAÍSES COM MAIS PUBLICAÇÕES NA ÁREA	FA / PAÍS
DIAGNÓSTICO	50	21%		
Diagnóstico - Benchmarking	4	8%	1)Austrália, Irã, Irlanda, Itália e Sérvia	1
Diagnóstico - Qualidade do ambiente interno	8	16%	1)Reino Unido 2)Estados Unidos, França, Noruega e China	2 1
Diagnóstico - Consumo energético	34	68%	1)Itália 2)Estados Unidos 3)Brasil, México, Espanha, Austrália, Reino Unido e Grécia	5 4 2
Diagnóstico - Sustentabilidade	4	8%	1)China 2)Indonésia, Noruega, Itália, México, Emirados Árabes, Espanha e Reino Unido	2 1
OTIMIZAÇÃO	75	32%		
Otimização - Implantação de fontes renováveis de energia	11	15%	1)Itália 2)Alemanha, Austrália, Arábia Saudita, Coreia do Sul, Espanha, Grécia, Romênia	3 1
Otimização - Geração distribuída	10	13%	1)China 2)Estados Unidos, Índia, Marrocos, Paquistão e Romênia	3 1
Otimização - Sistemas (condicionamento de ar, iluminação ou envoltória)	34	45%	1)Estados Unidos 2)China, Espanha, Reino Unido, Polônia e Romênia 3)Austrália, África do Sul, Arábia Saudita, Bélgica, Colômbia, etc.	6 2 1
Otimização - Retrofit energético (conversão para Near Zero)	16	21%	1)Itália 2)Alemanha, Estados Unidos, Portugal, Austrália, Polônia e Turquia	7 1
Otimização - Regime operacional	4	5%	1)Estados Unidos, Áustria e Coreia do Sul	1
AUTOMAÇÃO	49	21%		
Automação - Sensores	7	14%	1)Itália e Estados Unidos 2)Coreia do Sul, Austrália, Índia e Singapura	2 1
Automação - Sistemas de informação	42	86%	1)Estados Unidos 2)Dinamarca, Marrocos e Singapura 3)Itália	13 3 2
USUÁRIO	9	4%		
Usuário - Comportamento ou percepção	6	100%	1)Estados Unidos 2)Itália 3)África do Sul	3 2 1
OUTROS	50	21%		
TOTAL	233	100%		

FA: Frequência absoluta; FR: Frequência relativa

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Percebe-se que, internacionalmente, a maior quantidade de pesquisas dos últimos cinco anos relaciona-se à categoria Otimização, principalmente à otimização de Sistemas (condicionamento de ar, iluminação ou envoltória). Em seguida, tem-se as categorias Automação, Diagnóstico e Outros, respectivamente. Automação apresentou grande quantidade de publicações relacionadas ao desenvolvimento e implantação de Sistemas de Informação nos Campi Universitários, representando mais de 80% das publicações da categoria. Sendo esta uma categoria que possui

aproximadamente 20% da produção geral, verifica-se que Sistemas de Informação é um nicho que vem recebendo destaque nas pesquisas científicas internacionais. Neste tema, são estudados sistemas computacionais para subsidiar a implantação de infraestruturas inteligentes nas quais sensores e atuadores colaboram para coletar informações e interagir com máquinas, ferramentas e usuários – os chamados *smart campus* ou *smart buildings*. Dentre os artigos há, por exemplo, trabalhos sobre métodos de medição automatizada de dados por sensores e visualização de dados em interfaces para o gerenciamento de sistemas de condicionamento de ar. A categoria com menor quantidade de publicações foi a que se relaciona ao Usuário.

Verifica-se ainda que dentre os países com maior quantidade de publicações, há a presença de Estados Unidos e Itália, assim como de países em desenvolvimento como o Brasil, China e Índia em diversas subcategorias. Trabalhos que abordaram o benchmarking apresentaram pouco destaque no levantamento, representando apenas 8% das publicações da categoria Diagnóstico. Não foram detectados estudos originados no Brasil neste levantamento na base de dados Scopus.

A Figura A.7 apresenta o quadro resumo de produções nacionais nos encontros de tecnologia (ENTAC) e de conforto ambiental (ENCAC) dos últimos dez anos, conforme as mesmas categorias usadas para levantamento do cenário internacional.

Figura A.7: Quadro resumo de publicações nacionais por categoria nos últimos 10 anos nos ENCACs e ENTACs

CATEGORIAS	FREQUÊNCIA ABSOLUTA	FREQUÊNCIA RELATIVA (%)
DIAGNÓSTICO	39	49%
Diagnóstico - <i>Benchmarking</i>	1	1%
Diagnóstico - Qualidade do ambiente interno	19	24%
Diagnóstico - Consumo energético e etiquetagem	18	23%
Diagnóstico - Sustentabilidade	1	1%
OTIMIZAÇÃO	18	23%
Otimização - Implantação de fontes renováveis de energia	4	5%
Otimização - Geração distribuída	0	0%
Otimização - Sistemas (condicionamento de ar, iluminação ou envoltória)	14	18%
Otimização - Retrofit energético (conversão para Near Zero)	0	0%
Otimização - Regime operacional	0	0%
AUTOMAÇÃO	1	1%
Automação - Sensores	0	0%
Automação - Sistemas de informação	1	1%
USUÁRIO - Comportamento ou percepção	5	6%
OUTROS	16	20%
TOTAL	79	100%

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Com a Figura A.7, percebe-se que, nos últimos dez anos, o Brasil possuiu maior quantidade de publicações na categoria Diagnóstico, sendo seguido por Otimização, principalmente de sistemas de condicionamento de ar, iluminação e envoltória. A

categoria de Automação foi a que apresentou a menor quantidade de publicações, diferentemente do cenário internacional. A partir desta constatação, entende-se que estudos focados na implantação de sistemas de informação automatizados nos edifícios universitários configuram uma tendência para pesquisas futuras no país. A categoria Usuários apresentou pouco destaque no cenário nacional, assim como no internacional. No entanto, artigos de revisões recentes que analisaram outras tipologias de edifícios, mostram que há o desenvolvimento de diversos estudos de eficiência energética nos edifícios com foco nos usuários (user-centric), em seu conforto, performance (JUNG; JAZIZADEH, 2019 e GENG et al., 2019). Assim, entende-se que este nicho conforma uma oportunidade de direcionamento de pesquisas nacionais e internacionais direcionadas para a tipologia de edifícios universitários.

Tendo em vista um dos objetivos dessa seção, que é a verificação sobre a lacuna relacionada ao *benchmarking* energético de edifícios universitários, a categoria Diagnóstico, da qual a subcategoria *Benchmarking* faz parte, foi abordada de forma mais específica.

Internacionalmente, os trabalhos focados em Diagnóstico de Consumo Energético foram a maioria dentre as subcategorias. Nestes trabalhos, destacam-se as práticas de auditorias energéticas dos edifícios, onde são levantados os consumos por uso final, em sua maioria, com a utilização de equipamentos de medição. O estudo de Samira e Nurmammad (2018) é um exemplo, que também demonstra que o diagnóstico energético conforma etapa anterior à tomada de decisões para otimização e elaboração de políticas a serem implantadas nos campi universitários.

O *benchmarking* energético de campi universitários representou 8% das publicações dentre as subcategorias do Diagnóstico, se apresentando como uma tendência recente com 4 artigos publicados entre 2017 e 2018. Nestes estudos, Vaisi, Pilla e McCormack (2018) desenvolvem um novo benchmark para *campi* universitários de Dublin, a partir da comparação dos consumos de 52 edifícios com o *benchmark* indicado pela *Chartered Institution of Building Services Engineers*, CIBSE TM46. Khoshbakht, Gou e Dupre (2018) analisam os padrões de uso de energia de edifícios universitários da Austrália, tendo em vista seus diferentes usos e sua complexidade, estabelecendo também um *benchmark* para esta tipologia no país. Jurišević et al.

(2018) realizam um *benchmark* específico para a energia utilizada para o aquecimento de 42 edifícios na Sérvia. Percebe-se ainda que, de forma geral, os estudos de benchmarking para campi possuem caráter “local”, sendo desenvolvidas para cada país, ou mesmo para um determinado *campi*.

No cenário nacional, a categoria Diagnóstico representou aproximadamente 50% das publicações, das quais a maior parte referiu-se ao diagnóstico de Consumo Energético e etiquetagem das edificações. Nesta subcategoria, aproximadamente 80% dos artigos retrataram a aplicação do Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética dos Edifícios Comerciais, Serviços e Edifícios Públicos (RTQ-C) (BRASIL, 2010). Em seguida, destacou-se a subcategoria Qualidade do Ambiente Interno, na qual os trabalhos analisaram o conforto térmico e luminoso como forma de promover a redução do consumo energético, como visto em Oliveira e Rola (2019).

Não foram encontrados, nas publicações analisadas, artigos a respeito do desenvolvimento ou aplicação de *benchmark* energético para as universidades brasileiras. Considera-se, portanto, que este é um nicho oportuno para o desenvolvimento de pesquisas mais aprofundadas, na área de Diagnóstico. A fim de condensar os principais resultados dos trabalhos da categoria Diagnóstico, foi feito o levantamento das variáveis mais consideradas nos mesmos e dos tipos de condicionamento de ar verificados nos edifícios analisados pelos estudos, internacional e nacionalmente (Figuras A.8 e A.9).

Figura A.8: Variáveis consideradas nos artigos de Diagnóstico (em amarelo, a sinalização das dez variáveis mais analisadas, internacional e nacionalmente)

	Área	Volume	Nº de pavimentos	Fator de forma	Clima	Tipo de uso do edifício	Idade da edificação	Padrão de ocupação	Densidade de ocup.	Transmitância parede	Absorância parede	Transmitância cobertura	Absorância cobertura	Comport. do usuário	Sistema de ilumin. Artif.	Consumo de equip.	Presença de prot. solar	Temperatura externa	Disciplina acadêmica	% abertura da fachada	% área por tipo de uso	Orientação da fachada	Consumo energético	Luz do dia/ iluminância
Artigos internacionais (n=53)	70%	15%	40%	2%	42%	96%	49%	36%	19%	28%	4%	19%	2%	26%	38%	28%	13%	38%	2%	21%	17%	17%	75%	11%
Artigos nacionais (n=35)	66%	20%	34%	20%	49%	97%	31%	23%	9%	40%	43%	37%	37%	6%	57%	23%	49%	20%	9%	34%	3%	57%	43%	29%

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Figura A.9: Tipos de condicionamento de ar verificados nos estudos dos artigos da categoria Diagnóstico, internacional e nacionalmente

	Tipo de condicionamento de ar			
	Ventilação natural	Ar condicionado	Misto (ambos)	Não se aplica
Artigos internacionais (n=39)	11,32%	41,51%	41,51%	5,66%
Artigos nacionais (n=35)	34,3%	0,0%	57,1%	8,57%

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Interessante notar, na Figura A.8, que estudos internacionais abordam mais o comportamento do usuário e densidade de ocupação do que os estudos nacionais. Por outro lado, os estudos nacionais abordam mais variáveis presentes no RTQ-C (BRASIL, 2010) e aspectos relacionados à grande incidência solar, como proteção solar e orientação das fachadas. Já na Figura A.9, nota-se a diferença entre os tipos de condicionamento de ar relatados nos artigos internacionais e nacionais, nos quais os primeiros apresentam maior predominância de condicionamento artificial e misto, enquanto no segundo, a maior parte dos trabalhos relatam tipo de condicionamento misto, seguido de ventilação natural.

Comparando-se as categorias com maiores quantidades de publicações internacionais e nacionais, e considerando que estudos de Diagnóstico são etapas anteriores ao estabelecimento de medidas de otimização, os autores acreditam que Otimização e Automação são também nichos representativos das tendências para o desenvolvimento de pesquisas futuras no cenário nacional, considerando todas as suas subcategorias. Reforça-se ainda a abordagem da categoria Usuários como oportunidade de desenvolvimento de mais pesquisas, tanto nacional quanto internacionalmente.

O presente apêndice apresentou análise bibliométrica das produções sobre o tema Eficiência Energética e *benchmarking* em *Campi* Universitários, identificando o estado da arte, oportunidades e tendências de pesquisa sobre o tema. A evolução de produção na área, as fontes de publicação e os países com maiores contribuições foram apresentados, além do mapeamento de categorias dos principais focos de pesquisa e da contextualização da produção brasileira frente ao cenário internacional.

A partir das revisões sistemáticas da produção científica no cenário internacional e nacional, considera-se que a quantidade pouco expressiva de publicações relacionadas a *benchmarking* em edificações universitárias indica que este é um nicho do tema geral de eficiência energética em edificações universitárias para o qual ainda cabem maiores investigações, lacuna na qual a presente tese se insere. Ainda, aponta-se maior pertinência que os estudos de *benchmarking* de universidades brasileiras abordem com maior foco edifícios ventilados de forma natural ou mista.

**APÊNDICE B: Questionário sobre tipos de condicionamento de ar e
experiência térmica nos edifícios de *campus* de instituições de ensino superior
no Brasil**

Este questionário irá auxiliar pesquisa de doutorado em andamento no Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura, UFMG.

Ficamos muito gratos por sua participação!

Caso queira entrar em contato conosco, envie um e-mail para:
marinagarcia.arq@gmail.com

O Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) assinado pelo pesquisador
está disponível para download no link:

<https://www.dropbox.com/s/cpdc57ctq5npgid/TCLE.pdf?dl=0>.

Legenda:

- Indica alternativas que só podem ter **uma** escolha dentro das opções de cada linha
- Indica alternativas que podem ter **múltiplas** escolhas

1. Você frequenta um *campus* de instituição de ensino superior brasileira? (universidade ou instituto) *[O respondente só poderia passar para as próximas perguntas caso respondesse “Sim”].*

- Sim Não

2. Assinale abaixo se concorda em participar desta pesquisa, se leu o TCLE e se tem mais de 18 anos. *[O respondente só poderia passar para as próximas perguntas caso respondesse “Sim”].*

- Sim Não

3. Sexo:

- Feminino Masculino Outro: _____

4. A instituição que você frequenta é:

- Pública Privada

12. Se você frequentar **Unidades Acadêmicas**, indique qual a sua percepção em relação à **sensação térmica** nos ambientes no **inverno**, em geral.

	Muito quente	Quente	Levemente quente	Confortável	Levemente frio	Frio	Muito frio	Não sei ou não se aplica
Salas de aula (tradicionais, com quadro e carteiras)	<input type="radio"/>							
Bibliotecas	<input type="radio"/>							
Laboratórios de pesquisa (que só têm computadores)	<input type="radio"/>							
Laboratórios de equipamentos (que tenham outros equipamentos além de computadores)	<input type="radio"/>							
Gabinetes de professores, salas administrativas	<input type="radio"/>							

13. Se você frequentar **Unidades Acadêmicas**, indique qual a sua percepção em relação à **preferência térmica** nos ambientes no **verão**, em geral.

	Mais resfriado	Assim mesmo	Mais aquecido	Não sei ou não se aplica
Salas de aula (tradicionais, com quadro e carteiras)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bibliotecas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Laboratórios de pesquisa (que só têm computadores)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Laboratórios de equipamentos (que tenham outros equipamentos além de computadores)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gabinetes de professores, salas administrativas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

14. Se você frequentar **Unidades Acadêmicas**, indique qual a sua percepção em relação à **preferência térmica** nos ambientes no **inverno**, em geral.

	Mais resfriado	Assim mesmo	Mais aquecido	Não sei ou não se aplica
Salas de aula (tradicionais, com quadro e carteiras)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bibliotecas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Laboratórios de pesquisa (que só têm computadores)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Laboratórios de equipamentos (que tenham outros equipamentos além de computadores)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gabinetes de professores, salas administrativas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

15. Se você frequentar **Unidades Acadêmicas**, indique qual a sua percepção em relação à **aceitabilidade térmica** nos ambientes no **verão**, em geral.

	Aceitável	Inaceitável	Não sei ou não se aplica
Salas de aula (tradicionais, com quadro e carteiras)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bibliotecas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Laboratórios de pesquisa (que só têm computadores)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Laboratórios de equipamentos (que tenham outros equipamentos além de computadores)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gabinetes de professores, salas administrativas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

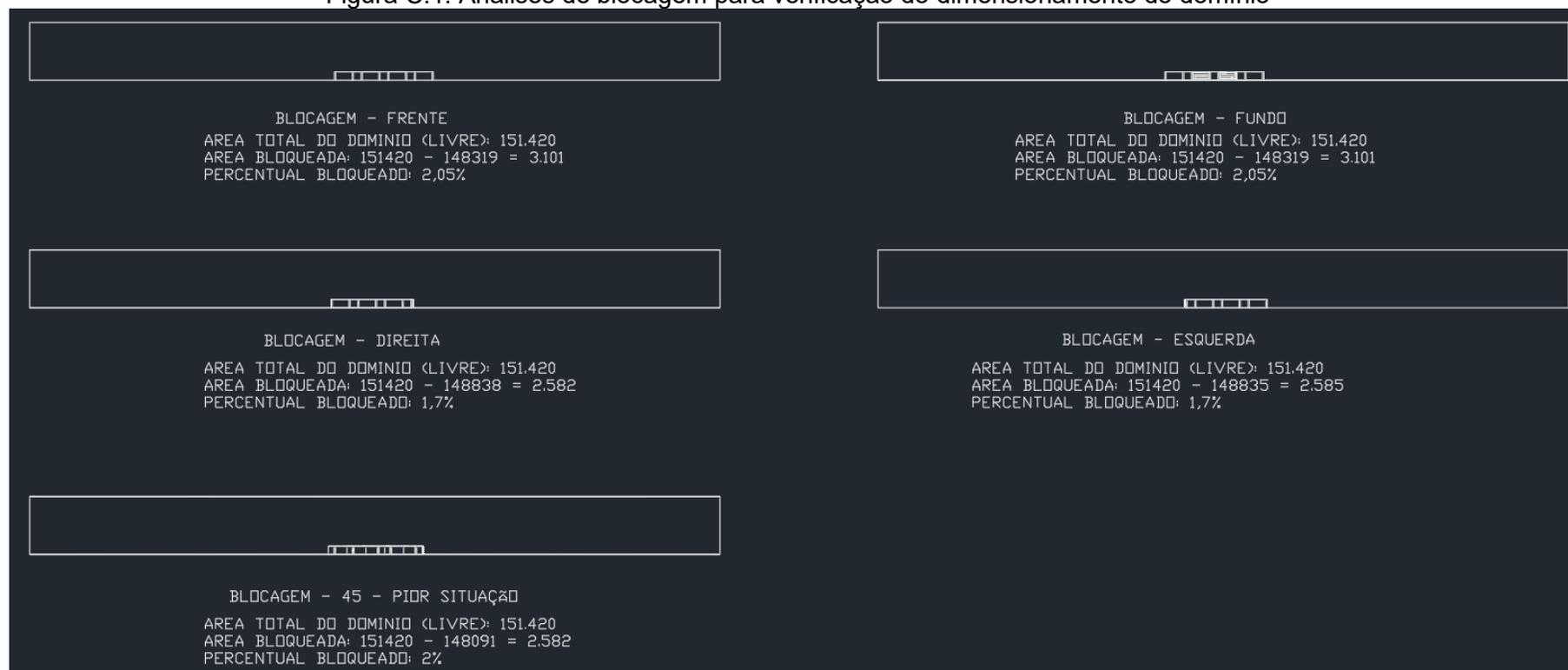
16. Se você frequentar **Unidades Acadêmicas**, indique qual a sua percepção em relação à **aceitabilidade térmica** nos ambientes no **inverno**, em geral.

	Mais resfriado	Assim mesmo	Não sei ou não se aplica
Salas de aula (tradicionais, com quadro e carteiras)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bibliotecas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Laboratórios de pesquisa (que só têm computadores)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Laboratórios de equipamentos (que tenham outros equipamentos além de computadores)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gabinetes de professores, salas administrativas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

APÊNDICE C: Análises referentes ao experimento de simulações em CFD

Resultados análises de bloqueio do domínio: A Figura mostra que os percentuais de obstrução pela análise de bloqueio foram inferiores aos limites estabelecidos pela literatura (AMARAL, 2017).

Figura C.1: Análises de bloqueio para verificação do dimensionamento do domínio



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Resultados do Teste de refinamento de malha: A Tabela mostra que o teste de refinamento de malha indicou a necessidade da utilização da malha de 55 milhões de elementos, uma vez que as malhas menos robustas (com 11 e 25 milhões de elementos) apresentaram pontos com diferenças de Cps maiores que 10%.

Tabela C.1 – Resultados do teste de refinamento de malha para simulações em CFD

	Nomes das superfícies	CPs malha 11M	CPs malha 25M	CPs malha 55M	Diferença entre malhas 11 e 25M (%)	Diferença entre malhas 25 e 55M (%)
0	J_CORR_1PAV	-0,28	-0,30	-0,30	0,07	0,00
1	J_CORR_1PAV_BRISE	-0,29	-0,33	-0,32	0,14	0,03
2	J_CORR_2PAV	-0,29	-0,33	-0,33	0,14	0,00
3	J_CORR_2PAV_BRISE	-0,37	-0,40	-0,39	0,08	0,03
4	J_CORR_COB	-0,29	-0,28	-0,28	0,03	0,00
5	J_CORR_COB_BRISE	-0,42	-0,41	-0,40	0,02	0,02
6	J_CORR_TERREO	-0,27	-0,28	-0,27	0,04	0,04
7	J_CORR_TERREO_BRISE	-0,23	-0,25	-0,25	0,09	0,00
8	J_EXT1_1PAV	-0,18	-0,17	-0,17	0,06	0,00
9	J_EXT1_2PAV	-0,15	-0,15	-0,15	0,00	0,00
10	J_EXT1_COB	0,01	-0,04	-0,04	5,00	0,00
11	J_EXT1_TERREO	-0,05	-0,06	-0,07	0,20	0,17
12	J_EXT2_1PAV	0,61	0,54	0,52	0,11	0,04
13	J_EXT2_2PAV	0,60	0,51	0,50	0,15	0,02
14	J_EXT2_COB	0,32	0,25	0,24	0,22	0,04
15	J_EXT2_TERREO	0,61	0,54	0,53	0,11	0,02
16	J_FRONT_1PAV	0,19	0,20	0,19	0,05	0,05
17	J_FRONT_1PAV_BRISE	0,33	0,30	0,30	0,09	0,00
18	J_FRONT_2PAV	0,22	0,20	0,19	0,09	0,05
19	J_FRONT_2PAV_BRISE	0,38	0,33	0,33	0,13	0,00
20	J_FRONT_COB	0,07	0,07	0,07	0,00	0,00
21	J_FRONT_COB_BRISE	0,34	0,30	0,30	0,12	0,00
22	J_FRONT_TERREO	0,17	0,19	0,18	0,12	0,05
23	J_FRONT_TERREO_BRISE	0,27	0,27	0,27	0,00	0,00
24	J_PATIO_1PAV	-0,14	-0,11	-0,10	0,21	0,09
25	J_PATIO_1PAV_BRISE	-0,33	-0,23	-0,23	0,30	0,00
26	J_PATIO_2PAV	-0,11	-0,11	-0,10	0,00	0,09
27	J_PATIO_2PAV_BRISE	-0,33	-0,25	-0,24	0,24	0,04
28	J_PATIO_COB	0,10	-0,05	-0,03	1,50	0,40
29	J_PATIO_COB_BRISE	-0,32	-0,24	-0,23	0,25	0,04
30	J_PATIO_TERREO	0,08	-0,07	-0,05	1,88	0,29
31	J_PATIO_TERREO_BRISE	-0,33	-0,22	-0,22	0,33	0,00

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

APÊNDICE D: Estudo de diferenças dos resultados entre tipos de morfologias das salas de aula

Este apêndice apresenta os resultados do estudo no qual verificou-se a variação de resultados de PHOC e GHC a partir do uso das morfologias 1A e 2A para representarem todas as demais morfologias identificadas. Foram verificados o NMBE (%) e o CvRMSE (%) entre os resultados das seguintes morfologias: 1A e 1B, 2A e 2B, 2A e 3A, 2A e 3B, 2A e 4A, 2A e 4B e 2A e 4C. Assim, a morfologia 1B seria representada pela 1A e as demais seriam representadas pela morfologia 2A. Esta etapa foi desenvolvida para viabilizar o experimento paramétrico, diminuindo a quantidade de variações de modelos necessárias.

Os modelos simulados seguiram a conformação do arquétipo 2, sem consideração de proteção solar, com os Cps calculados a partir das simulações em CFD, com PAF de 38% e orientação norte. Os resultados de PHOC e GHC obtidos para todos os quatro pavimentos foram considerados para o cálculo das medidas de variação. A Tabela mostra os resultados obtidos a partir desse estudo.

Tabela D.1 – Diferenças de resultados de PHOC e GHC entre tipos de morfologias

Morfologias	PHOC		GRAUS-HORA	
	CvRMSE (%)	NMBE (%)	CvRMSE (%)	NMBE (%)
1A-1B	0.15	0.09	0.08	-0.07
2A-2B	0.06	0.03	0.08	-0.07
2A-2C	0.04	0.02	0.04	-0.04
2A-3A	11.44	0.41	12.17	-1.38
2A-3B	15.12	11.66	16.04	-11.41
2A-4A	11.40	-114.86	13.33	72.21
2A-4B	29.47	-29.26	25.29	24.05
2A-4C	66.97	-66.12	51.92	49.89

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Considerando a indicação da ASHRAE Guideline 14 (ASHRAE, 2002), no caso de comparações de dados medidos e simulados horários, os valores para o CvRMSE e o NMBE devem ser inferiores a 30% e 10%, respectivamente, para que se possa considerar que um modelo esteja aceitavelmente calibrado. No caso desse estudo, esses limites foram considerados para avaliar as diferenças entre os modelos. Verificou-se que no caso dos modelos 1B, 2A, 2B, 2C, 3A e 3B, os índices alcançaram valores dentro dos limites, indicados pela ASHRAE (2002). Assim, entendeu-se que os modelos 1A e 2A poderiam ser utilizados para representá-los de maneira suficientemente aceitável. Já os modelos 4A, 4B e 4C não alcançaram as métricas

consideradas. Para que se pudesse avaliar o conforto térmico de todas as salas de aula no sistema de *benchmarking*, optou-se que, quando houver a morfologia do tipo 4 no edifício, deve ser indicado no benchmarking que o modelo considerado apresenta diferenças em relação à morfologia original da sala. O percentual de salas com morfologia do tipo 4 para cada prédio deve ser informado.

APÊNDICE E: Mapeamento das rodadas possíveis para simulações paramétricas

O Quadro 14 refere-se a um trecho do quadro completo de mapeamento das rodadas possíveis para a simulação de todos os cenários. Este trecho mostra as rodadas do arquétipo 2, o mais representativo da UFMG. São identificados com Status “Ok” aquelas rodadas que foram simuladas no presente estudo.

Quadro 14 – Trecho do mapeamento de rodadas possíveis para o experimento de simulações paramétricas

FACE (arquétipo 2)						
Status	Nº	Nome pasta	ENVOLTORIA	BRISE - CP	TEMPO (h)	Qt simulacoes
Ok	1	ARQUETIPO_FACE_1A	env. comb. 1	CPS S/ BRISE	10	2304
Ok	2	ARQUETIPO_FACE_1A-2	env. comb. 2	CPS S/ BRISE	10	2304
Ok	3	ARQUETIPO_FACE_1A-3	env. comb. 3	CPS S/ BRISE	9	2304
Ok	4	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISE - PAF15	env. comb. 1	CPS BRISE	8	504
Ok	5	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISE - PAF30	env. comb. 1	CPS BRISE	4,7	504
Ok	6	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISE - PAF60	env. comb. 1	CPS BRISE	2,5	504
Ok	7	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISE - PAF80	env. comb. 1	CPS BRISE	2,5	504
	8	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISE-2 - PAF15	env. comb. 2			
Ok	9	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISE-2 - PAF30	env. comb. 2	CPS BRISE	2	504
Ok	10	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISE-2 - PAF60	env. comb. 2	CPS BRISE	2	504
	11	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISE-2 PAF80	env. comb. 2			
	12	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISE-3 - PAF15	env. comb. 3			
Ok	13	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISE-3 - PAF30	env. comb. 3	CPS BRISE	6,5	504
Ok	14	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISE-3 - PAF60	env. comb. 3	CPS BRISE	7	504
	15	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISE-3 - PAF80	env. comb. 3			
Ok	16	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISE-SUL - PAF15	env. comb. 1	CPS BRISE	0,5	72
Ok	17	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISE-SUL - PAF30	env. comb. 1	CPS BRISE	0,5	72
Ok	18	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISE-SUL - PAF60	env. comb. 1	CPS BRISE	0,5	72
Ok	19	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISE-SUL - PAF80	env. comb. 1	CPS BRISE	0,5	72
	20	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISE-SUL - PAF15	env. comb. 2			
	21	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISE-SUL - PAF30	env. comb. 2			
	22	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISE-SUL - PAF60	env. comb. 2			

	23	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-SUL - PAF80	env. comb. 2			
	24	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-SUL - PAF15	env. comb. 3			
	25	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-SUL - PAF30	env. comb. 3			
	26	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-SUL - PAF60	env. comb. 3			
	27	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-SUL - PAF80	env. comb. 3			
	28	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-VENEZIANA - PAF15	env. comb. 1			
	29	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-VENEZIANA - PAF15	env. comb. 2			
	30	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-VENEZIANA - PAF15	env. comb. 3			
Ok	31	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-VENEZIANA - PAF30	env. comb. 1	CPS BRISSE	2	504
	32	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-VENEZIANA - PAF30	env. comb. 2			
	33	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-VENEZIANA - PAF30	env. comb. 3			
Ok	34	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-VENEZIANA - PAF60	env. comb. 1	CPS BRISSE	2	504
	35	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-VENEZIANA - PAF60	env. comb. 2			
	36	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-VENEZIANA - PAF60	env. comb. 3			
	37	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-VENEZIANA - PAF80	env. comb. 1			
	38	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-VENEZIANA - PAF80	env. comb. 2			
	39	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-VENEZIANA - PAF80	env. comb. 3			
	40	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF15	env. comb. 1			
	41	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF15	env. comb. 2			
	42	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF15	env. comb. 3			
	43	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF30	env. comb. 1			
	44	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF30	env. comb. 2			
	45	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF30	env. comb. 3			
	46	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF60	env. comb. 1			
	47	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF60	env. comb. 2			
	48	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF60	env. comb. 3			
	49	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF80	env. comb. 1			
	50	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF80	env. comb. 2			
	51	ARQUETIPO_FACE_1A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF80	env. comb. 3			
Ok	52	ARQUETIPO_FACE_2A	env. comb. 1	CPS SEM BRISSE	40	2304
Ok	53	ARQUETIPO_FACE_2A-2	env. comb. 2	CPS SEM BRISSE	9,7	2304
Ok	54	ARQUETIPO_FACE_2A-3	env. comb. 3	CPS SEM BRISSE	10,0	2304
	55	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRISSE - PAF15	env. comb. 1			

Ok	56	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS - PAF30	env. comb. 1	CPS BRIS	6	504
Ok	57	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS - PAF60	env. comb. 1	CPS BRIS	6,8	504
	58	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS - PAF80	env. comb. 1			
	59	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-2 - PAF15	env. comb. 2			
	60	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-2 - PAF30	env. comb. 2			
Ok	61	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-2 - PAF60	env. comb. 2	CPS BRIS	7	504
	62	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS -2 PAF80	env. comb. 2			
	63	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-3 - PAF15	env. comb. 3			
	64	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-3 - PAF30	env. comb. 3			
	65	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-3 - PAF60	env. comb. 3			
	66	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-3 - PAF80	env. comb. 3			
	67	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-SUL - PAF15	env. comb. 1			
Ok	68	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-SUL - PAF30	env. comb. 1	CPS BRIS	0,5	72
	69	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-SUL - PAF60	env. comb. 1			
	70	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-SUL - PAF80	env. comb. 1			
	71	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-SUL - PAF15	env. comb. 2			
	72	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-SUL - PAF30	env. comb. 2			
	73	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-SUL - PAF60	env. comb. 2			
	74	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-SUL - PAF80	env. comb. 2			
	75	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-SUL - PAF15	env. comb. 3			
	76	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-SUL - PAF30	env. comb. 3			
	77	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-SUL - PAF60	env. comb. 3			
	78	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-SUL - PAF80	env. comb. 3			
	79	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-VENEZIANA - PAF15	env. comb. 1			
	80	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-VENEZIANA - PAF15	env. comb. 2			
	81	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-VENEZIANA - PAF15	env. comb. 3			
Ok	82	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-VENEZIANA - PAF30	env. comb. 1	CPS BRIS	6	504
	83	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-VENEZIANA - PAF30	env. comb. 2			
	84	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-VENEZIANA - PAF30	env. comb. 3			
	85	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-VENEZIANA - PAF60	env. comb. 1			
	86	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-VENEZIANA - PAF60	env. comb. 2			
	87	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-VENEZIANA - PAF60	env. comb. 3			
	88	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRIS-VENEZIANA - PAF80	env. comb. 1			

	89	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRISSE-VENEZIANA - PAF80	env. comb. 2			
	90	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRISSE-VENEZIANA - PAF80	env. comb. 3			
	91	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF15	env. comb. 1			
	92	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF15	env. comb. 2			
	93	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF15	env. comb. 3			
Ok	94	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF30	env. comb. 1	CPS BRISSE	6	72
	95	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF30	env. comb. 2			
	96	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF30	env. comb. 3			
	97	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF60	env. comb. 1			
	98	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF60	env. comb. 2			
	99	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF60	env. comb. 3			
	100	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF80	env. comb. 1			
	101	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF80	env. comb. 2			
	102	ARQUETIPO_FACE_2A-COMBRISSE-SUL-VENEZIANA - PAF80	env. comb. 3			
Ok	103	ARQUETIPO_FACE_2A-VENT_CRUZADA	env. comb. 1	CPS SEM BRISSE	17,8	2304
Ok	104	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT_CRUZADA-2	env. comb. 2	CPS SEM BRISSE	17,8	2304
	105	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT_CRUZADA-3	env. comb. 3			
	106	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT_CRUZADA-COMBRISSE - PAF15	env. comb. 1			
Ok	107	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT_CRUZADA-COMBRISSE - PAF30	env. comb. 1	CPS BRISSE	2,7	504
Ok	108	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT_CRUZADA-COMBRISSE - PAF60	env. comb. 1	CPS BRISSE	3,8	504
	109	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT_CRUZADA-COMBRISSE - PAF80	env. comb. 1			
	110	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT_CRUZADA-COMBRISSE-2 - PAF15	env. comb. 2			
Ok	111	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT_CRUZADA-COMBRISSE-2 - PAF30	env. comb. 2	CPS BRISSE	4	504
Ok	112	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT_CRUZADA-COMBRISSE-2 - PAF60	env. comb. 2	CPS BRISSE	5,9	504
	113	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT_CRUZADA-COMBRISSE -2 PAF80	env. comb. 2			
	114	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT_CRUZADA-COMBRISSE-3 - PAF15	env. comb. 3			
	115	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT_CRUZADA-COMBRISSE-3 - PAF30	env. comb. 3			
	116	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT_CRUZADA-COMBRISSE-3 - PAF60	env. comb. 3			
	117	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT_CRUZADA-COMBRISSE-3 - PAF80	env. comb. 3			
	118	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT_CRUZADA-COMBRISSE-SUL - PAF15	env. comb. 1			
	119	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT_CRUZADA-COMBRISSE-SUL - PAF30	env. comb. 1			
	120	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT_CRUZADA-COMBRISSE-SUL - PAF60	env. comb. 1			
	121	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT_CRUZADA-COMBRISSE-SUL - PAF80	env. comb. 1			

	122	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL - PAF15	env. comb. 2			
	123	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL - PAF30	env. comb. 2			
	124	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL - PAF60	env. comb. 2			
	125	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL - PAF80	env. comb. 2			
	126	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL - PAF15	env. comb. 3			
	127	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL - PAF30	env. comb. 3			
	128	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL - PAF60	env. comb. 3			
	129	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL - PAF80	env. comb. 3			
Ok	130	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-VENEZIANA - PAF15	env. comb. 1	CPS BRIS	4,6	504
	131	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-VENEZIANA - PAF15	env. comb. 2			
	132	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-VENEZIANA - PAF15	env. comb. 3			
Ok	133	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-VENEZIANA - PAF30	env. comb. 1	CPS BRIS	4,8	504
	134	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-VENEZIANA - PAF30	env. comb. 2			
	135	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-VENEZIANA - PAF30	env. comb. 3			
Ok	136	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-VENEZIANA - PAF60	env. comb. 1	CPS BRIS	6,3	504
	137	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-VENEZIANA - PAF60	env. comb. 2			
	138	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-VENEZIANA - PAF60	env. comb. 3			
Ok	139	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-VENEZIANA - PAF80	env. comb. 1	CPS BRIS		504
	140	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-VENEZIANA - PAF80	env. comb. 2			
	141	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-VENEZIANA - PAF80	env. comb. 3			
	142	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL-VENEZIANA - PAF15	env. comb. 1			
	143	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL-VENEZIANA - PAF15	env. comb. 2			
	144	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL-VENEZIANA - PAF15	env. comb. 3			
	145	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL-VENEZIANA - PAF30	env. comb. 1			
	146	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL-VENEZIANA - PAF30	env. comb. 2			
	147	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL-VENEZIANA - PAF30	env. comb. 3			
Ok	148	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL-VENEZIANA - PAF60	env. comb. 1	CPS BRIS	1,1	72
	149	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL-VENEZIANA - PAF60	env. comb. 2			
	150	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL-VENEZIANA - PAF60	env. comb. 3			
	151	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL-VENEZIANA - PAF80	env. comb. 1			
	152	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL-VENEZIANA - PAF80	env. comb. 2			
	153	ARQUETIPO_FACE_2A_VENT CRUZADA-COMBRIS-SUL-VENEZIANA - PAF80	env. comb. 3			

APÊNDICE F: Pré-Processamento com SLAB/EnergyPlus para definição da temperatura do solo

Este apêndice mostra os resultados do pré-processamento com o pacote Slab do EnergyPlus para a definição da temperatura do solo. Foi adotado o procedimento de convergência indicado em Costa, Roriz e Chvatal (2017) e seguidas as recomendações de LABEEE (2017), utilizando o modelo do arquétipo 4 (Tabela). A diferença limite máxima considerada entre as temperaturas do ar interno para o processo de convergência foi de 0,0001°C, conforme indicado por Costa, Roriz e Chvatal (2017).

Tabela F.1 - Processo de convergência para cálculo da temperatura do solo com Slab/EnergyPlus – diferenças entre temperaturas internas da zona térmica

Colunas1	Simulacao referencia	Simulacao Slab 1	Diferença (preliminar - Slab1)	Simulacao Slab 2	Diferença (Slab1 - Slab2)	Simulacao Slab 3	Diferença (Slab2 - Slab3)	Simulacao Slab 4	Diferença (Slab3 - Slab4)	Simulacao Slab 5	Diferença (Slab4 - Slab5)	Simulacao Slab 6	Diferença (Slab5 - Slab6)	Simulacao Slab 7	Diferença (Slab6 - Slab7)
January	25.8476	25.7153	0.1323	25.6975	0.0178	25.6950	0.0025	25.6946	0.0004	25.6946	0.0000	25.6946	0.0000	25.6946	0.0000
February	25.5507	25.4449	0.1058	25.4292	0.0157	25.4269	0.0023	25.4266	0.0003	25.4265	0.0002	25.4265	0.0000	25.4265	0.0000
March	25.7755	25.5826	0.1928	25.5591	0.0236	25.5559	0.0032	25.5555	0.0004	25.5555	0.0000	25.5555	0.0000	25.5555	0.0000
April	25.2001	24.8544	0.3457	24.9140	-0.0596	24.8220	0.0920	24.8126	0.0094	24.8115	0.0011	24.8115	0.0000	24.8115	0.0000
May	23.4020	23.0322	0.3698	23.0032	0.0290	22.9900	0.0132	22.9878	0.0022	22.9880	-0.0002	22.9880	0.0000	22.9880	0.0000
June	22.6583	22.2915	0.3668	22.2518	0.0397	22.2484	0.0034	22.2474	0.0010	22.2472	0.0002	22.2472	0.0000	22.2472	0.0000
July	22.6954	22.2741	0.4213	22.2348	0.0393	22.2315	0.0033	22.2314	0.0002	22.2312	0.0002	22.2312	0.0000	22.2312	0.0000
August	23.7607	23.3359	0.4248	23.2882	0.0477	23.2855	0.0027	23.2850	0.0005	23.2856	-0.0006	23.2850	0.0006	23.2856	-0.0006
September	24.9583	24.6052	0.3530	24.5653	0.0399	24.5611	0.0042	24.5605	0.0006	24.5605	0.0000	24.5605	0.0000	24.5605	0.0000
October	25.8322	25.5793	0.2530	25.5421	0.0372	25.5363	0.0058	25.5355	0.0008	25.5355	0.0000	25.5355	0.0000	25.5355	0.0000
November	24.6459	24.5326	0.1133	24.5139	0.0188	24.5108	0.0030	24.5104	0.0005	24.5104	0.0000	24.5104	0.0000	24.5104	0.0000
December	25.4186	25.2752	0.1434	25.2554	0.0199	25.2523	0.0031	25.2519	0.0005	25.2519	0.0000	25.2519	0.0000	25.2519	0.0000
	Com material isolante espesso no piso	Sem material isolante no piso a partir daqui													

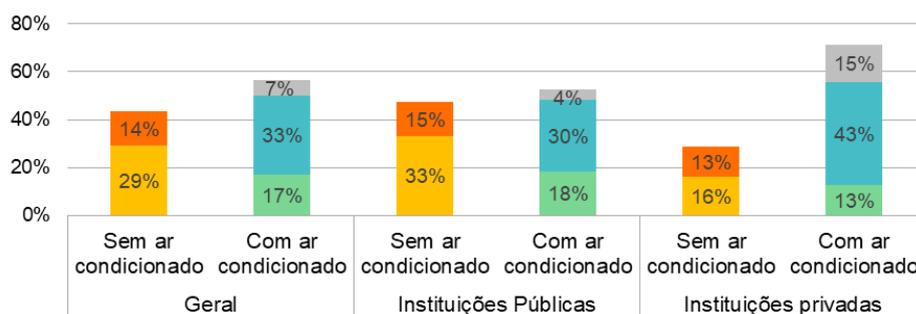
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Observa-se que foram necessários sete ciclos para finalizar o processo de convergência. As temperaturas do solo mensais médias geradas pelo Slab na simulação 7 foram utilizadas para as demais simulações computacionais com o EnergyPlus, conforme indicado na Tabela 7 no corpo do texto.

APÊNDICE G: Demais respostas do questionário

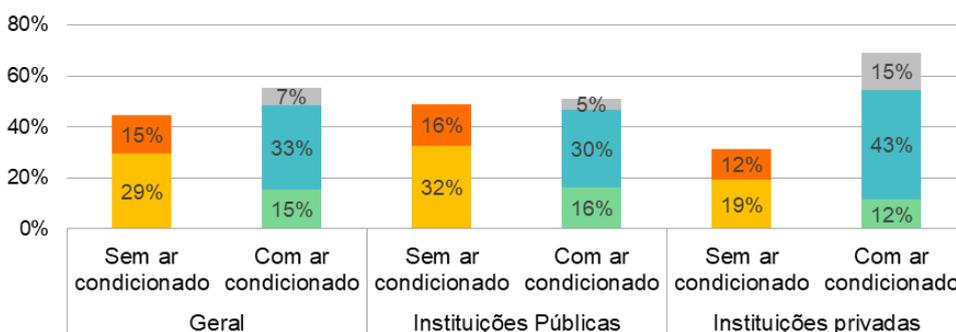
Este apêndice apresenta o tratamento das respostas do questionário, além das apresentadas no corpo da tese. Os Gráficos G.1 a G.3 mostram os sistemas de ventilação encontrados nos diferentes tipos de edifícios: Laboratórios, Administrativos e Serviços/Outros, respectivamente.

Gráfico G.176: Tipos de sistemas de ventilação em prédios do tipo **Laboratórios**



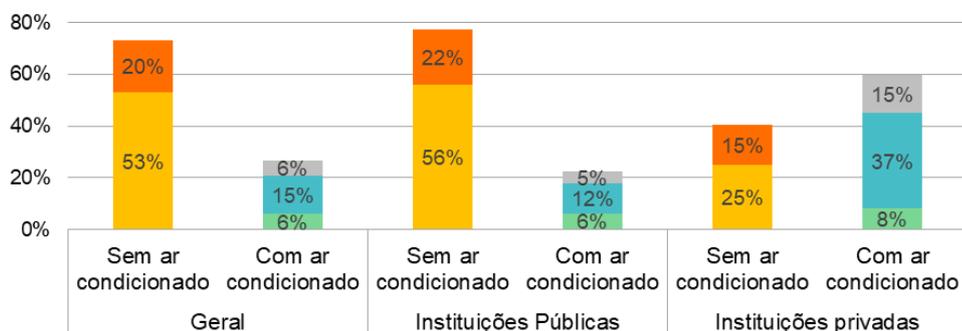
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Gráfico G.2: Tipos de sistemas de ventilação em prédios do tipo **Administrativos**



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Gráfico G.3: Tipos de sistemas de ventilação em prédios do tipo **Serviços/Outros**



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Legenda:

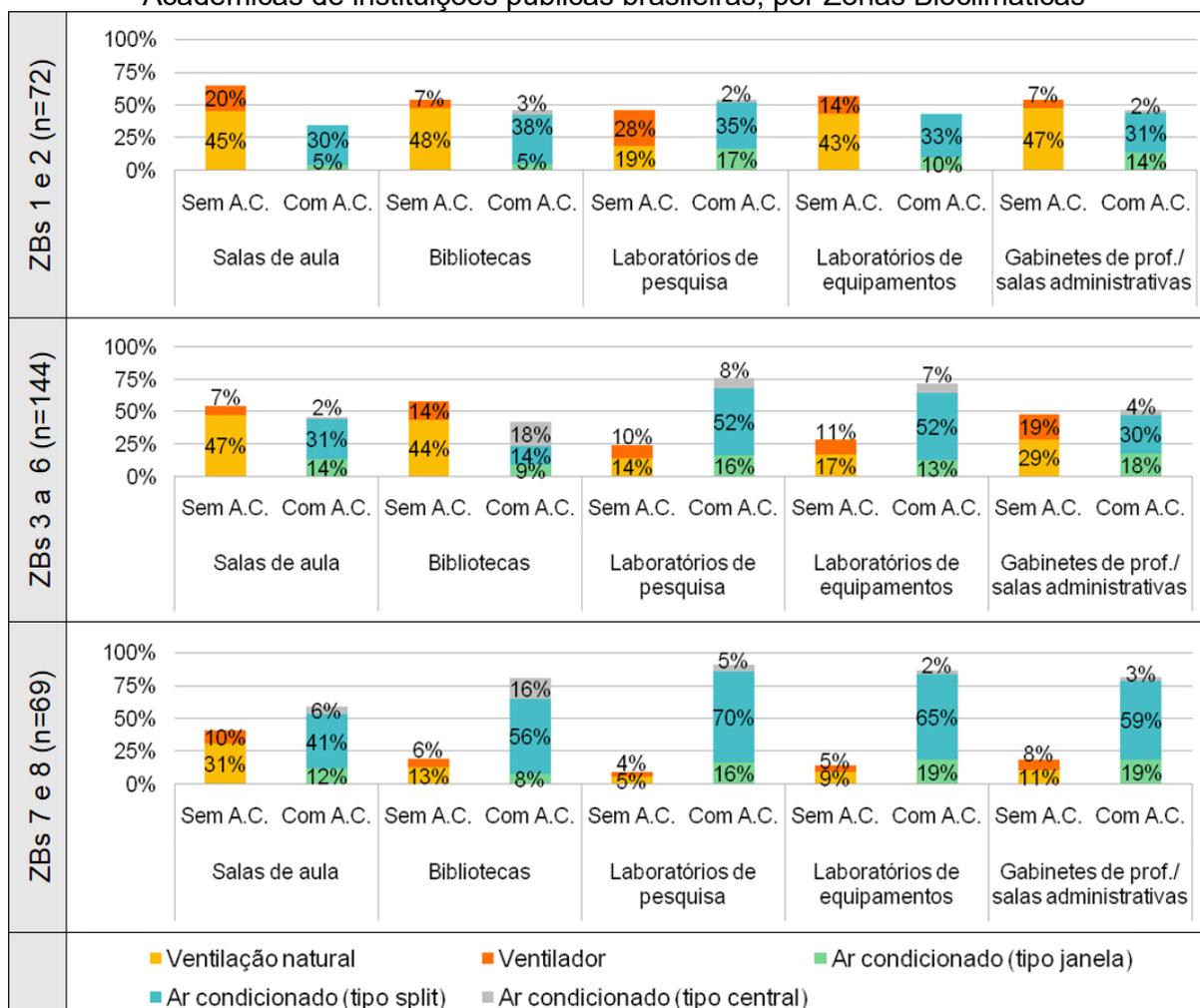
- Ventilação natural
- Ar condicionado (tipo janela)
- Ar condicionado (tipo central)
- Ventilador
- Ar condicionado (tipo split)

Percebe-se que, considerando instituições públicas e privadas, os sistemas de ventilação sem ar-condicionado foram indicados como mais encontrados pelos respondentes nos edifícios de Unidades Acadêmicas e de Serviços/Outros. Já os sistemas de ventilação com ar-condicionado foram indicados como encontrados na maioria nos prédios de Laboratórios (de pesquisa e equipamentos) e nos Administrativos, com predominância do tipo *split*.

Notou-se significativa diferença entre as respostas dos frequentadores de instituições públicas e privadas. No caso das Unidades Acadêmicas e prédios de Serviços/Outros, a predominância de tipo de sistema de ventilação (com ou sem ar-condicionado) foi inversa, no qual os respondentes de instituições públicas indicaram predominância dos sistemas sem ar-condicionado, enquanto os respondentes das instituições privadas indicaram predominância do condicionamento artificial. A existência de sistemas com ar-condicionado nos prédios de Laboratórios de instituições particulares foi aproximadamente duas vezes maior do que a existência de sistemas sem ar-condicionado, enquanto nas instituições públicas esta diferença foi menor do que 10%. Tal fato indica que instituições privadas possuem significativamente maior proporção de sistemas de condicionamento artificial do que nas instituições públicas.

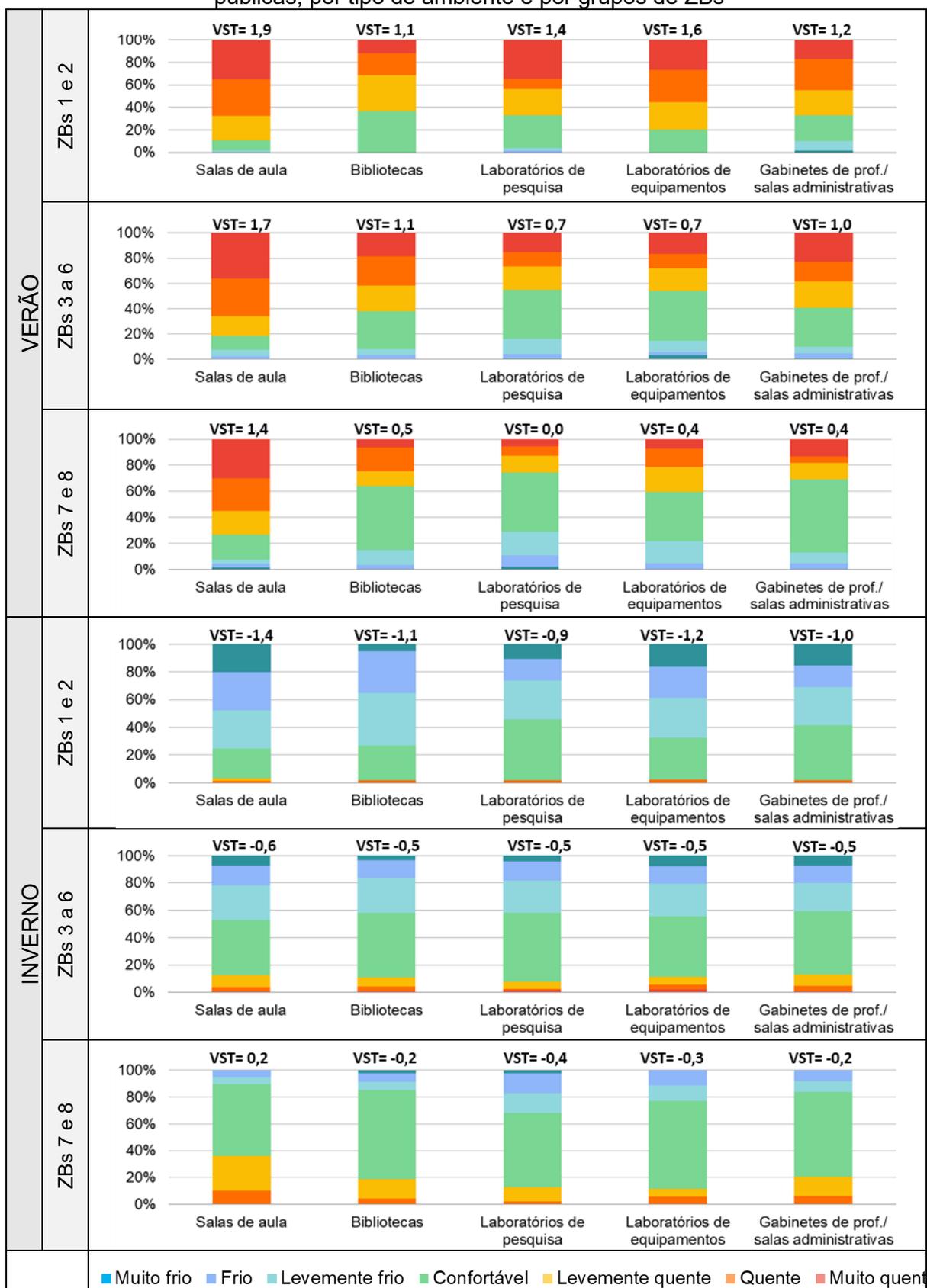
O Quadro 15 mostra os tipos de sistemas de ventilação encontrados predominantemente em Unidades Acadêmicas em diferentes ambientes, considerando as instituições públicas. Os Quadros G.2 a G.4 mostram as respostas referentes à experiência térmica, considerando o agrupamento por Zonas Bioclimáticas (ZBs) brasileiras.

Quadro 15 - Tipos de sistemas de ventilação encontrados predominantemente em Unidades Acadêmicas de instituições públicas brasileiras, por Zonas Bioclimáticas



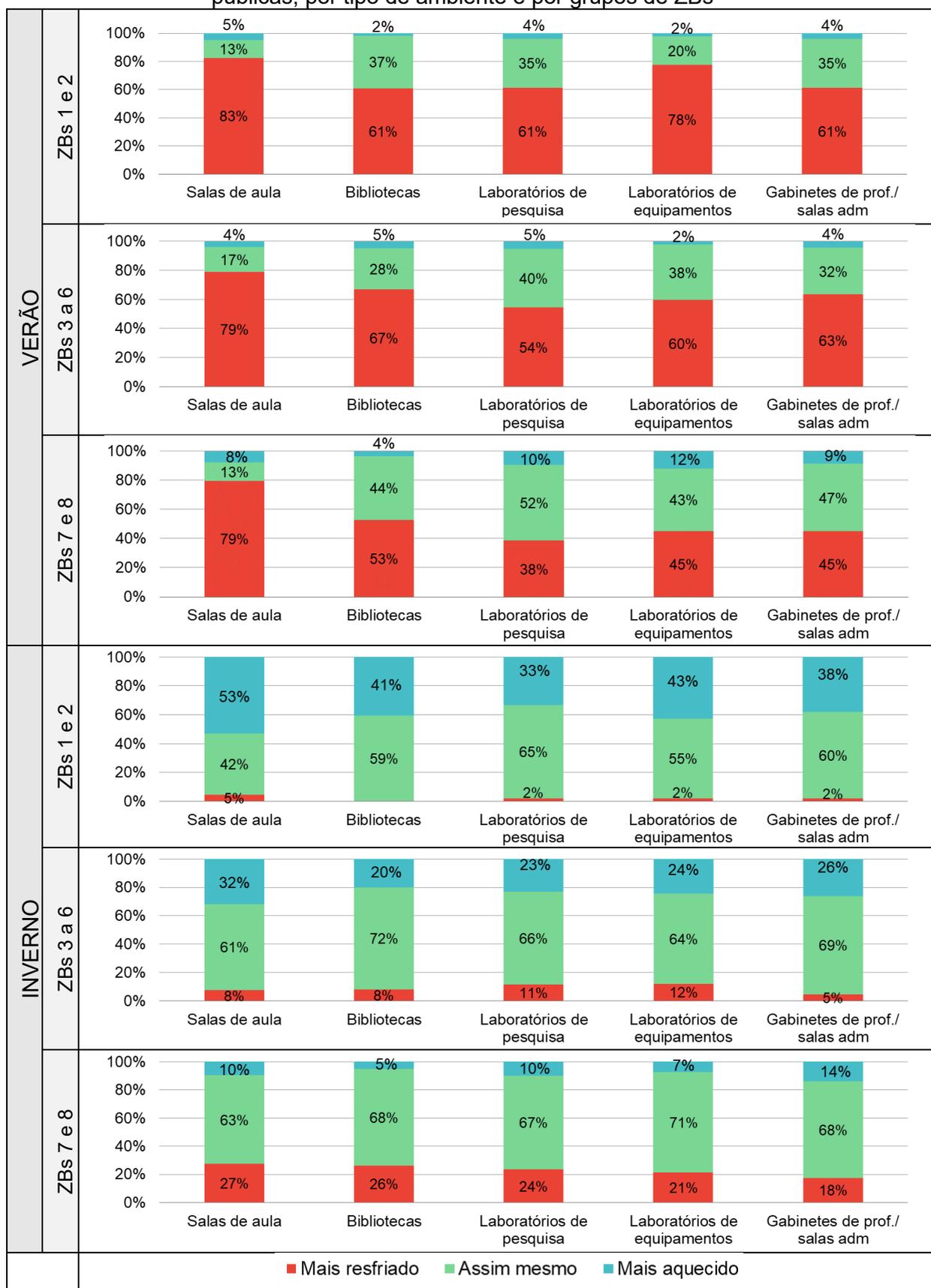
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Quadro 16 - Votos de sensação térmica (VST) em Unidades Acadêmicas de instituições públicas, por tipo de ambiente e por grupos de ZBs



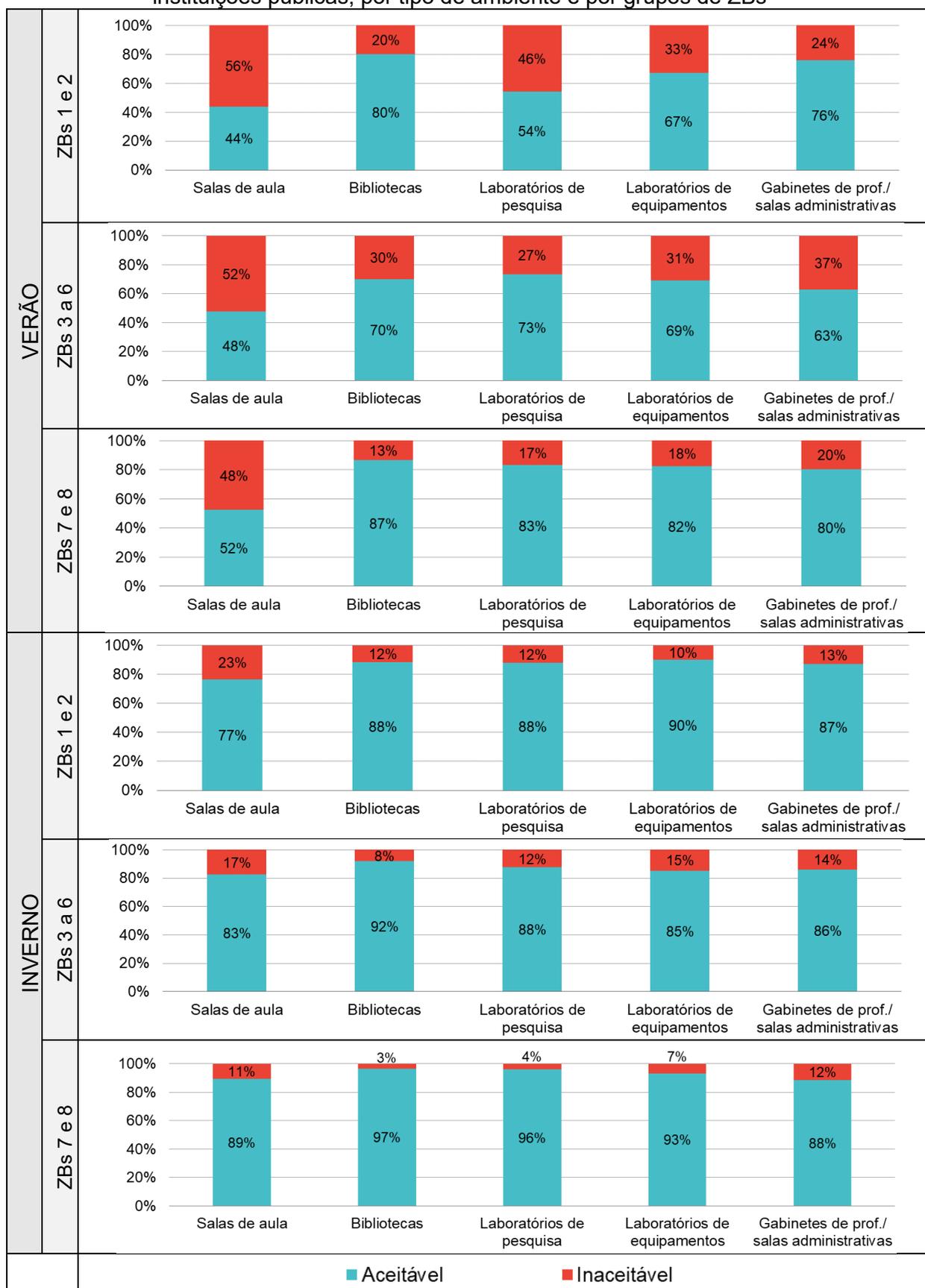
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Quadro G.3 - Votos de preferência térmica (VPT) em Unidades Acadêmicas de instituições públicas, por tipo de ambiente e por grupos de ZBs



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Quadro G.4 - Votos de aceitabilidade térmica (VAT) em Unidades Acadêmicas de instituições públicas, por tipo de ambiente e por grupos de ZBs



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Foi observada significativa diferença entre sistemas de ventilação e respostas de conforto térmico dos usuários de instituições de ensino superior públicas e privadas do Brasil. Tais diferenças embasaram a opção de trabalhar com o recorte de instituições públicas na presente pesquisa.

Em relação ao tipo de sistema de ventilação indicados pelos usuários, verificou-se que Salas de aula, Bibliotecas e Gabinetes de professores são ambientes condicionados predominantemente com ventilação natural nas ZBs 1 a 6, enquanto os Laboratórios são predominantemente condicionados artificialmente em todas as ZBs. Nas ZBs 7 e 8, os usuários indicaram predominância de ar-condicionado tipo split em todos os ambientes.

Observou-se que, em todos os grupos de ZBs, foi verificado o desconforto térmico em todos os ambientes das Unidades acadêmicas, principalmente no verão. Percebeu-se preferência dos usuários para que todos os ambientes fossem mais resfriados nesta estação. As Salas de aula foram os ambientes com situação mais crítica de desconforto – por calor, em todas as ZBs no verão, e por frio, nas ZBs 1 e 2 no inverno. Os resultados relativos ao conforto térmico obtidos com os usuários da UFMG, analisados no texto da tese, mostraram similaridade aos resultados obtidos nas ZBs 1 a 6 no verão e, no inverno, similaridade com as respostas das ZBs 3 a 8. Portanto, observa-se que, ao considerar todo o ano, os resultados dos usuários da UFMG assemelham-se com os obtidos pelos usuários do grupo de ZBs 3 a 6, assim como o esperado, dado que Belo Horizonte pertence à ZB 3.

Os resultados do questionário confirmam a relevância de se abordar os aspectos referentes ao conforto térmico em edifícios universitários públicos no país, e que a realidade nacional apresenta problemáticas similares às indicadas por Singh *et al.* (2019), que mostram pesquisas internacionais as quais apontam o desconforto térmico em edifícios desta tipologia em diferentes países.

APÊNDICE H: Listagem de interações promissoras e variáveis que não funcionariam bem juntas – Modelo 1 – predição de EUI para prédios sem laboratórios densos

Interações promissoras:

- Prop AC ULTPAV x Abs_paredes_nivel
- Prop AC ULTPAV x Abs_cobertura_nivel
- Prop AC x CPD
- Prop AC x Abs_paredes_nivel
- Prop AC x Abs_cobertura_nivel
- Prop AC x Orientacao
- A_CONST x Area conhecimento
- A_CONST x Tipo vent
- A_CONST x Abs_Cobertura_nivel
- Areas_de_estudos_sqr x CPD
- Areas_de_estudos_sqr x Lampadas LED
- Area_de_estudos_sqr x Area conhecimento
- Area_de_estudos_sqr x Tipo vent
- Pessoas/m2 x Area conhecimento
- Pessoas/m2 x Tipo vent
- Pessoas/m2 x Orientacao
- Areas_de_estudos x Lampadas LED
- Area_de_estudos x Area conhecimento
- Area_de_estudos x Tipo vent
- Gabinetes x Abs_paredes_nivel
- U cobertura x Area conhecimento
- U cobertura x Abs_cobertura_nivel
- U cobertura x Tipo vent
- Sala aula sqr x Area conhecimento
- PAF Norte x Tipo vent
- PAF Norte x Abs_paredes_nivel
- PAF Oeste x Tipo vent
- PAF Oeste x Abs_paredes_nivel
- PAF x Tipo vent
- PAF x Abs_paredes_nivel
- PAF Leste x Area conhecimento
- PAF Leste x Tipo vent
- PAF Leste x Abs_paredes_nivel
- Circulação x CPD
- Circulação x Lampadas LED
- Lab equip x Area conhecimento
- Lab equip x Abs_cobertura_nivel
- Lab equip x Orientacao (evitar... só poderia usar o L-O pq senão sinal n faz sentido)

- DPI x CPD
- DPI x Abs_cobertura_nivel
- ABS par x Abs_paredes_nivel
- PAF Sul x Tipo vent
- PAF Sul x Abs_paredes_nivel
- Lab pesq x CPD
- Lab pesq x Area conhecimento
- Prop AC Janela x CPD
- Prop AC Janela x Area conhecimento
- Prop AC Janela x Tipo vent
- Prop AC Janela x Abs par nivel
- Prop AC Janela x Abs cob nivel
- Prop AC Split x CPD
- Prop AC Split x Area conhecimento
- Prop AC Split x Abs par nivel
- Prop AC Central x Area conhecimento

Variáveis que não funcionariam bem juntas:

- PROP AC – PROP AC ULT PAV
- PROP AC – SALA AULA OU SALA AULA SQR
- PROP AC – A_ESTUDOS
- PROP AC – PESSOAS/M2
- PROP AC ULT PAV – AREA DE ESTUDOS E AREA DE ESTUDOS SQR
- PROP AC ULT PAV – GABINETES
- SALA AULA – PAF NORTE
- SALA AULA – PAF SUL
- AREA ESTUDOS – LABORATORIOS EQUIPAMENTOS
- AREA ESTUDOS – PAF NORTE E
- AREA ESTUDOS – PAF SUL
- LAB EQUIP – CIRCULACAO
- LAB EQUIP – PAF SUL
- LAB EQUIP – PESSOAS/M²
- DPI – PESSOAS/M²

APÊNDICE I: Listagem de interações promissoras e variáveis que não funcionariam bem juntas – Modelo 2 - predição de EUI para prédios com laboratórios densos

Interações promissoras:

- Prop AC x Area conhecimento
- Prop AC x Ventiladores_salasaula
- Prop AC x Abscobnivel
- Prop AC x Absparnivel
- PAF x Area conhecimento
- PAF x Tipo vent
- PAF x Abscobnivel
- PAF x Absparnivel
- PAF x orientação
- Lab pesq x Area conhecimento
- AbsCob x Area conhecimento
- Abs cob x Tipo vent
- AbsCob x Ucobnivel
- AbsCob x Ventiladores_salasaula
- Gabinetes x Area conhecimento
- Gabinetes x Ucobnivel
- Gabinetes x Tipo vent
- Salas de aula sqr x Ventiladores_salasaula
- Salas de aula sqr x Area conhecimento
- Salas de aula sqr x Tipo vent
- Salas de aula sqr x Ucobnivel
- Salas de aula sqr x Absparnivel
- Salas de aula sqr x Abscobnivel
- Salas de aula sqr x Orientacao
- Circulação x LED
- Circulação x Tipo vent
- Circulação x CPD
- Circulação x Ventiladores_salasaula
- Circulação x Area conhecimento
- Abs par x Tipo vent
- Abs Par x CPD
- AbsPar x Area conhecimento
- Abspar x orientação
- PAF Oeste x CPD
- PAF Oeste x Absparnivel
- PAF Oeste x Orientação
- Area estudos sqr x LED
- Area estudos sqr x Area conhecimento
- Area estudos sqr x Tipo vent
- Area estudos sqr x Ventiladores_salasaula

- Area estudos x Ventiladores_salasaula
- PAF Norte x Area conhecimento
- PAF Norte x Ventiladores_salasaula
- PAF Norte x Absparnivel
- PAF Norte x orientação
- PAF Norte x Tipo vent
- PAF Sul x Area conhecimento
- PAF Sul x Ventiladores_salasaula
- PAF Sul x orientação
- PAF Leste x Area conhecimento
- PAF Leste x Tipo vent
- PAF Leste x orientação
- Prop_AC_Split x CPD_24h
- Prop_AC_Split x Area conhecimento
- Prop_AC_Split x Tipo ventilacao
- Prop_AC_Split x U cob nível
- Prop_AC_Split x Abs cob nivel
- Prop_AC_Split x Orientacao

Variáveis que não funcionariam bem juntas:

- PROP AC – PROP AC ULT PAV
- PROP AC ULT PAV – PAF
- PROP AC ULT PAV – PAF SUL
- AREA ESTUDOS – AREA CONSTRUIDA
- AREA ESTUDOS – LABORATORIOS PESQUISA
- AREA ESTUDOS – PAF LESTE
- AREA ESTUDOS – PESSOAS/M²
- LAB PESQUISA – PAF LESTE
- LAB PESQUISA – ABS PAREDES
- LAB PESQUISA – PESSOAS/M²
- GABINETES – CIRCULAÇÃO
- GABINETES – ABS COBERTURA
- PAF – PAF SUL
- PAF NORTE – ABS COB
- PAF OESTE – ABS COB
- DPI ILUM – AREA CONSTRUIDA

APÊNDICE J: Resultado ANOVA do Modelo 3 – predição de PHOC para as salas de aula

Analysis of Variance Table

Response: asin(PHOC/100)

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
People	1	1598.26	1598.26	8.4002e+05	< 2.2e-16	***
Brise	1	3090.73	3090.73	1.6244e+06	< 2.2e-16	***
Ventilador	1	1262.28	1262.28	6.6344e+05	< 2.2e-16	***
Veneziana	1	181.70	181.70	9.5499e+04	< 2.2e-16	***
VentCruz	1	288.53	288.53	1.5165e+05	< 2.2e-16	***
Andar	2	1253.69	626.85	3.2946e+05	< 2.2e-16	***
Orientacao	7	1540.85	220.12	1.1569e+05	< 2.2e-16	***
AbsCob	1	521.31	521.31	2.7399e+05	< 2.2e-16	***
sqrt(PAF)	1	0.18	0.18	9.2967e+01	< 2.2e-16	***
Upar	1	455.98	455.98	2.3966e+05	< 2.2e-16	***
Morfologia	1	142.60	142.60	7.4950e+04	< 2.2e-16	***
Arquetipo	3	279.08	93.03	4.8893e+04	< 2.2e-16	***
Tipo_janela	1	141.84	141.84	7.4547e+04	< 2.2e-16	***
Ucob	1	2.31	2.31	1.2135e+03	< 2.2e-16	***
Lights	1	64.63	64.63	3.3967e+04	< 2.2e-16	***
People:Brise	1	1.60	1.60	8.3966e+02	< 2.2e-16	***
People:Ventilador	1	1.37	1.37	7.1778e+02	< 2.2e-16	***
People:Veneziana	1	9.95	9.95	5.2303e+03	< 2.2e-16	***
People:VentCruz	1	10.75	10.75	5.6524e+03	< 2.2e-16	***
People:Andar	2	15.78	7.89	4.1475e+03	< 2.2e-16	***
People:Orientacao	7	8.52	1.22	6.3993e+02	< 2.2e-16	***
People:AbsCob	1	1.68	1.68	8.8425e+02	< 2.2e-16	***
People:sqrt(PAF)	1	107.89	107.89	5.6707e+04	< 2.2e-16	***
People:Upar	1	69.49	69.49	3.6526e+04	< 2.2e-16	***
People:Morfologia	1	0.09	0.09	4.5090e+01	1.886e-11	***
People:Arquetipo	3	37.19	12.40	6.5159e+03	< 2.2e-16	***
People:Tipo_janela	1	2.71	2.71	1.4218e+03	< 2.2e-16	***
People:Ucob	1	9.05	9.05	4.7575e+03	< 2.2e-16	***
Brise:Upar	1	130.50	130.50	6.8590e+04	< 2.2e-16	***
Ventilador:Upar	1	9.65	9.65	5.0711e+03	< 2.2e-16	***
Veneziana:Upar	1	60.26	60.26	3.1674e+04	< 2.2e-16	***
VentCruz:Upar	1	69.94	69.94	3.6759e+04	< 2.2e-16	***
Andar:Upar	2	98.72	49.36	2.5942e+04	< 2.2e-16	***
Orientacao:Upar	7	9.05	1.29	6.7936e+02	< 2.2e-16	***
AbsCob:Upar	1	7.19	7.19	3.7785e+03	< 2.2e-16	***
sqrt(PAF):Upar	1	25.70	25.70	1.3509e+04	< 2.2e-16	***
Upar:Morfologia	1	0.95	0.95	5.0160e+02	< 2.2e-16	***
Upar:Arquetipo	3	34.25	11.42	5.9998e+03	< 2.2e-16	***
Upar:Tipo_janela	1	5.73	5.73	3.0092e+03	< 2.2e-16	***
Upar:Ucob	1	20.08	20.08	1.0555e+04	< 2.2e-16	***
Upar:Lights	1	3.04	3.04	1.5975e+03	< 2.2e-16	***
Brise:AbsCob	1	0.05	0.05	2.6587e+01	2.521e-07	***
Ventilador:AbsCob	1	0.16	0.16	8.6208e+01	< 2.2e-16	***
Veneziana:AbsCob	1	3.75	3.75	1.9684e+03	< 2.2e-16	***
VentCruz:AbsCob	1	1.39	1.39	7.3290e+02	< 2.2e-16	***

Andar:AbsCob	2	138.68	69.34	3.6444e+04	< 2.2e-16	***
Orientacao:AbsCob	7	2.55	0.36	1.9159e+02	< 2.2e-16	***
AbsCob:sqrt(PAF)	1	54.43	54.43	2.8606e+04	< 2.2e-16	***
AbsCob:Morfologia	1	1.06	1.06	5.5611e+02	< 2.2e-16	***
AbsCob:Arquetipo	3	1.85	0.62	3.2466e+02	< 2.2e-16	***
AbsCob:Ucob	1	36.15	36.15	1.9001e+04	< 2.2e-16	***
Brise:Tipo_janela	1	3.30	3.30	1.7329e+03	< 2.2e-16	***
Veneziana:Tipo_janela	1	2.40	2.40	1.2626e+03	< 2.2e-16	***
VentCruz:Tipo_janela	1	4.34	4.34	2.2786e+03	< 2.2e-16	***
Andar:Tipo_janela	2	0.99	0.49	2.5970e+02	< 2.2e-16	***
Orientacao:Tipo_janela	7	0.87	0.12	6.5228e+01	< 2.2e-16	***
sqrt(PAF):Tipo_janela	1	4.78	4.78	2.5109e+03	< 2.2e-16	***
Arquetipo:Tipo_janela	3	2.74	0.91	4.7988e+02	< 2.2e-16	***
Tipo_janela:Ucob	1	0.37	0.37	1.9463e+02	< 2.2e-16	***
Tipo_janela:Lights	1	0.05	0.05	2.3799e+01	1.070e-06	***
Brise:Ucob	1	4.70	4.70	2.4677e+03	< 2.2e-16	***
Ventilador:Ucob	1	1.54	1.54	8.0989e+02	< 2.2e-16	***
Veneziana:Ucob	1	0.13	0.13	7.0521e+01	< 2.2e-16	***
VentCruz:Ucob	1	0.30	0.30	1.5738e+02	< 2.2e-16	***
Andar:Ucob	2	19.98	9.99	5.2508e+03	< 2.2e-16	***
Orientacao:Ucob	7	3.32	0.47	2.4908e+02	< 2.2e-16	***
Morfologia:Ucob	1	0.62	0.62	3.2593e+02	< 2.2e-16	***
Brise:sqrt(PAF)	1	39.35	39.35	2.0680e+04	< 2.2e-16	***
Ventilador:sqrt(PAF)	1	14.79	14.79	7.7746e+03	< 2.2e-16	***
Veneziana:sqrt(PAF)	1	9.03	9.03	4.7439e+03	< 2.2e-16	***
VentCruz:sqrt(PAF)	1	20.72	20.72	1.0892e+04	< 2.2e-16	***
Andar:sqrt(PAF)	2	6.30	3.15	1.6567e+03	< 2.2e-16	***
Orientacao:sqrt(PAF)	7	41.78	5.97	3.1368e+03	< 2.2e-16	***
sqrt(PAF):Morfologia	1	3.73	3.73	1.9629e+03	< 2.2e-16	***
sqrt(PAF):Arquetipo	3	60.12	20.04	1.0533e+04	< 2.2e-16	***
sqrt(PAF):Lights	1	3.75	3.75	1.9719e+03	< 2.2e-16	***
Brise:Ventilador	1	3.35	3.35	1.7625e+03	< 2.2e-16	***
Brise:VentCruz	1	38.48	38.48	2.0224e+04	< 2.2e-16	***
Brise:Andar	2	71.26	35.63	1.8726e+04	< 2.2e-16	***
Brise:Orientacao	7	323.71	46.24	2.4305e+04	< 2.2e-16	***
Brise:Morfologia	1	1.40	1.40	7.3339e+02	< 2.2e-16	***
Brise:Arquetipo	3	7.89	2.63	1.3828e+03	< 2.2e-16	***
Brise:Lights	1	0.03	0.03	1.5733e+01	7.297e-05	***
Ventilador:Veneziana	1	5.08	5.08	2.6716e+03	< 2.2e-16	***
Ventilador:VentCruz	1	0.55	0.55	2.8773e+02	< 2.2e-16	***
Ventilador:Andar	2	21.67	10.84	5.6954e+03	< 2.2e-16	***
Ventilador:Orientacao	7	8.36	1.19	6.2788e+02	< 2.2e-16	***
Ventilador:Arquetipo	3	5.75	1.92	1.0081e+03	< 2.2e-16	***
Ventilador:Lights	1	0.04	0.04	2.0448e+01	6.129e-06	***
Veneziana:VentCruz	1	9.92	9.92	5.2119e+03	< 2.2e-16	***
Veneziana:Andar	2	19.80	9.90	5.2025e+03	< 2.2e-16	***
Veneziana:Orientacao	7	11.05	1.58	8.2940e+02	< 2.2e-16	***
Veneziana:Morfologia	1	14.25	14.25	7.4893e+03	< 2.2e-16	***
Veneziana:Arquetipo	3	7.93	2.64	1.3888e+03	< 2.2e-16	***
VentCruz:Andar	2	33.55	16.78	8.8180e+03	< 2.2e-16	***
VentCruz:Orientacao	7	6.43	0.92	4.8283e+02	< 2.2e-16	***
VentCruz:Arquetipo	3	7.45	2.48	1.3057e+03	< 2.2e-16	***
VentCruz:Lights	1	0.74	0.74	3.8913e+02	< 2.2e-16	***
Andar:Orientacao	14	21.51	1.54	8.0736e+02	< 2.2e-16	***
Andar:Morfologia	2	1.00	0.50	2.6229e+02	< 2.2e-16	***
Andar:Arquetipo	6	23.38	3.90	2.0477e+03	< 2.2e-16	***
Andar:Lights	2	0.93	0.46	2.4424e+02	< 2.2e-16	***
Orientacao:Morfologia	7	13.08	1.87	9.8243e+02	< 2.2e-16	***
Orientacao:Arquetipo	21	3.62	0.17	9.0717e+01	< 2.2e-16	***
Orientacao:Lights	7	0.38	0.05	2.8256e+01	< 2.2e-16	***
Morfologia:Arquetipo	3	5.45	1.82	9.5500e+02	< 2.2e-16	***
Morfologia:Lights	1	0.11	0.11	5.8002e+01	2.629e-14	***
Arquetipo:Lights	3	1.54	0.51	2.7057e+02	< 2.2e-16	***
Residuals	219734	418.08	0.00			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

APÊNDICE K: Resultado ANOVA do Modelo 4 – predição de GHC para as salas de aula

Analysis of Variance Table

Response: log10(Graus_Hora_Calor)

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
People	1	3566.3	3566.3	6.8791e+05	< 2.2e-16	***
Brise	1	9063.9	9063.9	1.7484e+06	< 2.2e-16	***
VentCruz	1	635.8	635.8	1.2265e+05	< 2.2e-16	***
Ventilador	1	4232.1	4232.1	8.1634e+05	< 2.2e-16	***
Orientacao	7	4883.3	697.6	1.3456e+05	< 2.2e-16	***
Andar	2	4863.3	2431.7	4.6905e+05	< 2.2e-16	***
PAF	1	622.8	622.8	1.2013e+05	< 2.2e-16	***
AbsCob	1	1882.6	1882.6	3.6314e+05	< 2.2e-16	***
Morfologia	1	317.6	317.6	6.1269e+04	< 2.2e-16	***
Arquetipo	3	236.0	78.7	1.5174e+04	< 2.2e-16	***
Tipo_janela	1	241.6	241.6	4.6605e+04	< 2.2e-16	***
Upar	1	96.4	96.4	1.8591e+04	< 2.2e-16	***
Lights	1	193.0	193.0	3.7237e+04	< 2.2e-16	***
Ucob	1	10.8	10.8	2.0899e+03	< 2.2e-16	***
Veneziana	1	247.0	247.0	4.7649e+04	< 2.2e-16	***
People:Brise	1	147.9	147.9	2.8538e+04	< 2.2e-16	***
People:VentCruz	1	4.2	4.2	8.1234e+02	< 2.2e-16	***
People:Ventilador	1	50.9	50.9	9.8096e+03	< 2.2e-16	***
People:Orientacao	7	112.3	16.0	3.0959e+03	< 2.2e-16	***
People:Andar	2	69.0	34.5	6.6592e+03	< 2.2e-16	***
People:PAF	1	227.3	227.3	4.3843e+04	< 2.2e-16	***
People:AbsCob	1	45.6	45.6	8.7945e+03	< 2.2e-16	***
People:Morfologia	1	7.4	7.4	1.4188e+03	< 2.2e-16	***
People:Arquetipo	3	35.6	11.9	2.2886e+03	< 2.2e-16	***
People:Tipo_janela	1	0.1	0.1	2.5097e+01	5.456e-07	***
People:Upar	1	89.1	89.1	1.7186e+04	< 2.2e-16	***
People:Lights	1	4.6	4.6	8.8235e+02	< 2.2e-16	***
People:Ucob	1	17.7	17.7	3.4143e+03	< 2.2e-16	***
Brise:AbsCob	1	6.9	6.9	1.3227e+03	< 2.2e-16	***
AbsCob:Veneziana	1	3.3	3.3	6.3388e+02	< 2.2e-16	***
VentCruz:AbsCob	1	0.2	0.2	3.9837e+01	2.766e-10	***
Ventilador:AbsCob	1	27.0	27.0	5.2013e+03	< 2.2e-16	***
Orientacao:AbsCob	7	11.0	1.6	3.0325e+02	< 2.2e-16	***
Andar:AbsCob	2	443.0	221.5	4.2722e+04	< 2.2e-16	***
PAF:AbsCob	1	162.3	162.3	3.1314e+04	< 2.2e-16	***
AbsCob:Morfologia	1	0.9	0.9	1.6796e+02	< 2.2e-16	***
AbsCob:Tipo_janela	1	0.1	0.1	2.6749e+01	2.319e-07	***
AbsCob:Upar	1	79.4	79.4	1.5311e+04	< 2.2e-16	***
AbsCob:Lights	1	2.0	2.0	3.8433e+02	< 2.2e-16	***
AbsCob:Ucob	1	128.8	128.8	2.4844e+04	< 2.2e-16	***
Brise:PAF	1	250.5	250.5	4.8316e+04	< 2.2e-16	***
PAF:Veneziana	1	0.5	0.5	9.6748e+01	< 2.2e-16	***
VentCruz:PAF	1	9.2	9.2	1.7753e+03	< 2.2e-16	***
Ventilador:PAF	1	70.6	70.6	1.3615e+04	< 2.2e-16	***
Orientacao:PAF	7	153.1	21.9	4.2186e+03	< 2.2e-16	***
Andar:PAF	2	37.1	18.5	3.5759e+03	< 2.2e-16	***
PAF:Morfologia	1	14.3	14.3	2.7495e+03	< 2.2e-16	***
PAF:Arquetipo	3	168.6	56.2	1.0843e+04	< 2.2e-16	***
PAF:Tipo_janela	1	8.7	8.7	1.6733e+03	< 2.2e-16	***
PAF:Lights	1	11.9	11.9	2.2905e+03	< 2.2e-16	***
PAF:Ucob	1	4.8	4.8	9.3026e+02	< 2.2e-16	***
Brise:Upar	1	202.3	202.3	3.9018e+04	< 2.2e-16	***
Upar:Veneziana	1	102.9	102.9	1.9846e+04	< 2.2e-16	***
VentCruz:Upar	1	148.6	148.6	2.8658e+04	< 2.2e-16	***
Ventilador:Upar	1	21.6	21.6	4.1668e+03	< 2.2e-16	***
Orientacao:Upar	7	38.3	5.5	1.0560e+03	< 2.2e-16	***
Andar:Upar	2	269.9	135.0	2.6032e+04	< 2.2e-16	***
Morfologia:Upar	1	19.6	19.6	3.7771e+03	< 2.2e-16	***
Arquetipo:Upar	3	45.9	15.3	2.9516e+03	< 2.2e-16	***

Tipo_janela:Upar	1	4.8	4.8	9.3140e+02	< 2.2e-16	***
Upar:Lights	1	5.3	5.3	1.0268e+03	< 2.2e-16	***
Upar:Ucob	1	43.3	43.3	8.3476e+03	< 2.2e-16	***
Brise:Tipo_janela	1	1.0	1.0	1.9541e+02	< 2.2e-16	***
Tipo_janela:Veneziana	1	3.3	3.3	6.2982e+02	< 2.2e-16	***
VentCruz:Tipo_janela	1	7.0	7.0	1.3446e+03	< 2.2e-16	***
Ventilador:Tipo_janela	1	2.0	2.0	3.8250e+02	< 2.2e-16	***
Orientacao:Tipo_janela	7	1.6	0.2	4.2801e+01	< 2.2e-16	***
Andar:Tipo_janela	2	1.3	0.6	1.2197e+02	< 2.2e-16	***
Morfologia:Tipo_janela	1	0.0	0.0	1.2979e+00	0.2546	
Arquetipo:Tipo_janela	3	2.4	0.8	1.5343e+02	< 2.2e-16	***
Tipo_janela:Ucob	1	0.5	0.5	9.1322e+01	< 2.2e-16	***
Brise:Ucob	1	9.2	9.2	1.7760e+03	< 2.2e-16	***
Ucob:Veneziana	1	5.0	5.0	9.6116e+02	< 2.2e-16	***
Ventilador:Ucob	1	7.0	7.0	1.3422e+03	< 2.2e-16	***
Orientacao:Ucob	7	9.5	1.4	2.6200e+02	< 2.2e-16	***
Andar:Ucob	2	3.9	1.9	3.7216e+02	< 2.2e-16	***
Morfologia:Ucob	1	1.1	1.1	2.0658e+02	< 2.2e-16	***
Arquetipo:Ucob	3	2.0	0.7	1.2814e+02	< 2.2e-16	***
Brise:VentCruz	1	47.9	47.9	9.2369e+03	< 2.2e-16	***
Brise:Ventilador	1	142.6	142.6	2.7512e+04	< 2.2e-16	***
Brise:Orientacao	7	658.7	94.1	1.8152e+04	< 2.2e-16	***
Brise:Andar	2	165.7	82.9	1.5984e+04	< 2.2e-16	***
Brise:Morfologia	1	10.1	10.1	1.9448e+03	< 2.2e-16	***
Brise:Arquetipo	3	27.3	9.1	1.7585e+03	< 2.2e-16	***
Brise:Lights	1	4.7	4.7	9.0619e+02	< 2.2e-16	***
VentCruz:Veneziana	1	1.3	1.3	2.4497e+02	< 2.2e-16	***
Ventilador:Veneziana	1	0.2	0.2	3.8538e+01	5.379e-10	***
Orientacao:Veneziana	7	31.5	4.5	8.6684e+02	< 2.2e-16	***
Andar:Veneziana	2	55.3	27.6	5.3295e+03	< 2.2e-16	***
Morfologia:Veneziana	1	33.3	33.3	6.4228e+03	< 2.2e-16	***
Arquetipo:Veneziana	3	15.6	5.2	1.0020e+03	< 2.2e-16	***
Lights:Veneziana	1	0.1	0.1	2.7409e+01	1.648e-07	***
VentCruz:Ventilador	1	13.0	13.0	2.5035e+03	< 2.2e-16	***
VentCruz:Orientacao	7	15.6	2.2	4.2863e+02	< 2.2e-16	***
VentCruz:Andar	2	86.5	43.3	8.3436e+03	< 2.2e-16	***
VentCruz:Arquetipo	3	10.2	3.4	6.5475e+02	< 2.2e-16	***
VentCruz:Lights	1	0.5	0.5	1.0001e+02	< 2.2e-16	***
Ventilador:Orientacao	7	131.4	18.8	3.6199e+03	< 2.2e-16	***
Ventilador:Andar	2	203.5	101.7	1.9622e+04	< 2.2e-16	***
Ventilador:Arquetipo	3	24.1	8.0	1.5525e+03	< 2.2e-16	***
Ventilador:Lights	1	4.8	4.8	9.3468e+02	< 2.2e-16	***
Orientacao:Andar	14	93.7	6.7	1.2907e+03	< 2.2e-16	***
Orientacao:Morfologia	7	57.5	8.2	1.5854e+03	< 2.2e-16	***
Orientacao:Arquetipo	21	56.1	2.7	5.1511e+02	< 2.2e-16	***
Orientacao:Lights	7	5.1	0.7	1.3940e+02	< 2.2e-16	***
Andar:Morfologia	2	3.2	1.6	3.1200e+02	< 2.2e-16	***
Andar:Arquetipo	6	59.2	9.9	1.9027e+03	< 2.2e-16	***
Morfologia:Arquetipo	3	28.5	9.5	1.8345e+03	< 2.2e-16	***
Arquetipo:Lights	3	1.9	0.6	1.2134e+02	< 2.2e-16	***
Residuals	219734	1139.2	0.0			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

ANEXO 1: Resolução nº01/2020, de 02 de setembro de 2020



ESCOLA DE
ARQUITETURA

Resolução nº 01/2020, de 02 de setembro de 2020.

Define os critérios para dispensa de aprovação das pesquisas feitas na Escola de Arquitetura da UFMG no Comitê de Ética em Pesquisa (CEP)

A Congregação da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, no uso de suas atribuições estatutárias e regimentais, resolve que:

Art. 1º Deve-se observar a Resolução Nº 510, de 07 de abril de 2016, do Conselho Nacional de Saúde (CNS), anexa a esta resolução, que "dispõe sobre as normas aplicáveis a pesquisas em Ciências Humanas e Sociais cujos procedimentos metodológicos envolvam a utilização de dados diretamente obtidos com os participantes ou de informações identificáveis ou que possam acarretar riscos maiores do que os existentes na vida cotidiana".

Art. 2º Não será necessário encaminhar para registro ou avaliação pelo Comitê de Ética em Pesquisa da UFMG (CEP) ou pela Comissão Nacional de Ética em Pesquisa (Conep) as propostas de pesquisa que se enquadrem em um ou mais itens do parágrafo único do Art. 1 da Resolução Nº 510 do CNS:

- I. pesquisa de opinião pública com participantes não identificados;
- II. pesquisa que utilize informações de acesso público, nos termos da Lei no 12.527, de 18 de novembro de 2011;
- III. pesquisa que utilize informações de domínio público;
- IV. pesquisa censitária;
- V. pesquisa com bancos de dados, cujas informações são agregadas, sem possibilidade de identificação individual;
- VI. pesquisa realizada exclusivamente com textos científicos para revisão da literatura científica;
- VII. pesquisa que objetiva o aprofundamento teórico de situações que emergem espontânea e contingencialmente na prática profissional, desde que não revelem dados que possam identificar o sujeito; e
- VIII. atividade realizada com o intuito exclusivamente de educação, ensino ou treinamento sem finalidade de pesquisa científica, de alunos de graduação, de curso técnico, ou de profissionais em especialização.

Parágrafo único. As pesquisas em Arquitetura e Urbanismo que propõem procedimentos metodológicos que combinem alguns dos itens acima, desde que não haja identificação nominal dos sujeitos, poderão ser desenvolvidas sem encaminhamento para CEP ou Conep.

Art. 3º A produção de material para divulgação pública que envolva registro de depoimentos de pessoas de forma escrita ou audiovisual pode ser feita sem a necessidade de registro e avaliação pelo CEP/Conep, desde que tenha assentimento e consentimento livre e esclarecido de todos os participantes.

Parágrafo único. Para uso em pesquisa esse material se enquadra no inciso II do Art. 2º desta resolução.

Art. 4º Esta Resolução entra em vigor nesta data.



Professor Maurício José Laguardia Campomori
Diretor da Escola de Arquitetura da UFMG