

Mayna Lais Tenório de Araújo

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO EM CRECHE  
DO PROGRAMA PROINFÂNCIA NAS ZONAS  
BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS**

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

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

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Juliana Oliveira Batista

Florianópolis  
2019

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

Araújo, Mayna Lais Tenório de  
Avaliação de desempenho térmico em creche do  
programa Proinfância nas Zonas Bioclimáticas  
Brasileiras / Mayna Lais Tenório de Araújo ;  
orientadora, Veridiana Atanasio Scalco,  
coorientadora, Juliana Oliveira Batista, 2019.  
175 p.

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

Inclui referências.

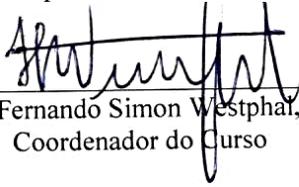
1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Desempenho  
térmico. 3. Projeto Padrão. 4. Simulação  
Computacional. I. Scalco, Veridiana Atanasio. II.  
Batista, Juliana Oliveira. III. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação  
em Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Mayna Lais Tenório de Araújo

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO EM CRECHE  
DO PROGRAMA PROINFÂNCIA NAS ZONAS  
BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS**

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

Florianópolis, 03 de maio de 2019.



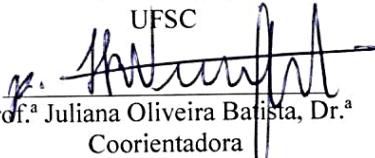
Prof. Fernando Simon Westphal, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**



Prof.ª Veridiana Atanasio Scalco, Dr.ª  
Orientadora

UFSC



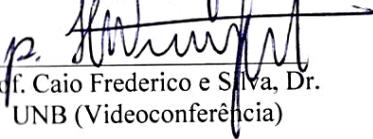
Prof.ª Juliana Oliveira Batista, Dr.ª  
Coorientadora

UFAL



Prof. Fernando Simon Westphal, Dr.  
UFSC

UFSC



Prof. Caio Frederico e Silva, Dr.  
UNB (Videoconferência)



Dedico este trabalho aos meus pais e  
minha avó Luiza, meus maiores  
incentivadores.



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, minha base em todos os momentos. Aos meus pais Ricardo e Sandra, e minha avó Luiza, por sempre embarcarem comigo nos meus sonhos, me oferecendo apoio, incentivo e amor incondicional. Ao Guilherme, pelo carinho, incentivo, cuidado e paciência diante das minhas angústias.

À Izabella, Roberta e Chico, que se tornaram minha família alagoana em Florianópolis, me receberam de braços abertos e estiveram ao meu lado nos melhores e piores momentos. Diante da saudade de casa, me incentivaram a não desistir. E diante dos desafios do mestrado, me ajudaram a superar cada obstáculo. Palavras não são suficientes pra agradecer tudo o que fizeram por mim.

A minha orientadora Veridiana Scalco, por toda dedicação, ensinamentos, paciência, e orientações semanais seguidas de conversas descontraídas que tornaram a pesquisa leve. A minha coorientadora Juliana Batista, principal responsável por eu estar aqui hoje, pois despertou em mim o interesse pelo mestrado na UFSC. Muito obrigada pelos inúmeros assessoramentos via Skype e por toda amizade.

Ao professor Fernando Westphal, pelo auxílio e disponibilidade para sanar as dúvidas durante toda a pesquisa e ao professor Caio Frederico e Silva, por ter aceitado prontamente o convite para compor a banca examinadora.

A todos os amigos do LabCon/UFSC, com os quais compartilhei esses dois anos, trocando conhecimento e construindo amizades que levarei por toda vida. À Carol, parceira de aferição de hobos e incentivadora em todos os momentos. Ao Vinícius, por todo auxílio com as planilhas do Excel e à Mônica, pelas inúmeras consultorias. À Ana Paula e Rayner (LabEEE), pelo auxílio com o EnergyPlus.

Ao professor Victor Roriz, pelo auxílio com a criação do arquivo climático. Ao engenheiro Ruddybert, do FNDE, por toda contribuição com dados do programa Proinfância. Ao professor Leonardo Bittencourt, pelos esclarecimentos sobre ventilação natural. E a equipe do CMEI Rodrigues Alves, por toda contribuição na etapa de monitoramento.

À Universidade Federal de Alagoas, por ter concedido o afastamento remunerado durante o mestrado. E aos professores do LabConf/UFAL que viabilizaram meu afastamento.

Aos amigos e familiares que mesmo à distância sempre estiveram presentes torcendo por mim. E a todos que contribuíram direta ou indiretamente para conclusão dessa pesquisa.



## RESUMO

Projetos padronizados são frequentemente utilizados em obras públicas devido à celeridade que proporcionam no processo licitatório das obras. No âmbito da educação infantil, destaca-se o programa Proinfância que financia a construção de Centros Municipais de Educação Infantil (CMEI) por todo o Brasil, com base em projetos padrão. Entretanto observa-se que a não adequação desses projetos ao clima em que são inseridos pode resultar em desconforto térmico para os usuários. Portanto, a presente pesquisa tem como objetivo avaliar o impacto que diferentes configurações de paredes e coberturas podem oferecer às condições térmicas das salas de aula do projeto padrão Tipo B do programa Proinfância nas oito Zonas Bioclimáticas Brasileiras (ZBB). Para tal foram realizadas simulações computacionais com o programa EnergyPlus v.8.8. tendo o modelo computacional sido calibrado com base no monitoramento in loco de uma edificação localizada em Maceió-AL. Cinco configurações de paredes e coberturas preconizadas pelo FNDE foram avaliadas em oito cidades. Os resultados indicaram que a orientação do CMEI não teve influência significativa no desempenho das salas, visto que o maior ganho de calor acontece pela cobertura. Constatou-se que nas ZB1, 2 e 3, os modelos com isolamento nas paredes e coberturas apresentaram melhor resultado, com apenas 8% das horas de ocupação em desconforto, em Florianópolis (ZB3). Já o modelo com paredes em concreto PVC e isolamento na cobertura apresentou o pior resultado, com até 40% de horas de ocupação anuais em desconforto (1240°Ch), em Santa Maria. Nas ZB4, 5, 6, 7 e 8, a construção em alvenaria associada ao telhado isolado resultou em menor desconforto. Já os modelos com paredes isoladas apresentaram o pior desempenho, com até 87% (6035°Ch) das horas ocupadas em desconforto, como é o caso de Teresina. Para tal cidade, o projeto padrão mostrou-se inadequado. Portanto, a depender do contexto climático, um CMEI com a mesma configuração de paredes e cobertura, pode apresentar variações no percentual de horas ocupadas em desconforto de até 77 pontos percentuais e de até 97% no somatório anual de graus-hora em desconforto (modelo com paredes em Light Steel Frame e cobertura isolada- com melhor desempenho em Florianópolis e o pior em Teresina). Assim, ao indicar o desempenho alcançado pelos diferentes modelos torna-se possível identificar as tipologias construtivas mais adequadas a cada zona bioclimática do país.

**Palavras-chave:** Desempenho térmico, Projeto Padrão, Simulação Computacional.



## ABSTRACT

Standardized designs are constantly applied on public buildings due to its cost effectiveness, which brings brevity to the bidding process. As an example, one can mention *Proinfância*: a program for financing the building of standardized primary schools known as *Centros Municipais de Educação Infantil* (CMEI) all over the country. However, the lack of attention to local climate adjustments on the standard design may result in thermal discomfort for users. Therefore, the present study aims to evaluate the impact of different wall and roof compositions on classrooms thermal conditions for standard designs *Tipo B* from *Proinfância* in the eight Brazilian Bioclimatic Zones (BBZ). Computer simulations on EnergyPlus v.8.8 were conducted based on *in loco* measurements from a building located in Maceió, Alagoas. Five different compositions of walls and roof recommended by the *Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação* (FNDE) were analyzed in eight cities. The results indicated that the building orientation had no significant influence over the classroom performance since the roof is accountable for most of the heat gain. It was evidenced that for BZ 1, 2 and 3, models with insulated walls and roof provided better performance, with only 8% of discomfort hours in Florianópolis (BZ-3). The model with Insulated Concrete Form (ICF) walls and insulated roof presented the worst performance resulting in up to 40% annual discomfort hours (1240°Ch) in Santa Maria. For the zones BZ 4, 5, 6, 7 and 8, masonry associated to insulated roof showed best results. The models with insulated walls presented the worst performance reaching up to 87% (6035°Ch) of discomfort hours in Teresina. Therefore, depending on local climate features, a particular CMEI composition can present a variation of 77 percentage points for annual discomfort hours. For the total annual discomfort hours, it can vary up to 97% (models with light steel frame walls and insulated roof – with the best performance observed in Florianópolis and the worst in Teresina). That way, it is possible to identify the most suitable building compositions for each climatic zone in Brazil.

**Keywords:** Thermal performance, Standardized Design, Computer Simulation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Gráfico dos limites de aceitabilidade .....	36
Figura 2- Temperaturas do ar simuladas (preto) e monitoradas(cinza) e a área sombreada representa uma incerteza de medição de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ . .....	43
Figura 3- Temperatura de superfície simulada (preto) e monitorada (cinza) durante uma semana, e a área sombreada representa uma incerteza de medição de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ . .....	43
Figura 4- Caso base .....	45
Figura 5-Adição do entorno.....	45
Figura 6- Alteração da resistência térmica da envoltória em +15% .....	45
Figura 7-Alteração da absorvância da envoltória associada a um erro de -0,10 .....	45
Figura 8-Comparação entre medições e simulações do modelo inicial.....	47
Figura 9-Comparação entre medições e simulações do modelo calibrado.....	48
Figura 10- Resultados da calibração do modelo nas zonas 2 e 7.50	
Figura 11- Fluxos de calor na superfície da parede leste, medidos e simulados com combinações distintas de algoritmos (dia 25/01).....	52
Figura 12-Somatório de graus-hora de resfriamento, simulações com algoritmo CTF (22 a 25/01).....	52
Figura 13- Detalhamento dos Casos simulados.....	55
Figura 14- Casos com melhor desempenho térmico por Zona Bioclimática. ....	56
Figura 15- Desempenho do modelo sob cada uma das configurações quanto a conforto térmico no dormitório sul em cada uma das zonas bioclimáticas. Quanto mais clara a cor do preenchimento, melhor o desempenho.....	57
Figura 16- Planta baixa e volumetria do objeto de estudo.....	59
Figura 17- comparação de graus-hora de frio e calor para os seis cenários. ....	61
Figura 18-Fluxograma da metodologia do aplicado no estudo... ..	62
Figura 19- Da esquerda para a direita: modelo 3D da casa: fachada Norte e fachada Sul; plano genérico do modelo de habitação; seção do modelo de habitação com a divisão de zonas térmicas.....	64
Figura 20- Somatório de graus-hora de desconforto com 1troca de ar e 0,15 tocas de ar, para o melhor desempenho, pior desempenho e segundo pior desempenho (edificação típica brasileira).....	65

Figura 21- Ensaio na mesa d'água e planta baixa com estudo do fluxo do ar nos ambientes. ....	67
Figura 22- Máscaras de sombra das janelas dos quartos.....	67
Figura 23-Modelos adaptados simulados. ....	67
Figura 24- Etapas do método aplicado na pesquisa.....	70
Figura 25- Localização das cidades avaliadas.....	71
Figura 26- Temperaturas médias (vazio entre as barras cinza claro), médias das máximas e médias das mínimas (limite superior e inferior das barras em cinza claro), máximas e mínimas mensais (limite superior e inferior das barras em cinza escuro), máximas e mínimas registradas (círculos nas extremidades das barras) e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade ao fundo do gráfico (cinza intermediário) na cidade de Curitiba/PR. ....	72
Figura 27- Médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar ao longo do ano em Curitiba/PR.....	73
Figura 28- Médias mensais de Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Curitiba/PR.....	73
Figura 29-Variação diária de temperatura do ar ao longo do ano em Curitiba/PR.....	73
Figura 30-Temperaturas médias, médias das máximas e médias das mínimas, máximas e mínimas mensais, máximas e mínimas registradas e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade, na cidade de Santa Maria/RS. ....	74
Figura 31- Médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar ao longo do ano em Santa Maria/RS.....	75
Figura 32- Médias mensais de Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Santa Maria/RS. ....	75
Figura 33-Variação diária de temperatura do ar ao longo do ano em Santa Maria/RS. ....	75
Figura 34- Temperaturas médias, médias das máximas e médias das mínimas, máximas e mínimas mensais, máximas e mínimas registradas e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade, na cidade de Florianópolis/ SC. ....	76
Figura 35- Médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar ao longo do ano em Florianópolis/SC.....	77
Figura 36-Médias mensais de Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Florianópolis/SC.....	77
Figura 37-Variação diária de temperatura do ar ao longo do ano em Florianópolis/SC. ....	77
Figura 38- Temperaturas médias, médias das máximas e médias das mínimas, máximas e mínimas mensais, máximas e mínimas	

registradas e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade, na cidade de Brasília/DF. ....	78
Figura 39- Médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar ao longo do ano em Brasília/DF.....	79
Figura 40- Médias mensais de Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Brasília/DF. ....	79
Figura 41-Variação diária de temperatura do ar ao longo do ano em Brasília/DF. ....	79
Figura 42- Temperaturas médias, médias das máximas e médias das mínimas, máximas e mínimas mensais, máximas e mínimas registradas e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade, na cidade de Vitória da Conquista/BA. ....	80
Figura 43- Médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar ao longo do ano em Vitória da Conquista/ BA. ....	81
Figura 44- Médias mensais de Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Vitória da Conquista/ BA. ....	81
Figura 45- Variação diária de temperatura do ar ao longo do ano em Vitória da Conquista/ BA. ....	81
Figura 46- Temperaturas médias, médias das máximas e médias das mínimas, máximas e mínimas mensais, máximas e mínimas registradas e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade, na cidade de Campo Grande/MS.....	82
Figura 47- Médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar ao longo do ano em Campo Grande/ MS. ....	83
Figura 48- Médias mensais de Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Campo Grande/ MS. ....	83
Figura 49-Variação diária de temperatura do ar ao longo do ano em Campo Grande/ MS.....	83
Figura 50- Temperaturas médias, médias das máximas e médias das mínimas, máximas e mínimas mensais, máximas e mínimas registradas e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade, na cidade de Teresina/PI. ....	84
Figura 51- Médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar ao longo do ano em Teresina/PI.....	85
Figura 52- Médias mensais de Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Teresina/PI.....	85
Figura 53- Variação diária de temperatura do ar ao longo do ano em Teresina/PI. ....	85
Figura 54- Temperaturas médias, médias das máximas e médias das mínimas, máximas e mínimas mensais, máximas e mínimas	

registradas e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade, na cidade de Maceió/AL. ....	86
Figura 55- Médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar ao longo do ano em Maceió/AL. ....	87
Figura 56- Médias mensais de Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Maceió/AL. ....	87
Figura 57- Variação diária de temperatura do ar ao longo do ano em Maceió/AL. ....	87
Figura 58- CMEI Rodrigues Alves, localizada em Maceió-AL. ....	88
Figura 59- Localização do CMEI de análise. ....	89
Figura 60- Setorização do projeto padrão do programa Proinfância com identificação das salas avaliadas. ....	91
Figura 61- Revestimentos externos da edificação. ....	92
Figura 62- Data Logger- HOBO ....	93
Figura 63- Especificações técnicas do equipamento HOBO. ....	94
Figura 64- Calibração dos hobos. ....	95
Figura 65- Localização dos HOBOS internos e externos. ....	96
Figura 66- Geometria do modelo computacional. ....	98
Figura 67- Exemplo explicativo das nomenclaturas utilizadas para cada modelo. ....	107
Figura 68- Especificações dos modelos computacionais. ....	108
Figura 69- Percentual anual de desconforto, graus-hora de desconforto e graus-hora médio, nas oito orientações simuladas. ....	110
Figura 70- Mapa das Zonas Bioclimáticas Brasileiras com identificação dos modelos que apresentaram o pior e o melhor desempenho térmico em cada cidade. ....	144

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Frequência de ocorrência de desconforto para os casos 1 e 2 nas três cidades, em relação a faixa de conforto.....	60
Quadro 2- Resultados das simulações realizadas para calibração do modelo com infiltração.....	114
Quadro 3- Interpretação do gráfico tipo <i>boxplot</i> . ....	114
Quadro 4- Resultados das simulações realizadas para calibração do modelo com ventilação,.....	118
Quadro 5- <i>Ranking</i> dos modelos de acordo com os percentuais anuais de desconforto e os somatórios de graus-hora anuais, classificados do melhor para o pior desempenho térmico, para todas as cidades.....	125



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1- Dados dos parâmetros variados no estudo.....	59
Tabela 2- Desvio padrão calculado para cada HOB0. ....	95
Tabela 3- Simulações realizadas na calibração do modelo.....	104



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Resultados de desvio médio e erro quadrático para os casos simulados com infiltração.....	115
Gráfico 2- Comparação entre temperaturas simuladas no Caso 1-BASE, com infiltração, e as temperaturas monitoradas <i>in loco</i> , nas quatro salas.....	116
Gráfico 3- Comparação entre temperaturas simuladas no Caso 12-MODELO CALIBRADO, com infiltração, e as temperaturas monitoradas <i>in loco</i> , nas quatro salas.....	117
Gráfico 4- Resultados de desvio médio e erro quadrático para os casos simulados com ventilação.....	118
Gráfico 5- Comparação entre temperaturas simuladas no Caso 13-BASE, com ventilação, e as temperaturas monitoradas <i>in loco</i> , nas quatro salas.....	119
Gráfico 6- Comparação entre temperaturas simuladas no Caso 15-MODELO CALIBRADO, com ventilação, e as temperaturas monitoradas <i>in loco</i> , nas quatro salas.....	119
Gráfico 7- Percentuais de desconforto por sala, considerando todos os modelos em todas as cidades.....	122
Gráfico 8- Percentual de desconforto total, por frio e por calor nas oito cidades.....	123
Gráfico 9- Somatório anual de graus-hora total, por frio e por calor nas oito cidades. ....	124
Gráfico 10-Variação horária da temperatura operativa dos modelos com pior (cor verde) e melhor (cor vermelha) desempenho, na sala 4 ao longo do ano, em relação a faixa de conforto adaptativo, na cidade de Curitiba/PR.....	127
Gráfico 11- a) Percentual de desconforto mensal, b) Somatório de graus-hora de desconforto, c) Grau-hora médio, por frio (barras vazadas) e por calor (barras cheias), nos modelos com pior (cor vermelha) e melhor (cor verde) desempenho térmico, na cidade de Curitiba/PR... ..	128
Gráfico 12-Variação horária da temperatura operativa dos modelos com pior (cor verde) e melhor (cor vermelha) desempenho, na sala 4 ao longo do ano, em relação a faixa de conforto adaptativo, na cidade de Santa Maria/RS. ....	129
Gráfico 13- a) Percentual de desconforto mensal, b) Somatório de graus-hora de desconforto, c) Grau-hora médio, por frio (barras vazadas) e por calor (barras cheias), nos modelos com pior (cor vermelha) e melhor (cor verde) desempenho térmico, na cidade de Santa Maria/RS. ....	130

Gráfico 14- Variação horária da temperatura operativa dos modelos com pior (cor verde) e melhor (cor vermelha) desempenho, na sala 4 ao longo do ano, em relação a faixa de conforto adaptativo, na cidade de Florianópolis/SC. ....	131
Gráfico 15- a) Percentual de desconforto mensal, b) Somatório de graus-hora de desconforto, c) Grau-hora médio, por frio (barras vazadas) e por calor (barras cheias), nos modelos com pior (cor vermelha) e melhor (cor verde) desempenho térmico, na cidade de Florianópolis/SC. ....	132
Gráfico 16- Variação horária da temperatura operativa dos modelos com pior (cor verde) e melhor (cor vermelha) desempenho, na sala 4 ao longo do ano, em relação a faixa de conforto adaptativo, na cidade de Brasília/DF. ....	134
Gráfico 17- a) Percentual de desconforto mensal, b) Somatório de graus-hora de desconforto, c) Grau-hora médio, por frio (barras vazadas) e por calor (barras cheias), nos modelos com pior (cor vermelha) e melhor (cor verde) desempenho térmico, na cidade de Brasília/DF. ...	135
Gráfico 18- Variação horária da temperatura operativa dos modelos com pior (cor verde) e melhor (cor vermelha) desempenho, na sala 4 ao longo do ano, em relação a faixa de conforto adaptativo, na cidade de Vitória da Conquista/BA. ....	136
Gráfico 19- a) Percentual de desconforto mensal, b) Somatório de graus-hora de desconforto, c) Grau-hora médio, por frio (barras vazadas) e por calor (barras cheias), nos modelos com pior (cor vermelha) e melhor (cor verde) desempenho térmico, na cidade de Vitória da Conquista/BA. ....	137
Gráfico 20- Variação horária da temperatura operativa dos modelos com pior (cor verde) e melhor (cor vermelha) desempenho, na sala 4 ao longo do ano, em relação a faixa de conforto adaptativo, na cidade de Campo Grande/MS. ....	138
Gráfico 21- a) Percentual de desconforto mensal, b) Somatório de graus-hora de desconforto, c) Grau-hora médio, por frio (barras vazadas) e por calor (barras cheias), nos modelos com pior (cor vermelha) e melhor (cor verde) desempenho térmico, na cidade de Campo Grande/MS. ....	139
Gráfico 22- Variação horária da temperatura operativa dos modelos com pior (cor verde) e melhor (cor vermelha) desempenho, na sala 4 ao longo do ano, em relação a faixa de conforto adaptativo, na cidade de Teresina/PI. ....	140
Gráfico 23- a) Percentual de desconforto mensal, b) Somatório de graus-hora de desconforto, c) Grau-hora médio, por frio (barras vazadas)	

e por calor (barras cheias), nos modelos com pior (cor vermelha) e melhor (cor verde) desempenho térmico, na cidade de Teresina/PI.... 141

Gráfico 24- Variação horária da temperatura operativa dos modelos com pior (cor verde) e melhor (cor vermelha) desempenho, na sala 4 ao longo do ano, em relação a faixa de conforto adaptativo, na cidade de Maceió/AL. .... 142

Gráfico 25- a) Percentual de desconforto mensal, b) Somatório de graus-hora de desconforto, c) Grau-hora médio, por frio (barras vazadas) e por calor (barras cheias), nos modelos com pior (cor vermelha) e melhor (cor verde) desempenho térmico, na cidade de Maceió/AL.... 143

Gráfico 26- Variação do Percentual de horas em desconforto em relação ao modelo ALV\_CER\_CON (parede em alvenaria de tijolos cerâmicos, com telhado cerâmico e laje em concreto), para as oito cidades..... 145

Gráfico 27- Variação percentual do somatório anual de graus-hora total, em relação ao modelo ALV\_CER\_CON (parede em alvenaria de tijolos cerâmicos, com telhado cerâmico e laje em concreto), para as oito cidades..... 146



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RAH	-	Renovações de Ar por Hora
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
CMEI	-	Centro Municipal de Educação Infantil
GHR	-	Graus-Hora de Resfriamento
GHA	-	Graus-Hora de Aquecimento
°Ch	-	Grau-hora
°ChR	-	Graus-Hora de Resfriamento
°ChA	-	Graus-Hora de Aquecimento
FNDE	-	Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação
ASHRAE	-	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
MEC	-	Ministério da Educação
PDE	-	Plano de desenvolvimento Educacional
IOEB	-	Índice de Oportunidades da Educação no Brasil
IDHM	-	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
EPW	-	<i>EnergyPlus Weather File</i>
LABEEE	-	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
NBR	-	Norma Técnica Brasileira
RTQ-R	-	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>29</b>
1.1	OBJETIVOS .....	31
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>31</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>32</b>
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	32
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>35</b>
2.1	PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES .....	35
2.2	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO .....	38
<b>2.2.1</b>	<b>Monitoramento associado à simulação computacional (Calibração)</b> .....	<b>42</b>
2.3	O PROJETO PADRÃO E SEU DESEMPENHO EM DIFERENTES CONTEXTOS CLIMÁTICOS .....	53
2.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	68
<b>3</b>	<b>MÉTODO</b> .....	<b>70</b>
3.1	CONTEXTOS CLIMÁTICOS AVALIADOS .....	71
<b>3.1.1</b>	<b>Curitiba-PR</b> .....	<b>72</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Santa Maria - RS</b> .....	<b>74</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Florianópolis – SC</b> .....	<b>76</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Brasília – DF</b> .....	<b>78</b>
<b>3.1.5</b>	<b>Vitória da Conquista – BA</b> .....	<b>80</b>
<b>3.1.6</b>	<b>Campo Grande – MS</b> .....	<b>82</b>
<b>3.1.7</b>	<b>Teresina- PI</b> .....	<b>84</b>
<b>3.1.8</b>	<b>Maceió – AL</b> .....	<b>86</b>
3.2	A EDIFICAÇÃO DE ANÁLISE .....	88
<b>3.2.1</b>	<b>O CMEI Rodrigues Alves</b> .....	<b>88</b>
3.3	MONITORAMENTO DA EDIFICAÇÃO .....	93
<b>3.3.1</b>	<b>Equipamentos utilizados</b> .....	<b>93</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Períodos de monitoramento</b> .....	<b>96</b>
3.4	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS .....	96
<b>3.4.1</b>	<b>Calibração do Modelo para Simulação</b> .....	<b>97</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Simulações de desempenho térmico</b> .....	<b>104</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>113</b>
4.1	CALIBRAÇÃO DO MODELO .....	113
<b>4.1.1</b>	<b>Modelo com infiltração</b> .....	<b>113</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Modelo com ventilação natural</b> .....	<b>118</b>
4.2	SIMULAÇÕES DE DESEMPENHO TÉRMICO .....	120

4.2.1	Grupo 1- Curitiba (ZB1), Santa Maria (ZB2) e Florianópolis (ZB3).....	126
4.2.2	Grupo 2- Brasília (ZB4), Vitória da Conquista (ZB5), Campo Grande (ZB6), Teresina (ZB7) e Maceió (ZB8) .....	133
4.2.3	Análise de desempenho térmico comparada a um sistema construtivo usual.....	144
5	CONCLUSÕES.....	148
5.1	LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	151
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	151
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	153
APÊNDICE A	- Fotos da área externa do CMEI monitorado.	163
APÊNDICE B	- Localização e detalhamento das esquadrias.	164
APÊNDICE C	- Localização da estação meteorológica do INMET em Maceió em relação ao CMEI monitorado. ....	165
APÊNDICE D	- Fotos das salas de aula avaliadas com localização do hobs.....	166
APÊNDICE E	- Procedimento de criação do arquivo climático.	167
APÊNDICE F	- Propriedades térmicas dos componentes construtivos dos modelos simulados. ....	168
ANEXO 1	- Planta baixa do projeto padrão tipo b - CMEI Rodrigues Alves.....	170
ANEXO 2	- Cortes do CMEI Rodrigues Alves.....	171
ANEXO 3	- Fachadas do CMEI Rodrigues Alves.....	172
ANEXO 4	-Coeficientes e expoentes do fluxo de ar por frestas de janelas e portas.....	173

## 1 INTRODUÇÃO

Projetos padronizados são frequentemente utilizados em obras públicas devido à celeridade que proporcionam no processo licitatório das obras. No âmbito da educação infantil, destaca-se o programa Proinfância que financia a construção de Centros Municipais de Educação Infantil (CMEI) por todo o Brasil, com base em projetos padrão. Entretanto observa-se que a não adequação desses projetos ao clima em que são inseridos pode resultar em desconforto para os usuários.

De acordo com a Lei de Diretrizes e Bases da Educação (BRASIL, 1996), a educação infantil é a primeira etapa da educação básica e objetiva o desenvolvimento integral da criança de até cinco anos, em seus aspectos físico, psicológico, intelectual e social, complementando a ação da família e da comunidade.

Conforme o Estatuto da Criança e do Adolescente (BRASIL, 1990) é papel do Estado, assegurar o atendimento em creche e pré-escola às crianças de zero a cinco anos de idade. Entretanto, reduzir as desigualdades de oportunidades educacionais é um desafio para os sistemas de educação, a começar pela educação infantil, que é prejudicada pela insuficiência de vagas e recursos financeiros para a rede pública de ensino.

Nesse sentido, o Governo Federal fundou em 2007 o Programa Nacional de Reestruturação e Aquisição de Equipamentos para a Rede Escolar Pública de Educação Infantil (Proinfância), criado por iniciativa do Ministério da Educação (MEC) e do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE), como parte das ações do Plano de Desenvolvimento da Educação (PDE). O principal objetivo do programa é prestar assistência financeira ao Distrito Federal e aos municípios visando garantir o acesso de crianças a creches e escolas da rede pública. Desde sua criação, o programa já construiu 8.728 novos Centros Municipais de Educação Infantil (CMEI), contribuindo assim com o acesso à educação em todo o país (FNDE, 2017).

Os Municípios que são contemplados com obras do Programa Proinfância devem seguir os projetos arquitetônicos padronizados propostos pelo Governo Federal. Esses são divididos em 4 tipologias: Projeto Padrão Tipo 1, Tipo 2, Tipo B e Tipo C. A demanda atendida varia entre 120 alunos (Tipo C) e 376 alunos (Tipo 1) (FNDE, 2017).

Dada a grande escala desse programa, seu impacto sobre o desempenho de milhares de crianças por todo o país é substancial, principalmente por promover os espaços onde as crianças em fase inicial

da educação passarão a maior parte do dia. Nesse aspecto, diversos estudos abordam a influência que condições de conforto térmico em edificações escolares exercem sobre o desempenho dos alunos e destacam que o processo de ensino e aprendizagem pode ser afetado significativamente quando o ambiente de ensino é projetado com má qualidade (MENDELL; HEATH, 2005, JIANG et al., 2018, KALAMEES et al., 2015, KOWALTOWSKI, 2011, GIULI; POS; CARLI, 2012, VILCEKOVA et al., 2017). Uma escola termicamente agradável apresenta condições que não causam nem calor nem frio aos usuários (MUELLER, 2007). Uma forma de promover espaços termicamente confortáveis e saudáveis é concebendo a arquitetura adaptada ao clima, desse modo também ocorre a redução do consumo de energia e a redução de poluição ao meio ambiente (BECCALI et al., 2018, LAM; YANG; LIU, 2006, DESOGUS; FELICE CANNAS; SANNA, 2016).

Entre todos os ambientes escolares, as salas de aula são apontadas por Perez e Capeluto (2009) e Becker et al (2007) como o espaço funcional com maior influência no consumo energético de escolas, pois além de apresentarem a maior área na edificação, também apresentam a maior densidade de ocupação e sediam a maior parte de atividades por maior tempo. Por isso é importante que esses espaços apresentem um bom desempenho térmico e proporcionem conforto aos usuários com o mínimo de uso de condicionamento artificial.

Embora existam especificações de parâmetros construtivos relativos à implantação e à adequação climática de projetos padronizados, observa-se a necessidade de verificação quanto ao cumprimento desses parâmetros, pois em muitos casos o desempenho térmico da edificação é prejudicado pela ausência de adequação ao contexto em que a mesma está inserida, resultando em ambientes com problemas de conforto ambiental (KOWALTOWSKI, 2011).

“Um projeto padrão necessita de flexibilidade para permitir ajustes a condições peculiares de implantação, orientação solar e direção dos ventos predominantes. Principalmente em edificações escolares, onde o desconforto térmico interfere de forma negativa no processo de ensino-aprendizagem, comprometendo a saúde física e psicológica de professores e alunos” (KOWALTOWSKI, 2011)

Diante do exposto, a construção de um mesmo projeto arquitetônico de creches no Brasil demanda o desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao desempenho térmico dessas construções, principalmente levando em consideração a diversidade climática existente no país, que abrange desde climas quentes à amenos e frios. Em regiões onde há desconforto por calor e por frio, a adaptação de um projeto padronizado se torna ainda mais desafiadora, como é o caso, principalmente, do Sul do Brasil, onde observa-se que as soluções para potencializar o conforto térmico são frequentemente conflitantes para lidar com as demandas de aquecimento e refrigeração, o que dificulta a adoção de estratégias de projeto adequadas.

Dessa forma, o presente trabalho consiste na avaliação de desempenho térmico de um projeto padrão Tipo B, do programa Proinfância. Essa tipologia foi escolhida por ser a mais recorrente no Brasil. O projeto apresenta capacidade para 224 crianças em dois turnos e 112 crianças em tempo integral e é composto por salas de aula, banheiros, fraldários, recreio coberto, parque, refeitório, sala multiuso, setores administrativos e de serviços, entre outros ambientes que possibilitam a realização de atividades pedagógicas, recreativas e de alimentação (FNDE, 2017).

A pesquisa se propõe a avaliar o impacto que diferentes configurações de paredes e coberturas podem oferecer às condições térmicas dos ambientes nas oito Zonas Bioclimáticas (ZB) Brasileiras. As análises são direcionadas ao bloco pedagógico, onde o desempenho térmico de quatro salas de aula foi avaliado de acordo com limites de conforto térmico adaptativo, por meio de simulações computacionais. Assim, poderão ser identificadas as configurações de paredes e coberturas com melhor e pior desempenho térmico para cada ZB, de modo a contribuir com a qualidade nos ambientes de ensino, com o conforto dos usuários e consequentemente com o respeito ao meio ambiente, tendo em vista possíveis reduções no consumo de energia elétrica dessas edificações em função da necessidade de condicionamento artificial de ar.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho térmico de um projeto padrão do programa Proinfância sob diferentes configurações de paredes e coberturas nas oito zonas bioclimáticas brasileiras.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Calibrar o modelo a ser utilizado nas simulações computacionais a partir de dados de temperatura do ar monitorados em uma edificação real;
- Caracterizar as configurações de paredes e coberturas utilizadas nos projetos tipo B do Programa Proinfância;
- Verificar por meio de simulações termo-energéticas o desempenho térmico de cinco configurações de paredes e coberturas, nas oito zonas bioclimáticas brasileiras.
- Indicar o desempenho alcançado pelas configurações, considerando o conforto térmico adaptativo em cada zona bioclimática.

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação se estrutura em 5 (cinco) capítulos. O primeiro capítulo aborda a problemática e justificativa para o tema do trabalho, apontando os motivos para escolha do projeto a ser analisado, assim como a descrição dos objetivos a serem alcançados e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica com temas relativos ao estudo, que abordam parâmetros, normativas e métodos de avaliação de desempenho térmico. Também são abordados procedimentos e configurações de simulações computacionais e estudos que avaliaram o desempenho térmico de projetos padrão em diferentes climas.

O terceiro capítulo apresenta o método da pesquisa, onde é feita a caracterização do objeto de estudo e dos contextos climáticos avaliados. Nesse capítulo são retratados o processo de monitoramento, calibração e simulação dos modelos computacionais. São definidas as alternativas a serem simuladas e todas as configurações relativas às simulações. Também é exposta a sistemática das avaliações realizadas após obtenção dos resultados.

No quarto capítulo são apresentados os resultados da calibração dos modelos em duas etapas, com infiltração e com ventilação. Também são realizadas análises acerca dos resultados das simulações em cada

zona bioclimática, onde os resultados são agrupados por semelhanças no desempenho dos modelos nas cidades.

O quinto capítulo contém as conclusões do estudo e em seguida são apresentadas as limitações do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda uma revisão dos principais conceitos e métodos de pesquisa de acordo com o objetivo do trabalho. Inicialmente são apresentados os parâmetros de avaliação de desempenho térmico, bem como as normas vigentes sobre o tema. Em seguida são apresentados estudos que trataram dos métodos de avaliação de desempenho térmico de edificações, enfatizando a simulação computacional e o monitoramento em estudos que realizaram calibração dos modelos. Por fim, são apresentados estudos acerca do desempenho térmico de projetos padrão em diferentes contextos climáticos.

### 2.1 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

A NBR 15575 (ABNT, 3013) define desempenho como o comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas. Nesse sentido existem normas internacionais e nacionais que visam avaliar e regulamentar um padrão mínimo de desempenho, para isso estabelecem requisitos e critérios com base em exigências do usuário, visando o conforto térmico nos ambientes.

Algumas pesquisas apontam o conforto térmico como o indicador mais adequado para esse tipo de análise (AKUTSU & VITTORINO, 1997; DANIEL; WILLIAMSON; SOEBARTO, 2017), pois o comportamento e preferências dos usuários são fatores importantes que devem ser considerados no processo de avaliação de desempenho térmico.

As normas mais difundidas internacionalmente foram desenvolvidas pela ASHRAE – Sociedade Americana de Aquecimento, Refrigeração e Engenharia de Condicionamento de Ar – nos Estados Unidos da América (EUA), e serviram como base para outras normas.

No âmbito do conforto térmico, destaca-se a norma internacional ASHRAE 55 (2017) que apresenta o modelo estático, elaborado a partir do modelo de Fanger, e o modelo adaptativo, que supõe uma adaptação do usuário ao ambiente em que realiza suas atividades, através de ajustes corporais ou na vestimenta. Esse último é aplicável a ambientes naturalmente ventilados, com velocidade do ar menor que 0,2 m/s e com controle de aberturas por parte dos usuários. No modelo adaptativo, a temperatura de conforto é função da temperatura externa do ar e são definidos dois limites de aceitabilidade, máximo e mínimo, através das equações 1 e 2. Vale ressaltar que o limite superior dessas faixas de

conforto pode ser ajustado de acordo com a velocidade do ar. Esse método é aplicável em ambientes cujos ocupantes exerçam atividade metabólica entre 1,0 e 1,3 met e possam adaptar sua vestimenta em um intervalo de 0,5 a 1,0 clo. Destaca-se também que a temperatura do ar externo ao ambiente deve estar entre 10°C e 33,5°C (Figura 1).

$$\text{Limite superior de 80\% de aceitabilidade (}^{\circ}\text{C)} = 0,31 t_{mpa(out)} + 21,3$$

Equação 1

$$\text{Limite inferior de 80\% de aceitabilidade (}^{\circ}\text{C)} = 0,31 t_{mpa(out)} + 21,3$$

Equação 2

A temperatura média predominante do ar externo é definida pela seguinte equação:

$$t_{mpa(out)} = mpa(out) = 0,34t_{od-1} + 0,23t_{od-2} + 0,16t_{od-3} + 0,11t_{od-4} + 0,08t_{od-5} + 0,05t_{od-6} + 0,03t_{od-7}$$

Equação 3

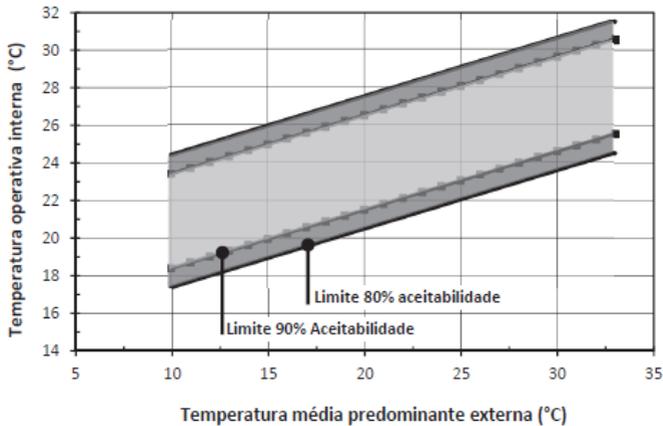
Onde

$t_{mpa(out)}$  é a temperatura média predominante do ar externo;

$t_{od-1}$  é a temperatura média predominante do dia anterior ao dia em questão;

$t_{od-2}$  é a temperatura média predominante do dia anterior, e assim por diante.

Figura 1- Gráfico dos limites de aceitabilidade



Fonte: Adaptado da ASHRAE Standard 55 (2017)

No Brasil, vigoram duas normas que tratam de desempenho térmico de edificações, a NBR 15220 (ABNT, 2005) e a NBR15575 (ABNT, 2013b). Ambas são voltadas às edificações habitacionais, entretanto, devido à ausência de normas voltadas para edificações comerciais e institucionais no Brasil, atualmente, são utilizadas para todos os tipos de edificações.

A NBR 15220 é dividida em cinco partes e aborda desde os métodos de cálculo e medição de propriedades térmicas de componentes construtivos de edificações, até o zoneamento bioclimático brasileiro, que divide o território brasileiro em oito zonas bioclimáticas de acordo com as diretrizes construtivas aplicáveis a cada contexto. As recomendações projetuais presentes na NBR 15220 são baseadas na carta bioclimática elaborada por Givoni (1992) e nas planilhas de Mahoney. Essa norma apresenta o detalhamento das estratégias de condicionamento térmico passivo com base em parâmetros fixados para cada zona bioclimática e engloba recomendações referentes às propriedades térmicas dos componentes construtivos, o tamanho das aberturas para ventilação e a presença de elementos de sombreamento.

A NBR 15575 (ABNT, 2013) é indicada para edificações habitacionais a partir de cinco pavimentos e apresenta requisitos para verificação dos níveis mínimos de desempenho através do método prescritivo ou simulação. A simulação é indicada para edificações em fase projetual, e o prescritivo, para projetos construídos. Cabe ressaltar que a NBR 15575 não considera a edificação condicionada artificialmente. A norma adota basicamente as mesmas recomendações de propriedades térmicas da NBR 15220, que são a transmitância térmica, a absorvância e a capacidade térmica dos elementos construtivos de acordo com cada zona. Apenas o atraso térmico e fator solar não foram incorporados. A classificação das edificações é dividida em mínima, intermediária ou superior; caso não atenda nenhum critério, o ambiente é considerado insatisfatório.

Nas avaliações que consideram o conforto como parâmetro de desempenho, a variável indicada é a **temperatura operativa**. Ela é definida pela ASHRAE 55 (2017) como a temperatura uniforme radiante de um ambiente negro hipotético, onde um ocupante poderia trocar a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que no ambiente real. Ela pode ser calculada por aproximação como sendo o valor médio entre a temperatura média radiante e a temperatura do ar.

A temperatura operativa é utilizada como parâmetro comparativo mediante limites estabelecidos de conforto, por norma, como é o caso da ASHRAE 55 (2017). Dessa forma é possível quantificar o **percentual**

**de horas** em que um ambiente oferece situação de desconforto para os usuários. Do mesmo modo torna-se possível quantificar o somatório de graus hora de necessidade de resfriamento ou aquecimento que ocorrem em determinados ambientes.

O conceito de **graus-hora** é utilizado em avaliações de desempenho de edificações naturalmente ventiladas com o objetivo de quantificar as horas que os usuários estão em desconforto. O número de graus-hora de desconforto representa a quantidade de graus, por hora, nos quais a temperatura operativa excede os limites da faixa de conforto. Assim, obtêm-se os graus-hora de resfriamento quando a temperatura excede o limite máximo de conforto e os graus-hora de aquecimento quando a temperatura está abaixo do limite mínimo de conforto proposto (SORGATO, 2009). Torres (2015) ressalta que o somatório de graus-hora deve ser utilizado em conjunto com o percentual de horas em desconforto, observando a relação intensidade *versus* tempo. Assim torna-se possível avaliar como se dá a distribuição do desconforto ao longo do tempo.

Também é possível utilizar como parâmetro o **grau-hora médio**, que permite identificar o quanto, em média, as temperaturas estão acima ou abaixo das temperaturas limites de conforto. Esse parâmetro corresponde a razão entre o somatório de graus-hora e o número de horas em desconforto. Papst; Lamberts (2002) afirmam que analisar apenas o número de horas em que a temperatura está acima dos limites não demonstra o quanto, em média, essas temperaturas estariam excedentes.

## 2.2 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO

As principais maneiras de avaliar o desempenho térmico de edificações são através de monitoramento *in loco*, simulações computacionais, ou através da junção de monitoramento com simulação, quando é feita a calibração do modelo computacional.

O monitoramento permite avaliar as condições reais da edificação construída e checar a confiabilidade de modelos computacionais por meio da calibração. Além disso, pode ser uma forma de identificar alternativas de melhoria do desempenho térmico da edificação, na medida em que são analisadas a viabilidade de determinadas modificações no projeto ou suas condições operacionais.

Já a simulação tem a vantagem de verificar o desempenho das edificações antes mesmo de serem construídas, além de possibilitar determinar os dados de entrada e variar apenas um parâmetro a fim de

mensurar sua influência no modelo, o que é chamado de análise de sensibilidade (BARBOSA; GHISI, 2017). Entretanto é um processo que envolve muitas incertezas e por isso a calibração é indicada como uma forma de conferir maior confiabilidade aos modelos computacionais.

De acordo com Roberti; Oberegger; Gasparella (2015), a calibração é um processo de ajuste que minimiza o erro entre dados medidos e simulados, variando um conjunto de parâmetros. Apresenta-se como uma maneira de reduzir incertezas no processo de simulação, uma vez que os modelos computacionais representam uma simplificação da realidade.

Nesse aspecto, Westphal (2007) destaca que os dados de entrada devem representar adequadamente o desempenho da edificação sendo, portanto, ajustados na etapa de calibração. Para cada ajuste é verificada a sua influência nos dados de saída do programa. Esse tipo de análise é chamado de análise de sensibilidade e se baseia na análise estatística dos dados. Bertagnolio et al. (2010) destacam como principais parâmetros estatísticos: desvio médio, erro médio quadrático e coeficiente de variação do erro médio quadrático.

Royapoor; Roskilly (2015) identificam que em um processo de calibração existem duas fontes gerais de erro. A primeira é referente aos dados reais e a segunda, ao erro do modelo resultante das simulações. Os erros das medições podem ser determinados pelos fabricantes dos equipamentos ou por meio da calibração dos mesmos. Já os erros das simulações são mais complicados de identificar devido as incertezas envolvidas no processo. Paliouras (2015) menciona que o comportamento dos ocupantes pode ser considerado como a fonte mais decisiva de incerteza durante a calibração, pois os ocupantes interagem com o ambiente construído e com os sistemas de condicionamento climático (uso de dispositivos de sombreamento, janelas, iluminação artificial, etc.).

Nesse sentido, Wit; Augenbroe (2002) relacionam as fontes de incerteza às especificações do edifício: englobando geometria, propriedades dos materiais, especificações HVAC e plantas; incertezas de modelagem: relacionadas a simplificações e suposições de processos físicos complexos e incertezas do cenário: relativas a condições externas ao edifício, condições climáticas e de comportamento dos ocupantes.

Devido ao grande número de variáveis de entrada necessárias para obtenção de resultados precisos, a construção de modelos de **simulação computacional** apresenta-se como uma atividade complexa devido ao grande número de variáveis de entrada necessárias para obtenção de resultados precisos. Considerando que essas variáveis

fazem parte de um regime dinâmico de trocas de calor e massa entre os ambientes internos e externos das edificações, faz-se necessário um bom conhecimento por parte do simulador para inserir os parâmetros de entrada que melhor representem a situação real (PEDRINI; WESTPHAL; LAMBERTS, 2002) (FABRIZIO; MONETTI, 2015).

Nesse sentido, Bre et al. (2016) utilizaram simulações e análises de sensibilidade para identificar variáveis de projeto com maior influência no desempenho térmico de uma residência no litoral da Argentina. Para isso utilizaram o EnergyPlus versão 8.4.0 e o software R. Além disso, estudaram qual seria a melhor combinação dessas variáveis por meio de algoritmos genéticos.

O modelo computacional foi composto por 8 zonas térmicas, a transferência de calor com o solo foi modelada com o objeto GroundDomain: Slab e a ventilação natural foi modelada com o objeto AirflowNetwork, com controle de abertura de portas e janelas para permitir o fluxo de ar quando a temperatura interna fosse mais alta do que a externa e sempre que a temperatura externa fosse superior a 20° C. Nos quartos, sempre que a ventilação natural não fosse suficiente, o ar condicionado era ligado e o fluxo de ar externo bloqueado.

Para as análises da sala foram utilizados os limites de aceitabilidade de 80% estabelecidos pela ASHRAE Standard 55 (2017) e os parâmetros de análise foram os graus hora de aquecimento e graus hora de resfriamento. Já para os quartos, que possuíam condicionamento artificial em alguns momentos, o parâmetro de análise foi o consumo anual total de energia. Esses dois parâmetros originaram uma função de objetivo global, definida como a soma ponderada dos dois sub-objetivos, que serviria como base para as análises, pois a melhoria do desempenho estaria condicionada a minimizar essa função. Foi feita uma análise de sensibilidade com 21 variáveis de entrada, cada uma com 4 níveis de variação. Observou-se que para o resfriamento as variáveis de maior impacto foram: a orientação, absorção solar e capacidade térmica das paredes externas, fração da área de janela para ventilação natural e capacidade térmica do telhado. Já para o resfriamento, a infiltração das janelas, orientação e transmitância térmica de paredes externas e teto foram as variáveis com maior influência. De modo geral, foi possível observar que a taxa de infiltração das janelas foi a variável mais influente no consumo total de energia nos quartos, enquanto a transmissão térmica das paredes externas foi a mais relevante no total de graus-hora na sala de estar. Como resultado da otimização foram obtidas reduções de até 91% nos graus-horas totais da sala de estar e de até 88%

no consumo de energia dos quartos, em relação ao projeto original (BRE et al., 2016).

Simulações computacionais também foram utilizadas por Rackes et al. (2015) para avaliar o potencial de conforto térmico em escolas naturalmente ventiladas por meio do programa EnergyPlus. Os autores realizaram 50.000 simulações detalhadas de energia e fluxo de ar em 427 locais em todo o Brasil, variando 55 parâmetros que representam a morfologia do edifício, como: infiltração, propriedades de construção, ganhos internos, tempos de operação, modificadores de vento, fluxos, controle de janelas e tipos de solo, a fim de elaborar um metamodelo para apoiar o programa de etiquetagem de edificações e fornecer orientações de projeto em edifícios comerciais naturalmente ventilados. Os resultados foram quantificados por *Exceedance Hour Fraction (EHF hot)*, a fração de horas ocupadas que excedeu o limite superior da zona de conforto adaptativo para 80% de aceitabilidade, ou seja, o número de horas em que o limite de conforto é excedido dividido pelo número total de horas ocupadas. Esse metamodelo foi utilizado em um estudo de caso para analisar o projeto preliminar de uma escola para 800 crianças em São Luís - MA, que apresenta temperatura máxima média diária de 30 a 32 °C o ano inteiro. Observou-se que a redução da largura das edificações facilitou as trocas de ar por meio da ventilação cruzada e quando somada a variações de percentual de aberturas, fator solar das janelas, ângulos de sombreamento dos dispositivos e uso de ventiladores de teto, o EHF quente pode ser reduzido de 0,99 para 0,06.

Como resultado, o uso de ventiladores de teto promovendo movimentação do ar, assim como a utilização da ventilação noturna, apresentaram-se como intervenções de conforto altamente efetivas para climas quentes. Conclui-se também que depois dos fatores climáticos, o tamanho da construção (área e número de pavimentos) e os ganhos internos são os fatores mais influentes no desempenho térmico e energético. Vale ressaltar que a ventilação noturna e o uso de ventiladores de teto também são apontadas por Santamouris et al (2007) e por Becker et al. (2007) como uma estratégia eficiente para climas quentes.

Para simulação de ambientes naturalmente ventilados, Versage (2009) sugere que os formatos das aberturas de janelas e portas podem influenciar significativamente no desempenho térmico dos edifícios e por isso aponta alguns parâmetros de simulação que apresentaram maior influência nos resultados, como os coeficientes de descarga, os expoentes e coeficientes de fluxo de ar pelas frestas, coeficientes de pressão do vento e também a rugosidade do entorno, que pode

influenciar os resultados de graus hora de refrigeração em até 10% para mais, ou para menos.

No próximo tópico são apresentados estudos que aplicaram o monitoramento combinado com simulações computacionais para calibrar os modelos utilizados em análises de desempenho térmico.

### **2.2.1 Monitoramento associado à simulação computacional (Calibração).**

Os estudos aqui apresentados abordam desde os equipamentos e procedimentos de monitoramento *in loco*, até o processo de calibração dos modelos computacionais e resultados das simulações.

Roberti; Oberegger; Gasparella (2015) propuseram um método para calibrar um modelo de simulação de uma edificação histórica na Itália. Eles destacam que o risco de obter um modelo calibrado com valores longe dos valores reais é grande, devido às incertezas sobre a construção da edificação e por isso sugerem a calibração em diferentes etapas para esse tipo de edificação.

O edifício foi modelado no EnergyPlus com base em uma auditoria energética e foi feita uma análise de sensibilidade para identificar os parâmetros que afetam a calibração.

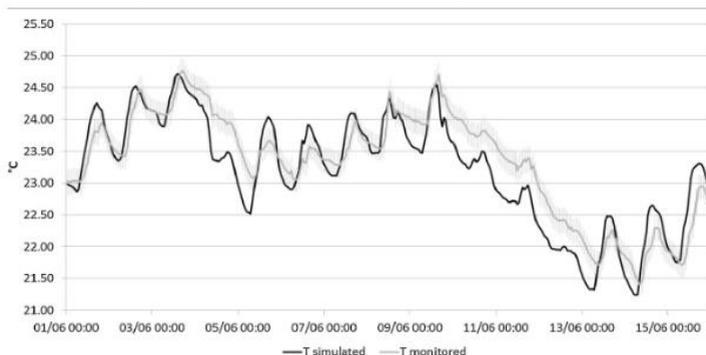
No monitoramento, foram coletados dados de condutância térmica, infiltração de ar, temperaturas internas, e dados climáticos coletados por satélites. Os parâmetros utilizados foram o erro médio absoluto e o erro quadrático médio.

Na análise de sensibilidade, os parâmetros que mais reduziram os erros foram a espessura das paredes externas, a infiltração de ar e a transmitância solar das janelas.

Foram feitas três etapas de calibração. Na primeira, o modelo foi calibrado com dados horários das temperaturas do ar, na edificação como um todo, no verão. Dessa forma, obteve-se redução do erro médio de 0,96K no modelo inicial, para 0,66K no modelo calibrado. Na segunda calibração, os parâmetros de apenas uma sala foram variados, mantendo para as demais zonas os valores da calibração anterior. As diferenças entre a primeira e a segunda calibração indicaram possíveis erros de modelagem, que no estudo estiveram relacionados com as taxas de infiltração e componentes danificados (teto e janelas). Em seguida, o modelo foi validado usando dados de um período diferente da calibração, ou seja, com o modelo calibrado para o verão, seu comportamento foi verificado com dados de inverno, atingindo um erro médio de 0,62K. Também foi feita uma validação com relação as

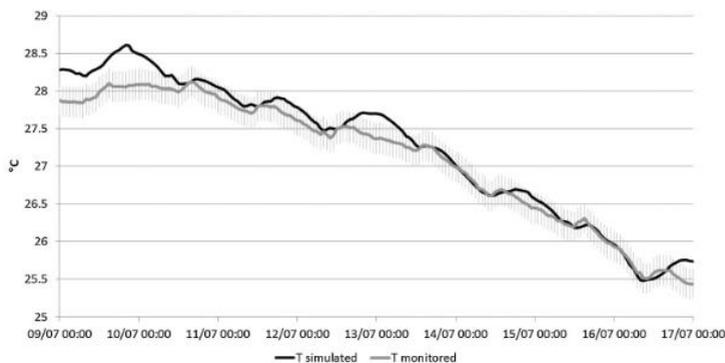
temperaturas de superfície interna das paredes externas, resultando em erros médios de 0,4K.

Figura 2- Temperaturas do ar simuladas (preto) e monitoradas(cinza) e a área sombreada representa uma incerteza de medição de  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ .



Fonte: Roberti; Oberegger; Gasparella (2015).

Figura 3- Temperatura de superfície simulada (preto) e monitorada (cinza) durante uma semana, e a área sombreada representa uma incerteza de medição de  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ .



Fonte: Roberti; Oberegger; Gasparella (2015).

Barbosa; Ghisi (2017) elaboraram uma proposta de calibração de um modelo computacional de uma tipologia de residência unifamiliar, não ocupada, em Goiânia, no Brasil. Para tal, realizaram o monitoramento da residência não ocupada, onde foram coletadas as temperaturas do ar com o auxílio de *dataloggers* do modelo HOBO, marca ONSET, em dois quartos e na área externa da residência. Os

equipamentos internos foram centralizados nos ambientes, fixados no teto e pendurados por um fio a 1,9m de altura do piso. Já o externo, foi locado abaixo do beiral, protegido por uma barreira radiante de papelão revestido com papel alumínio e pequenas aberturas nas laterais para permitir a ventilação. Os hobs foram configurados para efetuar registros a cada 15 min, no período de 21 de dezembro de 2015 a 30 de janeiro de 2016. Esse período foi definido em função da disponibilidade dos moradores. Cabe ressaltar que foi feita a aferição dos equipamentos antes do monitoramento. Eles foram dispostos em uma caixa de EPS e monitorados por três dias. Foram calculadas as médias de cada equipamento e a média geral dos três juntos, assim foi obtido o coeficiente de adição para corrigir a medição dos equipamentos.

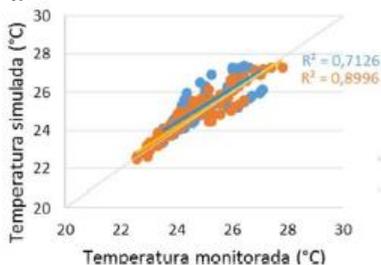
O procedimento de aferição também foi abordado por Batista (2006) que inseriu os Hobos em um compartimento isolado (caixa de EPS) durante um intervalo de 19h, e programou os equipamentos para efetuarem registros de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar. Foram calculados os desvios padrões entre os valores máximos, médios e mínimos registrados pelos HOBOS, após estabilização dos mesmos. Posteriormente os desvios foram comparados com o intervalo correspondente a incerteza dos equipamentos:  $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$  no caso das temperaturas e  $\pm 5\%$  no caso da umidade relativa. Dessa forma pode-se observar que os valores de desvios se enquadraram nos limites de incerteza do equipamento sendo, portanto, aceitáveis.

Dando prosseguimento ao estudo de Barbosa; Ghisi (2017), após o monitoramento, os dados foram utilizados como parâmetro para calibração do modelo computacional. Nesse processo o modelo sofre variações dos dados de entrada até que o valor de temperatura obtido por simulação fique igual ou o mais próximo possível da temperatura monitorada. Para isso, os autores utilizaram o programa computacional EnergyPlus, versão 8.4 e realizaram alterações nas seguintes variáveis: geometria da cobertura, entorno, absorvância dos materiais, resistência térmica dos materiais e infiltração de ar. Nas simulações foi utilizado um arquivo climático com dados reais do período de monitoramento, coletados no site do INMET (2018).

Cada fator foi alterado individualmente e a modificação era mantida nas simulações posteriores quando a alteração era considerada satisfatória. Para verificar se a variável analisada ajudou na calibração do modelo, foram comparados o erro quadrático médio, desvio médio, amplitude térmica e a correlação entre os valores da temperatura do ar simulada e monitorada.

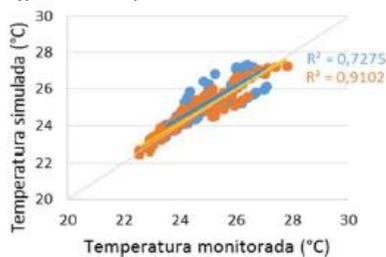
Dos nove casos avaliados, três foram considerados satisfatórios, pois obtiveram influências significativas e positivas no processo de calibração do modelo, apresentando maior correlação entre os dados medidos e simulados, que são: a adição do entorno, o aumento em 15% no valor da resistência térmica da envoltória e a alteração da absorvância da envoltória associada a um erro de -0,10. Os três casos obtiveram o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) mais próximo de 1 e a linha de tendência ficou mais próxima da bissetriz (Figura 4, Figura 5, Figura 6, Figura 7).

Figura 4- Caso base



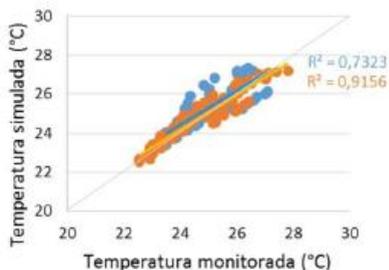
Fonte: Barbosa; Ghisi (2017).

Figura 5-Adição do entorno



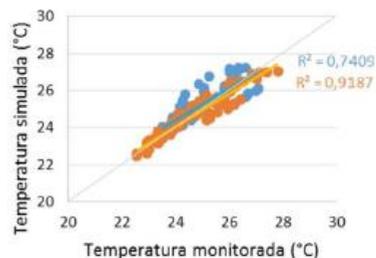
Fonte: Barbosa; Ghisi (2017).

Figura 6- Alteração da resistência térmica da envoltória em +15%



Fonte: Barbosa; Ghisi (2017).

Figura 7-Alteração da absorvância da envoltória associada a um erro de -0,10



Fonte: Barbosa; Ghisi (2017).

Os resultados indicaram que o entorno foi a variável que mais influenciou no processo de calibração. As alterações nas propriedades térmicas das superfícies, como resistência térmica e absorvância, também ocasionaram alterações significativas no processo de calibração. Os autores também destacam que a diferença das alturas de medição dos equipamentos e da simulação oferecem incertezas aos resultados da calibração.

O estudo de Barbosa; Ghisi (2017) apresentou como limitação a não consideração da ventilação natural no processo de calibração. Em um segundo estudo, os mesmos autores utilizaram o modelo calibrado do estudo anterior para avaliar a influência da orientação solar, associada ao comportamento do usuário, no desempenho térmico da mesma edificação para a qual foi feita a calibração. O método foi dividido em cinco etapas: monitoramento, calibração, determinação dos padrões de uso a serem simulados, simulação e análise dos dados simulados. O processo de monitoramento e calibração é descrito na primeira etapa do estudo. Os padrões de uso foram estimados por meio da análise de cluster, que se trata de uma análise estatística que permite agrupar os objetos com características similares e eleger um único objeto para representar todo o grupo.

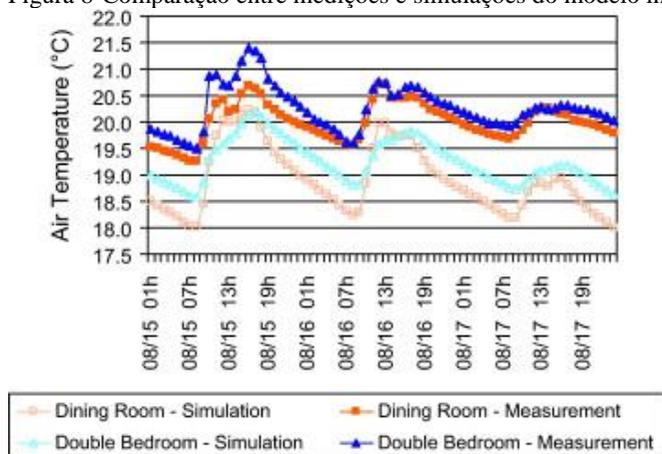
Com o modelo calibrado e os padrões de uso definidos, foi possível realizar as simulações para um ano inteiro a partir das combinações entre os padrões de uso para as oito orientações principais. Com posse das temperaturas operativas, da temperatura do ar e da umidade relativa do ar, foi possível realizar a análise de desempenho térmico empregando os parâmetros de graus-médio, horas de desconforto e carta bioclimática. Os resultados indicaram que as orientações norte e sul são as que oferecem melhor desempenho térmico e constatou-se que o comportamento do usuário influencia diretamente no desempenho térmico da edificação. Os resultados obtidos por meio da carta bioclimática expõem a ventilação como a melhor estratégia bioclimática para reduzir o desconforto por calor, quando somada ao sombreamento pode resolver mais de 80% dos problemas de desconforto térmico por calor, enquanto a alta inércia térmica ou aquecimento solar é a estratégia mais eficiente para reduzir o desconforto por frio. Com a modificação das orientações foi possível observar diferenças de até 700 horas de desconforto, considerando um ano inteiro e 208 horas considerando o período de ocupação da residência (BARBOSA; GHISI, 2017b).

Com o objetivo de calibrar um modelo computacional, Pereira (2009) também realizou o monitoramento de uma edificação. Seu estudo foi feito em uma residência no Sul do Brasil, em Florianópolis-SC, com quatro períodos de monitoramento, sendo de 15 a 21 de agosto de 2007 (casa fechada, sem ventilação) e 11 a 17 de setembro de 2007 (casa aberta com ventilação natural), no inverno. Já no verão, 24 a 30 de dezembro de 2007 (casa fechada, sem ventilação e sem usuários) e 07 a 13 de janeiro de 2008 (casa aberta com ventilação natural). Foram utilizados equipamentos Hobos *data loggers*, Marca *Onset Computer*

*Corporation*, modelo Hobo U12. Dados de temperatura e umidade relativa do ar foram registrados de 5 em 5 minutos, para posterior comparação com os dados simulados. Os equipamentos foram instalados nos quartos de casal e solteiro, na sala de estar, cozinha e banheiro. Foram posicionados no centro dos ambientes a 1,80 m do piso. Destaca-se que as variáveis externas como temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, pressão atmosférica e radiação solar global, direta e difusa foram obtidas pela estação meteorológica do Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia (LEPTEN) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.

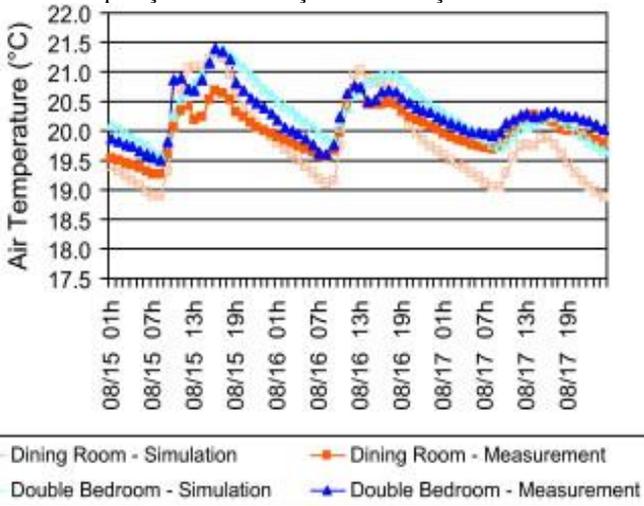
Os dados de dois períodos do monitoramento de Pereira (2009) foram utilizados por Pereira; Ghisi (2011) para calibrar o modelo computacional que seria utilizado na investigação da influência das propriedades térmicas da envoltória no desempenho térmico da mesma edificação do estudo anterior. Para isso, os autores realizaram simulações com o programa EnergyPlus, onde foram feitas alterações nos principais dados de entrada até que o modelo apresentasse diferenças médias inferiores a 1°C entre temperaturas simuladas e medidas (Figura 8 e Figura 9). Os parâmetros variados foram: temperatura do solo, geometria do telhado, resistência térmica dos componentes da envoltória, absorção solar das superfícies externas, ganho de calor interno pelos aparelhos, infiltração de ar, coeficiente de vazão e expoente da velocidade do vento.

Figura 8-Comparação entre medições e simulações do modelo inicial.



Fonte: Pereira; Ghisi (2011).

Figura 9-Comparação entre medições e simulações do modelo calibrado.



Fonte: Pereira; Ghisi (2011).

Posteriormente foram atribuídos ao modelo de referência padrões de ocupação e ventilação referentes ao uso real da edificação. O modelo foi submetido a variações dos materiais da envoltória gerando 26 alternativas simuladas com sete opções de paredes e cinco opções de telhados, com e sem ventilação.

O parâmetro utilizado para análise do desempenho térmico foi o percentual de horas de desconforto e de conforto no quarto de casal e na sala de estar de cada modelo. Esses percentuais foram obtidos com o auxílio do programa Analysis Bio que considera a zona de conforto adaptativo na carta psicométrica elaborada por Givoni.

Os resultados mostraram que a inclusão da ventilação natural e da ocupação no modelo levaram ao aumento do percentual de horas de desconforto por calor tanto no quarto, quanto na sala, com aumento anual de 51,7% para 65,9% de horas de desconforto. Os menores percentuais de desconforto foram observados no modelo com a parede de tijolo maciço duplo com camada de lã de rocha interna. Ao analisar a correlação entre propriedades térmicas e desempenho térmico da residência, observou-se que a capacidade térmica apresenta a maior correlação com as horas de desconforto e a transmitância térmica a menor correlação, nos modelos com e sem ocupação e ventilação. Portanto a adoção de envoltórias com maior capacidade e atraso térmico

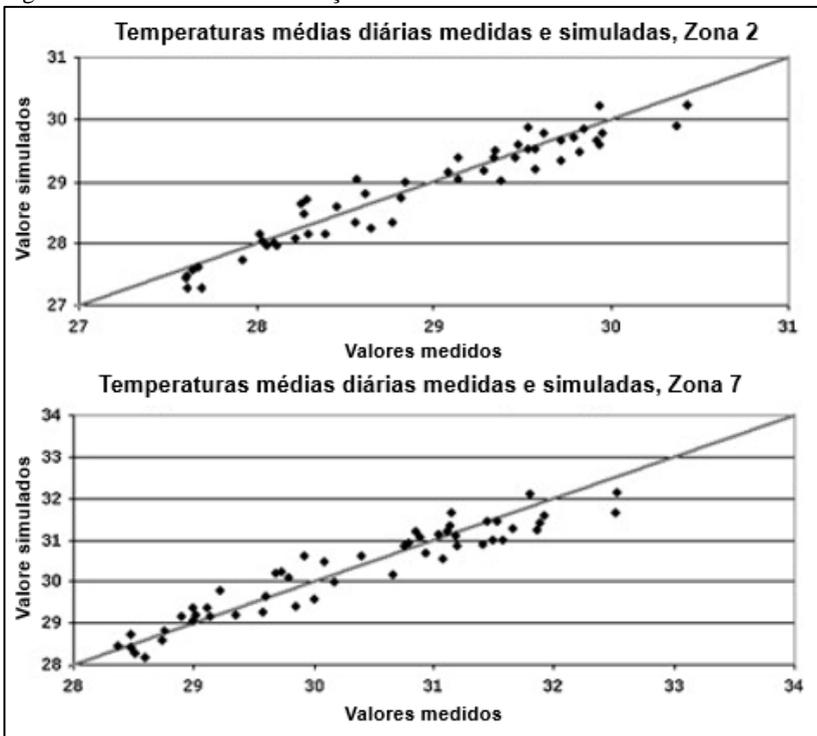
resultariam no melhor desempenho de residências naturalmente ventiladas em climas semelhantes ao de Florianópolis.

O procedimento de monitoramento também pode ser observado no estudo de Synnefa; Saliari; Santamouris (2012). Trata-se de um estudo de caso em um edifício educacional em Atenas, com o objetivo de estimar o impacto que um telhado frio causaria no desempenho térmico e energético da edificação. Para isso, três salas de aula, uma sala de professores e o espaço externo foram monitoradas com sensores de coleta de dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar (Termohigrômetros Tinytag). Além disso, medições de temperatura de superfície também foram feitas no teto do prédio, com o auxílio de um termômetro infravermelho (Cole e Palmer) e uma câmera infravermelha (AGEMA Thermovision 570, comprimento de onda de 7,5-13  $\mu\text{m}$ ). As medições foram feitas a cada hora, das 9:00 às 18:00. Vários pontos da superfície do telhado foram medidos e um valor médio foi calculado. Assim como nos demais estudos apresentados nessa seção, dados meteorológicos de temperatura externa, radiação solar total e difusa, velocidade e direção do vento, foram coletados e fornecidos pela estação meteorológica mais próxima, nesse caso, o Observatório Nacional de Atenas. Foram realizados dois monitoramentos, um antes da aplicação do revestimento no telhado (outubro de 2007) e outro após a aplicação do telhado frio (15 de maio a 30 de setembro de 2009). Os dados do monitoramento foram utilizados para ajustar e validar o modelo computacional utilizado nas simulações.

Com a calibração, o erro máximo encontrado foi de 3% (diferença de temperatura de  $0,81^{\circ}\text{C}$ ) para a zona 7, representando as salas em contato direto com o teto e de 3,5% ( $0,89^{\circ}\text{C}$ ) para a zona 2, representando as salas de aula no térreo (Figura 10).

Os resultados das simulações indicaram uma redução na temperatura do ar das salas de aula de até  $2,8^{\circ}\text{C}$  e uma redução de 40% na carga de resfriamento anual. Houve um aumento de 10% na carga de aquecimento. Destaca-se que após a alteração o telhado, a temperatura de superfície foi reduzida em até  $25^{\circ}\text{C}$  e as flutuações diárias da temperatura da superfície foram reduzidas, sugerindo uma maior longevidade do telhado.

Figura 10- Resultados da calibração do modelo nas zonas 2 e 7.



Fonte: Synnefa; Saliari; Santamouris (2012), adaptado pela autora.

Batista; Lamberts; Güths (2011) realizaram um estudo utilizando a mesma edificação avaliada por Pereira (2009). Desta vez, os autores investigaram a influência dos algoritmos de condução e convecção sobre os resultados de simulações do comportamento térmico de edificações. Para isso as simulações foram calibradas para o verão, com base em dados medidos in loco. Foram efetuadas medições de fluxos de calor, temperaturas do ar e temperaturas superficiais. No exterior da edificação, uma estação meteorológica monitora temperatura e radiação (horárias), precipitação (diária) e velocidade e direção do vento (registradas em intervalos de 1 min). Foram analisados o balanço térmico das superfícies e os somatórios de graus-hora de resfriamento do quarto de casal.

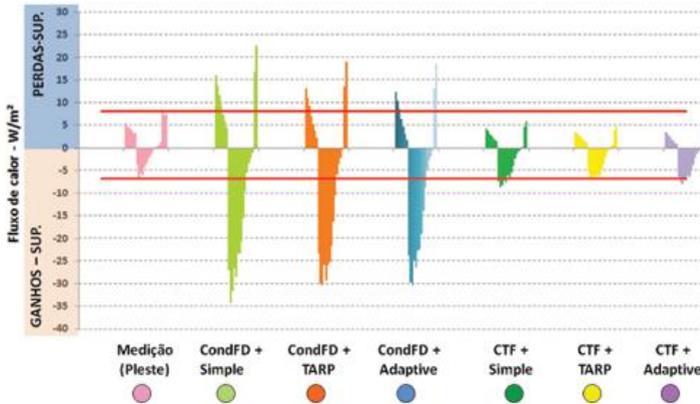
Para as simulações da calibração o arquivo climático original, (TRY de Florianópolis de 1963) foi modificado por dados do período de monitoramento e o modelo computacional de Pereira (2009) foi

adaptado com a inclusão da ventilação mecânica. A calibração foi realizada nos períodos: 01/01 e 02/01 (janelas fechadas 24h) ; Dias 08/01 a 10/01 (janelas abertas entre 9h e 12h e entre 14h e 17h) ; Dias 22/01 a 25/01 (janelas abertas entre 9h e 11h e entre 13h e 18h, com ventilação mecânica noturna (21h às 7h) e Dias 03/02 a 06/02 (janelas fechadas (24 h), com ventilação mecânica noturna (21h às 7h). O período de 22/01 a 25/01/2008 foi utilizado para a análise do balanço térmico das superfícies internas.

O procedimento de calibração foi realizado em duas etapas: com o ambiente fechado e sem o emprego de nenhuma estratégia de ventilação (natural ou mecânica) e na sequência, foram testados valores-limites para a inserção dos dados de entrada referentes à ventilação natural. O modelo sofreu ajustes na geometria (dimensões da zona, áreas de abertura e inserção do insuflamento), testes sem ventilação mecânica (com temperatura do solo, infiltração das janelas, fluxos de ar e rugosidade do entorno), testes com ventilação mecânica (vazão do equipamento, infiltração pelo equipamento desligado, aumento de pressão, coeficiente de descarga do equipamento e infiltração pela abertura de insuflamento). Também foram realizados testes dos algoritmos de condução e convecção no modelo base inicial das simulações, para então definir o modelo final e realizar a análise paramétrica. Desvios médios e os erros quadráticos das temperaturas do ar em relação às temperaturas medidas *in loco* eram obtidos a cada teste, sendo mantidos os dados de entrada das simulações cujos resultados apresentassem os menores desvios médios e erros quadráticos. No total, foram simulados 11 modelos, em que foram combinados os algoritmos CTF e CondFD (condução), com os algoritmos TARP, Simple Natural e Adaptive (convecção).

Os resultados indicaram que nas paredes o algoritmo CondFD superestimou as medições, em até 2,5 vezes para as perdas de calor (fluxos positivos) e em 4,4 vezes para os ganhos de calor pela superfície da parede (fluxos negativos). Já com o algoritmo CTF apresentaram resultados equivalentes às medições quanto aos ganhos de calor, enquanto as perdas foram subestimadas em até 38% (Figura 11).

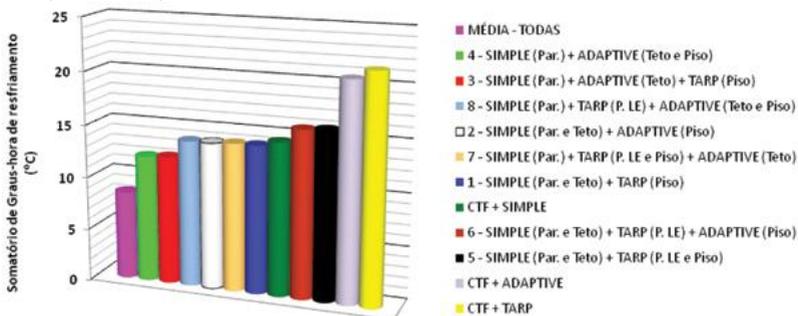
Figura 11- Fluxos de calor na superfície da parede leste, medidos e simulados com combinações distintas de algoritmos (dia 25/01)



Fonte: Batista; Lamberts; Güths (2011).

O algoritmo CTF foi adotado para as análises posteriores. Observou-se que o somatório de graus-hora de resfriamento variou de 12,1 °C a 21,5 °C em função dos coeficientes de convecção. O uso dos algoritmos *Simple* para as paredes e *Adaptive* para o teto e o piso resultou nos menores desvios da temperatura do ar: 0,3 °C a 0,9 °C (Figura 12).

Figura 12-Somatório de graus-hora de resfriamento, simulações com algoritmo CTF (22 a 25/01).



Fonte: Batista; Lamberts; Güths (2011).

Dessa forma, os resultados apresentados demonstram o impacto que a seleção dos algoritmos de condução e convecção produz nos resultados das simulações e ressaltam a importância da calibração dos

modelos computacionais utilizados na avaliação do desempenho térmico de edificações.

Por fim, é importante destacar que o monitoramento de edificações é essencial para a validação dos modelos computacionais, tendo em vista o grau de ajuste entre dados medidos e simulados que confere precisão e maior confiabilidade aos modelos utilizados em simulações de edificações reais.

### 2.3 O PROJETO PADRÃO E SEU DESEMPENHO EM DIFERENTES CONTEXTOS CLIMÁTICOS.

Diversos setores ligados ao governo adotam projetos de edificações padronizadas como uma forma de reduzir custos em áreas como habitação, saúde e educação. Entretanto, devido à uniformização essas edificações muitas vezes não apresentam o desempenho térmico adequado, pois não consideram as melhores orientações, propriedades térmicas dos materiais e as características das aberturas que melhor se adequam aos diferentes contextos climáticos (RACKES ET. AL, 2015).

Nesse aspecto, a crescente preocupação com a qualidade dos ambientes internos e o impacto das construções sobre o meio ambiente tem intensificado os debates sobre o papel do arquiteto em relação ao projeto de edificações. Nesse sentido, destaca-se a importância em adotar estratégias bioclimáticas desde as etapas iniciais do projeto arquitetônico, pois a arquitetura adaptada ao clima pode oferecer melhores condições térmicas ao ambiente de forma passiva. Dessa forma, torna-se possível contribuir com o conforto térmico<sup>1</sup>, saúde dos usuários e consequentemente com a eficiência energética das edificações (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2013; OLGYAY, 2008; GIVONI, 1992).

Labaki; Kowaltowski (1998) e Ralegaonkar; Gupta (2010) também reforçam que a aplicação de estratégias bioclimáticas depende de definições acuradas do clima e dizem respeito a orientação da construção, avaliação do vento predominante, espessura da parede, definição de materiais e cores, condições de sombreamento, construção do telhado e aberturas para ventilação natural.

---

<sup>1</sup> O conforto térmico pode ser definido como um estado de satisfação com o ambiente térmico onde o indivíduo se insere (ASHRAE,1992). É uma sensação humana fortemente relacionada à subjetividade, compreendendo fatores físicos, fisiológicos e psicológicos.

Nesse processo é importante destacar a relevância do monitoramento das variáveis climáticas e da disponibilidade de dados climáticos tratados para os projetistas, pois é a análise do contexto climático que orientará as decisões projetuais mais adequadas para cada caso (PASSOS, 2009).

A envoltória das edificações é apontada por Mirrahimi et al. (2016) como o parâmetro mais importante para gerenciar o conforto térmico. Nesse sentido, em um estudo feito em um edifício português, Dias et al. (2014) observaram que o aumento da refletância solar total do telhado e da fachada, de 50% para 92%, reduziu a temperatura interna máxima entre 2,0°C e 4,7°C em construções sem isolamento térmico e 1,2°C e 3°C em construções com isolamento, afirmando a efetividade do uso de pinturas ou revestimentos como forma de retardar o ganho de calor pela envoltória.

A radiação solar é responsável pela maior parte dos ganhos de calor de uma edificação, por isso a absorptância e a refletância das superfícies externas tem influência direta na carga térmica total dos ambientes. Nesse sentido, recomenda-se atenção para a composição dos telhados das edificações, pois estes são a parte crítica da envoltória, altamente suscetíveis à radiação solar, sendo indicado o uso de isolamentos térmicos para diminuir o ganho de calor solar pela cobertura. Sugere-se ainda a pintura da superfície externa do telhado na cor branca, cobertura com vegetação para fornecer umidade e sombra, ou usar materiais com alta capacidade térmica para minimizar o ganho de calor solar (SADINENI; MADALA; BOEHM, 2011, MIRRAHIMI et al., 2016, CHENG; NG; GIVONI, 2005).

Muitos estudos apontam as vantagens da utilização de isolamento térmico, tanto para obtenção de condições térmicas mais favoráveis, quanto para a redução do consumo energético (WESTPHAL; YAMAKAWA; CASTRO, 2011; OLIVEIRA, 2010; NYERS et al., 2015; PASSOS, 2016). De acordo com Sadineni; Madala; Boehm (2011), as camadas de isolamento de poliestireno ou poliuretano, quando utilizadas em telhados, têm a capacidade de reduzir a carga térmica em mais de 50% quando comparado a um telhado de edifício idêntico sem isolamento. Os autores alertam para uma desvantagem quanto ao uso de isolamento em paredes em regiões climáticas mais frias: o crescimento microbiano indesejado que pode reduzir a vida útil da parede e levar a outras condições indesejáveis no edifício, devido à maior chance de condensação superficial quando a umidade relativa do ar ambiente é superior a 80%, desde que os coeficientes de transferência de calor convectivo e radiativo da parede externa sejam pequenos.

O isolamento térmico retarda a taxa de fluxo de calor por condução, convecção e radiação, devido à sua alta resistência térmica. Sua aplicação apresenta melhor desempenho quando é colocado próximo da superfície de entrada de calor; ou seja, em regiões com predominância de carga de aquecimento do ambiente, o isolamento deve ser colocado próximo à superfície interna do envelope do edifício, enquanto nas regiões onde a carga de resfriamento é predominante, esse deve estar mais próximo da superfície externa (SADINENI; MADALA; BOEHM, 2011).

Nesse sentido, Passos (2016) realizou simulações termo-energéticas nas diferentes zonas bioclimáticas brasileiras, a fim de identificar o impacto do uso de isolamento térmico em um projeto padrão de habitação social naturalmente ventilada.

A edificação com paredes em alvenaria e cobertura em fibrocimento, foi simulada no EnergyPlus, nas cidades de Curitiba (ZB1), Santa Maria (ZB2), São Paulo (ZB3), Brasília (ZB4), Vitória da Conquista (ZB5), Campo Grande (ZB6), Teresina (ZB7) e Recife (ZB8), com as seguintes opções de uso de isolamento (Figura 13):

Figura 13- Detalhamento dos Casos simulados.

CASO	SÍMBOLO	PAREDE	TETO	TELHADO
1		Sem isolante	Sem isolante	Sem isolante
2		Com isolante	Sem isolante	Sem isolante
3		Sem isolante	Sem isolante	Com isolante
4		Com isolante	Sem isolante	Com isolante
5		Sem isolante	Com isolante	Sem isolante
6		Com isolante	Com isolante	Sem isolante

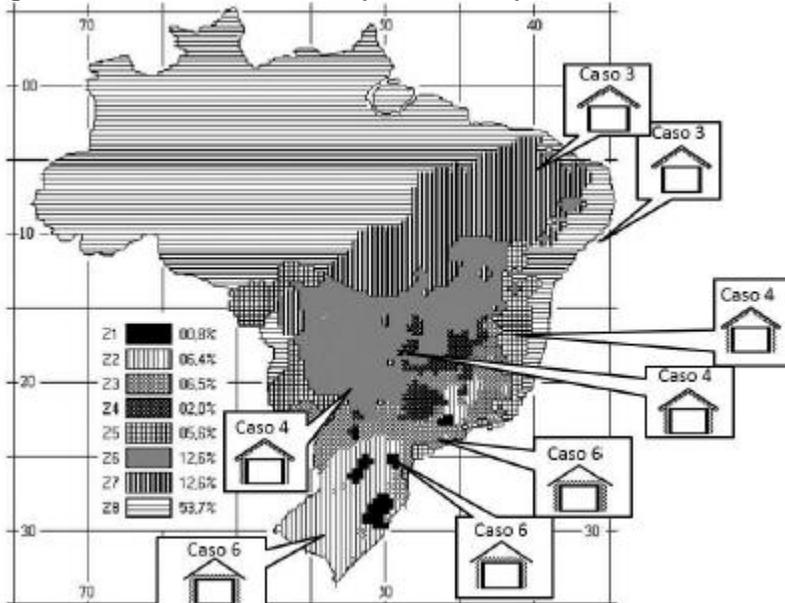
Fonte: Passos, 2016.

O desempenho dos casos foi avaliado através das horas em desconforto por frio e calor (conforto adaptativo 90% de aceitabilidade ASHRAE STANDARD 55 (2010) e pelo consumo energético para aquecimento e resfriamento.

Para Teresina e Recife, os melhores desempenhos foram observados nos Casos 3 e 5, com o uso de lã de vidro junto à cobertura, permitindo uma maior troca de calor do meio interno com o externo por meio da infiltração de ar no ático.

O Caso 6, com isolamento junto a laje e a parede, mostrou-se mais vantajoso nos climas de Curitiba, Santa Maria e São Paulo. Já em Brasília e Vitória da Conquista, o Caso 4 (lã de vidro junto à telha e a parede) foi o que apresentou o menor desconforto por calor e frio de forma equilibrada. Em Campo Grande, o Caso 5 foi melhor energeticamente, enquanto os casos 4 e 6 apresentaram melhores condições de conforto térmico (Figura 14 e Figura 15).

Figura 14- Casos com melhor desempenho térmico por Zona Bioclimática.



Fonte: Passos, 2016.

Figura 15- Desempenho do modelo sob cada uma das configurações quanto a conforto térmico no dormitório sul em cada uma das zonas bioclimáticas. Quanto mais clara a cor do preenchimento, melhor o desempenho.

	 Caso 1	 Caso 2	 Caso 3	 Caso 4	 Caso 5	 Caso 6
Z1	31,7%	45,2%	28,4%	43,7%	31,7%	49,1%
Z2	46,2%	49,0%	51,3%	56,8%	52,0%	58,7%
Z3	47,2%	59,0%	47,6%	65,0%	51,4%	67,9%
Z4	76,3%	95,2%	79,2%	100,0%	84,7%	99,5%
Z5	74,2%	93,3%	73,4%	99,3%	79,1%	99,2%
Z6	79,0%	80,9%	85,7%	94,0%	86,4%	93,7%
Z7	43,6%	14,1%	56,1%	23,9%	52,1%	16,5%
Z8	28,7%	23,6%	55,0%	49,9%	49,1%	45,0%

Fonte: Passos, 2016.

Os resultados indicaram que o isolamento pode trazer benefícios ao conforto térmico e eficiência energética, desde que seja aplicado somente em coberturas nas zonas bioclimáticas mais quentes, como foi o caso em Teresina e Recife, e nas paredes e coberturas nas zonas bioclimáticas mais frias do Brasil, como em Curitiba, Santa Maria, São Paulo, Brasília e Vitória da Conquista.

Roriz,; Chvatal; Cavalcanti (2009) indicam que nem sempre transmitâncias térmicas baixas resultam em ambientes mais confortáveis. Em estudo realizado em nove climas do Brasil, os autores identificaram que, em climas quentes, o isolamento restringe as perdas de calor em edificações com altas cargas internas, o que gera desconforto. Em contrapartida, ao avaliar a influência das propriedades térmicas da envolvente opaca de uma HIS em São Carlos, SP, Marques (2013) confirmou que quanto maior o valor da transmitância, pior será o desempenho térmico da envoltória e alerta para a dificuldade em estabelecer os limites de transmitância sem considerar a totalidade de fatores que tem influência sobre o desempenho de habitações, como por exemplo: porcentagem de área envidraçada por orientação de fachada.

A influência do tipo de material da envoltória em edificações ventiladas e ocupadas foi estudada por Pereira (2009), constatando-se que o desempenho térmico está fortemente relacionado à capacidade

térmica dos componentes da envoltória, e menos à sua transmitância térmica.

A ventilação natural é uma estratégia de resfriamento passivo bastante utilizada em projetos padronizados, tanto pela viabilidade econômica, quanto por questões de conforto e salubridade, pois além de resfriar os edifícios, ela proporciona qualidade do ar e o resfriamento fisiológico. O primeiro por meio da remoção de impurezas do ar e o segundo, por meio do refrescamento causado pela velocidade do ar.

Rackes; Melo; Lamberts (2016) destacam que no Brasil, a ventilação natural é utilizada frequentemente em edifícios públicos como escolas, que possuem janelas operáveis e não dependem de resfriamento mecânico. Entretanto, Rackes et. al (2015) destacam que esse recurso pode não ser favorecido frente a construção de projetos padronizados para todo o território nacional, que desconsidera as interações entre características do edifício e características climáticas.

Um protótipo de escola naturalmente ventilada foi simulado por Rackes et al (2015) em três contextos climáticos do Brasil. Cidades pertencentes às zonas bioclimáticas 1, 3 e 8 (Curitiba, São Paulo e Salvador) foram escolhidas por representarem um clima frio, ameno e quente.

O modelo utilizado nas simulações é representativo de um projeto padrão do FNDE- Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação e se trata de uma escola com uma sala de aula, com parede em alvenaria de tijolos de 6 furos (transmitância de  $2,46 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) e cobertura de telhas cerâmicas com laje em concreto maciço (transmitância de  $2,05 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), com ocupação de 26 alunos e 1 professor, das 7h às 18h (Figura 16).

Figura 16- Planta baixa e volumetria do objeto de estudo.



Fonte: Rackes et al (2015).

Foram simulados dois modelos para cada cidade. O Caso 1, composto por uma combinação que resultaria em um melhor desempenho, e o Caso 2, composto por práticas construtivas típicas que resultariam em um pior desempenho. Os parâmetros variados nos casos podem ser observados na Tabela 1. Destaca-se que os casos foram incrementados com a extensão da faixa de conforto em 1,8°C, representando um ventilador de teto.

Tabela 1- Dados dos parâmetros variados no estudo.

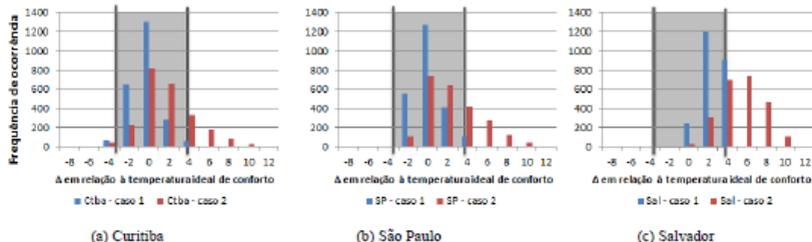
Caso	Porcentagem máximo da abertura de janelas [%]	Orientação	Absortância solar externa (paredes e cobertura) [adimensional]	Emissividade térmica no interior do ático [adimensional]	Massa térmica das paredes [kJ/m <sup>2</sup> K]	Velocidade de ar [m/s]
1	50%	L-O	0,3	0,2	C <sub>T</sub> ~ 400 (espessura elevada)	0,9 (ventilador)
2	20%	N-S	0,9	0,9	C <sub>T</sub> ~ 150 (pouca espessura)	< 0,3 (sem ventilador)

Fonte: Rackes et al (2015).

Observa-se que em Salvador, o caso 1 apresentou todas as horas do ano em conforto, com o auxílio de ventilador de teto. Também foi favorecido pelo atraso térmico e a redução da absortância. Já no caso 2, a baixa inércia térmica provocou desconforto, mesmo com o uso de ventiladores. Além disso, a absortância de 0,9 e a massa térmica inferior ao caso 1, levou ao aumento da temperatura de forma cumulativa. Curitiba e São Paulo apresentaram tendências semelhantes.

Já em relação ao período em conforto, o Caso 1 não apresentou desconforto significativo nas três cidades. Entretanto, o Caso 2 apresentou maior desconforto, principalmente no clima mais quente com 64% das horas acima do limite de conforto em Salvador, seguido do 22% em São Paulo e 14% em Curitiba (Quadro 1).

Quadro 1- Frequência de ocorrência de desconforto para os casos 1 e 2 nas três cidades, em relação a faixa de conforto.



Fonte: Rackes et al (2015).

Observa-se que o Caso 1, apresentou baixa absorção no envelope, que é uma característica favorável ao conforto em climas mais quentes, entretanto, em Curitiba favoreceu o desconforto por frio.

Os resultados reforçam que em projetos padronizados, a escolha adequada dos componentes construtivos pode reduzir as diferenças de desempenho térmico das edificações, além de reduzir ou cessar a necessidade da utilização do condicionamento de ar, através do uso de ventiladores de teto.

Spagnuolo; Silveira; Serrano; Magagnin; Faria (2018) avaliaram um projeto padrão de edifício escolar naturalmente ventilado, a fim de identificar seu grau de adequação térmica em três Zonas Bioclimáticas Brasileiras distintas. Para tal, utilizaram simulações computacionais com o programa EnergyPlus, onde a edificação foi simulada em duas orientações de implantação: norte-sul (0°) e Leste-Oeste (90°), nos contextos climáticos das cidades de Belém-PA, Canela- RS e Sorocaba (SP), nas zonas bioclimáticas 9, 1 e 3, respectivamente. A abertura das esquadrias foi configurada para ocorrer quando a temperatura operativa da zona fosse igual ou superior à temperatura do ambiente externo, ou quando esta fosse igual ou superior a 25°C, ao longo das horas de ocupação. Os resultados indicaram que em ambas as implantações, houve um índice significativo de horas em desconforto para calor (Belém), atingindo 1485°ChR. E também, de horas em desconforto por frio (Canela), atingindo 1012 grau-hora frio, o que confirma que a

edificação apresenta baixa adequação a esses climas. Destaca-se que a maior variação entre orientações ocorreu em Belém, onde houve um aumento de 10% em horas de desconforto e acréscimo 69% nos graus-hora. Nessa mesma zona bioclimática prevalece o desconforto por calor em ambas as orientações, com 80% das horas ocupadas durante a tarde em desconforto.

A Zona Bioclimática 3 apresentou o melhor desempenho frente as demais, com graus hora de até 354 graus-hora calor, o que revela uma boa adequação do projeto ao contexto climático da cidade (Figura 17).

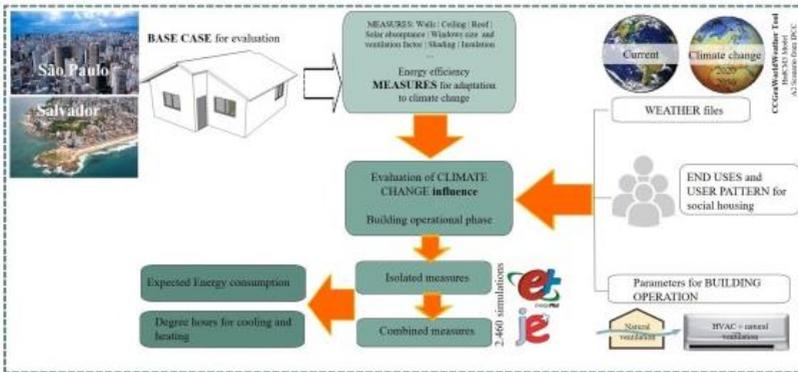
Figura 17- comparação de graus-hora de frio e calor para os seis cenários.



Fonte: Spagnuolo; Silveira; Serrano; Magagnin; Faria, 2018.

Triana; Lamberts; Sassi (2018) realizaram 2460 simulações computacionais com o EnergyPlus a fim de identificar medidas de eficiência energética para a adaptação de uma edificação popular às mudanças climáticas futuras. Para isso, utilizou-se de um arquivo climático EPW alterado com a ferramenta World Weather File Generator for World-Wide Weather Data (CCWorldWeatherGen), que possibilita a geração de arquivos climáticos futuros para qualquer local do mundo. As alterações foram feitas para os anos de 2020 e 2050 nos contextos climáticos de São Paulo/SP (necessidade de aquecimento e resfriamento) e Salvador/BA (apenas resfriamento) no Brasil, considerando a operação da edificação com ventilação natural e com AVAC (Figura 18).

Figura 18-Fluxograma da metodologia do aplicado no estudo.



Fonte: Triana; Lamberts; Sassi (2018).

Dentre as alterações, foram testadas diferentes opções de paredes e tetos, considerando componentes com maior resistência térmica, diferentes absorvâncias e o uso de isolamento; redução da radiação direta através de sombreamento das janelas; aumento das janelas para ampliar a ventilação natural e os efeitos do contato do edifício com o solo também foram avaliados. Nas simulações, cargas térmicas de aparelhos foram mantidas fixas à medida que eram feitas alterações apenas na envoltória. Assim, as alterações foram avaliadas individualmente e posteriormente, combinadas, por meio de simulações paramétricas com o programa JePlus versão 1.5.1.

Considerando os projetos de habitação avaliados não possuem orientação definida para implantação, foram testadas quatro orientações, sendo adotada para as simulações isoladas, a de pior desempenho ( $180^\circ$ ) e para as combinadas, a melhor orientação ( $0^\circ$ ). O consumo de energia e os graus-hora de aquecimento e resfriamento, foram os indicadores de desempenho utilizados na pesquisa.

Os resultados indicaram que nas duas cidades avaliadas, foi observado aumento significativo na necessidade de resfriamento no clima futuro, atingindo um aumento de 140% no consumo para refrigeração em São Paulo, do caso base em relação ao caso de 2050. Em São Paulo, com a incorporação de medidas combinadas de adaptação, foram alcançadas reduções de 40% a 90% nos graus-hora de resfriamento, dos casos atual e futuro, em relação ao caso base. Os casos com pior desempenho apresentaram paredes de madeira com isolamento e absorvância solar de 0,3 e 0,6 e paredes de tijolos com 18cm e absorvância de 0,6. Já os melhores casos apresentaram em comum:

paredes de tijolos duplos e parede de concreto com isolamento e 0,3 de absorvância solar e também parede de tijolos com 18cm e 0,3 de absorvância.

Já para Salvador, foram obtidas reduções nos graus-hora de resfriamento variando entre 33% e 68%, combinando medidas de adaptação no clima atual, em comparação ao caso base e de 27% a 53% comparando 2050 com o caso base. Nessa cidade, os melhores desempenhos foram atribuídos ao uso de paredes em alvenaria com absorvância de 0,3, sombreamento de todos os ambientes, janelas com fator de ventilação de 90%, uso de isolamento no telhado.

Para ambas as cidades, o uso de isolamento no telhado foi uma medida eficaz. Entretanto, a alteração na espessura do isolamento nos telhados em São Paulo não apresentou diferenças significativas na maioria dos indicadores, sendo relevante apenas para reduzir os graus-hora de aquecimento no clima atual. Já em Salvador, para os telhados com absorvância de 0,3, a espessura do isolamento não surtiu diferenças no desempenho (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2018).

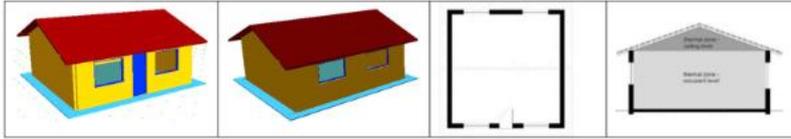
Outros estudos, como o de Tubelo et al. (2018) abordam o desempenho térmico de habitações de interesse social no Brasil, com foco nas propriedades da envoltória. Essas edificações consistem em projetos padronizados e foram analisadas no contexto climático do sul do Brasil, nas cidades de Curitiba, São Paulo e Porto Alegre.

Através de simulações com o programa Thermal Analysis Simulation (TAS) e análises de sensibilidade são investigadas diferentes combinações de envelopes de uma edificação representativa, assim como diferentes taxas de infiltração.

São propostas alterações na envoltória e é feita uma avaliação dos custos de implantação dessas modificações. Para isso, uma variedade de combinações de envoltórias foi avaliada por meio de simulações e análise de sensibilidade em três cidades brasileiras: Curitiba, São Paulo e Porto Alegre.

Foi feita uma simplificação no modelo para isolar a interferência de outras variáveis e compreender melhor a influência da envoltória, por isso as partições internas não foram consideradas (Figura 19).

Figura 19- Da esquerda para a direita: modelo 3D da casa: fachada Norte e fachada Sul; plano genérico do modelo de habitação; seção do modelo de habitação com a divisão de zonas térmicas.



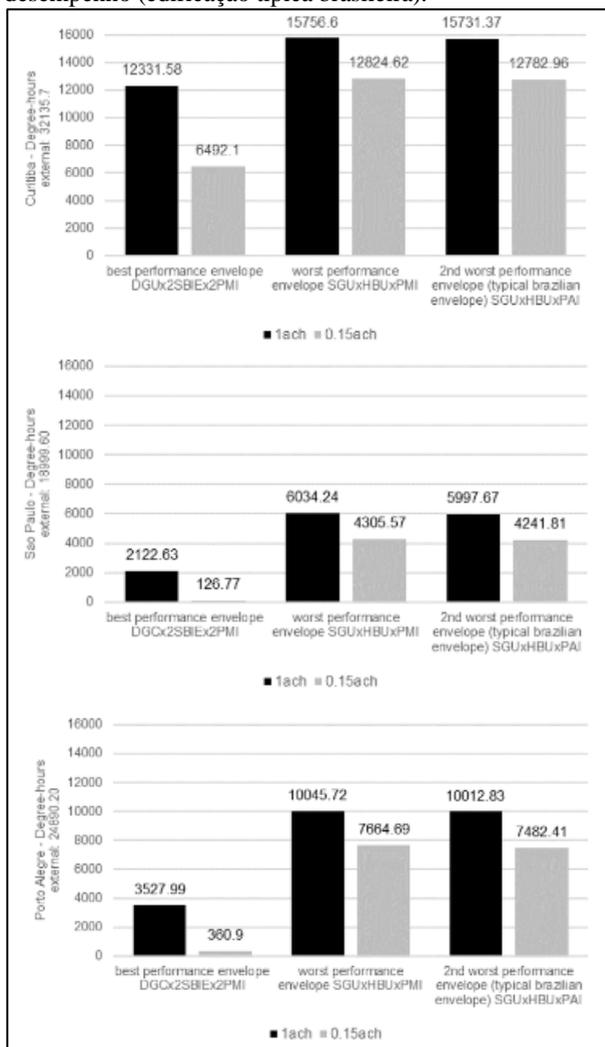
Fonte: Tubelo et al. (2018)

Nos modelos, a configuração do piso se manteve constante, sem isolamento. Foram testados diferentes níveis de massa térmica, com componentes comumente encontrados no Brasil, assim como a utilização de isolamento térmico. Foram assumidos dois valores de trocas de ar por hora: 1 troca e 0,15 trocas.

Os resultados indicaram que a combinação referente a construção típica (vidro simples, parede de bloco cerâmico não isolado e telhado cerâmico com folha de alumínio) apresentou o segundo pior desempenho entre as combinações avaliadas em todas as cidades.

O melhor desempenho nas três cidades foi observado na combinação de paredes e telhados isolados com vidros duplos, com melhoria no conforto de até 52,06%, 98,53% e 89,86% em relação a tipologia padrão, em Curitiba, São Paulo e em Porto Alegre, respectivamente. Entretanto, essas alterações revelaram custos de 50% mais caros que no sistema convencional.

Figura 20- Somatório de graus-hora de desconforto com 1 troca de ar e 0,15 tocas de ar, para o melhor desempenho, pior desempenho e segundo pior desempenho (edificação típica brasileira).



Fonte: Tubelo et al. (2018).

O envelope que apresentou melhor custo-benefício é composto por vidros simples, paredes isoladas e telha cerâmica com folha de alumínio. Nesse modelo os custos extras são inferiores a 10% e

umentam o conforto em até 42% em relação ao envelope típico brasileiro.

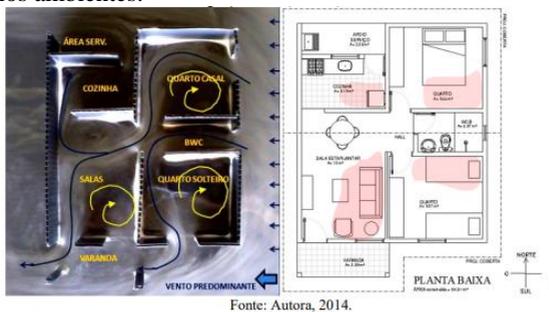
Destaca-se que com a redução da infiltração para 0,15 houve melhoria de até 92,86% em Curitiba. Essa alteração foi responsável pelo aumento das temperaturas internas no inverno e pela redução dos picos de temperatura no verão, período em que a ventilação natural não é favorável.

Torres (2015) avaliou o desempenho térmico de habitações populares padronizadas em três cidades do estado de Alagoas, no Brasil: Maceió e Palmeira dos Índios, com clima quente úmido, e Pão de Açúcar, com clima semiárido. Seu estudo teve como objetivo propor adaptações do projeto aos diferentes contextos climáticos avaliados. Para isso ela utilizou simulações computacionais com o programa EnergyPlus e testou diferentes estratégias bioclimáticas no projeto, utilizando o modelo base (projeto padrão) como parâmetro para as comparações dos resultados de cada modelo adaptado. O indicador de desempenho adotado foi o conforto adaptativo com base nos limites de 90% de aceitabilidade estabelecidos pela ASHRAE Standard 55. A autora utilizou o percentual de desconforto e o somatório de graus-hora de desconforto por calor como parâmetro de análise.

Inicialmente, foi feito um estudo qualitativo com o auxílio do equipamento mesa d'água, a fim de identificar a necessidade de possíveis alterações na disposição das aberturas (Figura 10).

Também foi feito o estudo do desempenho dos protetores solares por meio do programa SOL-AR. Como resultado, a janela do quarto de solteiro foi realocada na fachada leste para melhor captação da ventilação predominante e a tipologia da janela de correr, foi substituída por janelas de giro com venezianas móveis, a fim de aumentar o percentual de abertura para ventilação e sombrear os ambientes de acordo com a trajetória solar (Figura 22). Assim foram definidos os modelos de acordo com as estratégias bioclimáticas indicadas para cada cidade, conforme a Figura 23.

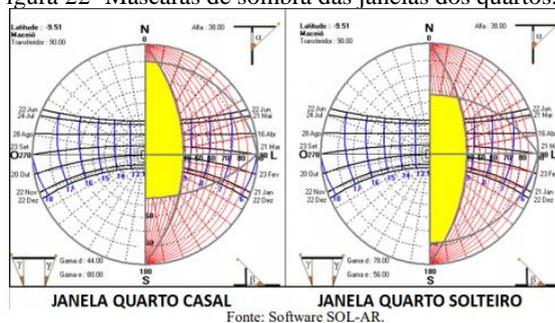
Figura 21- Ensaio na mesa d'água e planta baixa com estudo do fluxo do ar nos ambientes.



Fonte: Autora, 2014.

Fonte: Torres (2015)

Figura 22- Máscaras de sombra das janelas dos quartos.



Fonte: Software SOL-AR.

Fonte: Torres (2015).

Figura 23-Modelos adaptados simulados.

Modelo base	Modelo VENT	Modelo V_MT	Modelo V_RE	Modelo 3E
Modelos adaptados	Estratégias inseridas			Cidades
Modelo VENT	Ventilação natural			Maceió
Modelo V_MT	Ventilação natural + Massa térmica			Palmeira dos Índios e
Modelo V_RE	Ventilação natural + Resfriamento Evaporativo			Pão de Açúcar
Modelo 3E	Ventilação natural + Massa térmica + Resfriamento Evaporativo			Todas as 3 cidades

Fonte: Torres (2015).

Os resultados mostraram que apesar de todas as cidades estarem inseridas na mesma zona bioclimática (ZBB 8), para a qual é

recomendada a ventilação cruzada permanente, apenas essa estratégia é insuficiente. Observou-se que o uso de estratégias híbridas favoreceram o desempenho térmico dos modelos. O modelo que apresentou os melhores resultados foi o que possuía ventilação natural, massa térmica e resfriamento evaporativo, com 50% de redução do somatório de graus hora de desconforto, em relação ao modelo base, nas três cidades. O modelo que apresentou as menores reduções foi o que possuía ventilação e massa térmica, com menos de 15% de redução no somatório, nas cidades de Palmeira dos Índios e Pão de Açúcar.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica abordou aspectos relevantes para fundamentar o método a ser aplicado na presente pesquisa, explorando estudos que alertam para os diferentes comportamentos de uma mesma edificação em contextos climáticos distintos. Pesquisas apontam para o uso de isolamento térmico nas edificações como uma alternativa benéfica frente ao desconforto por frio e por calor; e recomendam o uso de isolamento na cobertura em cidades com climas quentes e o uso de isolamento nas paredes e coberturas em climas moderados e frios. Além disso, destacam a influência que as propriedades térmicas dos componentes construtivos da envoltória têm sobre seu desempenho termo energético.

As pesquisas também destacam que os parâmetros de desempenho térmico devem atender às necessidades de conforto dos usuários das edificações. Para tal, utilizar o conforto adaptativo como indicador de desempenho é visto de forma positiva. São recomendados os seguintes parâmetros: percentual de desconforto e somatório de graus-hora em desconforto.

Procedimentos de avaliação de desempenho são exemplificados desde a etapa de monitoramento das edificações, até as simulações computacionais juntamente com a calibração dos modelos. O monitoramento *in loco* constitui-se como um recurso fundamental na validação de modelos de simulação; para tal é preciso obter dados de um período de referência e que preferencialmente apresente padrão de uso conhecido, a fim de diminuir o tempo destinado à calibração.

A calibração é apontada como uma forma de conferir maior confiabilidade aos resultados das simulações, que por sua vez, permitem análises prévias acerca do desempenho térmico de uma edificação ainda em fase projetual ou já construída. Nesse sentido, a análise de

sensibilidade permite identificar quais variáveis de entrada exercem maior influência nos resultados das simulações.

Os estudos indicaram as variáveis que precisam ser levantadas e inseridas nos processos de monitoramento e simulação. Destacando-se na etapa de monitoramento as variáveis: Temperatura do ar interno e externo e umidade relativa do ar, além de dados externos de radiação solar, precipitação, ventilação, entre outros obtidos por estações meteorológicas para confecção de arquivos climáticos utilizados na calibração de modelos. Já no processo de simulação, destacam-se as seguintes variáveis de entrada: cargas internas, dados climáticos (arquivos climáticos), padrão de uso dos ambientes, propriedades térmicas dos componentes construtivos e geometria dos modelos.

Ao avaliar o desempenho de projetos padrão em diferentes contextos climáticos, diversos estudos alertam para necessidade de adaptação dos mesmos a cada realidade em que serão inseridos, pois comprovam que a depender da localização ou da orientação de implantação, um mesmo projeto pode obter variações significativas de percentual de desconforto e de somatório de graus-hora de aquecimento ou resfriamento.

A revisão bibliográfica foi essencial para definição da metodologia adotada na presente pesquisa, pois além de abordar conceitos e normativas que devem ser utilizados em análises de desempenho térmico, exemplificou as etapas e procedimentos necessários para tais análises. Dessa forma, os estudos aqui abordados forneceram um repertório que serviu como base para a avaliação da influência dos climas das oito cidades, sobre o desempenho térmico de um projeto de CMEI construído com diferentes configurações de envoltória.

### 3 MÉTODO

Neste capítulo são apresentadas as etapas necessárias para o desenvolvimento da pesquisa. O método aqui proposto divide-se em quatro etapas principais que são: a caracterização do objeto de estudo, o monitoramento da edificação de análise, simulações computacionais para calibração, simulações de desempenho térmico e tratamento dos dados. Na primeira etapa é feita uma caracterização do contexto climático das cidades avaliadas e da edificação de análise. Na etapa de monitoramento são descritos os procedimentos e materiais utilizados para a coleta de dados *in loco*. A etapa de simulações computacionais é dividida em duas partes. Na primeira são abordados os parâmetros e critérios utilizados para calibração do modelo representativo de uma edificação real. Na segunda, são descritos os procedimentos de simulação para análises de desempenho. A última etapa aborda o tratamento de dados, apresentando como os mesmos serão compilados e apresentados (Figura 24).

Figura 24- Etapas do método aplicado na pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

### 3.1 CONTEXTOS CLIMÁTICOS AVALIADOS

Com o objetivo de analisar o desempenho térmico das configurações de paredes e coberturas dos CMEIs em todo o país, foram selecionadas oito cidades, representativas das zonas bioclimáticas brasileiras (Figura 25). Na escolha foram consideradas a maior variação possível de latitudes, visto sua influência no ganho de radiação solar, e a disponibilidade de arquivos climáticos para as simulações. Dessa forma, as cidades escolhidas foram:

- Curitiba-PR (Zona bioclimática 1)
- Santa Maria-RS (Zona bioclimática 2)
- Florianópolis-SC (Zona bioclimática 3)
- Brasília-DF (Zona bioclimática 4)
- Vitória da Conquista-BA (Zona bioclimática 5)
- Campo Grande-MS (Zona bioclimática 6)
- Teresina-PI (Zona bioclimática 7)
- Maceió-AL (Zona bioclimática 8)

Figura 25- Localização das cidades avaliadas.



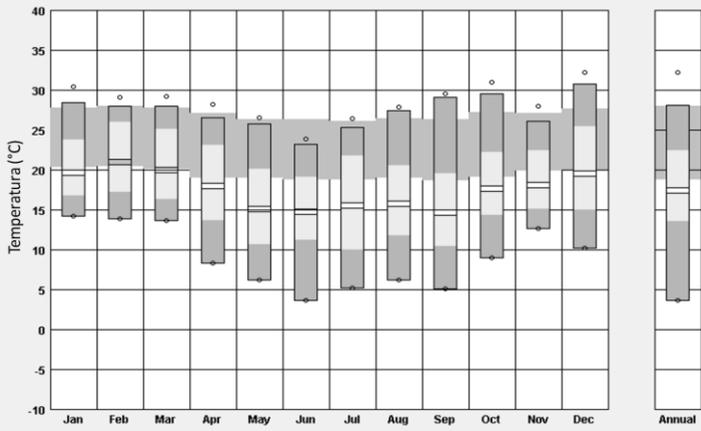
Fonte: Autora (2019).

O contexto climático de cada cidade é apresentado a seguir por meio da caracterização climática. Para tal foram utilizados os arquivos climáticos no formato .EPW.

### 3.1.1 Curitiba-PR

Capital do estado do Paraná, Curitiba localiza-se na região Sul do Brasil, com latitude  $-25^{\circ}25'47''$  e longitude  $-49^{\circ}16'19''$ . De acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005), está inserida na zona bioclimática 1, para a qual é recomendado o uso de aberturas médias para ventilação que permitam a aquisição de radiação solar durante o período frio. Para as vedações externas recomendam-se paredes leves com coberturas leves e isoladas. Além disso, o aquecimento solar e o uso de vedações internas pesadas destacam-se como estratégias de condicionamento passivo nessa ZB. A cidade apresenta 78% de desconforto ao longo do ano, em sua maioria por frio, considerando o modelo adaptativo para 80% de aceitabilidade (Figura 26).

Figura 26- Temperaturas médias (vazio entre as barras cinza claro), médias das máximas e médias das mínimas (limite superior e inferior das barras em cinza claro), máximas e mínimas mensais (limite superior e inferior das barras em cinza escuro), máximas e mínimas registradas (círculos nas extremidades das barras) e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade ao fundo do gráfico (cinza intermediário) na cidade de Curitiba/PR.



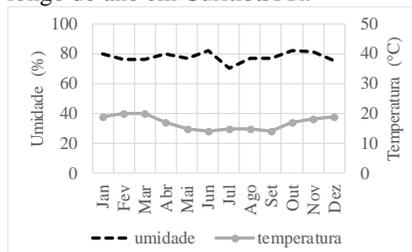
Fonte: Elaborado no software Climate Consultant 5.5 (UCLA, 2015) e por meio do arquivo climático EPW (INMET, 2016).

Curitiba apresenta temperatura média anual de  $16,9^{\circ}\text{C}$ , com média máxima mensal de  $20^{\circ}\text{C}$  em fevereiro e março, e média mínima mensal de  $14^{\circ}\text{C}$  nos meses de junho e setembro. A Figura 27 (eixo 2) demonstra as médias mensais de temperatura ao longo do ano, indicando uma amplitude térmica anual de  $6^{\circ}\text{C}$ . Observa-se que a variação de

temperaturas é proporcional a variação de radiação solar ao longo do ano. Nos meses mais quentes, a radiação atinge os 241Wh/m<sup>2</sup> e nos mais frios 109Wh/m<sup>2</sup> (Figura 28).

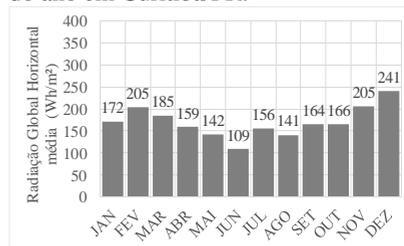
Já a umidade relativa média anual é de 77,7%, com mínima média de 70% em julho e máxima média de 82% em junho e outubro (Figura 27–eixo 1).

Figura 27- Médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar ao longo do ano em Curitiba/PR.



Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

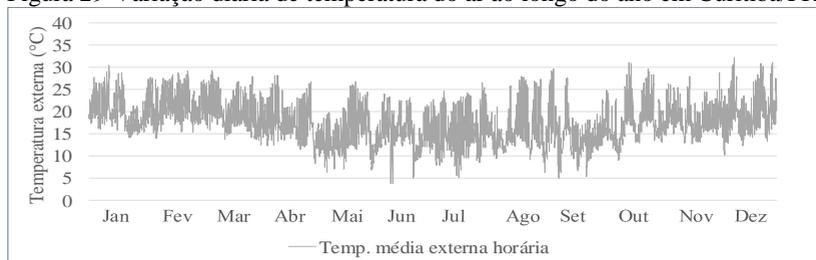
Figura 28- Médias mensais de Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Curitiba/PR.



Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

Analisando as temperaturas horárias ao longo do ano, observam-se amplitudes diárias de em média 8,92°C, com até 17,3°C de amplitude diária em julho e com amplitude diária mínima de 1,2°C em abril (Figura 29).

Figura 29-Variação diária de temperatura do ar ao longo do ano em Curitiba/PR.



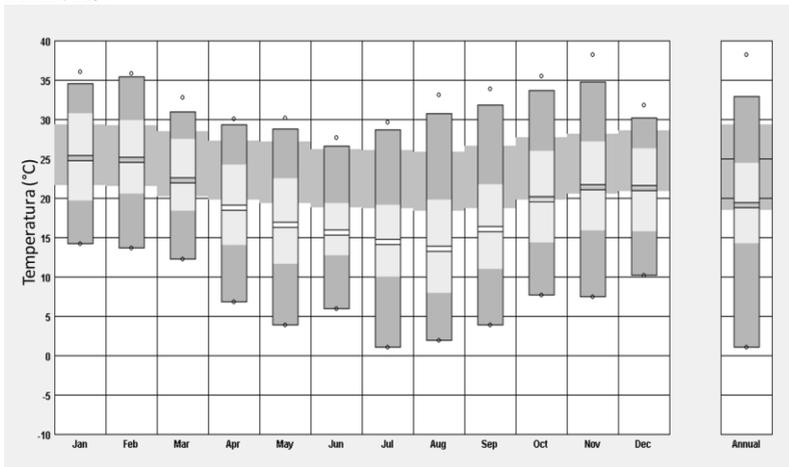
Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

A ventilação predominante na cidade é proveniente do quadrante Leste, com velocidades médias de até 2m/s maior parte do ano, entretanto essa estratégia é considerada apenas nos meses mais quentes, tendo em vista as baixas temperaturas externas registradas ao longo do ano.

### 3.1.2 Santa Maria - RS

Santa Maria está localizada no estado do Rio Grande do Sul, a uma latitude de  $-29^{\circ} 41' 03''$  e longitude de  $-53^{\circ} 48' 25''$ . De acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005) está inserida na ZB2, para a qual recomenda-se o uso de aberturas médias para ventilação, que permitam incidência de radiação solar durante o inverno e uso de paredes leves com coberturas isoladas. Destacam-se como estratégias de condicionamento passivo a ventilação cruzada, no verão, e aquecimento solar e vedações internas pesadas, no inverno (Figura 30). Considerando os limites de aceitabilidade de 80%, estabelecidos pela ASHRAE Standard 55 (2017), é possível observar que 70% das horas do ano apresentam desconforto, em sua maioria por frio (Figura 30).

Figura 30-Temperaturas médias, médias das máximas e médias das mínimas, máximas e mínimas mensais, máximas e mínimas registradas e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade, na cidade de Santa Maria/RS.



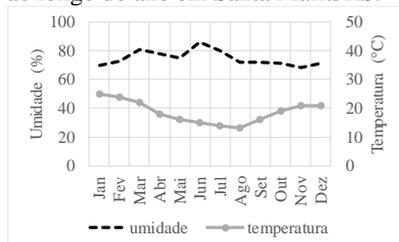
Fonte: Elaborado no software Climate Consultant 5.5 (UCLA, 2015) e por meio do arquivo climático EPW (INMET, 2016).

Com temperatura média anual de  $18,6^{\circ}\text{C}$ , Santa Maria apresenta temperatura média máxima de  $25^{\circ}\text{C}$  em janeiro. Já a média mínima é registrada em agosto, com  $14^{\circ}\text{C}$ . A Figura 31 expõe as médias mensais de temperatura ao longo do ano, onde é possível observar amplitude térmica anual de  $12^{\circ}\text{C}$ . Em relação a incidência de radiação solar, a maior taxa de radiação média mensal é registrada em janeiro, com

274Wh/m<sup>2</sup>. Já a menor média é observada em junho, com 78Wh/m<sup>2</sup> (Figura 32).

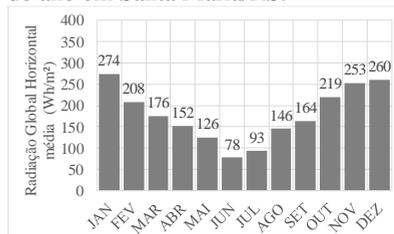
A variação de umidade relativa do ar é inversamente proporcional às temperaturas. A média anual é de 74,7%, com mínima média de 68% em novembro e máxima média de 86% em junho (Figura 31– eixo 1).

Figura 31- Médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar ao longo do ano em Santa Maria/RS.



Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

Figura 32- Médias mensais de Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Santa Maria/RS.

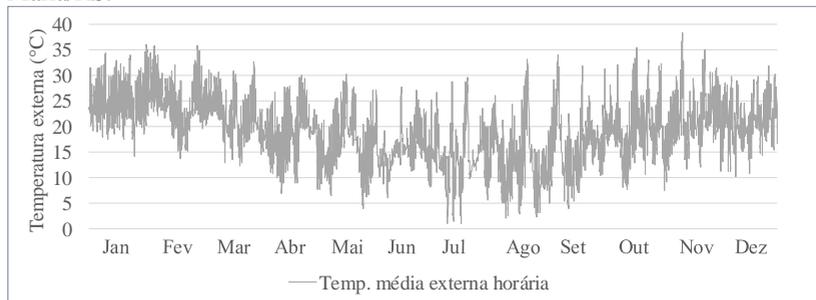


Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

Em Santa Maria as amplitudes diárias apresentam em média 10,25°C, com média diária máxima de 22,3°C em agosto e mínima de 1,2°C em julho (Figura 33).

Destaca-se que a maior ocorrência de ventilação na cidade é proveniente do quadrante sudeste, com velocidades de em média 2m/s.

Figura 33-Variação diária de temperatura do ar ao longo do ano em Santa Maria/RS.

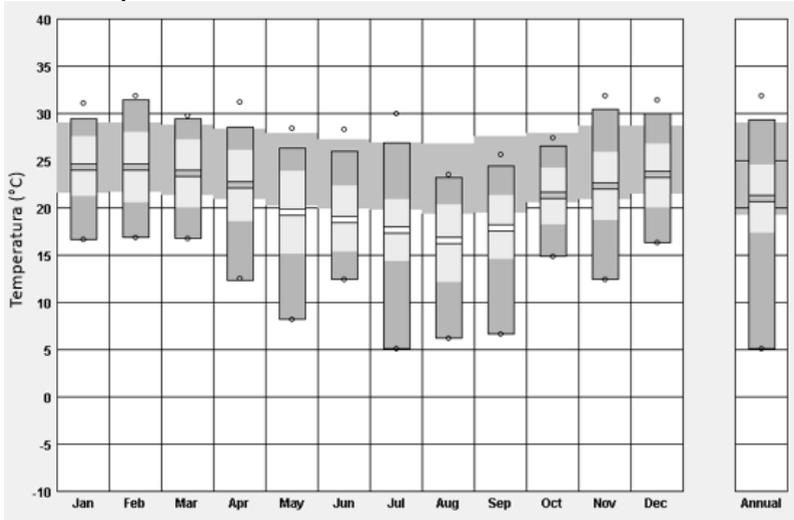


Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

### 3.1.3 Florianópolis – SC

Capital do estado de Santa Catarina, localiza-se na latitude  $-27^{\circ} 35' 48''$  e longitude  $-48^{\circ} 32' 57''$ , região Sul do Brasil. Com 51% das horas do ano em situação de desconforto (Figura 34), a cidade está inserida na ZB3, para a qual a NBR 15220 (ABNT, 2005) recomenda o uso de aberturas médias que permitam incidência de radiação solar durante o inverno, paredes leves refletoras e coberturas leves isoladas. No verão, é indicada a ventilação cruzada. Já no inverno, aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas.

Figura 34- Temperaturas médias, médias das máximas e médias das mínimas, máximas e mínimas mensais, máximas e mínimas registradas e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade, na cidade de Florianópolis/ SC.

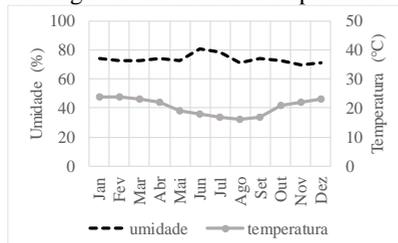


Fonte: Elaborado no software Climate Consultant 5.5 (UCLA, 2015) e por meio do arquivo climático EPW (INMET, 2016).

A temperatura média anual na cidade é  $20,5^{\circ}\text{C}$ , com média mensal máxima de  $24^{\circ}\text{C}$  em janeiro e fevereiro, e média mensal mínima de  $16^{\circ}\text{C}$  em agosto. Observam-se amplitudes mensais de até  $8^{\circ}\text{C}$  (Figura 35- Eixo 2). A umidade relativa média anual é de 73,83%, com média mensal máxima de 81% registrada em junho, e com média mensal mínima de 70% em novembro (Figura 35- Eixo 1).

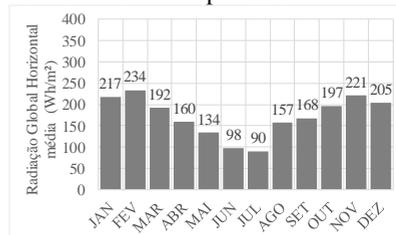
Em relação a incidência de radiação solar, as maiores taxas de radiação são observadas entre os meses de novembro e abril, atingindo os 234 Wh/m<sup>2</sup> no mês de fevereiro. Os meses de junho e julho apresentam as menores taxas de radiação, com 98 Wh/m<sup>2</sup> e 90 Wh/m<sup>2</sup>, respectivamente (Figura 36).

Figura 35- Médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar ao longo do ano em Florianópolis/SC.



Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

Figura 36- Médias mensais de Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Florianópolis/SC.

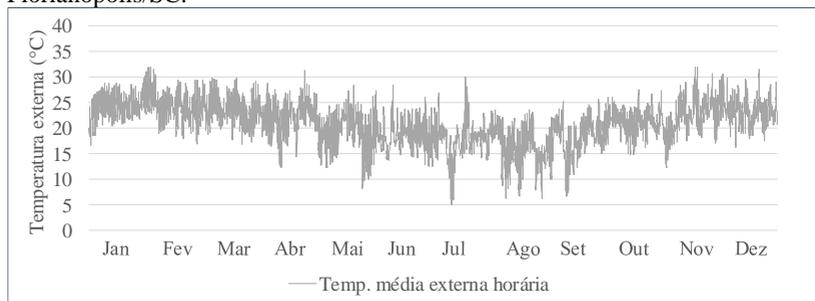


Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

Em Florianópolis, a amplitude média diária ao longo do ano é de 7,18°C. Sendo a máxima amplitude média diária observada em setembro, 14,9°C e a mínima em junho, 1,2°C (Figura 37).

Em relação aos ventos predominantes, destacam-se o nordeste, seguido do sul e sudeste, com velocidades médias de aproximadamente 4m/s.

Figura 37-Variação diária de temperatura do ar ao longo do ano em Florianópolis/SC.



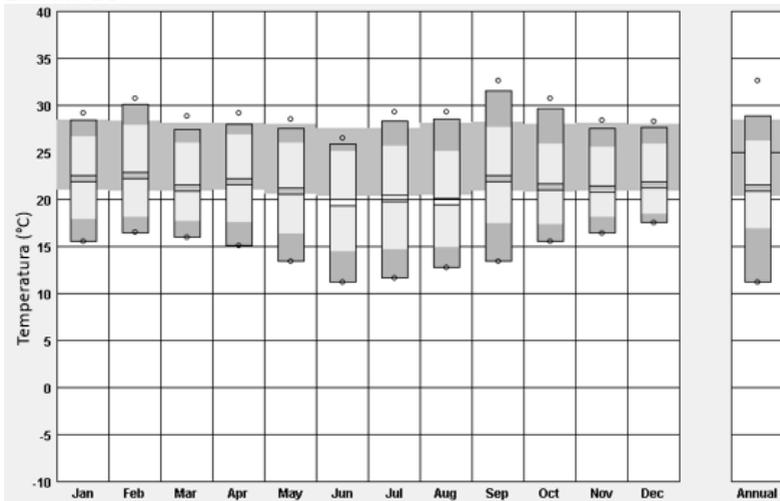
Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

### 3.1.4 Brasília – DF

Capital do Distrito Federal, Brasília está localizada na latitude - 15° 46' 47" e longitude -47° 55' 47'. Está inserida na ZB4, para a qual a NBR 15220 (ABNT, 2005) indica o uso de aberturas para ventilação com tamanho médio e sombreadas, paredes pesadas e coberturas leves e isoladas. Durante o verão, estratégias como: resfriamento evaporativo, massa térmica para resfriamento e ventilação seletiva são indicadas. Já no inverno, recomenda-se o aquecimento solar da edificação e uso de vedações internas pesadas.

Apresenta 59% das horas do ano em situação de desconforto, em sua maioria por frio, levando em consideração os limites de aceitabilidade de 80%, estabelecidos pela ASHRAE Standard 55 (2017) (Figura 38).

Figura 38- Temperaturas médias, médias das máximas e médias das mínimas, máximas e mínimas mensais, máximas e mínimas registradas e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade, na cidade de Brasília/DF.



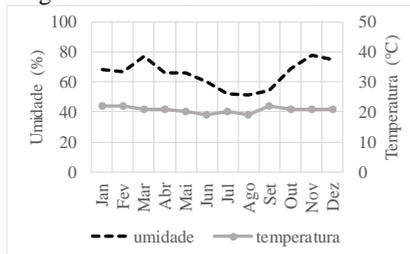
Fonte: Elaborado no software Climate Consultant 5.5 (UCLA, 2015) e por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

A temperatura média anual na cidade é 20,7°C, com máxima média mensal de 22°C nos meses de janeiro, fevereiro e setembro e mínima média mensal de 19°C em junho e agosto. É possível observar baixa amplitude mensal de 3°C. Com umidade relativa anual de 62,2%,

apresenta mínima de 51% em agosto e máxima de 78% em novembro (Figura 39).

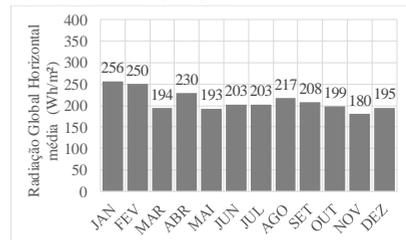
A incidência média de radiação solar apresenta pouca variação ao longo do ano, com máximas de 256Wh/m<sup>2</sup> e 250Wh/m<sup>2</sup>, nos meses de janeiro e fevereiro, e média mensal mínima de 194 Wh/m<sup>2</sup> em março (Figura 40).

Figura 39- Médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar ao longo do ano em Brasília/DF.



Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

Figura 40- Médias mensais de Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Brasília/DF.

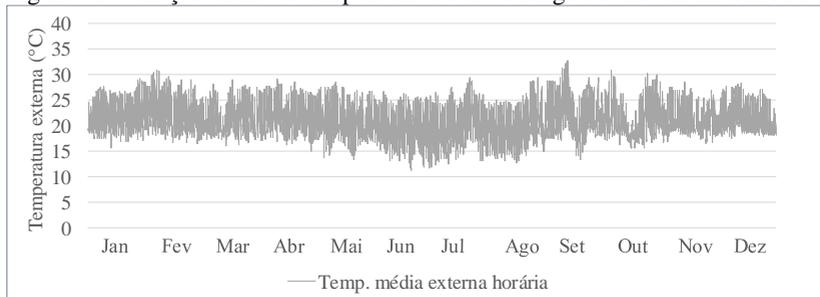


Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

Em Brasília, a amplitude média diária ao longo do ano é de 9,29°C. Sendo a máxima amplitude média diária observada em setembro, 14,2°C e a mínima em maio, 2°C (Figura 41).

Em relação aos ventos, Brasília apresenta predominância de incidências das direções Leste e Sudeste, com velocidades médias de 3m/s e 2m/s, respectivamente.

Figura 41-Variação diária de temperatura do ar ao longo do ano em Brasília/DF.

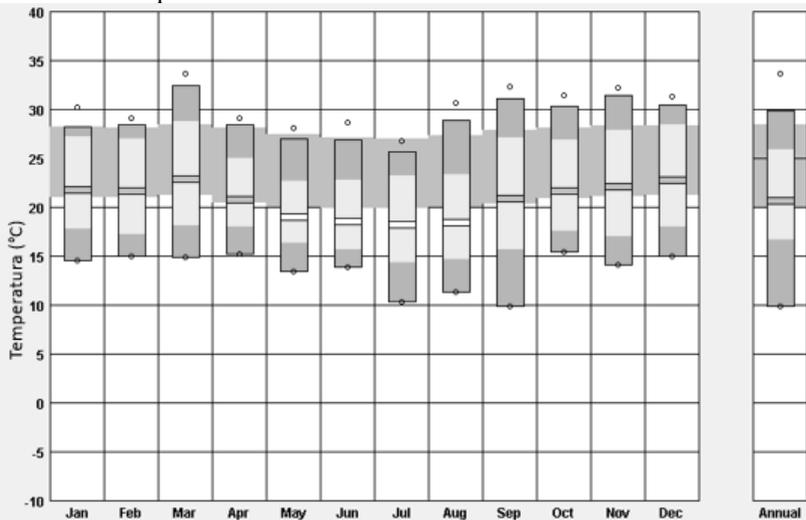


Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

### 3.1.5 Vitória da Conquista – BA

Localizada no estado da Bahia, Vitória da Conquista possui latitude  $-14^{\circ} 51' 58''$  e longitude  $-40^{\circ} 50' 22''$ . A cidade apresenta 67% de horas em desconforto ao longo do ano (Figura 42) e de acordo com o ZBB, está inserida na ZB5, para a qual a NBR 15220 (ABNT, 2005) indica aberturas para ventilação com dimensões médias e sombreadas, paredes leves refletoras e coberturas leves isoladas. No verão recomenda-se o uso da ventilação cruzada e no inverno, uso de vedações internas pesadas.

Figura 42- Temperaturas médias, médias das máximas e médias das mínimas, máximas e mínimas mensais, máximas e mínimas registradas e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade, na cidade de Vitória da Conquista/BA.

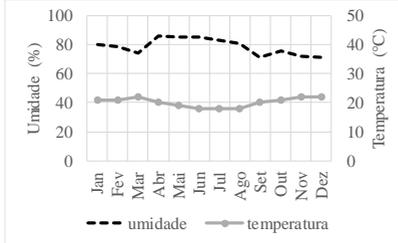


Fonte: Elaborado no software Climate Consultant 5.5 (UCLA, 2015) e por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Com temperatura média anual de  $20,2^{\circ}\text{C}$ , Vitória da Conquista apresenta temperatura média máxima de  $22^{\circ}\text{C}$  em novembro, dezembro e março; e média mínima de  $18^{\circ}\text{C}$  entre os meses de junho a agosto. Observa-se baixa amplitude térmica anual de  $4^{\circ}\text{C}$ . Nos períodos mais quentes, a taxa de radiação média mensal atinge  $312\text{Wh}/\text{m}^2$ , em novembro. Já no período frio, atingi mínima de  $182\text{Wh}/\text{m}^2$ , em junho (Figura 43 eixo 2 e Figura 44).

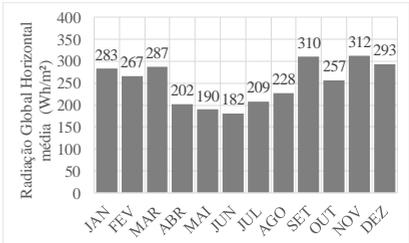
Em relação a umidade relativa do ar, a média anual é de 78%, com mínima média de 71% em dezembro e máxima média de 86% em abril (Figura 43 eixo 1).

Figura 43- Médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar ao longo do ano em Vitória da Conquista/ BA.



Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

Figura 44- Médias mensais de Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Vitória da Conquista/ BA.

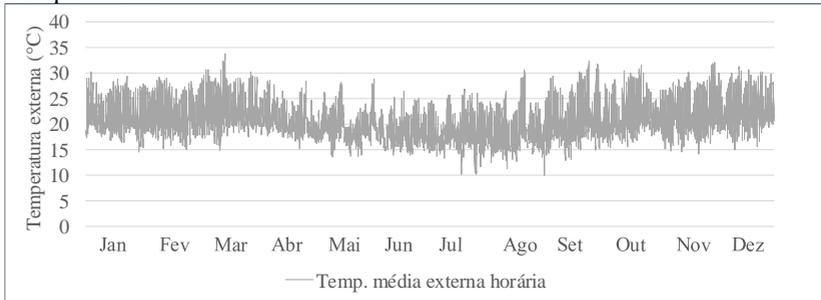


Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

Analisando a variação de temperaturas ao longo dos dias, na Figura 45, é possível observar amplitude média diária de 9,15°C. Com amplitude máxima média de 15,8°C no mês de setembro e mínima média de 2,5°C no mês de junho.

Os ventos predominantes na cidade são provenientes da direção Sudeste, seguido do Leste e Nordeste, com velocidades médias de 4m/s em todas as direções.

Figura 45- Variação diária de temperatura do ar ao longo do ano em Vitória da Conquista/ BA.

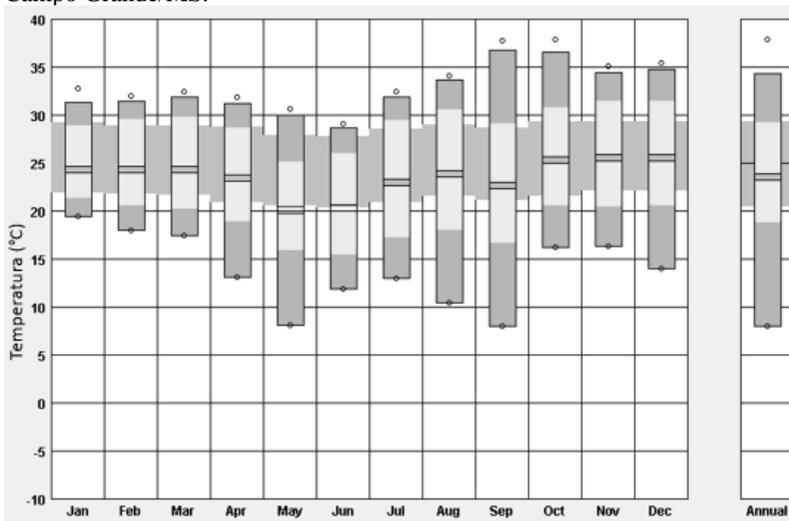


Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

### 3.1.6 Campo Grande – MS

Campo Grande é a capital do Mato Grosso do Sul, está localizada na latitude  $-20^{\circ} 26' 34''$  e longitude  $-54^{\circ} 38' 47''$ . Apresenta 56% das horas do ano em desconforto (Figura 46) e de acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005) está inserida na ZB6, para a qual são indicadas aberturas para ventilação com dimensões médias e sombreadas, paredes pesadas e coberturas leves e isoladas. Durante o verão estratégias como: resfriamento evaporativo, massa térmica para resfriamento e ventilação seletiva são indicadas. Já no inverno, recomenda-se o aquecimento solar da edificação e uso de vedações internas pesadas.

Figura 46- Temperaturas médias, médias das máximas e médias das mínimas, máximas e mínimas mensais, máximas e mínimas registradas e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade, na cidade de Campo Grande/MS.



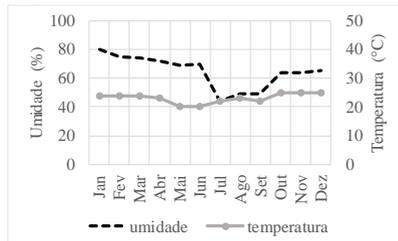
Fonte: Elaborado no software Climate Consultant 5.5 (UCLA, 2015) e por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Campo Grande apresenta temperatura média anual de  $23^{\circ}\text{C}$ , com média máxima mensal de  $25^{\circ}\text{C}$  em de outubro a dezembro, e média mínima mensal de  $20^{\circ}\text{C}$  nos meses de maio e junho. A Figura 47 (eixo 2) demonstra as médias mensais de temperatura ao longo do ano, indicando uma amplitude térmica anual de  $5^{\circ}\text{C}$ . Nos meses mais

quentes, a radiação média mensal atinge os 253Wh/m<sup>2</sup> e nos mais frios 151Wh/m<sup>2</sup> (Figura 48).

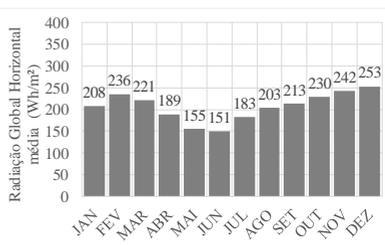
Já a umidade relativa média anual é de 64%, com mínima média de 44% em julho e máxima média de 80% em janeiro (Figura 47 - eixo 1).

Figura 47- Médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar ao longo do ano em Campo Grande/ MS.



Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

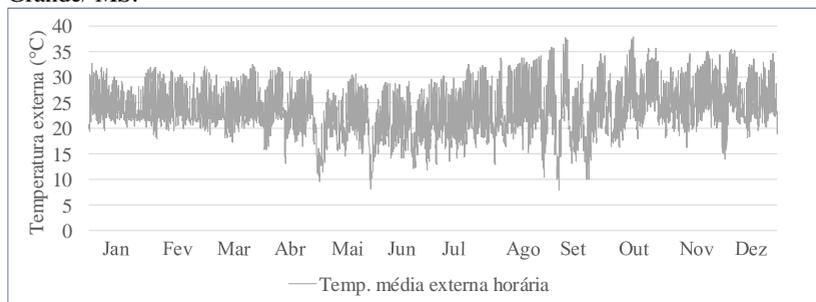
Figura 48- Médias mensais de Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Campo Grande/ MS.



Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

As amplitudes diárias apresentam em média 10,48°C, com média diária máxima de 17,8°C em agosto e mínima de 2,2°C em janeiro (Figura 49).

Figura 49-Variação diária de temperatura do ar ao longo do ano em Campo Grande/ MS.



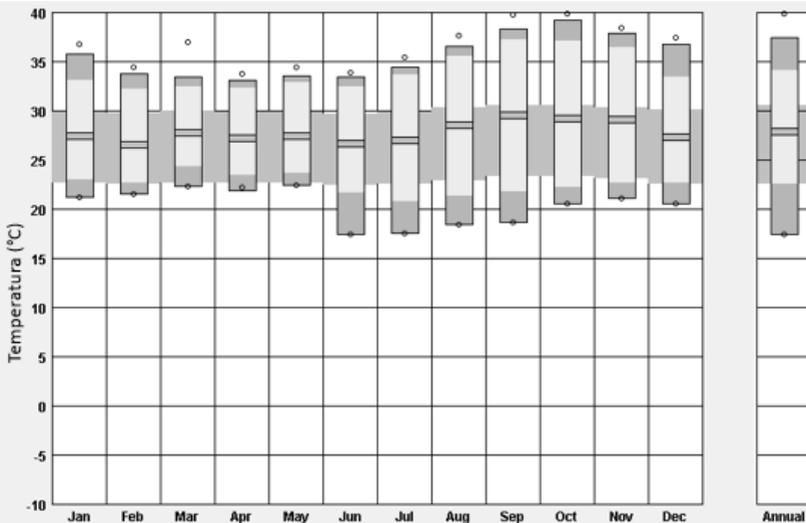
Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

Em Campo Grande, a ventilação predominante é Nordeste, com velocidade de 5m/s, em média. Também se observam ocorrências dos ventos Leste, nos períodos com temperaturas inferiores a 22°C; e ocorrência dos ventos Norte e Noroeste, nos períodos mais quentes, quando as temperaturas se encontram entre 24°C e 38°C, devendo, portanto, serem evitados.

### 3.1.7 Teresina- PI

Teresina é a capital do estado do Piauí, localiza-se na latitude  $-05^{\circ} 05' 21''$  e longitude  $-42^{\circ} 48' 07''$ . Com 45% das horas do ano em desconforto, em sua maioria por calor (Figura 50), a cidade está inserida na ZB7, para a qual NBR 15220 (ABNT, 2005) recomenda o uso de aberturas com dimensões pequenas para ventilação e sombreadas, paredes e coberturas pesadas. Resfriamento evaporativo, massa térmica para resfriamento e ventilação seletiva são estratégias de condicionamento passivas indicadas durante o verão.

Figura 50- Temperaturas médias, médias das máximas e médias das mínimas, máximas e mínimas mensais, máximas e mínimas registradas e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade, na cidade de Teresina/PI.

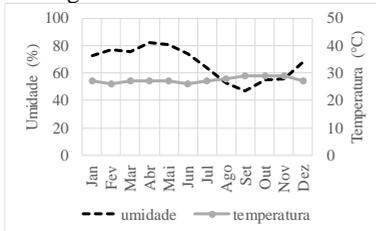


Fonte: Elaborado no software Climate Consultant 5.5 (UCLA, 2015) e por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Teresina apresenta temperatura média anual de  $27,4^{\circ}\text{C}$ , com média máxima mensal de  $29^{\circ}\text{C}$  de setembro a novembro, e média mínima mensal de  $26^{\circ}\text{C}$  nos meses de junho e fevereiro. A Figura 51 (eixo 2) demonstra as médias mensais de temperatura ao longo do ano, indicando uma amplitude térmica anual de  $3^{\circ}\text{C}$ . A radiação média mensal atinge os  $281\text{Wh/m}^2$  em setembro e a mínima  $202\text{Wh/m}^2$  em janeiro (Figura 52 e Figura 48).

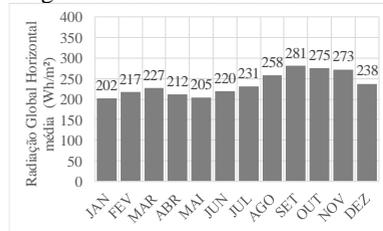
Já a umidade relativa média anual é de 64%, com mínima média de 44% em julho e máxima média de 80% em janeiro (Figura 51 e Figura 47 - eixo 1).

Figura 51- Médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar ao longo do ano em Teresina/PI.



Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

Figura 52- Médias mensais de Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Teresina/PI.

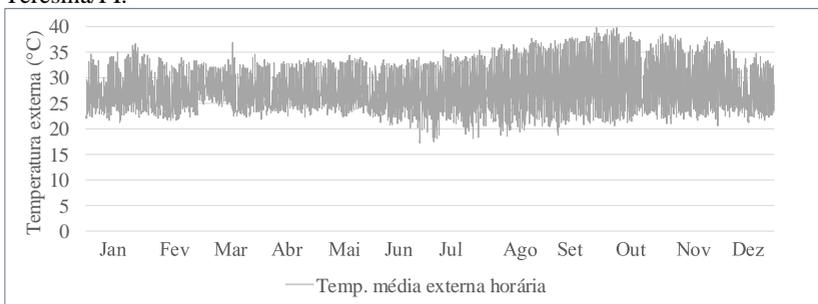


Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

Observam-se altas amplitudes diárias de em média 11,54°C. Com média diária máxima de 18,2°C em outubro e mínima de 4,4°C, em abril.

A ventilação predominante é a Sudoeste, com velocidades de 2m/s, em média. É importante ressaltar que nos períodos de ocorrência da ventilação, as temperaturas registram entre 24°C e 38°C, podendo gerar desconforto térmico aos ambientes.

Figura 53- Variação diária de temperatura do ar ao longo do ano em Teresina/PI.

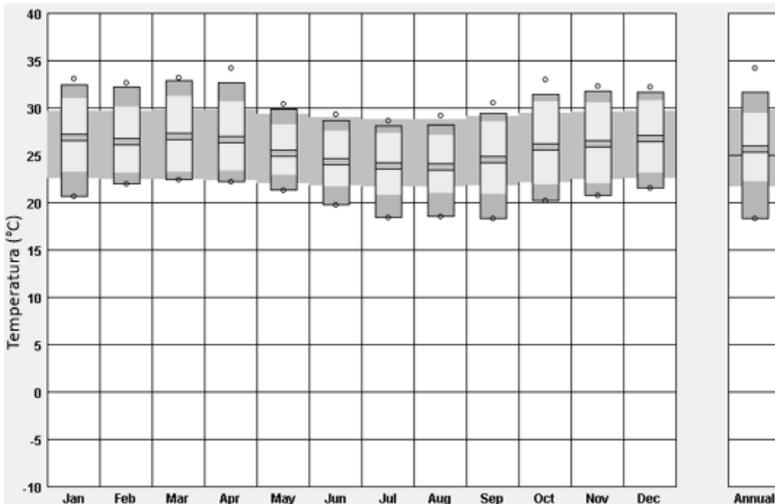


Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

### 3.1.8 Maceió – AL

Maceió é a capital do estado de Alagoas, está localizada sob a latitude  $-09^{\circ} 39' 57''$  e longitude  $-35^{\circ} 44' 07''$ . Apresenta 24% de desconforto ao longo do ano, não sendo registrado desconforto por frio considerável e está inserida na ZB8, para a qual NBR 15220 (ABNT, 2005) recomenda a ventilação cruzada permanente, uso de aberturas grandes e sombreadas, paredes e coberturas leves refletoras.

Figura 54- Temperaturas médias, médias das máximas e médias das mínimas, máximas e mínimas mensais, máximas e mínimas registradas e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade, na cidade de Maceió/AL.



Fonte: Elaborado no software Climate Consultant 5.5 (UCLA, 2015) e por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

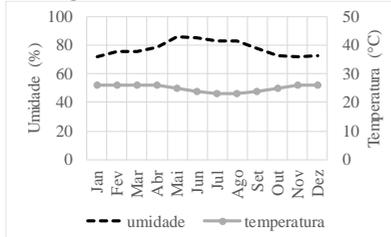
De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima de Alagoas é caracterizado como tropical quente e úmido do tipo  $As^s$ , com verão mais seco e chuvas concentradas no outono e inverno.

A cidade de Maceió apresenta temperatura média anual de  $25,5^{\circ}\text{C}$ , variando ao longo do ano com média máxima de  $26^{\circ}\text{C}$  de novembro a abril, e média mínima de  $23^{\circ}\text{C}$  nos meses de julho a agosto. A umidade relativa média anual é de 78%, com máxima no mês de maio (86%) e a mínima de 72 % nos meses de janeiro e novembro. Passos

(2009) destaca que em Maceió, devido as altas umidades relativas do ar, o uso da ventilação natural tem papel importante para amenizar a sensação de desconforto através da evaporação do suor (Figura 55).

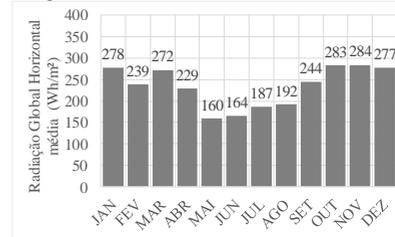
Em razão da sua proximidade com a linha do Equador, Maceió recebe radiação solar intensa na maior parte do ano, reforçando a necessidade de sombreamento nas edificações. Observa-se que a variação de incidência de radiação solar é proporcional às temperaturas, com valores médios mensais máximos de 283 Wh/m<sup>2</sup> e 284 Wh/m<sup>2</sup> nos meses de outubro e novembro. A média mensal mínima é registrada no mês de maio (160Wh/m<sup>2</sup>) (Figura 56).

Figura 55- Médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar ao longo do ano em Maceió/AL.



Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

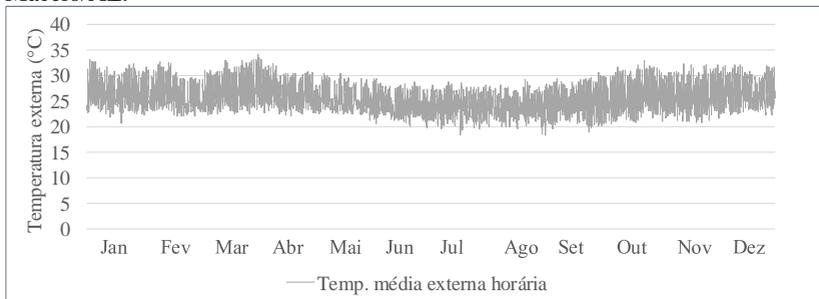
Figura 56- Médias mensais de Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Maceió/AL.



Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

Observa-se baixa amplitude térmica e baixa variação de umidade relativa do ar ao longo do ano. Analisando dados diários, observam-se amplitudes térmicas médias de 7,22°C, com máxima média de 11,3°C em novembro e 1,8°C em maio (Figura 57).

Figura 57- Variação diária de temperatura do ar ao longo do ano em Maceió/AL.



Fonte: Arquivo climático EPW (INMET, 2016).

Dados climáticos relativos à ventilação demonstram as maiores frequências de ocorrência provenientes do quadrante leste, com velocidades que atingem os 4m/s. As direções com maiores ocorrências são a leste, ocorrendo durante 15% do ano, seguida da orientação sudeste e da nordeste. Entre os meses de maio e agosto a direção predominante dos ventos é a sudeste. Nos demais meses, a direção predominante é a leste, com exceção do mês de outubro que apresenta maior incidência da ventilação nordeste.

### 3.2 A EDIFICAÇÃO DE ANÁLISE

Nessa etapa feita uma caracterização física do projeto tipo B do programa Proinfância. Para tal foi escolhido um projeto de Centro Municipal de Educação Infantil - CMEI representativo, localizada em Maceió-AL. Esse projeto foi escolhido levando em consideração a possibilidade de acesso, por parte da pesquisadora, ao interior da edificação. Tal acesso foi necessário para a etapa de monitoramento das salas de aula objetivando a calibração do modelo computacional utilizado na presente pesquisa.

#### 3.2.1 O CMEI Rodrigues Alves

A edificação escolhida para análise consiste em um CMEI do tipo B do programa Proinfância localizada na cidade de Maceió-AL, no bairro Benedito Bentes. O CMEI Rodrigues Alves está inserido em uma área predominantemente residencial. Trata-se de uma edificação térrea que segue os padrões construtivos determinados pelo FNDE (Figura 58 Figura 59).

Figura 58- CMEI Rodrigues Alves, localizada em Maceió-AL.



Fonte: Autora (2018).

Figura 59- Localização do CMEI de análise.



Fonte: Google Maps, adaptado pela autora (2017).

A edificação é cercada por um muro de 2,3 metros de altura e seu entorno é composto por espaços amplos e edificações de no máximo dois pavimentos. Do lado direito, o CMEI limita-se com a Estrada Duas Bocas, e do lado esquerdo com a rua A Vinte e Um, no recuo esquerdo observa-se a existência de árvores de médio porte. Aos fundos, o terreno limita-se com um terreno vazio e à frente com o batalhão da polícia militar de Alagoas, que também é uma edificação térrea. O acesso ao CMEI se dá por uma via secundária com baixo fluxo de veículos.

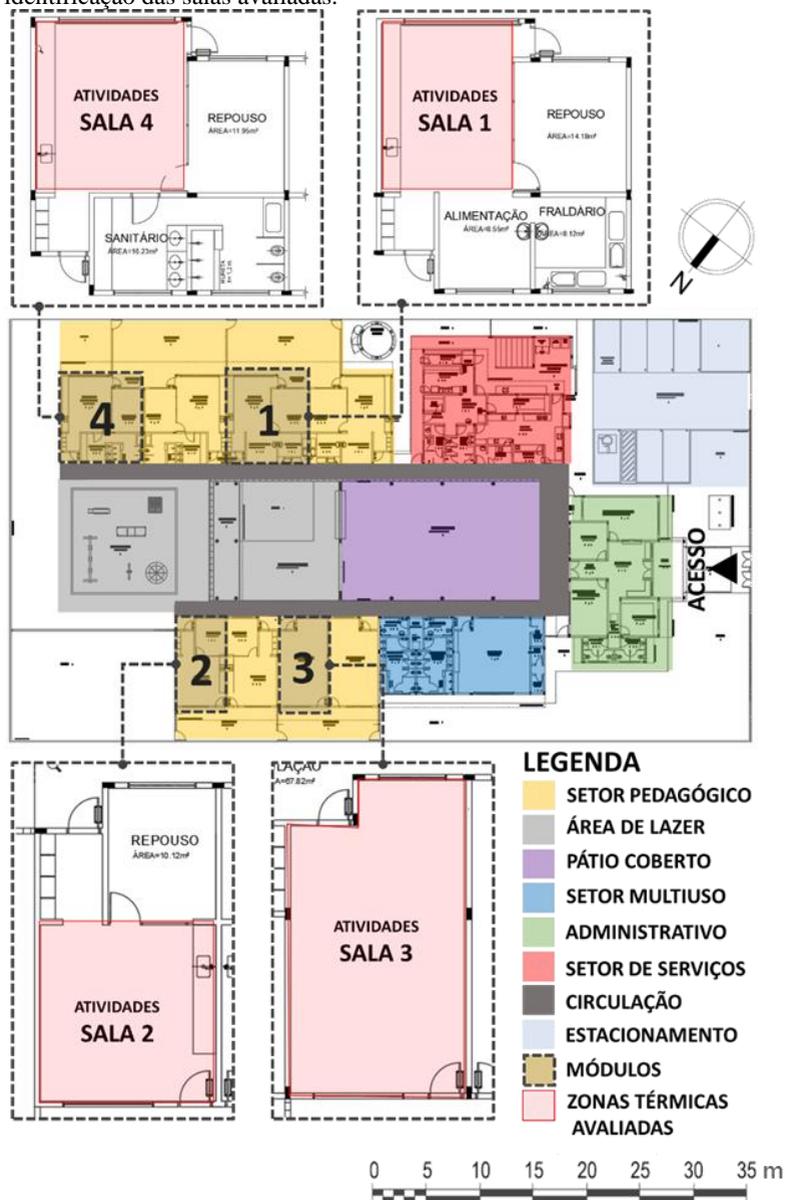
Com capacidade de atendimento de até 224 crianças em dois turnos, o projeto tipo B requer um terreno de 40m x 70m e declividade máxima de 3% para sua implantação.

A setorização é definida de acordo com os conjuntos funcionais, sendo composta por cinco blocos distintos: administrativo, serviços,

multiuso e dois blocos pedagógicos, todos interligados por uma circulação e um pátio coberto (Figura 60). No APÊNDICE A é possível observar fotos da área externa da edificação, onde encontram-se o playground, um anfiteatro, o castelo d'água e o estacionamento. A planta baixa, cortes e fachadas da edificação podem ser visualizados no ANEXO 1, ANEXO 2 e ANEXO 3.

Por ser o setor com maior densidade e período de ocupação, o bloco pedagógico foi escolhido para a análise neste estudo. Conforme a Figura 60, o setor pedagógico é composto por quatro tipos de módulos, que são espelhados, resultando em oito módulos. Esses são subdivididos de acordo com a faixa etária das crianças, onde os módulos 1 e 4 são destinadas a crianças de 0 a 3 anos e os módulos 2 e 3 destinados a crianças de 3 a 5 anos e 11 meses. Os módulos 1 e 4 são subdivididos em ambientes de fraldário (módulo 1), sanitário (módulo 4), atividades, repouso, alimentação e solário. O módulo 2 é dividido em ambiente de atividades, repouso e solário. Já o módulo 3 é composto apenas pelo ambiente de atividades. Para a presente pesquisa foram selecionados quatro módulos, representativos de cada tipologia, onde o ambiente avaliado foi a zona de atividades, que é ocupada pelas crianças por maior período, conforme indicado com delimitação em vermelho na Figura 60.

Figura 60- Setorização do projeto padrão do programa Proinfância com identificação das salas avaliadas.



Fonte: FNDE, adaptado pela autora (2019).

O sistema construtivo adotado no projeto é composto por estrutura de concreto armado, alvenaria de tijolo de 6 furos, alvenaria de elementos vazados, laje pré-moldada e telhas de cerâmica do tipo colonial.

As esquadrias são de alumínio, com folhas em vidro de 3mm. As portas externas são de madeira, com seteira em vidro para permitir a visualização entre interior e exterior das salas. As portas internas são de madeira. O detalhamento das esquadrias pode ser observado no APÊNDICE B.

Quanto aos acabamentos e revestimentos, as paredes externas possuem pintura acrílica na cor branco gelo e um barrado cerâmico na cor azul com 0,50 m de altura em relação ao piso; os muros e cobogós são amarelos. O piso é revestido com granitina na cor cinza claro. Toda a escola possui laje em concreto armado, com reboco liso na cor branco neve e a cobertura é composta por telha cerâmica natural (Figura 61).

Figura 61- Revestimentos externos da edificação.



Fonte: Autora (2018).

### 3.3 MONITORAMENTO DA EDIFICAÇÃO

O monitoramento é a etapa inicial para coleta de dados in loco. Nessa etapa, dados de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar foram coletados para serem confrontados com dados de simulação na etapa da calibração do modelo computacional. Equipamentos e procedimentos realizados durante o monitoramento são descritos nos itens a seguir.

#### 3.3.1 Equipamentos utilizados

No monitoramento das variáveis internas foram utilizados equipamentos armazenadores de dados (*data loggers*) da marca Onset Corporation, modelo HOBO U12 (Figura 62), cujas especificações podem ser observadas na Figura 63. Eles registram e armazenam dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar em ambientes, mediante prévia configuração. Os equipamentos foram previamente aferidos conforme descrito no item 3.3.1.1. Os dados armazenados nos HOBOS foram transferidos para o computador com o auxílio do programa HOBOWare (Software for HOBO U-Series Data Loggers & Devices), versão 2, para Windows, que transfere, lê os dados e plota gráficos com os valores medidos. Destaca-se que os dados obtidos no monitoramento foram transformados em médias horárias, viabilizando assim as comparações a serem feitas posteriormente na etapa da calibração.

Figura 62- Data Logger- HOBO



Fonte: A autora (2018)

Figura 63- Especificações técnicas do equipamento HOBO.

Resolução	Temperatura: 0,03°C (a 25°C) Umidade relativa: 0,03%
Temperatura de operação	De -20°C a 70°C
Faixa de medição	Temperatura: de -20°C a 70°C Umidade: 5% a 95%
Precisão	Temperatura: $\pm 0,35^\circ\text{C}$ , para temperatura de 0°C a 50 °C Umidade relativa: $\pm 2,5\%$ , para umidade de 10% a 90%

Fonte: Onset Computer Corporation (2004).

Os dados relativos às variáveis externas, foram coletados na plataforma digital do INMET (2018) e foram registrados pela estação meteorológica automática localizada no campus da Universidade Federal de Alagoas UFAL, estação mais próxima da edificação de análise. Ela foi aberta em 2003 e localiza-se a uma altitude de 84 metros, latitude de  $-9.55^\circ$  e longitude de  $-35.77^\circ$ . Nela são registrados dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, temperatura de orvalho, precipitação, pressão atmosférica e radiação solar global. A localização da estação pode ser observada no APÊNDICE C.

### 3.3.1.1 Aferição dos equipamentos

Para verificar a precisão dos Hobos foram utilizados dois sensores: um de temperatura do tipo termoresistor, com faixa de medição de 0 a 90 °C, resolução de 0,1 °C, incerteza de 0,2 °C e com intervalo de confiança de 95% e outro de umidade relativa do tipo capacitivo, Marca Honeywell, faixa de medição de 5 a 98 % e incerteza de 3 %.

Os hobos foram dispostos dentro de uma caixa de papelão, material escolhido por permitir trocas térmicas entre o interior e o exterior da caixa. Também foi inserido na caixa um ventilador para promover a circulação do ar durante o monitoramento. Os equipamentos foram programados para efetuar registros de 5 em 5 minutos, durante 2,5 horas. Vale ressaltar que os primeiros 30 minutos de monitoramento foram descartados, por se tratar do período de estabilização dos equipamentos (Figura 64).

Figura 64- Calibração dos hobos



Fonte: Autora (2018).

Com o auxílio de planilhas eletrônicas, os dados de temperatura e umidade coletados foram utilizados para calcular o desvio padrão de cada equipamento (Tabela 2). Com o resultado, constatou-se que os desvios são equivalentes a precisão dos equipamentos descrita no item 2.2.5, por isso são considerados aceitáveis.

Tabela 2- Desvio padrão calculado para cada HOBO.

	Te (°C)			UR (%)		
		Méd	Máx	Min	Méd	Máx
<i>SENSORES DE REFERÊNCIA</i>	0.08	0.07	0.07	3.63	2.98	2.76
<i>HOBO 1</i>	0.03	0.03	0.04	6.12	6.29	6.37
<i>HOBO 2</i>	0.02	0.02	0.02	0.26	0.26	0.30
<i>HOBO 3</i>	0.01	0.01	0.01	0.77	0.66	0.64
<i>HOBO 4</i>	0.02	0.03	0.03	0.03	0.06	0.09
<i>HOBO 5</i>	0.03	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01
<i>HOBO 6</i>	0.00	0.00	0.00	0.76	0.80	0.78
<i>HOBO 7</i>	0.00	0.00	0.00	0.33	0.31	0.28
<i>HOBO 8</i>	0.01	0.01	0.01	0.59	0.63	0.65
<i>HOBO 9</i>	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00
<i>HOBO 10</i>	0.00	0.00	0.00	0.31	0.32	0.32
<i>HOBO 11</i>	0.03	0.03	0.03	0.07	0.10	0.14
<i>MÉDIA</i>	0.02	0.02	0.02	1.08	1.04	1.03
<i>DESVIO PADRÃO</i>	<b>0.14</b>	<b>0.14</b>	<b>0.15</b>	<b>1.04</b>	<b>1.02</b>	<b>1.01</b>

### 3.3.1.2 Instalação dos equipamentos

No dia 22/12/2017 às 16:30h os hobos foram instalados nos ambientes em estudo, tendo sido configurados previamente para monitorar temperatura do ar e umidade relativa em intervalos de 5 em 5 minutos. Os hobos internos foram posicionados no centro dos ambientes sobre uma mesa com 70 cm de altura (altura do usuário: crianças). Já os

externos, foram fixados em colunas no pátio a 1,2m de altura em relação ao piso (Figura 65). A localização dos hobos em todas as salas pode ser vista no APÊNDICE D.

Figura 65- Localização dos HOBOS internos e externos.



Fonte: Autora (2017).

### 3.3.2 Períodos de monitoramento

Os períodos de monitoramento foram estipulados de acordo com a disponibilidade dos funcionários da creche. Por se tratar de um espaço escolar, houve a necessidade de realizar o monitoramento no período em que não houvesse atividades letivas nas salas de aula. Por isso foram realizadas duas medições: uma em Dezembro de 2017 (24/12/2017 à 30/12/2017), com ventilação natural das 8:30h às 11:30h e outra em Fevereiro de 2018, com esquadrias fechadas sempre (09/02/2018 à 16/02/2018). Vale ressaltar a importância de obter a menor variação no padrão de uso durante o monitoramento, dando preferência ao monitoramento sem ocupação nos ambientes, pois facilitaria a calibração no sentido de que haveria menos variáveis a serem trabalhadas, como por exemplo a abertura de esquadrias e o acionamento de equipamentos por parte dos ocupantes.

### 3.4 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

As simulações computacionais são citadas por diversas pesquisas como uma ferramenta eficaz para avaliação de desempenho térmico, pois possibilitam análises prévias de variações projetuais antes mesmo de serem efetuadas, conforme visto na revisão bibliográfica.

Nesta pesquisa, utilizou-se o programa EnergyPlus (versão 8.8.0), por ser um programa validado de código aberto, amplamente utilizado devido a confiabilidade do seu algoritmo no que diz respeito ao comportamento térmico de edificações.

O arquivo climático de Maceió, no formato EPW (LABEEE, 2017) foi utilizado nas simulações, entretanto, na etapa de calibração do modelo computacional, foi utilizado um arquivo EPW editado com dados dos dois períodos de monitoramento da edificação.

### **3.4.1 Calibração do Modelo para Simulação**

Com o objetivo de verificar a qualidade dos dados obtidos por simulação, no que diz respeito a resultados condizentes com a realidade, foi modelada uma edificação semelhante à monitorada e os resultados simulados foram comparados com os monitorados. Assim, foram feitas modificações no modelo com o objetivo de reduzir os desvios entre os dados de simulação e medição.

Considerando que o ambiente real é ventilado naturalmente, a calibração foi dividida em duas etapas. A primeira foi realizada para o ambiente fechado, considerando apenas as infiltrações por frestas. E a segunda, com o ambiente naturalmente ventilado em períodos do dia. Vale ressaltar que o modelo calibrado com infiltração foi utilizado como base para a calibração com ventilação natural.

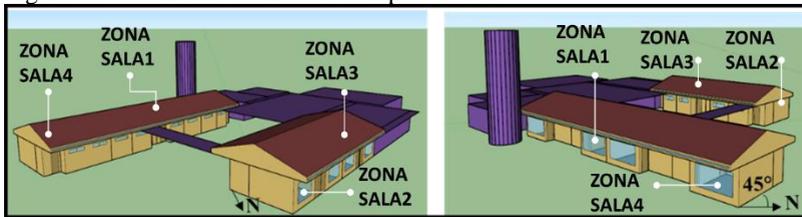
A geometria do modelo foi confeccionada no programa Sketchup, com o auxílio do plugin Euclid (versão 9.3) e as simulações computacionais foram efetuadas com o programa EnergyPlus v.8.8 (DOE, 2017).

Foi utilizado um arquivo climático EPW da cidade de Maceió com dados dos períodos de monitoramento, coletados na plataforma digital do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. O processo de confecção do arquivo climático utilizado na calibração pode ser observado no APÊNDICE E.

#### **3.4.1.1 Caracterização do modelo base**

O modelo base é composto por vinte e cinco zonas térmicas, representativas de cada ambiente do setor pedagógico. Oito dessas zonas representam as salas de aula, que foram escolhidas para análise por se tratarem dos ambientes onde as crianças passam a maior parte do dia. Das oito zonas, quatro foram escolhidas para análise, conforme indicadas na Figura 60. Os demais setores do CMEI foram modelados como objetos de sombreamento, como pode ser visto na cor lilás na Figura 66.

Figura 66- Geometria do modelo computacional.



Fonte: Autora (2018).

O **entorno** da edificação foi definido como terreno de subúrbio, caracterizado pela presença de árvores e espaçamento entre obstruções do tamanho ou maiores do que casas unifamiliares.

As **propriedades térmicas** dos componentes construtivos que compõem a edificação podem ser observadas no APÊNDICE FAPÊNDICE F – (a). Os valores foram obtidos em Weber et al (2017). Utilizou-se absorvância de 0,2 nas paredes externas, conforme indicado na NBR 15220 (ABNT, 2005) para pinturas claras.

As **aberturas** (portas e janelas) foram modeladas e dimensionadas de acordo com o projeto padrão do FNDE, sendo ajustadas conforme a situação real observada in loco na edificação de análise.

Em climas quentes, a **cobertura** das edificações é responsável por grande parte do ganho de calor nos ambientes internos. Desse modo, o ático da cobertura foi modelado como uma zona térmica, sem ocupação e sem cargas internas, sendo ventilado pelas frestas do telhado, tal como indicado por Lamberts (1988). Para isso, a infiltração que as telhas proporcionam nos áticos foi modelada como uma pequena abertura no ático.

Outro aspecto importante é a modelagem das **trocas de calor entre a edificação e o solo**, principalmente em edificações térreas. Para isso, foram avaliadas duas formas de modelagem do solo: com o objeto *Site: Ground Domain* e com o pré-processador Slab. O primeiro faz parte da classe de objetos *Site: Ground Temperature* e utiliza um modelo de diferenças finitas implícito para gerar as temperaturas do solo (EERE, 2016). Os dados de entrada foram baseados no trabalho de Mazzaferro; Melo; Lamberts (2016) e adotou-se o modelo *FiniteDifference*, que usa como base o arquivo climático para obter as condições de contorno da superfície. Já o slab se baseia em um método de cálculo onde o fator de escala para o fluxo de calor médio para pavimentos retangulares e em forma de L é o quociente entre a área e o

perímetro do piso. O método numérico utilizado é baseado em uma operação de diferenças finitas tridimensional, fornecendo uma solução com grande flexibilidade e bem detalhada (BAHNFLETH, 1989; CLEMENTS, 2004 apud COSTA, 2017).

Em relação ao cálculo da **convecção** nos ambientes internos, o EnergyPlus permite a utilização de cinco algoritmos diferentes: *Adaptive*, *TARP*, *Simple Natural*, *Ceiling Diffuser* e *Trombe Wall*. O *Adaptive* seleciona dentre as equações disponíveis, o coeficiente de convecção mais adequado para representar as trocas convectivas em uma determinada superfície, em um dado momento. O algoritmo *TARP* correlaciona o coeficiente de convecção com a orientação da superfície e com o gradiente de temperatura entre essa e o ar da zona. O algoritmo *Simple Natural* utiliza valores fixos para determinação dos coeficientes de convecção, de acordo com a orientação da superfície. Já o *Ceiling Diffuser* é indicado para ambientes que possuam sistema de condicionamento artificial instalado e o *Trombe Wall* é aplicável à para paredes do tipo trombe (ENERGYPLUS, 2018). Dessa forma, apenas os algoritmos *Adaptive*, *TARP* e o *Simple Natural* são aplicáveis à edificação de análise. Foi adotado no modelo BASE, o algoritmo *TARP*, que calcula o coeficiente de convecção em função do diferencial de temperatura entre a superfície e o ar.

Quanto ao cálculo de **condução**, foi aplicado o algoritmo *Conduction Transfer Function – CTF*, que utiliza equações matriciais para determinar as variáveis de interesse em função dos dados de entrada (temperaturas internas e externas) e de coeficientes constantes para temperaturas e fluxos de calor (SEEM, 1987 apud BATISTA, 2011).

Embora a primeira etapa da calibração tenha sido feita com portas e janelas fechadas, a ventilação natural foi configurada desde a etapa inicial por meio do objeto *AirflowNetwork*, que de acordo com Gu (2007) permite simular fluxos de ar pela ação dos ventos em múltiplas zonas através de um modelo de rede, onde “nós” são vinculados por percursos de fluxo de ar que atuam pela diferença de pressão. Através do objeto *MultiZone: Component: DetailedOpening* é possível especificar as características e propriedades do fluxo de ar para cada abertura. Adotou-se o coeficiente de descarga padrão do EnergyPlus (0,6).

Quanto a **infiltração** de ar através das janelas, utilizam-se as variáveis: coeficiente do fluxo de massa de ar por frestas (k) e expoente de fluxo de massa para aberturas fechadas (n) para detalhar as aberturas quando fechadas. No modelo BASE adotou-se os valores padrões

fornecidos pelo programa:  $k= 0,001\text{kg/s.m}$  e  $n=0,65$ , conforme indicado em Pereira et al. (2013).

Para o cálculo dos coeficientes de pressão ( $C_p$ ) do vento nas superfícies, foi aplicada a equação de Swami e Chandra (1988), utilizada pelo EnergyPlus para edifícios cuja altura é menor que três vezes o menor lado de sua base. Vale ressaltar que esse método é simplificado e apresenta algumas limitações como: aplicabilidade restrita a edificações retangulares, não considera os diferentes padrões de rugosidade do entorno e calcula os  $C_p$  médios das superfícies.

Considerando que os dados de velocidade do vento utilizados em simulações computacionais são provenientes de estações meteorológicas posicionadas a 10 metros de altura, faz-se necessária a correção da velocidade do vento em relação a **rugosidade do entorno** da edificação avaliada. Nesse sentido, o EnergyPlus faz um cálculo simplificado para obtenção da velocidade média do vento sobre uma edificação através da (Equação 4). Para o modelo BASE, utilizou-se o expoente ( $\alpha$ ) de 0,22 e a camada limite ( $\delta$ ) de 370 m, que representam um terreno urbano de subúrbio com presença de árvores e áreas com espaçamento entre obstruções do tamanho ou maiores do que casas unifamiliares.

$$V_{ref} = V_{met} \left( \frac{\delta_{met}}{h_{met}} \right)^{\alpha_{met}} \cdot \left( \frac{h_{ref}}{\delta_{ref}} \right)^{\alpha_{ref}}$$

Equação 4

Onde:

$V_{ref}$  é a velocidade do vento na altura desejada (m/s);

$V_{met}$  é a velocidade do vento obtida a partir do arquivo climático (m/s);

$\delta_{met}$  é a camada limite do local de instalação da estação meteorológica (m);

$\delta_{ref}$  a camada limite do terreno considerada na simulação(m).

$h_{met}$  altura do sensor de velocidade do vento na estação meteorológica

$h_{ref}$  altura acima do solo.

Salienta-se que o modelo BASE não apresenta ocupação nem cargas internas, pois durante o monitoramento as luzes foram mantidas apagadas e não havia nenhum equipamento nas salas. As simulações para calibração foram feitas seguindo o período de monitoramento, conforme descrito no item 3.3.2, sendo a primeira etapa com infiltração nas salas e a segunda etapa com portas e janelas abertas.

### 3.4.1.2 Ajustes no modelo base

Após o desenvolvimento da revisão bibliográfica foi possível identificar os dados de entrada de simulações computacionais que mais influenciavam no desempenho térmico de edificações térreas. Assim, o modelo com infiltração, sofreu ajustes nos seguintes parâmetros: modelagem das trocas de calor entre o solo e a edificação, algoritmos de convecção, infiltração por aberturas e absorvância das superfícies externas. Para a calibração do modelo ventilado, o modelo calibrado com infiltração foi utilizado como base, desta vez com abertura das esquadrias das 08h30 às 11h30 da manhã. Nesse modelo foram alterados os parâmetros: coeficientes de descarga das aberturas e coeficiente de rugosidade do entorno. As alterações são descritas nos tópicos a seguir:

#### a) Modelo com infiltração

•**Trocas de calor entre a edificação e o solo:** O estudo elaborado por Costa (2017) constatou que o uso do pré-processador Slab gera valores de temperatura da interface piso e solo muito próximos da realidade e que o uso de outras alternativas de modelagem gera diferenças significativas de até -55,2% nos graus-hora totais de uma edificação.

•**Algoritmos de convecção:** Batista (2011) observou uma significativa variabilidade nos resultados de simulações, dependendo da combinação de algoritmos de condução e convecção utilizados. Por isso, nessa etapa foram testados os algoritmos de convecção *Adaptive* e *Simple*. Esses apresentaram os menores desvios de temperatura do ar entre simulações e medições nos estudos de Pereira (2015) e Batista (2011) em simulações de desempenho térmico de edificações térreas em clima quente e úmido.

•**Infiltração:** Liddament (1986) apresenta uma base de dados de coeficientes de fluxo de ar e expoentes de fluxo de ar por tipo de abertura. Versage (2009) converteu os valores originais da base de dados de Liddament (1986) para a unidade aceita pelo Energyplus, que é fluxo de massa de ar por segundo por metro de fresta (kg/s.m), como pode ser visto no ANEXO 4. Assim, foram testados os coeficientes mínimos, máximos e médios conforme os tipos de esquadrias existentes na

edificação de análise. Os valores utilizados nas simulações de calibração estão destacados no ANEXO 4.

•**Absortância:** O estudo de Barbosa (2017) foi utilizado como base para a definição das variações de absortância solar no modelo. A autora realizou medições com um espectrômetro Alta II, e calculou a absortância de uma superfície na cor branca, mesma cor da edificação analisada na presente pesquisa. Como resultado encontrou uma absortância de 0,15, adicionando uma margem de erro de +/-0,1, devido a imprecisão do equipamento utilizado na medição. Dessa forma, na presente pesquisa foram testados os resultados obtidos pelas medições de Barbosa (2017) com os seguintes valores de absortância: 0,05 (margem de erro -0,1), 0,15 (valor medido) e 0,25 (margem de erro +0,1).

#### b) Modelo com ventilação

•**Coefficiente de descarga:** Flourentzou et al. (1998) indica o valor de 0,6 com precisão de  $\pm 0,1$ . Já Santamouris (1998) define que para pequenas aberturas internas o valor é 0,65 e para grandes aberturas 1,0, sendo 0,78 o valor padrão médio adotado. Na presente pesquisa foram testadas as margens de erro de 0,1 no coeficiente de descarga de 0,6, empregado no modelo base, sendo testados na calibração os coeficientes de descarga de 0,5 e 0,7.

•**Rugosidade do entorno:** Devido a existência do muro no entorno da edificação, foi testado o coeficiente de rugosidade do entorno de 0,33, que corresponde a um entorno com obstruções, e de 0,14 que corresponde a um entorno com pouca ou nenhuma obstrução. Com isso, buscou-se verificar o impacto que o entorno causaria nos desvios entre medição e simulação.

#### 3.4.1.3 Critérios para calibração

Salienta-se que o modelo BASE não apresenta ocupação nem cargas internas, pois durante o monitoramento as luzes foram mantidas apagadas e não havia nenhum equipamento nas salas. As simulações para calibração foram feitas seguindo o período de monitoramento, conforme descrito no item 3.3.2, sendo a primeira etapa com infiltração nas salas e a segunda etapa com portas e janelas abertas.

A cada alteração feita no modelo, as temperaturas da simulação foram comparadas com as temperaturas do monitoramento, calculando-se os desvios médios e os erros quadráticos (Equação 5 e Equação 6) dos dados simulados em relação às medições. Os parâmetros de entrada foram mantidos para as simulações posteriores quando os resultados dos erros e desvios eram inferiores aos da simulação anterior, até então mais calibrada, seguindo a sequência de simulações exposta na Tabela 3.

$$Dm = \left| \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)}{N} \right| \quad \text{Equação 5}$$

$$EQ = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N} \right]^{1/2} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

Dm é o desvio médio (°C);

y<sub>i</sub> é a temperatura horária simulada (°C);

x<sub>i</sub> é a temperatura horária monitorada (°C);

N é o número de observações (adimensional);

EQ é o erro quadrático médio (°C).

Tabela 3- Simulações realizadas na calibração do modelo.

<i>Modelo</i>	<i>Simulação</i>		<i>Mês do monitoramento</i>
	<b>Caso</b>	<b>Descrição/Alterações</b>	
<i>Com infiltração</i>	1	Solo Slab + algoritmo Tarp	Dezembro/2017
	2	Solo Slab + algoritmo Adaptive	Dezembro/2017
	3	Solo Slab + algoritmo Simple	Dezembro/2017
	4	Solo GroundDomain + algoritmo Tarp	Dezembro/2017
	5	Solo GroundDomain + algoritmo Adaptive	Dezembro/2017
	6	Solo GroundDomain + algoritmo Simple	Dezembro/2017
	7	Caso 5 + Absortância - 0,05	Dezembro/2017
	8	Caso 5 + Absortância - 0,15	Dezembro/2017
	9	Caso 5 + Absortância - 0,25	Dezembro/2017
	10	Caso9 + Infiltração máxima Liddament	Dezembro/2017
	11	Caso 9 + Infiltração média Liddament	Dezembro/2017
	12	Caso 9 + Infiltração mínima Liddament	Dezembro/2017
<i>Com ventilação</i>	13	Modelo com infiltração calibrado (Caso 12) + esquadrias abertas	Janeiro/2018
	14	Caso 13 + Coeficiente de descarga 0,5	Janeiro/2018
	15	Caso 13 + Coeficiente de descarga 0,7	Janeiro/2018
	16	Caso 15 + Expoente de velocidade do vento de 0,33	Janeiro/2018

### 3.4.2 Simulações de desempenho térmico

Nessa etapa, com o modelo calibrado, foram inseridas as cargas térmicas de modo padrão em todos os modelos, assim como os padrões de ocupação, funcionamento, iluminação e ventilação conforme o uso real da edificação. Utilizou-se o arquivo climático EPW (LABEEE, 2018), e foram realizadas simulações horárias para o ano inteiro.

### 3.4.2.1 Caracterização dos modelos computacionais

As configurações do modelo relativas à geometria, temperatura do solo, rugosidade do entorno e componentes construtivos foram mantidas conforme o modelo base descrito no item 2.3.1.2. O padrão anual de funcionamento foi definido de acordo com o ano letivo de escolas de ensino infantil, sendo 200 dias letivos, com 30 dias de recesso em janeiro e 15 dias em julho. Com base em entrevistas realizadas com a administração do CMEI, o período de ocupação foi definido das 7:30 às 11:30 e das 13:00 às 17:00 durante a semana. Durante esse período a iluminação é mantida ligada.

Devido à variedade de climas que seriam simulados, considerou-se o padrão de ventilação recomendado pelo Regulamento Técnico da Qualidade - RTQ para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, onde foi adotada uma temperatura de termostato de 20 °C e janelas e portas seriam abertas quando a temperatura do ar do ambiente estivesse igual ou superior à temperatura do termostado ( $T_{int} \geq 20^{\circ}\text{C}$ ) e também superior à temperatura externa ( $T_{int} \geq T_{ext}$ ).

As salas são ocupadas por vinte e duas pessoas, sendo vinte alunos, um professor e um auxiliar de classe. Destaca-se a dificuldade em aplicar os modelos de conforto térmico existentes, pois esses são baseados em adultos e não levam em consideração que as crianças apresentam taxas metabólicas mais altas, considerando sua área corporal.

Por isso, a taxa metabólica dos adultos (professores) foi atribuída de acordo com a ASHRAE Standard 55 (2017) considerando uma atividade moderada de 100W/m<sup>2</sup> (caminhando pelo ambiente), devido a movimentação constante que os professores realizam com os alunos. Já para as crianças foi adotada uma taxa metabólica corrigida. A correção foi feita com base no estudo de Almeida; Ramos; De Freitas (2016), que usa como base a taxa metabólica de um adulto e faz a correção utilizando a área de superfície corporal de uma criança (Equação 7). Assim, obtiveram para crianças de 4 a 5 anos de idade, idade mínima abordada no estudo, uma taxa metabólica 210% maior que de adultos. Dessa forma, adotou-se a atividade de um adulto escrevendo 1,2 Met (60W/m<sup>2</sup>) para efetuar a correção e obteve-se o valor de 2,55 met (148,41 W/m<sup>2</sup>) para as crianças.

$$M_{criança} = 1,2 \times \frac{ADu_{adulto}}{ADu_{criança}}$$

Equação 7

Onde:

1,2 é a taxa metabólica de um adulto em atividade sedentária, de acordo com a ISSO 7730.

ADu adulto= Área de superfície corporal DuBois, assumindo 1,7m<sup>2</sup> para um adulto.

ADu crianças= Área de superfície corporal DuBois para crianças menores que 6 anos (0,8m<sup>2</sup>)

#### 3.4.2.2 Alternativas simuladas

O FNDE preconiza alguns sistemas construtivos para os projetos padrão do programa Proinfância, e dentre eles estão o sistema convencional de alvenaria de tijolo cerâmico e os sistemas inovadores, ou metodologias inovadoras, conforme denominado pelo programa. As metodologias inovadoras englobam três sistemas: Tecnologia Concreto PVC, Tecnologia Light Steel Frame e Tecnologia Painel Wall System. Tratam-se de sistemas leves que foram adotados com o objetivo de atender à três premissas básicas do processo de implantação e expansão do programa Proinfância: Custo da Construção, Tempo de execução e Qualidade da construção.

A escolha dos modelos a serem analisados partiu da necessidade de verificar o desempenho de cada sistema nos contextos climáticos brasileiros. Portanto, foram simulados cinco modelos representativos de cada sistema, para cada cidade: Alvenaria de tijolos cerâmicos (ALV\_CER\_CON), Alvenaria com isolamento na cobertura (ALV\_ISO\_CON), Concreto PVC (CON\_SAN\_PVC), Light Steel Frame (LSF\_MET\_ISO) e Painel Wall System (EPS\_FIB\_EPS). Os modelos são compostos por combinações diferentes de paredes e coberturas, de acordo com as especificações do FNDE. A nomenclatura de tais modelos foi definida de acordo com o exemplo exposto na Figura 67, onde é possível observar o detalhamento das cinco configurações de paredes e coberturas. Já as propriedades térmicas dos componentes construtivos podem ser observadas no APÊNDICE F.

Figura 67- Exemplo explicativo das nomenclaturas utilizadas para cada modelo.

EXEMPLO: **ALV\_CER\_CON**

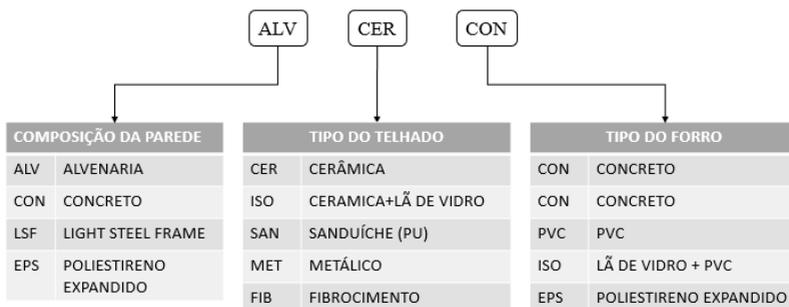


Figura 68- Especificações dos modelos computacionais.

	MODELO 1 ALV_CER_CON	MODELO 2 ALV_ISO_CON	MODELO 3 CON_SAN_PVC	MODELO 4 LSF_MET_ISO	MODELO 5 EPS_FIB_EPS
PAREDE					
COBERTURA	<p>TELHA CERÂMICA + ÁTICO + LAJE DE CONCRETO</p>	<p>TELHA CERÂMICA + LÃ DE VIDRO 50mm + LAJE DE CONCRETO</p>	<p>TELHA SANDUÍCHE POLIURETANO + FORRO DE PVC</p>	<p>TELHA METÁLICA + LÃ DE VIDRO 100mm + FORRO DE PVC</p>	<p>TELHA EM FIBROCIMENTO + FORRO EM EPS 50mm</p>

O Modelo 1, representa o sistema mais utilizado nas creches tipo B no Brasil, com 94% das creches já construídas até 2019 (FNDE, 2019). Apresenta parede em alvenaria de tijolos cerâmicos e cobertura em telha cerâmica com laje em concreto maciço.

O Modelo 2, corresponde ao Modelo 1 com o incremento do material isolante no telhado, onde foi acrescentada lã de vidro. Esse modelo não faz parte dos projetos do FNDE, entretanto optou-se por avaliá-lo por ser uma medida projetual de fácil execução que não causa grandes alterações no projeto padrão. Além disso, representa uma medida indicada para edificações térreas, que apresentam os maiores ganhos de calor pela cobertura.

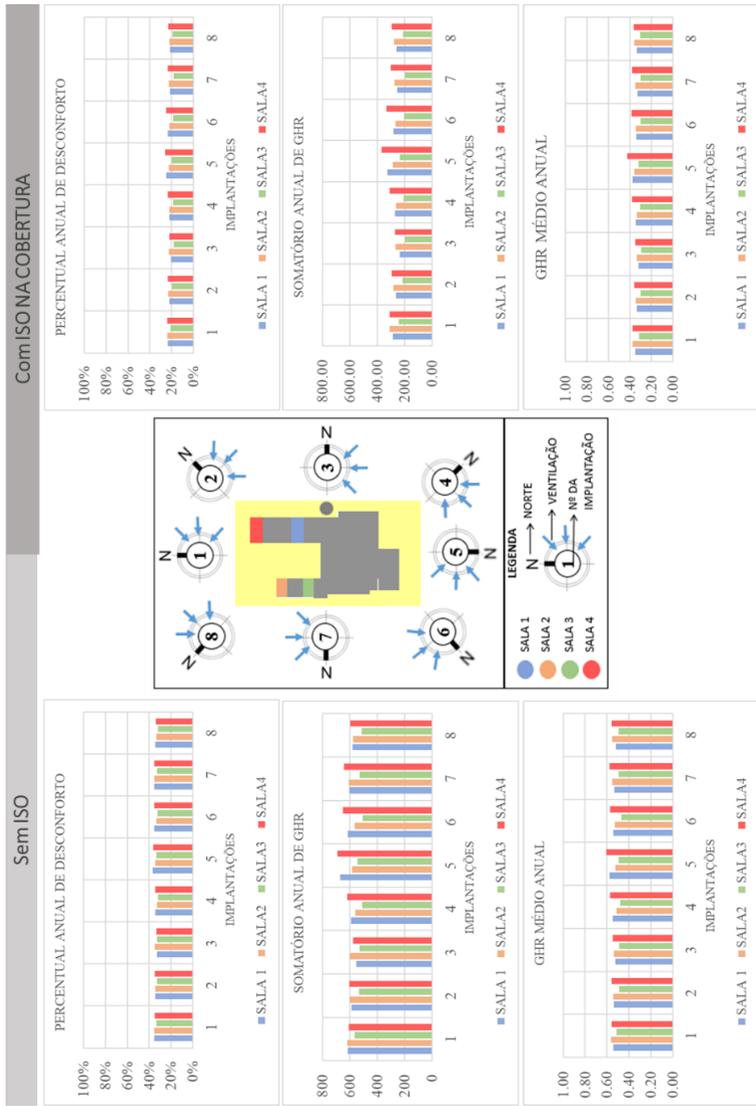
O Modelo 3, é representativo da tecnologia Concreto/PVC, que consiste em um sistema construtivo modular com estrutura metálica. As paredes são compostas por painéis de PVC, preenchidos com concreto de alto desempenho. Já a cobertura é composta por telhas sanduíche com alma em poliuretano e forro em PVC.

No Modelo 4 o sistema consiste em paredes com função estrutural compostas por perfis leves de aço com fechamento externo em placas cimentícias, núcleo com manta de lã de vidro e fechamento interno, em gesso acartonado. Na cobertura são utilizadas telhas metálicas trapezoidais e sobre o forro de gesso para *drywall*, existe uma manta de lã de vidro para isolamento.

Já o Modelo 5 trata-se de um sistema modular com estrutura metálica e fechamento em painéis sanduíche, tanto nas paredes, quanto no forro. Os painéis são compostos por placas com núcleo de poliestireno expandido (EPS) e gesso acartonado, revestido nas extremidades com polyester reforçado com fibra de vidro. A cobertura é composta por telhas de fibrocimento.

Para definir a orientação em que a edificação seria simulada, foram realizadas simulações prévias do modelo BASE, nas oito orientações principais, com e sem isolamento na cobertura (Figura 69). Dessa forma foi possível avaliar o impacto que a variação de orientações exerce sobre o desempenho de cada sala de aula avaliada e, nos casos com isolamento, evidenciar o ganho de calor pelas paredes. Os resultados não indicaram variações significativas entre orientações em nenhum dos casos. Entretanto, a orientação 5 apresentou somatórios de graus-hora superiores às demais e por isso foi escolhida para as simulações de desempenho, considerando que nessa orientação as maiores fachadas, assim como as maiores aberturas das salas de aula, estão voltadas para Leste e Oeste, recebendo maior incidência solar ao longo dia.

Figura 69- Percentual anual de desconforto, graus-hora de desconforto e graus-hora médio e graus-hora médio e graus-hora médio, nas oito orientações simuladas.



### 3.4.2.3 Indicadores de desempenho térmico utilizados

Considerando a influência que os ambientes de ensino podem exercer sobre o processo de aprendizagem dos alunos, principalmente em fase educacional inicial, os aspectos de conforto ambiental nas salas de aula tem importância fundamental para o desenvolvimento das crianças. Por isso, nesse estudo, o indicador de desempenho térmico utilizado nas análises das salas de aula baseia-se em limites de temperatura de conforto térmico.

Para análise dos resultados, foi utilizado o modelo adaptativo que é aplicável a edificações naturalmente ventiladas. Dessa forma, foi considerado o limite de aceitabilidade normativo, de 80% para conforto estabelecido pela ASHRAE Standard 55 (2017). Nas simulações utilizou-se a variável de saída *Zone Thermal Comfort ASHRAE 55 Adaptive Model Temperature [°C]*, a qual informa a temperatura operativa ideal em cada hora do dia ao longo do ano. Com base nisso, os limites máximos e mínimos foram adicionados à temperatura neutra obtida nas simulações, criando a faixa de conforto para cada caso.

Foram estabelecidos como parâmetros de desempenho: o percentual de horas em desconforto, os graus hora de resfriamento (GHR) e os graus-hora médio, que permitem a avaliação do desempenho a partir de valores de temperatura operativa.

O tratamento dos dados foi feito com o auxílio de planilhas no programa Excel. Foram utilizados dados horários para as análises e os resultados das salas são apresentados em percentual de horas em desconforto por calor e por frio, somatório de graus-hora de aquecimento e resfriamento, e Grau-hora médio. Cabe ressaltar que os resultados são referentes aos períodos em que há ocupação nas salas.

A tabulação dos dados foi feita inicialmente com dados anuais, para identificar os modelos com melhor e pior desempenho para cada cidade (considerando os valores absolutos de percentual de horas em desconforto e somatório de graus-hora em desconforto). Nessa etapa, considerou-se as médias dos resultados das quatro salas de aula para classificar os modelos com melhor e pior desempenho, tendo em vista que os resultados observados apresentaram pouca variação entre as salas.

Posteriormente foi feita a análise mensal desses modelos, para cada cidade, a fim de caracterizar o comportamento das salas de aula ao longo do ano e identificar quais os meses em que os ambientes oferecem mais desconforto térmico para os alunos. Para isso os resultados da sala 4 foram utilizados, tendo em vista que o ambiente possui três fachadas

voltadas para o exterior e possui as maiores aberturas voltadas para Oeste.

Por fim, foi feita uma comparação do desempenho dos modelos em relação ao modelo representativo do sistema mais usual em construções do Programa Proinfância no Brasil, que é composto por alvenaria e cobertura em telha cerâmica sem isolamento térmico.

Após todos os procedimentos percorridos neste capítulo, os resultados das simulações foram obtidos e tabulados. Esses são apresentados no capítulo a seguir juntamente com suas análises.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na pesquisa. Inicialmente são expostos os resultados da calibração do modelo, onde são apresentadas as comparações entre dados simulados e monitorados. Posteriormente os resultados das simulações de desempenho térmico dos cinco modelos nas oito cidades são expostos. Partindo de uma análise anual, o desempenho é avaliado por cidades, por modelos e por salas de aula. Os resultados da sala com pior desempenho são utilizados para elaborar um ranking de desempenho e também um agrupamento das cidades. É feita uma análise mensal comparando os modelos com pior e melhor desempenho. Por último, o desempenho dos modelos é comparado ao modelo usual, composto por paredes em alvenaria.

### 4.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO

Neste item são apresentados os resultados da calibração do modelo computacional, de acordo com os procedimentos metodológicos apresentados no item 3.4.1.

A calibração foi realizada a partir da análise de sensibilidade do modelo, utilizando-se como referência as temperaturas de bulbo seco das quatro salas de aula, coletadas nos períodos de monitoramento da edificação. Os resultados das primeiras simulações foram comparados às medições no período sem ventilação nas salas, apenas com infiltração por portas e janelas fechadas (fevereiro de 2018). As últimas simulações foram comparadas ao monitoramento no período em que houve abertura de esquadrias, proporcionando a ventilação natural (dezembro de 2017).

#### 4.1.1 Modelo com infiltração

A análise de sensibilidade realizada para o período com infiltração, foi feita com o ambiente fechado 24h por dia, entre os dias 09/02/2018 a 16/02/2018.

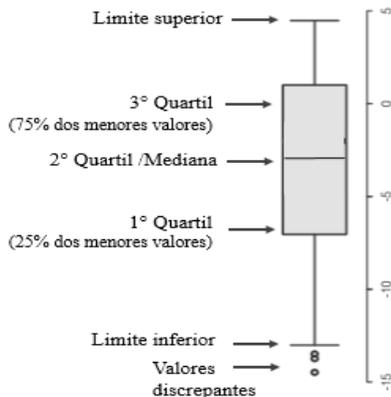
Os resultados da primeira etapa da calibração podem ser observados no Quadro 2. Quando a alteração no modelo oferecia melhoria ao conjunto de salas, com redução no somatório dos desvios e erros, a mesma era considerada satisfatória e incorporada nas simulações seguintes. Para melhor visualização dos resultados, os dados foram plotados no Gráfico 1, que apresenta os valores de desvio médio (D.M.) e erro quadrático (E.Q.) encontrados em cada caso simulado ao longo da

calibração com infiltração. Destaca-se que o gráfico *boxplot* apresenta aspectos relevantes de uma distribuição de frequências. A área dos retângulos representa a faixa dos 50% dos valores mais típicos da distribuição e caso existam valores discrepantes na amostra, esses são indicados por pontos. No Quadro 3 é possível observar a interpretação deste tipo de gráfico.

Quadro 2- Resultados das simulações realizadas para calibração do modelo com infiltração.

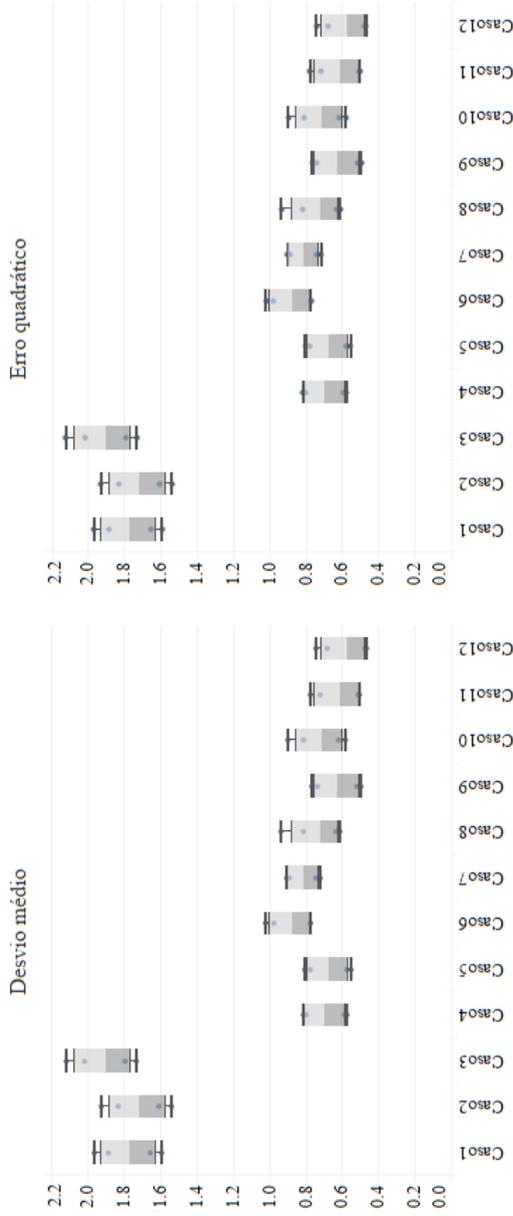
CASO	DESCRIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA	DESVIO MÉDIO (°C)				MÉDIA DOS DESVIOS	ERRO QUADRÁTICO (°C)				SOMA DOS ERROS	DADOS DE ENTRADA MANTIDOS
		SALA 1	SALA 2	SALA 3	SALA 4		SALA 1	SALA 2	SALA 3	SALA 4		
1	CASO BASE_TARP_ABS02_SLAB	1.88	1.65	1.97	1.59	<b>1.77</b>	1.90	1.68	1.99	1.64	7.21	NÃO
2	CASO 1+ADAPTIVE	1.83	1.61	1.93	1.54	<b>1.73</b>	1.85	1.64	1.95	1.59	7.03	NÃO
3	CASO 1+SIMPLE	2.02	1.79	2.12	1.73	<b>1.92</b>	2.04	1.82	2.14	1.77	7.77	NÃO
4	CASO BASE_TARP_ABS02_GD	0.80	0.57	0.82	0.59	<b>0.69</b>	0.84	0.65	0.86	0.69	3.04	SIM
5	CASO 4+ADAPTIVE	0.78	0.55	0.80	0.58	<b>0.68</b>	0.81	0.64	0.85	0.68	2.98	SIM
6	CASO 4+SIMPLE	0.98	0.77	1.02	0.77	<b>0.88</b>	1.01	0.83	1.05	0.85	3.74	NÃO
7	SIMULAÇÃO05+0.05 (-0.1)	0.89	0.72	0.90	0.74	<b>0.81</b>	0.92	0.80	0.94	0.82	3.49	NÃO
8	SIMULAÇÃO05+0.15 (0)	0.81	0.61	0.93	0.63	<b>0.75</b>	0.85	0.69	0.99	0.73	3.25	NÃO
9	SIMULAÇÃO05+0.25 (+0.1)	0.74	0.49	0.77	0.52	<b>0.63</b>	0.78	0.59	0.81	0.64	2.81	SIM
10	SIMULAÇÃO09+INFILTRAÇÃO MÁX LIDDAMENT	0.81	0.62	0.90	0.58	<b>0.73</b>	0.85	0.71	0.94	0.70	3.21	NÃO
11	SIMULAÇÃO09+INFILTRAÇÃO MED LIDDAMENT	0.72	0.51	0.78	0.50	<b>0.63</b>	0.76	0.60	0.82	0.63	2.81	NÃO
12	SIMULAÇÃO09+INFILTRAÇÃO MIN LIDDAMENT	0.68	0.47	0.74	0.47	<b>0.59</b>	0.72	0.57	0.79	0.61	2.68	SIM

Quadro 3- Interpretação do gráfico tipo *boxplot*.



Fonte: Barbetta, 2015. Adaptado pela autora.

Gráfico 1- Resultados de desvio médio e erro quadrático para os casos simulados com infiltração.



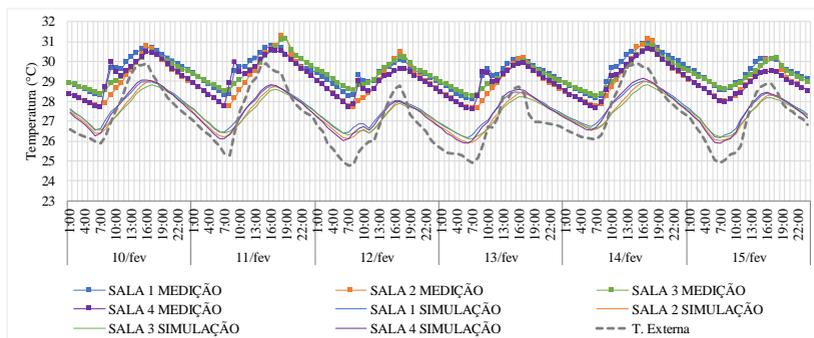
LEGENDA:

**Caso 1-** Slab\_Tarp / **Caso 2-** Slab\_Adaptive / **Caso 3-** Slab\_Simple / **Caso 4-** GroundDomain\_Tarp / **Caso 5-** GroundDomain\_Adaptive /  
**Caso 6-** GroundDomain\_Simple / **Caso 7-** Caso 5+Abs 0.05 / **Caso 8-** Caso 5+Abs 0.15 **Caso 9-** Caso 5+Abs 0.25 /  
**Caso 10-** Caso 9+Infiltração Máx / **Caso 11-** Caso 9+Infiltração Méd / **Caso 12-** Caso 9+Infiltração Min

Observa-se que os dados de entrada do modelo, fornecidos pela literatura, ocasionaram D.M. entre 0,47 e 2,12 no modelo base, considerando as quatro salas, e E.Q. de 0,57 a 2,14 entre dados medidos e simulados. O Gráfico 2 ilustra a variação das temperaturas medidas e simuladas durante o período de monitoramento. A diferença máxima observada entre dados medidos e simulados é em média 1,77°C, com a maior diferença de 3,3°C, na sala 4 e a menor diferença de 0,88°C na sala 2.

O somatório dos erros e a média dos desvios foi feito com o objetivo de unificar os resultados entre as quatro salas. Assim, foi possível verificar de forma global, quando o modelo estaria mais calibrado ou não. É importante destacar que quanto mais próximos de zero estiverem o desvio médio e o erro quadrático, mais calibrado estará o modelo.

Gráfico 2- Comparação entre temperaturas simuladas no Caso 1- BASE, com infiltração, e as temperaturas monitoradas *in loco*, nas quatro salas.



Dos Casos 1 (BASE) ao 6, foram testados os algoritmos de convecção combinados com a modelagem do solo. Do Caso 7 ao 9, foram alteradas as absorvâncias e do Caso 10 ao 12, a infiltração de ar.

Observa-se que a modelagem do solo com o pré-processador Slab, provocou os maiores erros e desvios no modelo, independentemente do algoritmo de convecção utilizado, quando comparado aos testes com o objeto GroundDomain. Já em relação aos algoritmos de convecção, os menores erros e desvios foram observados com a utilização do algoritmo *Adaptive*, confirmando o que foi constatado por (BATISTA, 2011) e (PEREIRA, 2015) que apontam esse

algoritmo como sendo apropriado para edificações térreas em climas quentes e úmidos.

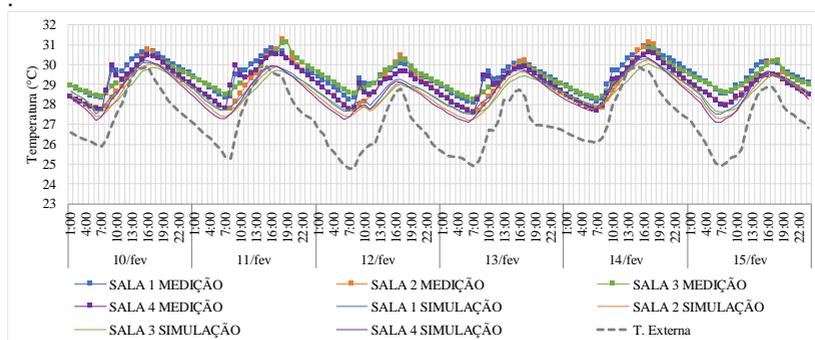
Assim, entre os seis primeiros casos avaliados, o Caso 5 apresentou os menores desvios e erros, sendo adotado como base para os testes de absorvância, realizados nos Casos 7, 8 e 9.

Em relação ao Caso 5, mais calibrado até então, cuja absorvância utilizada foi 0,2, a alteração da absorvância para 0,25 alcançou melhoria nos parâmetros avaliados. Dessa forma, o Caso 9 foi definido como o mais calibrado.

Já nos testes com variação nos valores de infiltração, correspondentes aos casos 10, 11 e 12, foi possível constatar que os valores mínimos de coeficientes e expoentes de fluxo de ar fornecidos por Liddament (1986) reduziram os desvios e erros quadráticos em relação ao Caso 9, mais calibrado até então. Logo, o Caso 12 foi considerado o mais calibrado, com a média dos desvios igual a 0,59 e soma dos erros igual a 2,68. Ou seja, foi alcançada uma redução de 37% nos erros e de 33% na média dos desvios, em relação ao Caso 1- BASE (não calibrado).

Assim, o modelo foi considerado calibrado tendo em vista a proximidade dos parâmetros avaliados do valor zero, com diferenças entre temperaturas medidas e simuladas de em média  $0,58^{\circ}\text{C}$  (Gráfico 3).

Gráfico 3- Comparação entre temperaturas simuladas no Caso 12- MODELO CALIBRADO, com infiltração, e as temperaturas monitoradas *in loco*, nas quatro salas.



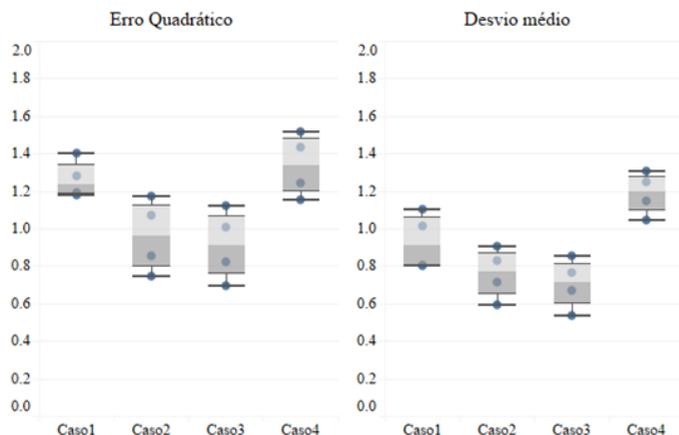
#### 4.1.2 Modelo com ventilação natural

A partir do modelo calibrado com infiltração, prosseguiu-se incluindo a ventilação natural no período de 24/12/2017 à 30/12/2017, com esquadrias abertas das 8:30h às 11:30h. Os valores de desvio médio (D.M.) e erro quadrático (E.Q.) encontrados em cada caso simulado ao longo da calibração com ventilação são apresentados no Quadro 4 e no Gráfico 1, e a variação das temperaturas monitoradas e simuladas pode ser vista no Gráfico 5.

Quadro 4- Resultados das simulações realizadas para calibração do modelo com ventilação,

CASO	DESCRIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA	DESVIO MÉDIO (°C)				MÉDIA DOS DESVIOS	ERRO QUADRÁTICO (°C)				SOMA DOS ERROS	DADOS DE ENTRADA MANTIDOS
		SALA 1	SALA 2	SALA 3	SALA 4		SALA 1	SALA 2	SALA 3	SALA 4		
13	CASO BASE_CD06	1.01	0.80	1.10	0.80	0.93	1.28	1.18	1.40	1.19	5.04	NÃO
14	CASO BASE_CD05	0.83	0.71	0.59	0.90	0.76	1.07	0.85	0.74	1.17	3.84	NÃO
15	CASO BASE_CD07	0.76	0.67	0.54	0.86	0.71	1.01	0.82	0.70	1.12	3.64	SEM
16	CASO 15 ENTORNO DE CIDADE	1.25	1.15	1.04	1.31	1.19	1.44	1.24	1.15	1.51	5.34	NÃO

Gráfico 4- Resultados de desvio médio e erro quadrático para os casos simulados com ventilação

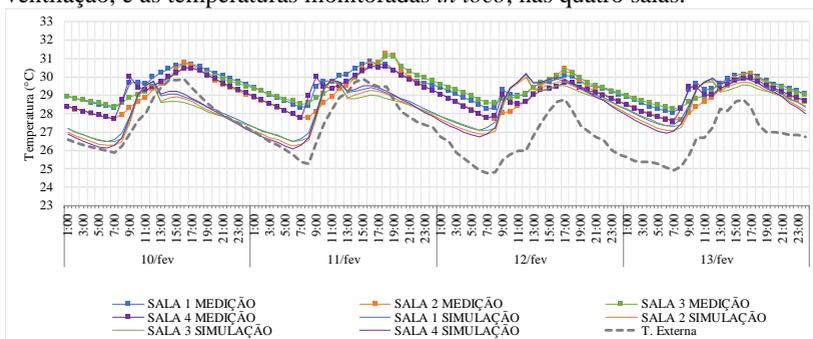


LEGENDA:

Caso 13 - Coeficiente de descarga 0,6/Caso 14-Coeficiente de descarga 0,5 /  
 Caso 15 - Coeficiente de descarga 0,7/Caso 16- Caso 15 + Entorno de cidade

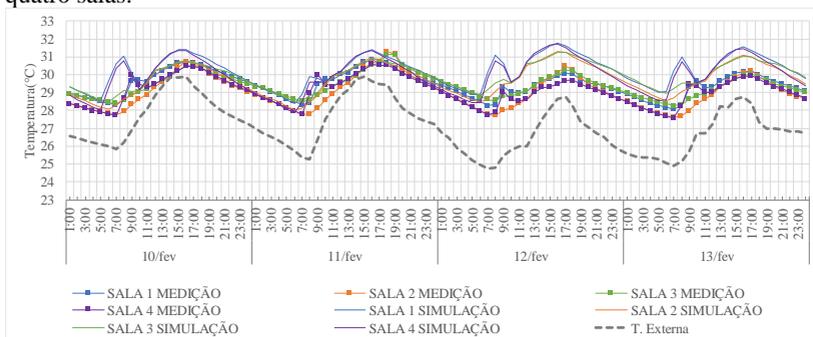
Os coeficientes de descarga das esquadrias foram testados nos casos 13, 14 e 15. Verificou-se que o coeficiente de descarga de 0,7 foi o que ofereceu a maior redução nos somatórios dos desvios e dos erros. Também foi feito um teste com a correção do entorno para um terreno de cidade (Caso 16), entretanto verificou-se que essa alteração não favoreceu a calibração, aumentando os desvios e erros em todas as salas. Desse modo, o Caso 15 foi definido como modelo calibrado.

Gráfico 5- Comparação entre temperaturas simuladas no Caso 13- BASE, com ventilação, e as temperaturas monitoradas *in loco*, nas quatro salas.



O Caso 15, apresentou desvios de em média 0,71 e soma dos erros quadráticos de 3,64, o que implica em reduções de 23% e 27%, respectivamente, em relação ao Caso 13 (BASE VENTILADO). Após calibrado, o modelo ventilado apresentou diferenças de temperatura entre dados medidos e simulados de em média 0,7°C (Gráfico 6).

Gráfico 6- Comparação entre temperaturas simuladas no Caso 15- MODELO CALIBRADO, com ventilação, e as temperaturas monitoradas *in loco*, nas quatro salas.



## 4.2 SIMULAÇÕES DE DESEMPENHO TÉRMICO

Após calibrado, o modelo computacional foi ajustado com as cargas térmicas e funcionamento correspondentes ao uso real do projeto. Também foram inseridas a ocupação dos alunos e professores e a ventilação natural conforme citada no item 3.4.2.1. Efetuadas as simulações, foram quantificados os percentuais de desconforto anuais e mensais, os somatórios de graus-hora de resfriamento anuais e mensais e os graus-hora médios mensais para as oito cidades.

Os resultados anuais são expostos no Gráfico 8 e Gráfico 9, onde é possível observar que apenas metade das cidades avaliadas apresentam desconforto por frio, com destaque para Curitiba e Santa Maria, que ultrapassam os 30% de desconforto por frio, com somatórios de graus hora de aquecimento (GHA) que atingem os 1000°Ch. Florianópolis e Brasília também apresentam desconforto por frio, entretanto, com percentuais máximos inferiores a 11% e GHA máximo de aproximadamente 300°Ch. Dentre as quatro cidades citadas, apenas Santa Maria e Brasília apresentam desconforto por calor considerável, atingindo os 20% de horas ocupadas em desconforto por calor, com até 1000°Ch de aquecimento. Já Curitiba e Florianópolis apresentam desconforto por calor inferior a 15% com somatórios de GHR inferiores a 500°Ch.

As demais cidades apresentam percentuais de desconforto por frio inferiores a 5% e desconforto por calor de até 90%, como é o caso de Teresina, que atinge os 5500°Ch de resfriamento, sendo a cidade que apresentou os resultados mais desfavoráveis ao conforto dos usuários, com mais que o dobro do desconforto observado em Maceió, Campo Grande e Vitória da Conquista. Os resultados de Maceió indicam que até 60% das horas ocupadas apresentam desconforto por calor ao longo do ano, com até 2000°Ch de resfriamento. Campo Grande e Vitória da Conquista apresentam 40% e 30% de desconforto com somatórios de até 1800°Ch e 1000°Ch, respectivamente.

Em relação aos modelos avaliados, observam-se resultados semelhantes nas zonas 01, 02 e 03, onde os modelos mais isolados como o LSF\_MET\_ISO e o EPS\_FIB\_EPS apresentaram melhores desempenhos térmicos, com percentuais de desconforto por frio próximos a zero. Tal fato se justifica por serem as cidades com temperaturas mais baixas em relação as demais, para as quais a capacidade térmica presente nos sistemas isolados funciona de forma adequada para armazenagem do calor nos períodos frios. Os resultados dos demais modelos apresentaram variações de desconforto inferiores a

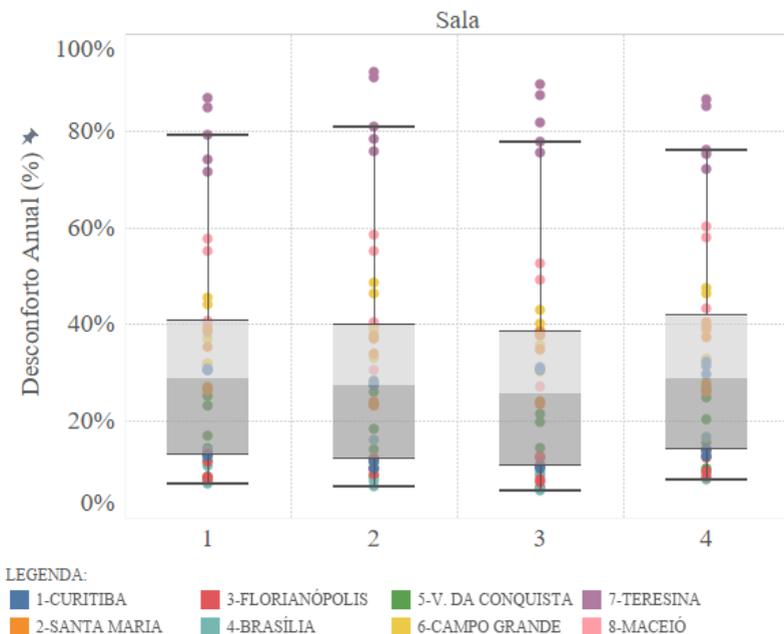
4 pontos percentuais entre si, nas três cidades. Considerando valores absolutos, o modelo em COM\_SAN\_PVC apresentou o pior desempenho, com até 38% de desconforto ( $1003^{\circ}\text{Ch}$ ) em Santa Maria. Já os modelos simulados para Florianópolis apresentaram resultados equivalentes no percentual anual de desconforto, com variação máxima de 3 pontos percentuais entre modelos.

Já nas Zonas 04, 05, 06, 07 e 08, o sistema com o melhor desempenho térmico foi o ALV\_ISO\_CON, que devido a presença de isolamento no telhado, retarda o ganho de calor pela cobertura ao mesmo tempo em que as paredes em alvenaria permitem as trocas térmicas entre interior e exterior. Os sistemas com isolamento térmico nas paredes (LSF\_MET\_ISO e EPS\_FIB\_EPS) apresentaram o pior desempenho nessas cidades.

De modo geral, é possível observar maior variação entre os desempenhos dos sistemas nas cidades com temperaturas externas mais altas, como é o caso de Teresina, que apresenta diferenças de até  $3500^{\circ}\text{Ch}$  de resfriamento entre o sistema com o melhor desempenho (ALV\_ISO\_CON) e com pior desempenho (LSF\_MET\_ISO).

Além dessas análises, observa-se que as quatro salas de aula simuladas apresentaram percentuais de desconforto aproximados em todas as cidades. Tal resultado confirma o que foi visto no item 3.4.2.2, em que a orientação não teve influência significativa no desempenho das salas de aula, visto que o maior ganho de calor acontece pela cobertura. Embora a diferença entre as salas com melhor e pior desempenho tenha sido inferior a 6 pontos percentuais em todas as cidades, a sala 4 destaca-se com os maiores percentuais de desconforto em relação às demais na maioria das cidades, com exceção de Campo Grande e Teresina, onde a sala 2 apresentou o pior desempenho (Gráfico 7) .

Gráfico 7- Percentuais de desconforto por sala, considerando todos os modelos em todas as cidades.



Ambas as salas possuem três fachadas voltadas para o exterior, entretanto a sala 4 possui as maiores aberturas voltadas para Oeste, o que potencializa o ganho de calor durante a tarde e pode justificar o pior desempenho desse ambiente.

Dessa forma, levando em consideração seu pior desempenho em relação as demais salas, a sala 4 foi escolhida para as análises a seguir.





A fim de verificar a distribuição do desconforto ao longo do ano foram definidos os modelos com pior e melhor desempenho em cada cidade, para realização de uma análise mensal. É importante ressaltar que embora algumas cidades apresentem pouca variação entre os resultados dos modelos, o *ranking* foi feito considerando os valores absolutos dos resultados anuais de percentual de desconforto e somatório anual de graus-hora da sala 4 (pior desempenho entre as demais), como pode ser visto no Quadro 5. Destaca-se também que nos gráficos mensais, o mês de janeiro não é ilustrado por não haver ocupação nas salas nesse período.

Quadro 5- *Ranking* dos modelos de acordo com os percentuais anuais de desconforto e os somatórios de graus-hora anuais, classificados do melhor para o pior desempenho térmico, para todas as cidades.

CURITIBA			SANTA MARIA			FLORIANÓPOLIS			BRASÍLIA		
MODELO	%	°Ch	MODELO	%	°Ch	MODELO	%	°Ch	MODELO	%	°Ch
EPS_FIB_EPS	13%	208.1	EPS_FIB_EPS	26%	862.4	EPS_FIB_EPS	8%	157.0	ALV_ISO_CON	8%	75.1
LSF_MET_ISO	14%	236.6	LSF_MET_ISO	27%	943.9	LSF_MET_ISO	10%	181.4	ALV_CER_CON	9%	120.6
ALV_CER_CON	30%	636.2	ALV_ISO_CON	37%	924.9	ALV_ISO_CON	12%	156.8	CON_SAN_PVC	13%	205.6
ALV_ISO_CON	31%	596.3	ALV_CER_CON	39%	1111.9	ALV_CER_CON	14%	198.0	EPS_FIB_EPS	14%	275.2
CON_SAN_PVC	32%	660.4	CON_SAN_PVC	40%	1240.7	CON_SAN_PVC	14%	215.9	LSF_MET_ISO	17%	345.6
V. DA CONQUISTA			CAMPO GRANDE			TERESINA			MACEIÓ		
MODELO	%	°Ch	MODELO	%	°Ch	MODELO	%	°Ch	MODELO	%	°Ch
ALV_ISO_CON	10%	127.9	ALV_ISO_CON	28%	673.4	ALV_ISO_CON	72%	2915.5	ALV_ISO_CON	33%	554.5
ALV_CER_CON	15%	309.3	ALV_CER_CON	33%	969.7	CON_SAN_PVC	75%	4343.9	ALV_CER_CON	40%	869.2
CON_SAN_PVC	20%	458.7	CON_SAN_PVC	39%	1368.3	ALV_CER_CON	76%	3766.1	CON_SAN_PVC	43%	1096.1
EPS_FIB_EPS	25%	768.3	EPS_FIB_EPS	46%	1775.6	EPS_FIB_EPS	85%	5583.1	EPS_FIB_EPS	58%	1742.6
LSF_MET_ISO	27%	903.5	LSF_MET_ISO	47%	1932.8	LSF_MET_ISO	87%	6035.7	LSF_MET_ISO	60%	1907.0

Desse modo, os resultados da análise mensal são apresentados a seguir em dois grupos, de acordo com as semelhanças do desempenho dos modelos nas cidades. O primeiro grupo é composto pelas cidades representativas das zonas ZB1, ZB2 e ZB3, onde o melhor desempenho foi observado no modelo EPS\_FIB\_EPS, composto por paredes em Poliestireno expandido, telhado em fibrocimento e forro em Poliestireno expandido; e o pior no modelo CON\_SAN\_PVC, composto por paredes em concreto PVC, telhado sanduíche e forro em PVC. Já o segundo grupo é composto pelas ZB4, ZB5, ZB6, ZB7 e ZB8, com melhor desempenho do modelo ALV\_ISO\_CON, composto por paredes em alvenaria de tijolos cerâmicos, telhado cerâmico com isolamento térmico e laje em concreto; e pior desempenho no modelo LSF\_MET\_ISO

composto por paredes em Light Steel Frame, telhas metálicas e forro em PVC coberto por uma camada de 10 cm de lã de vidro.

#### 4.2.1 Grupo 1- Curitiba (ZB1), Santa Maria (ZB2) e Florianópolis (ZB3)

Nessas regiões a necessidade de aquecimento é predominante, devido às perdas de calor através do envelope externo do edifício. Em contrapartida, as perdas externas do envelope contribuem para o resfriamento da edificação no período mais quente do ano, reduzindo a demanda de resfriamento.

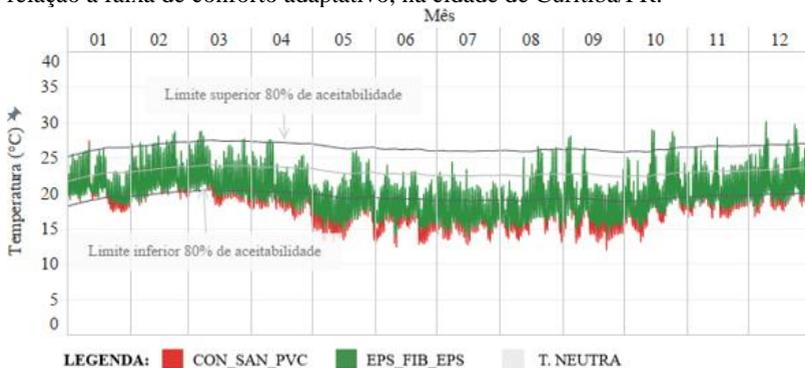
Os resultados apontaram que nas três cidades, o modelo EPS\_FIB\_EPS se destaca com o melhor desempenho térmico, e o modelo CON\_SAN\_PVC, com o pior desempenho, considerando os valores absolutos obtidos para percentual de horas em desconforto e somatório anual de graus hora de desconforto (frio e calor).

No contexto climático de **Curitiba**, o modelo CON\_SAN\_PVC resultou em um percentual anual de desconforto de 32,2%. Sendo 3,5% das horas ocupadas desconfortáveis por calor, com somatório de graus-hora de 71,9°ChR e 28,7% das horas desconfortáveis por frio, com 588,4 °ChA (Gráfico 8 e Gráfico 9).

Já o modelo EPS\_FIB\_EPS apresentou 12,8% das horas de ocupação da sala em desconforto, sendo 6,9% por calor, com um somatório de 128,88°ChR e 5,9% por frio, com um somatório anual graus-hora de 79,18°ChA (Gráfico 8 e Gráfico 9). Assim, é possível observar a redução de 19,4 pontos percentuais das horas em desconforto do modelo EPS\_FIB\_EPS em relação ao CON\_SAN\_PVC. Além disso, é possível observar uma redução de 68% no somatório anual de graus hora em desconforto total (frio e calor), do modelo EPS\_FIB\_EPS em relação ao CON\_SAN\_PVC.

No Gráfico 10, as temperaturas operativas horárias de ambos os modelos são plotadas em relação a faixa de conforto ao longo do ano. Observa-se predominância de desconforto por frio, com maior concentração de temperaturas abaixo do limite inferior de conforto entre os meses de maio a setembro. Observa-se que o modelo EPS\_FIB\_EPS resultou no aumento das temperaturas operativas, e apesar de reduzir o desconforto por frio, apresentou temperaturas acima do limite superior de conforto nos meses mais quentes.

Gráfico 10-Variação horária da temperatura operativa dos modelos com pior (cor vermelho) e melhor (cor verde) desempenho, na sala 4 ao longo do ano, em relação a faixa de conforto adaptativo, na cidade de Curitiba/PR.



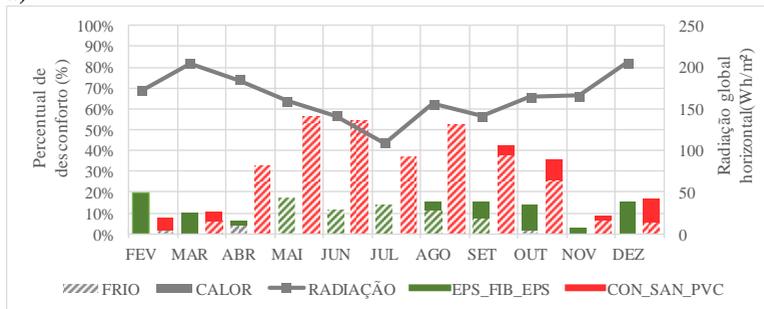
Ao analisar ao longo dos meses, no Gráfico 11(a) é possível observar a maior concentração de desconforto por frio entre maio e setembro.

No modelo CON\_SAN\_PVC, os piores resultados foram registrados no mês de maio, que apresentou 56,5% das horas ocupadas na sala de aula em desconforto por frio, com um somatório de 160,2°CCh de aquecimento, o que representa, em média, 1,3°C abaixo da temperatura limite mínima de conforto a cada hora em desconforto. Já no modelo EPS\_FIB\_EPS, o maior percentual de desconforto é observado em fevereiro, com 19,4% de desconforto por calor e 15,2°CCh de resfriamento. O que significa que a cada hora em desconforto, estão sendo reduzidos em média 1,4 °C (Gráfico 11(a) (b) (c)). A maior diferença entre os modelos foi observada no mês de maio, com redução de até 83% no somatório de graus-hora de aquecimento, do modelo EPS\_FIB\_EPS em relação ao CON\_SAN\_PVC.

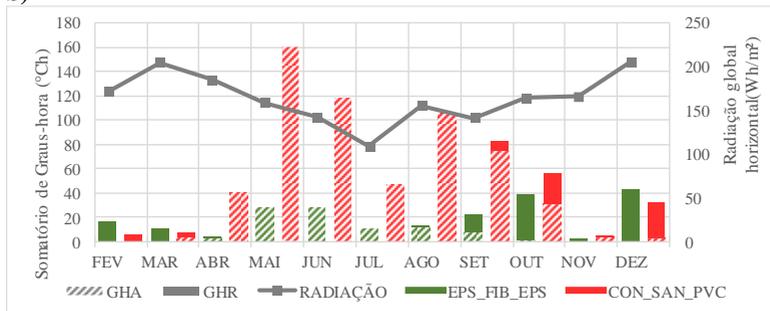
Apesar do modelo EPS\_FIB\_EPS ter apresentado o melhor desempenho, destaca-se que nos meses mais quentes houve um aumento da intensidade do desconforto, o que reflete o superaquecimento do ambiente devido ao isolamento das paredes e cobertura.

Gráfico 11- a) Percentual de desconforto mensal, b) Somatório de graus-hora de desconforto, c) Grau-hora médio, por frio (barras vazadas) e por calor (barras cheias), nos modelos com pior (cor vermelha) e melhor (cor verde) desempenho térmico, na cidade de Curitiba/PR.

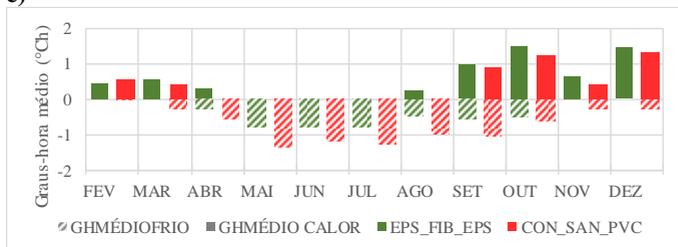
a)



b)



c)



No contexto climático de **Santa Maria**, o modelo CON\_SAN\_PVC resultou em um percentual anual de desconforto de 40,4%. 13,7% das horas ocupadas são desconfortáveis por calor, com somatório de graus-hora de 520,8°ChR e 26,7% das horas desconfortáveis por frio, com 719,7 °ChA (Gráfico 8 e Gráfico 9).

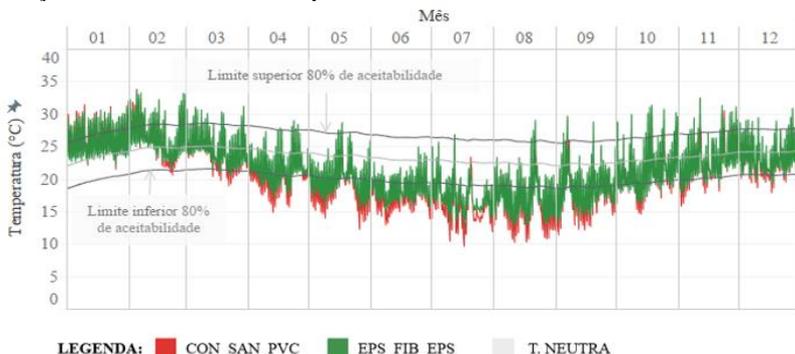
Com o modelo EPS\_FIB\_EPS foi possível reduzir em 14,3 pontos percentuais, o tempo em desconforto, assim como foram

alcançadas reduções no somatório de graus-hora anuais de até 30%, resultando em 26,1% das horas de ocupação da sala em desconforto, sendo 18,5% por calor, com um somatório de 723,9°ChR e 7,6% por frio, com um somatório anual graus-hora de 138,4°ChA (Gráfico 8 e Gráfico 9).

No

Gráfico 12, observa-se a variação das temperaturas operativas horárias, em relação à faixa de conforto, para os dois modelos. Em ambos a maior concentração de temperaturas abaixo da faixa de conforto é registrada entre os meses de abril e setembro, período em que as temperaturas médias mensais externas se encontram abaixo dos 15°C.

Gráfico 12-Variação horária da temperatura operativa dos modelos com pior (cor vermelho) e melhor (cor verde) desempenho, na sala 4 ao longo do ano, em relação a faixa de conforto adaptativo, na cidade de Santa Maria/RS.



O modelo CON\_SAN\_PVC causou maior desconforto por frio, enquanto que o EPS\_FIB\_EPS, por calor. Entre os meses de junho e agosto, o CON\_SAN\_PVC resulta em mais de 60% das horas de cada mês em desconforto por frio, atingindo 213,5°ChA no mês de agosto. Nesse mês, observa-se grau-hora médio de 1,8°C, o que representa que no período em que há desconforto, estão sendo reduzidos em média 1,8°C a cada hora em que a temperatura encontra-se abaixo do limite inferior de conforto (Gráfico 13 (a),(b) e (c)).

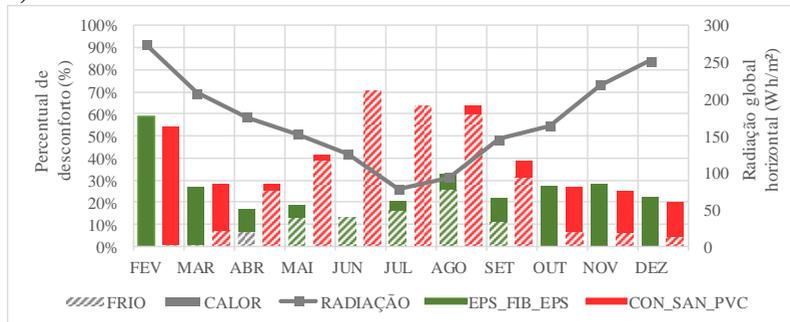
Já o EPS\_FIB\_EPS, provocou reduções de até 80% no desconforto por frio, em relação ao CON\_SAN\_PVC, entretanto, provocou um aumento de 28% no desconforto anual por calor. Nesse modelo, o mês de fevereiro se destaca com 58,9% das horas ocupadas em desconforto por calor, com grau-hora médio de 2,6°C.

Nos meses mais quentes, de outubro a março, as reduções nos somatórios de graus-hora mensais, comparando o pior e o melhor

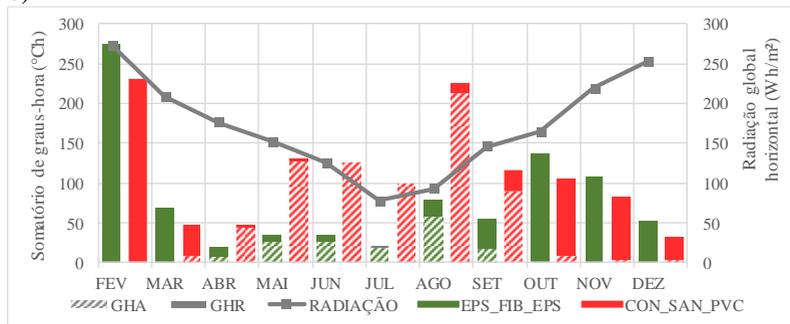
modelo, foram inferiores a 16%, já nos meses mais frios, essas reduções chegaram a 73% no mês de agosto

Gráfico 13- a) Percentual de desconforto mensal, b) Somatório de graus-hora de desconforto, c) Grau-hora médio, por frio (barras vazadas) e por calor (barras cheias), nos modelos com pior (cor vermelha) e melhor (cor verde) desempenho térmico, na cidade de Santa Maria/RS.

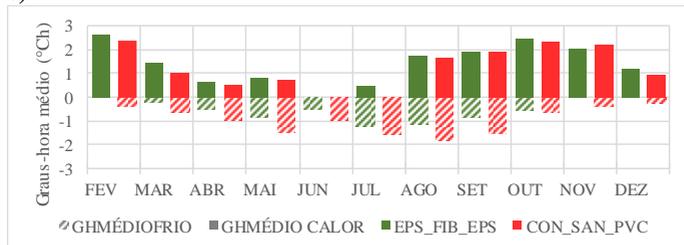
a)



b)



c)



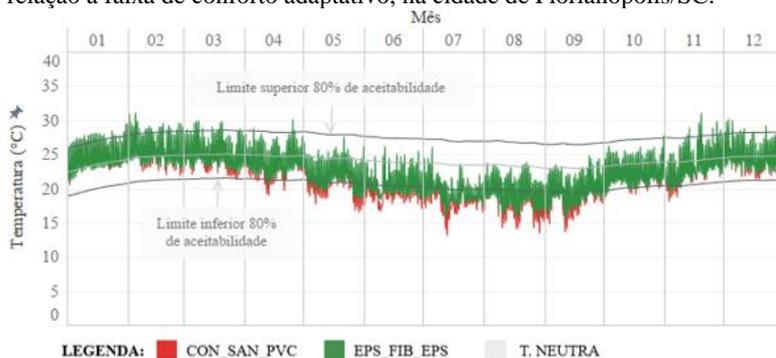
Já em **Florianópolis**, o modelo CON\_SAN\_PVC resultou em um percentual anual de desconforto de 14,1%. Sendo 4,7% das horas ocupadas desconfortáveis por calor, com somatório de graus-hora de

88,3°ChR e 9,4% das horas desconfortáveis por frio, com 127,5 °ChA (Gráfico 8 e Gráfico 9).

O modelo EPS\_FIB\_EPS reduziu o tempo em desconforto em 6,5 pontos percentuais, em relação ao pior modelo (COM\_SAN\_PVC), assim como foram alcançadas reduções no somatório de graus-hora anuais de até 27%, resultando em 8,5% das horas ocupadas na sala em desconforto, sendo 7,6% do tempo desconfortável por calor, com um somatório de 151°ChR e 0,9% por frio, com um somatório anual graus-hora de 6,02°ChA (Gráfico 8 e Gráfico 9).

No Gráfico 14, observa-se que em ambos os modelos, a maior concentração de horas em desconforto ocorre entre os meses de maio e setembro, quando as temperaturas operativas plotadas no gráfico encontram-se abaixo da faixa de conforto e atingem os 15°C.

Gráfico 14- Variação horária da temperatura operativa dos modelos com pior (cor vermelha) e melhor (cor verde) desempenho, na sala 4 ao longo do ano, em relação a faixa de conforto adaptativo, na cidade de Florianópolis/SC.



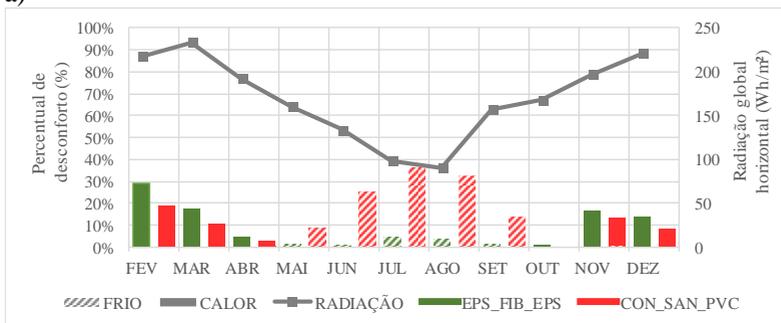
O modelo CON\_SAN\_PVC provocou maior desconforto por frio, com destaque para o mês de julho que apresentou 36% de suas horas de ocupação em desconforto, com somatório de 33°ChA. Nesse mês são reduzidos em média 0,9°C a cada hora que excede o limite inferior de conforto. Destaca-se que nesse mês a ocupação é reduzida em função das férias escolares (Gráfico 15).

Já o modelo EPS\_FIB\_EPS, provocou maior desconforto por calor, principalmente entre os meses de novembro e março, período com maiores temperaturas externas. O maior desconforto pode ser justificado porque o material isolante retarda as trocas de calor com o ambiente externo. O mês de fevereiro se destaca com 28,9% de suas horas em desconforto, com acréscimo de, em média, 1,1°C acima do limite superior de conforto.

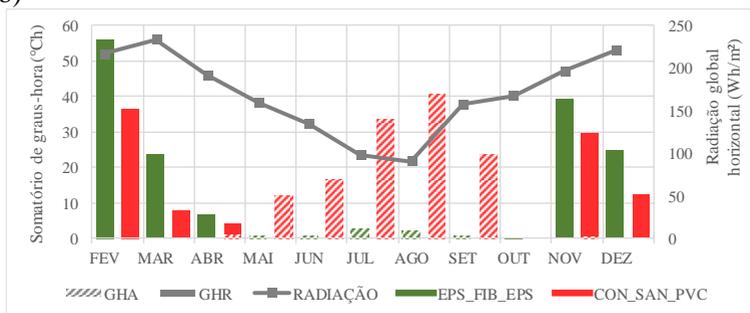
Nos meses mais frios, são observadas reduções de até 29 pontos percentuais no tempo em desconforto, no mês de agosto, quando comparados o modelo com pior e melhor desempenho. Nesse período, o modelo EPS\_FIB\_EPS apresenta 38°CChA a menos que o pior modelo, o que é equivalente a uma redução de 95% no somatório de GHA (Gráfico 15).

Gráfico 15- a) Percentual de desconforto mensal, b) Somatório de graus-hora de desconforto, c) Grau-hora médio, por frio (barras vazadas) e por calor (barras cheias), nos modelos com pior (cor vermelha) e melhor (cor verde) desempenho térmico, na cidade de Florianópolis/SC.

a)



b)



c)



Nas cidades do grupo 1, nota-se que apesar do sistema mais isolado apresentar melhores desempenhos para o período frio, nos meses mais quentes pode provocar o superaquecimento do ambiente, tendo em vista que a inércia térmica retarda a perda de calor do ambiente interno para o externo. Entretanto, por se tratarem de cidades com os maiores períodos em desconforto por frio, o uso de paredes e coberturas isoladas com baixa transmitância térmica apresenta-se como uma alternativa adequada para proporcionar maior conforto térmico as crianças durante as aulas.

#### **4.2.2 Grupo 2- Brasília (ZB4), Vitória da Conquista (ZB5), Campo Grande (ZB6), Teresina (ZB7) e Maceió (ZB8)**

Nas cidades pertencentes ao grupo 2, a necessidade de resfriamento é predominante, visto a maior ocorrência de períodos em desconforto por calor.

Para esses casos, a ventilação natural é apontada como a principal estratégia passiva para o resfriamento dos ambientes, e quando associada ao sombreamento das aberturas pode reduzir o desconforto por calor consideravelmente.

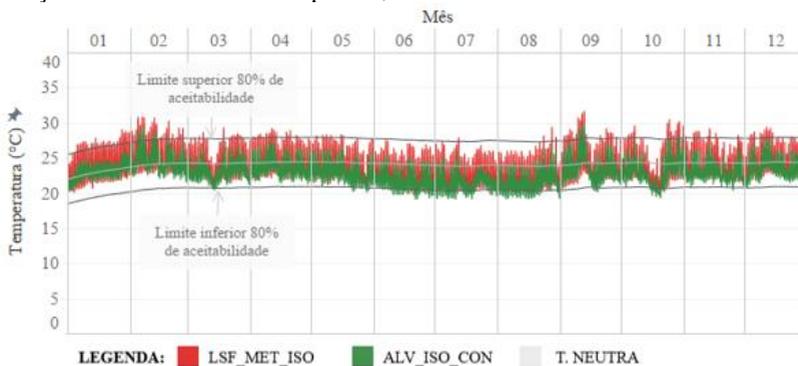
Nessas cidades, o modelo computacional que apresentou melhor desempenho térmico foi o ALV\_ISO\_CON, que é composto por paredes em alvenaria de tijolos cerâmicos, laje de concreto e isolamento de lã de vidro sob o telhado cerâmico. Observa-se que conforme visto na revisão de literatura, a cobertura é a superfície onde ocorre o maior ganho de calor, portanto, o uso de isolamento térmico retarda esse ganho. Além disso, ao contrário dos demais modelos que também possuem isolamento na cobertura, o ALV\_ISO\_CON não possui isolamento nas paredes, o que facilita a perda do calor armazenado ao longo do dia

Já o modelo que apresentou o pior desempenho foi o LSF\_MET\_ISO, que apresenta comportamento oposto ao citado anteriormente. Nele, a presença de isolamento térmico nas paredes e cobertura, impede a perda do calor armazenado nos ambientes, resultando em amplitudes diárias superiores ao do modelo ALV\_ISO\_CON.

No contexto climático da cidade de **Brasília**, o modelo com o pior desempenho (LSF\_MET\_ISO), apresentou 16,7% das horas ocupadas ao longo do ano em desconforto, com somatório anual de graus-hora de 345,4°C.h. Dessas horas, 16,6% do desconforto foi causado pelo calor e apenas 0,1% por frio. O mês de fevereiro se destacou com o maior percentual de desconforto por calor (42,8%) e um

somatório de graus-hora de 121,84°C.h. Isso significa que em 42,8% das horas de fevereiro são acrescidos em média 1,6°C à cada hora que excede a temperatura limite de conforto. Com o modelo ALV\_ISO\_CON foi obtida uma redução de 79% no somatório de graus-hora no mês em questão (Gráfico 8, Gráfico 9 e Gráfico 16).

Gráfico 16- Variação horária da temperatura operativa dos modelos com pior (cor vermelho) e melhor (cor verde) desempenho, na sala 4 ao longo do ano, em relação a faixa de conforto adaptativo, na cidade de Brasília/DF.



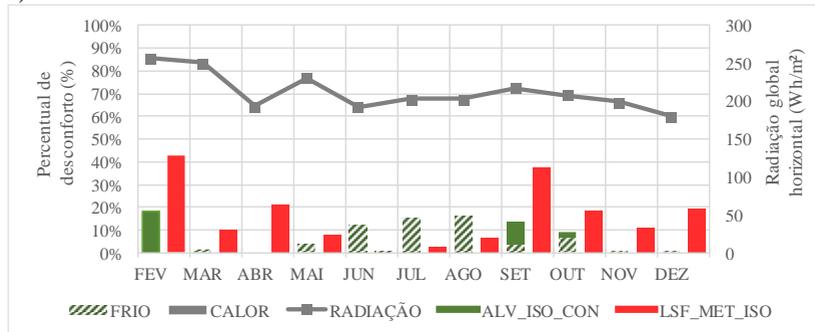
Ao analisar o modelo com o melhor desempenho (ALV\_ISO\_CON) observa-se que 7,9% das horas ocupadas ao longo do ano apresentam desconforto. Sendo 2,9% por calor, com somatório de 48,7GHR e 5% por frio, com 26,38 GHA. Apesar do desconforto anual por calor ser inferior a 10%, vale destacar a concentração desse desconforto nos meses de fevereiro, setembro e outubro, que apesar de serem os mais desconfortáveis, apresentaram percentuais inferiores a 20%.

O maior desconforto por frio foi constatado no mês de agosto, com 16,2% das horas em desconforto e 7,8GHA. Nesse mês são subtraídos, em média, 0,3°C a cada hora em desconforto por frio (Gráfico 17).

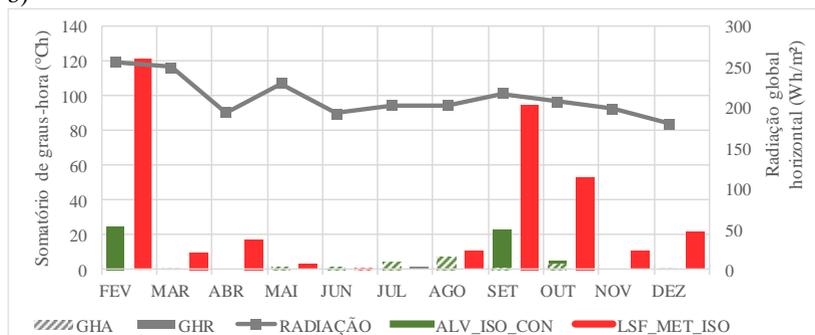
É importante ressaltar que o modelo ALV\_ISO\_CON reduziu o percentual anual de desconforto por calor em 13,7 pontos percentuais, quando comparado ao modelo LSF\_MET\_ISO. Entretanto, aumentou o desconforto por frio em 4,9 pontos percentuais. Contudo, os percentuais de desconforto resultantes do melhor modelo, permaneceram inferiores a 6% (Gráfico 17).

Gráfico 17- a) Percentual de desconforto mensal, b) Somatório de graus-hora de desconforto, c) Grau-hora médio, por frio (barras vazadas) e por calor (barras cheias), nos modelos com pior (cor vermelha) e melhor (cor verde) desempenho térmico, na cidade de Brasília/DF.

a)



b)



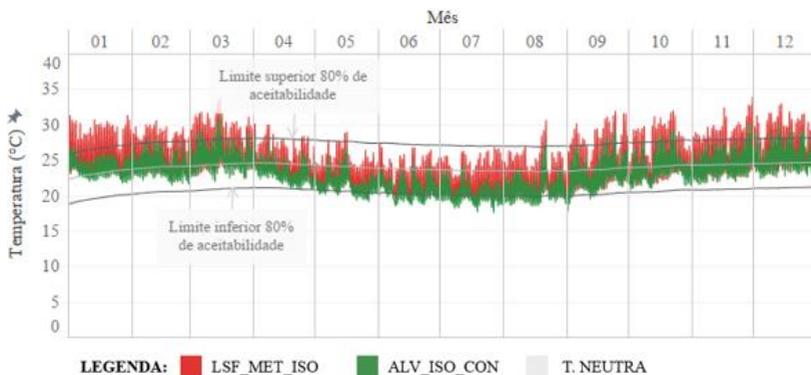
c)



Em **Vitória da Conquista**, houve maior desconforto por calor do que por frio, nos dois modelos. Como pode ser observado no Gráfico 18, o modelo LSF\_MET\_ISO apresentou apenas desconforto por calor, com temperaturas operativas superiores ao limite de conforto, entre os meses

de setembro e março, totalizando um desconforto anual de 26,6% com somatório de graus-hora de 903°ChR (Gráfico 8, Gráfico 9 e Gráfico 18).

Gráfico 18- Variação horária da temperatura operativa dos modelos com pior (cor vermelho) e melhor (cor verde) desempenho, na sala 4 ao longo do ano, em relação a faixa de conforto adaptativo, na cidade de Vitória da Conquista/BA.

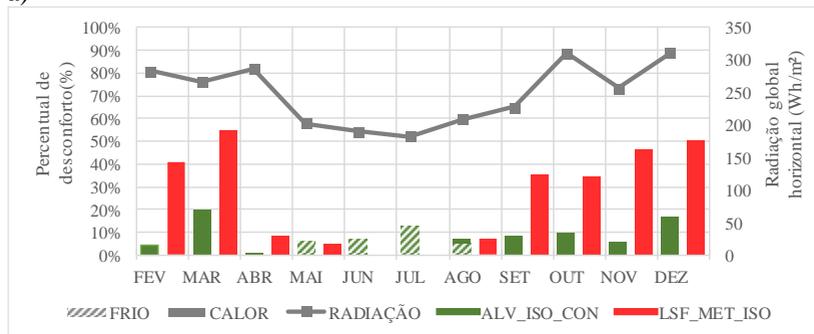


Como pode ser visto no Gráfico 19, o mês com maior desconforto foi março, com 54,5% de suas horas ocupadas em situação de desconforto, nesse período são acrescidos em média 2,1°C a cada hora que ultrapassa a temperatura limite de conforto. Em contrapartida, nesse mesmo mês, o modelo ALV\_ISO\_CON provocou reduções de até 80% no somatório de GHA.

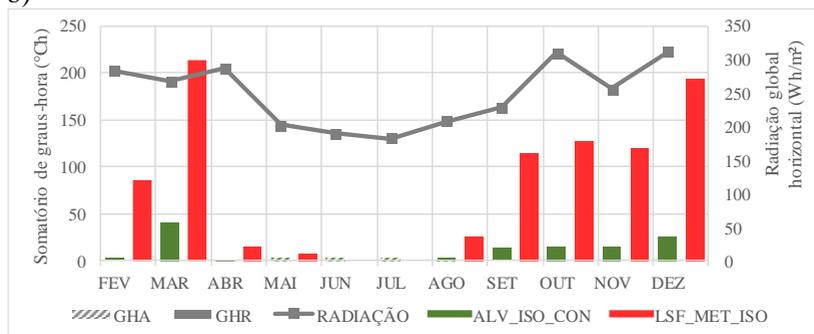
A construção com paredes em alvenaria, proporcionou reduções de 17,9 pontos percentuais no desconforto anual e reduções de 85% no somatório anual de graus-hora, em relação ao modelo LSF\_MET\_ISO. Destaca-se que o modelo ALV\_ISO\_CON gerou 2,4% de desconforto anual por frio, concentrados entre os meses de maio e agosto, com graus-hora médios inferiores a 0,5°C.

Gráfico 19- a) Percentual de desconforto mensal, b) Somatório de graus-hora de desconforto, c) Grau-hora médio, por frio (barras vazadas) e por calor (barras cheias), nos modelos com pior (cor vermelha) e melhor (cor verde) desempenho térmico, na cidade de Vitória da Conquista/BA.

a)



b)



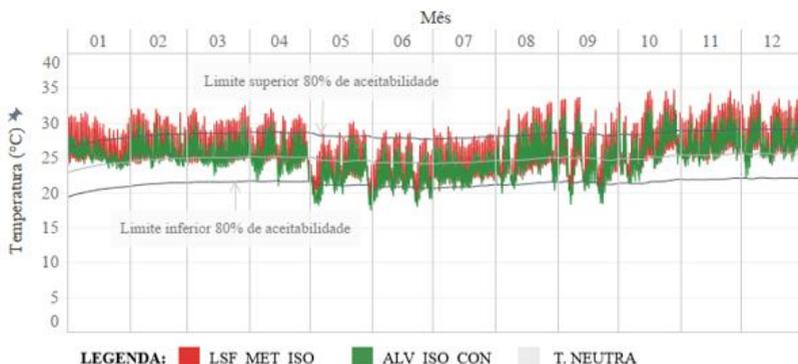
c)



Já em **Campo Grande**, o modelo LSF\_MET\_ISO resultou em 47,4% das horas ocupadas ao longo do ano em desconforto, sendo 46,5% por calor, com 1923,3 °ChR e apenas 0,9% por frio, com somatório de 9,49°ChA (Gráfico 8 e Gráfico 9).

O mês mais desconfortável foi outubro, onde a envoltória com maior isolamento ocasionou acréscimos de em média  $2,8^{\circ}\text{C}$  a cada hora que excede o limite superior de conforto, durante 60% do período de ocupação do mês. No Gráfico 20 é possível observar que apenas nos meses de maio, junho e julho as temperaturas não excedem, com frequência, o limite superior de conforto. Nos demais meses, ambos os modelos ultrapassam as temperaturas limites, atingindo os  $35^{\circ}\text{C}$  em outubro.

Gráfico 20- Variação horária da temperatura operativa dos modelos com pior (cor vermelho) e melhor (cor verde) desempenho, na sala 4 ao longo do ano, em relação a faixa de conforto adaptativo, na cidade de Campo Grande/MS.

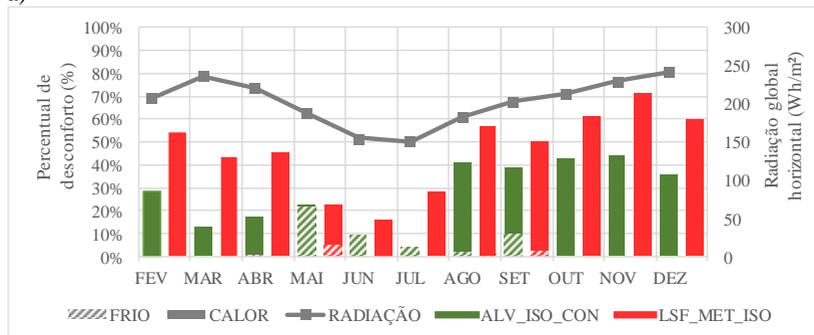


O modelo ALV\_ISO\_CON reduziu o desconforto anual em 19,2 pontos percentuais e provocou reduções no somatório anual de graus-hora de 65%, em relação ao modelo LSF\_MET\_ISO. Dos 28,2% de desconforto anual observado no modelo ALV\_ISO\_CON, 23,7% foi por calor, com  $590,8^{\circ}\text{ChR}$  e apenas 4,5%, por frio, com  $82,6^{\circ}\text{ChA}$  (Gráfico 8 e Gráfico 9).

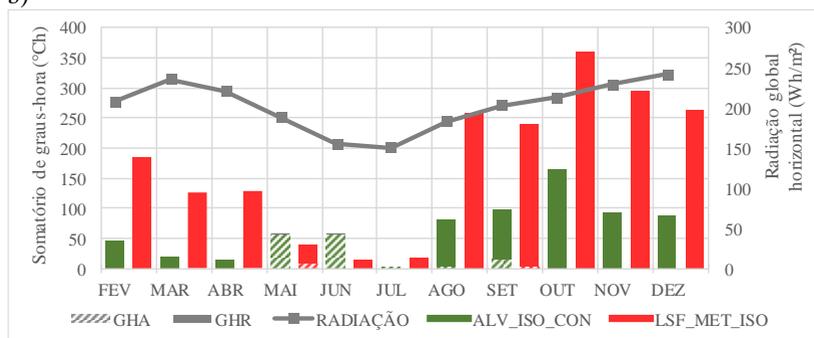
Mesmo no modelo com melhor desempenho, o mês com maior desconforto por calor foi outubro, desta vez com 43% das horas em desconforto e com acréscimo de em média  $1,8^{\circ}\text{C}$  a cada hora em desconforto. Isso significa que em outubro, a construção sem isolamento nas paredes, provocou reduções de 16 pontos percentuais no tempo em desconforto. Além disso, tornou o desconforto menos intenso, ao proporcionar reduções de 53% no somatório mensal de graus-hora de resfriamento, em relação ao modelo LSF\_MET\_ISO (Gráfico 21).

Gráfico 21- a) Percentual de desconforto mensal, b) Somatório de graus-hora de desconforto, c) Grau-hora médio, por frio (barras vazadas) e por calor (barras cheias), nos modelos com pior (cor vermelha) e melhor (cor verde) desempenho térmico, na cidade de Campo Grande/MS.

a)



b)



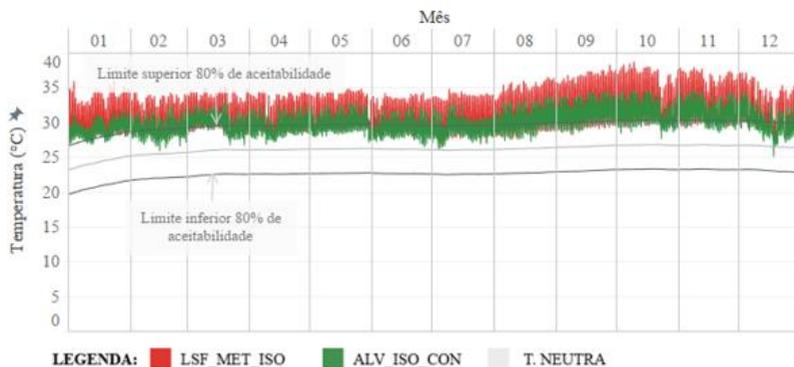
c)



Entre todas as cidades avaliadas, **Teresina** apresentou o maior desconforto por calor, não havendo registros de desconforto por frio ao longo do ano, conforme pode ser observado no Gráfico 22, onde no modelo com pior desempenho (LSF\_MET\_ISO), as temperaturas

operativas excedem o limite superior de 80% de aceitabilidade em 86,6% das horas ocupadas na sala de aula 4. Nesse período o somatório de graus-hora de resfriamento equivale a 6035°C hR.

Gráfico 22- Variação horária da temperatura operativa dos modelos com pior (cor vermelho) e melhor (cor verde) desempenho, na sala 4 ao longo do ano, em relação a faixa de conforto adaptativo, na cidade de Teresina/PI.



No Gráfico 23, observa-se que no modelo com pior desempenho, os meses com maior desconforto foram setembro e novembro. Em setembro 94,2% das horas ocupadas na sala encontram-se em desconforto, com 747°C hR. Já em novembro, 92%, com 821°C hR. O que significa que, em setembro, são acrescidos em média 4,7°C a cada hora em desconforto. Já em novembro, o acréscimo é de 4,2°C a cada hora em desconforto durante 92% do tempo.

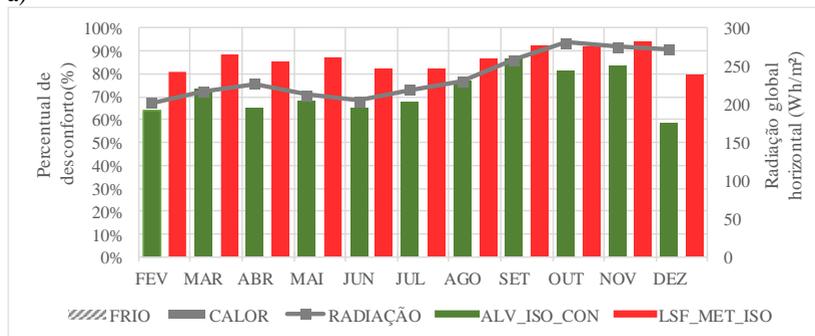
Já o modelo com melhor desempenho (ALV\_ISO\_CON), resultou em 72% das horas anuais em desconforto, com somatório de 2915 °ChR. Ou seja, o modelo em alvenaria com isolamento apenas na cobertura reduziu o desconforto anual em 14,6 pontos percentuais e o somatório de graus-hora em 51%, em relação ao modelo LSF\_MET\_ISO (Gráfico 23). No mês de setembro, houve redução de 5 pontos percentuais nas horas em desconforto e de 45% na intensidade do desconforto, em relação ao modelo LSF\_MET\_ISO. Além disso, o grau-hora médio que no pior modelo era 4,7°C, passou a ser 2,8°C no modelo com melhor desempenho, também no mês de setembro.

Observa-se que os dois sistemas resultaram em percentuais anuais de desconforto acima dos 60%, tal fato reflete as características rigorosas do clima da cidade, onde, devido as altas temperaturas externas que atingem os 40°C, a ventilação natural torna-se uma

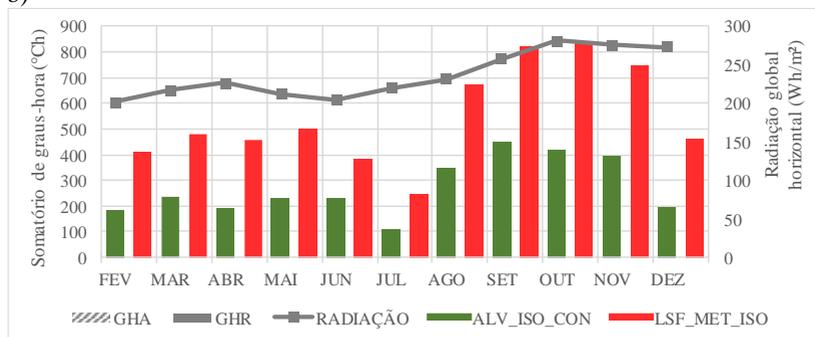
estratégia limitada, devendo ser condicionada aos períodos com temperaturas externas inferiores a 32°, de acordo com Givoni (1992), tendo em vista a incidência de ventos quentes no interior da edificação, o que pode intensificar o desconforto.

Gráfico 23- a) Percentual de desconforto mensal, b) Somatório de graus-hora de desconforto, c) Grau-hora médio, por frio (barras vazadas) e por calor (barras cheias), nos modelos com pior (cor vermelha) e melhor (cor verde) desempenho térmico, na cidade de Teresina/PI.

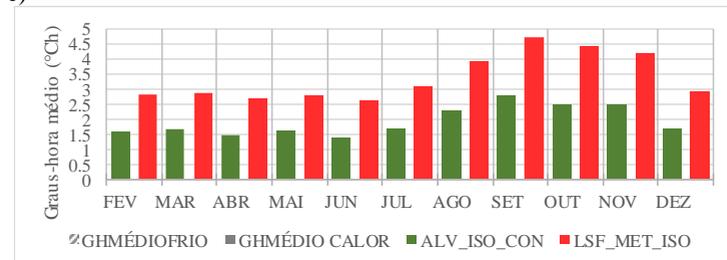
a)



b)

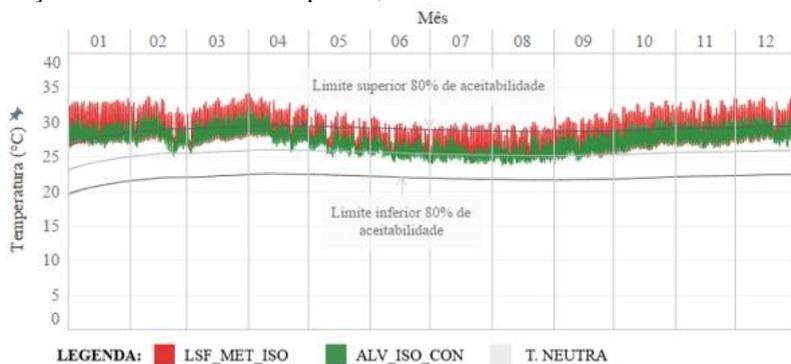


c)



No contexto climático da cidade de **Maceió**, assim como em Teresina, ocorre apenas desconforto por calor. No Gráfico 24 é possível observar que nos modelos com pior e melhor desempenho, as temperaturas operativas ultrapassam a temperatura limite de conforto durante todo o ano, principalmente entre os meses de setembro e abril.

Gráfico 24- Variação horária da temperatura operativa dos modelos com pior (cor vermelho) e melhor (cor verde) desempenho, na sala 4 ao longo do ano, em relação a faixa de conforto adaptativo, na cidade de Maceió/AL.

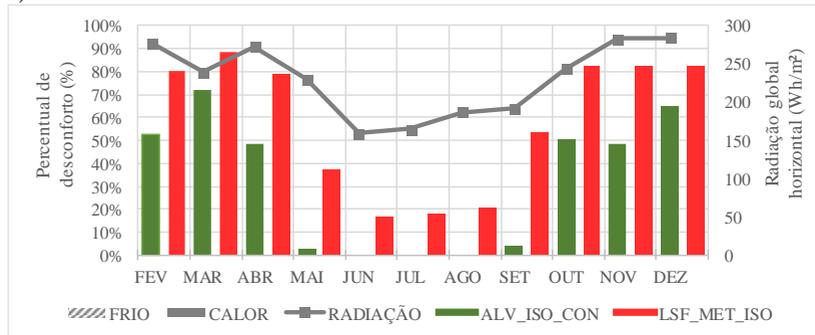


O modelo com pior desempenho (LSF\_MET\_ISO) resultou em 60% de desconforto ao longo do ano, com somatório de graus-hora anual de 1907°C hR. Nesse modelo, o maior desconforto foi observado no mês de março, onde durante 88,4% das horas ocupadas, são acrescidos em média 2,1 °C a cada hora que excede o limite de conforto. Nesse período são registradas as maiores temperaturas assim como maior radiação solar incidente, e por isso, uma edificação com isolamento térmico na envoltória pode prejudicar as condições de conforto dos usuários do ambiente (Gráfico 25)

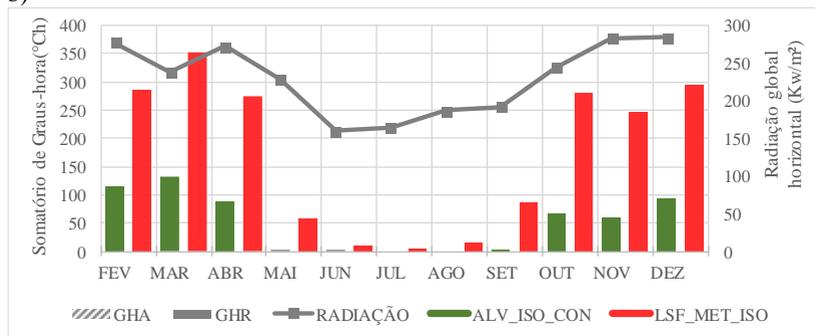
Já o modelo com melhor desempenho (ALV\_ISO\_CON), resultou em um percentual de desconforto com 27,3 pontos percentuais a menos que o modelo LSF\_MET\_ISO. Além disso, implicou em uma redução de 70% no somatório anual de graus hora em relação ao pior modelo. No modelo ALV\_ISO\_CON, o mês de março também apresentou o maior desconforto, entretanto, o percentual de horas ocupadas em desconforto passou a ser 72%, com acréscimo de, em média, 1°C a cada hora em desconforto (Gráfico 25).

Gráfico 25- a) Percentual de desconforto mensal, b) Somatório de graus-hora de desconforto, c) Grau-hora médio, por frio (barras vazadas) e por calor (barras cheias), nos modelos com pior (cor vermelha) e melhor (cor verde) desempenho térmico, na cidade de Maceió/AL.

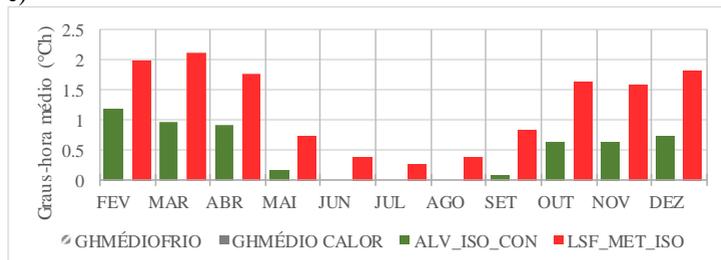
a)



b)



c)



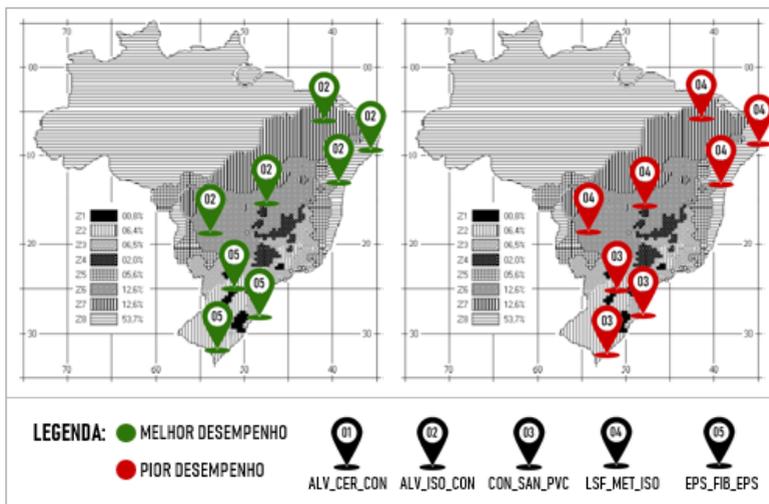
As cidades do grupo dois apresentaram em comum, maior período em desconforto por calor. Nesses casos, uma envoltória que permita as trocas de calor com o ambiente externo ao mesmo tempo em que se promove a ventilação natural se mostrou adequada para esses

climas. Destaca-se que o uso de isolamento térmico apenas na cobertura foi suficiente para melhorar as condições de conforto no ambiente.

Assim, ao comparar o desempenho de todos os modelos avaliados nessa pesquisa, para cada contexto climático pode-se quantificar o desconforto que cada sistema construtivo pode oferecer ao setor pedagógico do CMEI padrão do tipo B.

Na Figura 70 é possível observar um diagrama síntese onde são plotados os modelos com pior e melhor desempenho levando em consideração os valores absolutos de percentual e somatório anual de graus-hora em desconforto.

Figura 70- Mapa das Zonas Bioclimáticas Brasileiras com identificação dos modelos que apresentaram o pior e o melhor desempenho térmico em cada cidade.



#### 4.2.3 Análise de desempenho térmico comparada a um sistema construtivo usual.

De acordo com dados disponibilizados pelo FNDE (2019), dos 2.528 CMEIs tipo B já construídos pelo programa, até o ano de 2019, 96% são compostos por alvenaria de tijolos cerâmicos, e apenas 4% foram construídos com as metodologias inovadoras. Dessa forma, o modelo composto por alvenaria foi utilizado como parâmetro de análise para comparação dos desempenhos dos demais modelos, visto que é o sistema construtivo mais usual e recorrente no Brasil.

Ao adotar o modelo ALV\_CER\_CON como modelo referência em relação aos demais, foi possível observar que nas cidades do grupo 1 (Curitiba, Santa Maria e Florianópolis), o modelo EPS\_FIB\_EPS apresentou as maiores reduções no percentual anual de horas em desconforto, principalmente em Curitiba, onde houve incremento de até 17% nas condições de conforto na sala de aula avaliada. Nessas cidades, os modelos ALV\_ISO\_CON e CON\_SAN\_PVC apresentaram desempenho semelhante ao modelo ALV\_CER\_CON, com variação percentual inferior a 3% (Gráfico 26).

Por se tratarem de cidades com maior concentração de frio ao longo do ano, os sistemas isolados se mostram mais adequados do que o sistema usual, principalmente porque o modelo ALV\_CER\_CON apresenta inércia térmica inferior aos modelos LSF\_MET\_ISO e EPS\_FIB\_EPS, fato que favorece as temperaturas internas acompanharem mais rápido as oscilações das temperaturas externas.

Entretanto, é importante ressaltar que o uso excessivo de isolamento restringe as perdas de calor em edificações com altas cargas internas, como é o caso da edificação analisada nesta pesquisa, o que pode gerar desconforto nos períodos mais quentes do ano.

Já no grupo 2, composto por Brasília, Vitória da Conquista, Campo Grande, Teresina e Maceió, o modelo ALV\_ISO\_CON foi o único que apresentou melhorias consideráveis, em relação ao modelo ALV\_CER\_CON, com reduções de até 7% no tempo em desconforto ao longo do ano na cidade de Maceió. Tal resultado indica que nessas regiões, onde há predominância de desconforto por calor, a alvenaria é o sistema mais adequado, principalmente quando o ganho de calor pela cobertura é controlado através do uso de isolamento térmico.

Nesse grupo, os demais modelos apresentaram desempenho inferior ao ALV\_CER\_CON, principalmente os modelos mais isolados, como o LSF\_MET\_ISO e o EPS\_FIB\_EPS, que apresentaram aumentos de até 20% e 18%, respectivamente, no percentual de desconforto anual em relação ao modelo de referência, em Maceió. Com o aumento da resistência térmica do envelope, provoca-se a redução das perdas de calor por condução no ambiente interno, por isso em cidades com altas temperaturas externas o uso de isolamento em toda envoltória pode ser prejudicial ao conforto térmico.

Gráfico 26- Variação do Percentual de horas em desconforto em relação ao modelo ALV\_CER\_CON (parede em alvenaria de tijolos cerâmicos, com telhado cerâmico e laje em concreto), para as oito cidades.

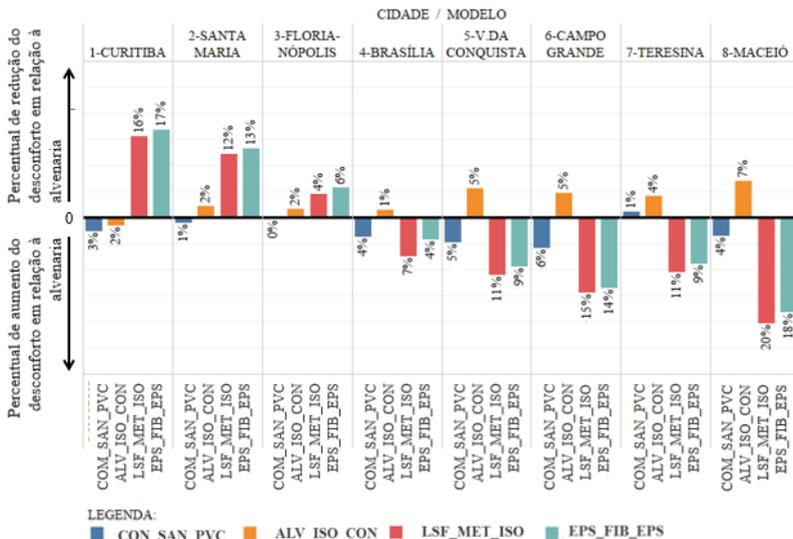
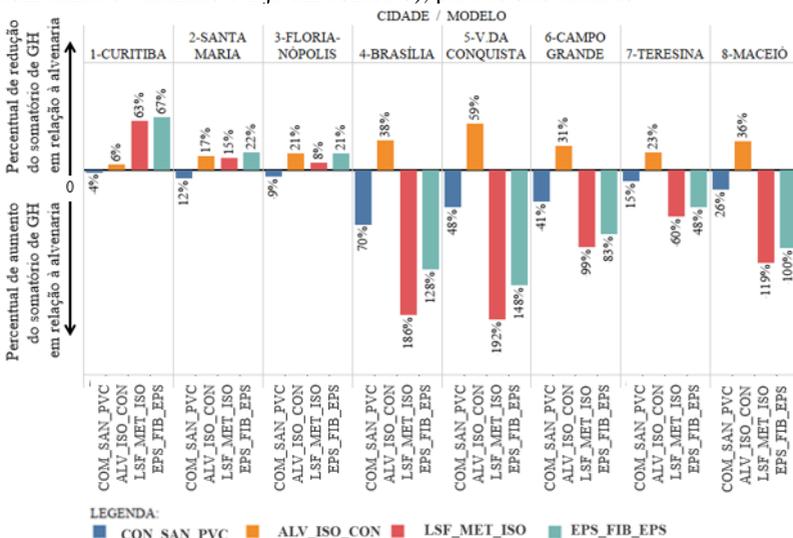


Gráfico 27- Variação percentual do somatório anual de graus-hora total, em relação ao modelo ALV\_CER\_CON (parede em alvenaria de tijolos cerâmicos, com telhado cerâmico e laje em concreto), para as oito cidades.



Ao analisar os somatórios anuais de graus-hora, nas cidades do grupo 1, observou-se que apenas o sistema CON\_SAN\_PVC provocou aumento no somatório de graus-hora em relação ao modelo de referência. Em contrapartida, na cidade de Curitiba, o modelo EPS\_FIB\_EPS provocou reduções de até 67% nos graus-hora de desconforto em relação ao ALV\_CER\_CON. Já em Santa Maria e Florianópolis, as reduções foram equivalentes para os modelos LSF\_MET\_ISO, EPS\_FIB\_EPS e ALV\_ISO\_CON, com em média 19% de reduções nos somatórios de graus-hora (Gráfico 27).

Já nas cidades do grupo 2, observou-se maior intensificação de desconforto no modelo LSF\_MET\_ISO, que atinge os 192% de aumento no somatório de graus-hora anuais, em relação ao modelo ALV\_CER\_CON, na cidade de Vitória da Conquista. Já o modelo ALV\_ISO\_CON apresentou reduções de até 59% em relação ao modelo de referência, na mesma cidade (Gráfico 27).

Os resultados obtidos evidenciam que os sistemas leves e isolados se apresentaram mais adequados para climas frios do que as construções em alvenaria. Já em climas quentes, paredes em alvenaria, apesar de não serem as mais econômicas, são as mais adequadas sobretudo quando são combinadas com coberturas isoladas. Tais resultados indicam que embora a racionalização da construção civil ofereça benefícios quanto aos custos e redução de resíduos na obra, a mesma pode ser prejudicial ao desempenho térmico dos ambientes na maioria das zonas bioclimáticas brasileiras, demonstrando assim a importância de adaptar os projetos e sistemas construtivos aos contextos climáticos em que serão inseridos.

## 5 CONCLUSÕES

Os projetos padronizados do programa Proinfância surgem como uma alternativa para reduzir o déficit educacional no país, porém muitas vezes são construídos sem a devida adequação ao clima e ao contexto urbano em que são inseridos, gerando desconforto térmico aos usuários. Portanto, verificou-se a necessidade de avaliar o desempenho térmico desses projetos por meio de simulações computacionais. Para isso foi feita uma calibração do modelo computacional utilizado nas simulações termo-energéticas.

Os resultados da calibração indicaram que os ajustes realizados no modelo, com base na literatura, ocasionaram desvios médios de 0,71 e soma dos erros quadráticos das quatro salas de 3,64. Com a calibração foram obtidas reduções de até 23% nos erros e 27% nos desvios, com diferenças entre temperaturas monitoradas e simuladas de em média 0,7°C.

Os parâmetros que favoreceram a redução de erros e desvios na calibração foram a modelagem do solo com o objeto GroundDomain, o uso do algoritmo de convecção Adaptive, o valor de 0,25 para absorvância de uma parede na cor branco gelo, os valores mínimos de infiltração indicados por Liddament (1986) e o valor de 0,7 para os coeficientes de descarga das esquadrias.

Com diferenças entre dados medidos e simulados inferiores a 1°C, o modelo calibrado foi utilizado para as análises de desempenho.

Ao caracterizar o comportamento térmico de cinco modelos representativos dos sistemas construtivos utilizados no projeto padrão tipo B do programa Proinfância, pode-se verificar que as salas de aula apresentam desempenhos bastante diferentes a depender do contexto climático em que o projeto está inserido.

Ao analisar o desempenho de todos os modelos nas salas de aula do CMEI, em cada cidade, foi possível observar que em contextos climáticos mais frios, como é o caso de Curitiba e Santa Maria, as horas ocupadas ao longo do ano nas salas de aula ultrapassam os 30% de desconforto por frio, com somatórios de graus hora de aquecimento (GHA) que atingem os 1000°C.h. Em Florianópolis e Brasília também observou-se desconforto por frio, entretanto, com percentuais anuais máximos inferiores a 11% e GHA máximo de aproximadamente 300°C.h.

Nos demais contextos, o CMEI apresentou percentuais de desconforto por frio inferiores a 5% e desconforto por calor de até 90%, como é o caso de Teresina, que atinge os 5500°C.h de resfriamento,

sendo a cidade que apresentou os resultados mais desfavoráveis ao conforto dos usuários. Tal resultado reflete que a construção do projeto padrão em Teresina não é indicada, devido aos longos períodos em desconforto ocasionados pelas altas temperaturas externas.

Em relação ao desempenho das quatro salas de aula nas oito cidades, constatou-se que a orientação do CMEI não teve influência significativa no desempenho das mesmas, visto que o maior ganho de calor acontece pela cobertura. Entretanto, embora a diferença entre os percentuais de desconforto das salas com melhor e pior desempenho tenha sido inferior a 6 pontos percentuais em todas as cidades, a sala 4 apresentou os maiores percentuais de desconforto em relação as demais na maioria das cidades, com exceção de Teresina, onde a sala 2 apresentou o pior desempenho.

Quanto aos modelos simulados, observam-se resultados semelhantes nas zonas 01, 02 e 03, onde os modelos mais isolados como o LSF\_MET\_ISO e o EPS\_FIB\_EPS apresentaram melhores desempenhos térmicos, com percentuais de desconforto por frio próximos a zero. Já os piores desempenhos dessas três zonas foram observados no modelo CON\_SAN\_PVC que atingiu os 38% das horas em desconforto (1003°Ch) na Zona 01 (Santa Maria).

Nas Zonas 04, 05, 06, 07 e 08, observou-se que a construção em alvenaria com o incremento do isolamento térmico no telhado ofereceu melhor desempenho às salas, sendo o modelo ALV\_ISO\_CON o mais adequado para essas cidades. Já os modelos com isolamento térmico nas paredes (LSF\_MET\_ISO e EPS\_FIB\_EPS) apresentaram o pior desempenho, com até 87% das horas ocupadas em desconforto ao longo do ano e somatórios anuais de GH de até 6035°Ch, na cidade de Teresina.

Vale ressaltar que em cidades com climas amenos, como é o caso de Florianópolis e Brasília, os resultados dos cinco modelos apresentaram pouca variação nos percentuais e somatórios de graus-hora de desconforto. Já nas cidades com temperaturas externas mais altas, como é o caso de Teresina e Maceió observou-se maior divergência entre os desempenhos dos modelos. Portanto, nas cidades mais quentes a escolha do modelo a ser construído deverá ser mais criteriosa.

Verificou-se diferenças de até 3500°Ch de resfriamento entre o sistema como melhor desempenho (ALV\_ISO\_CON) e com pior desempenho (LSF\_MET\_ISO), em Teresina. Essas diferenças refletem a intensidade do desconforto provocada por cada modelo. Enquanto no modelo ALV\_ISO\_CON são acrescidos, ao longo do ano, em média 2°C a cada hora que ultrapassa o limite superior de conforto, no modelo

LSF\_MET\_ISO são acrescidos em média 3,42°C, tornando o desconforto da sala de aula mais intenso.

Ao adotar o modelo ALV\_CER\_CON como modelo referência em relação aos demais, foi possível observar que nas cidades do grupo 1 (Curitiba, Santa Maria e Florianópolis), o modelo EPS\_FIB\_EPS apresentou as maiores reduções no percentual anual de horas em desconforto, principalmente em Curitiba, onde houve incremento de até 17% nas condições de conforto na sala de aula avaliada

Já no grupo 2, composto por Brasília, Vitória da Conquista, Campo Grande, Teresina e Maceió, o modelo ALV\_ISO\_CON apresentou os melhores resultados, em relação ao modelo ALV\_CER\_CON, com reduções de até 7% no tempo em desconforto ao longo do ano na cidade de Maceió.

Nos meses mais frios, independente dos modelos, observou-se a necessidade de aliar a inércia térmica com aquecimento solar passivo e ventilação seletiva, de forma que as trocas de ar sejam permitidas nas horas mais quentes do dia e sejam evitadas durante a noite, para manter o calor armazenado na edificação.

Já nos meses mais quentes, verificou-se que a alta inércia deve ser associada ao sombreamento das fachadas e aberturas, de modo que o ganho de calor solar seja evitado. A ventilação seletiva também é recomendada nesses casos, para que os ventos quentes sejam evitados durante o dia e sejam captados durante a noite, quando a temperatura externa é reduzida e pode promover o resfriamento dos ambientes.

Nesse sentido, a presente pesquisa constatou que um CMEI com a mesma configuração de parede e cobertura, quando construído em diferentes cidades pode apresentar variações no percentual anual de desconforto de até 77 pontos percentuais e no somatório anual de graus-hora em desconforto, variações de até 97%, como é o caso do modelo EPS\_FIB\_EPS, que apresentou o melhor desempenho em Florianópolis e o pior em Teresina. A primeira cidade, apresenta clima ameno durante a maior parte do ano, enquanto a segunda, clima predominantemente quente, o que pode justificar tal resultado.

Os resultados obtidos evidenciam que embora a racionalização da construção civil ofereça benefícios quanto aos custos e redução de resíduos na obra, a mesma é prejudicial ao desempenho térmico dos ambientes. Tal fato reforça a necessidade de melhorias no desempenho térmico da edificação estudada, principalmente por meio da adaptação do projeto à cada contexto climático em que será inserido.

De modo geral, a pesquisa contribui com a análise crítica dos modelos padronizados e, conseqüentemente, com a melhoria do

ambiente de ensino nessas edificações padronizadas, pois ao indicar o desempenho alcançado pelas diferentes configurações de paredes e coberturas torna-se possível identificar as tipologias construtivas mais adequadas a cada zona bioclimática do país.

Por fim, recomenda-se atenção quanto ao modo de construir nas diversas cidades do país, regionalizando as construções de modo que atendam às necessidades climáticas locais.

## 5.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Algumas limitações foram encontradas ao longo da pesquisa, principalmente relacionadas ao processo de simulação computacional:

- A pesquisa limitou-se a apenas uma tipologia de projeto padrão do FNDE.
- Diferentes condições de entorno não foram avaliadas. Essa análise seria importante visto as diversas possibilidades de localização do projeto que poderiam interferir diretamente na incidência da ventilação e no sombreamento da edificação.
- A ventilação natural foi considerada de forma simplificada, pois o EnergyPlus calcula os coeficientes de pressão do vento para edificações retangulares. Nesse caso, o uso de coeficientes de pressão do vento obtidos por meio de simulações com CFX poderia resultar em dados mais precisos.
- A sensação térmica dos usuários não foi abordada na pesquisa, devido à baixa faixa etária das crianças. Além disso, foi feita uma aproximação da taxa metabólica das crianças, considerando que as taxas disponibilizadas pelas normas são relativas a uma pessoa adulta.
- A análise pelo método Graus-hora não contempla condições de velocidade do vento e umidade, que seriam importantes para avaliar o conforto térmico.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Sugere-se replicar o método aqui proposto para avaliar o desempenho de outras tipologias de projeto padrão do FNDE.
- Análises relacionadas ao consumo energético das creches padronizadas.

- Avaliar diferentes configurações de janelas e estratégias de ventilação natural no projeto em questão
- Estudar as taxas de renovação de ar nas salas de aula, tendo em vista que a qualidade do ar nesses espaços é afetada pela alta densidade de ocupação
- Simular o impacto que diferentes condições de entorno podem oferecer ao desempenho térmico de um projeto padrão de CMEI.
- Avaliar por meio de ferramentas CFX a distribuição dos fluxos de ar nas salas de aula.
- Avaliar o custo benefício de cada configuração de envoltória.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKUTSU, M.; VITTORINO, F. A Tendência Atual dos Métodos de Avaliação do Desempenho Térmico e Energético de Edificações. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4., 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: ANTAC, 1997. p. 147-151.

ALMEIDA, R. M. S. F.; RAMOS, N. M. M.; DE FREITAS, V. P. Thermal comfort models and pupils' perception in free-running school buildings of a mild climate country. **Energy and Buildings**, v. 111, p. 64–75, 1 jan. 2016.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55** – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, Georgia: ASHRAE, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575**: Edifícios habitacionais até cinco pavimentos – desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

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

BARBOSA, K. H. **Avaliação da influência da orientação solar, associada ao comportamento do usuário, no desempenho térmico de uma tipologia de residência unifamiliar em Goiânia**. Florianópolis, SC, 2017. 225p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil.

BARTBETTA, P. A. **Estatística aplicada às Ciências Sociais**. 9. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2015.

BATISTA, J. O. **Arquitetura e seu desempenho térmico no contexto do semiárido alagoano**: estudos de caso em Santana do Ipanema. Florianópolis, 2006. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Santa

Catarina, Florianópolis, 2006.

BATISTA, J. O. **Eficácia da ventilação mecânica noturna para resfriamento**: impacto de estratégias híbridas de ventilação no desempenho térmico de residência em Florianópolis-SC. Tese (Doutorado). Florianópolis, SC, 2011. 286 p. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. Influências dos algoritmos de condução e convecção sobre os resultados de simulações do comportamento térmico de edificações. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 4, p. 79–97, dez. 2011.

BECCALI, M. et al. Vernacular and bioclimatic architecture and indoor thermal comfort implications in hot-humid climates: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1726–1736, 1 fev. 2018.

BECKER, Rachel; GOLDBERGER, Itamar; PACIUK, Monica. Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation. **Building And Environment**, [s.l.], v. 42, n. 9, p.3261-3276, set. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.08.016>.

BERTAGNOLIO, S.; LEMORT, V.; ANDRE, P. **IEA-ECBCS Annex 53: Total Energy Use in Buildings - Analysis and evaluation methods. Simulation assisted audit & Evidence based calibration methodology**. Laboratoire de Thermo-Dynamique, Université de Liege, Belgium, 2010.

BRASIL. Constituição (1990). Lei nº 8.069, de 13 de julho de 1990. **Dispõe Sobre O Estatuto da Criança e do Adolescente e Dá Outras Providências**. Brasília, DF, 16 set. 1990.

\_\_\_\_\_. Constituição (1996). Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996. **Estabelece As Diretrizes e Bases da Educação Nacional**. Brasília, DF, 23 dez. 1996.

BRE, F. et al. Residential building design optimisation using sensitivity analysis and genetic algorithm. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 853–866, 1 dez. 2016a.

CHENG, V.; NG, E.; GIVONI, B. Effect of envelope colour and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate. **Solar Energy**, v. 78,

n. 4, p. 528–534, 1 abr. 2005.

CORRÊA, Iran Carlos Stalliviere. **Topografia aplicada a Engenharia Civil**. 2016. Disponível em: <<http://biblioteca.univap.br/dados/000020/0000201a.pdf>>. Acesso em: 14 jul. 2018.

COSTA, Vanessa Aparecida Caieiro. **Trocas de calor entre edificações térreas e o solo e sua modelagem no pré-processador Slab**. São Carlos, 2017. 237p. Dissertação (mestrado) Programa de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2017.

DANIEL, L.; WILLIAMSON, T.; SOEBARTO, V. Comfort-based performance assessment methodology for low energy residential buildings in Australia. **Building and Environment**, v. 111, p. 169–179, 1 jan. 2017.

DESOGUS, G.; FELICE CANNAS, L. G.; SANNA, A. Bioclimatic lessons from Mediterranean vernacular architecture: The Sardinian case study. **Energy and Buildings**, v. 129, p. 574–588, 1 out. 2016.

DIAS, D. et al. Impact of using cool paints on energy demand and thermal comfort of a residential building. **Applied Thermal Engineering**, v. 65, n. 1–2, p. 273–281, 1 abr. 2014.

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

EERE- DEPARTMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. Ground Heat Transfer in EnergyPlus. In: Documentation, EnergyPlus version 8.5 - Auxiliary programs. Version 8.8 ed. [s.l.:s.n.]. p. 103-142. USA 2016.

ENERGYPLUS. **Engineering Manual**. Disponível em: <[www.energyplus.gov](http://www.energyplus.gov)>. Acesso em: 10 abr. 2018.

FABRIZIO, Enrico; MONETTI, Valentina. Methodologies and Advancements in the Calibration of Building Energy Models. **Energies**, [s.l.], v. 8, n. 4, p.2548-2574, 31 mar. 2015. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en8042548>.

FLOURENTZOU, F; VAN DER MAAS, J; ROULET, C.-A. Natural ventilation for passive cooling: measurement of discharge coefficients. **Energy and Buildings**, v.27, p.283-292. 1998

FNDE, Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação - **Proinfância**. Disponível em: <<http://www.fnde.gov.br/programas/proinfancia/proinfancia-apresentacao>>. Acesso em: 31 jan. 2017.

**Memorial descritivo do projeto tipo B**. Disponível em: <<http://www.fnde.gov.br/programas/proinfancia/eixos-de-atuacao/projetos-arquitetonicos-para-construcao/item/4816-tipo-b>>. Acesso em: 14 dez. 2017.

GIULI, Valeria de; POS, Osvaldo da; CARLI, Michele de. Indoor environmental quality and pupil perception in Italian primary schools. **Building And Environment**, [s.l.], v. 56, p.335-345, out. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.024>.

GIVONI, B. Comfort climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, p. 11–23, 1992.

GU, L. Airflow network modeling in *EnergyPlus*. In: Building Simulation 2007. **Proceedings...** Pequim, China. 2007.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Tabelas para cálculos no sistema de projeção universal transversa de mercator (UTM) : elipsóide internacional de 1967**. [s.l.] IBGE, 1995.

INMET- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (Org.). **Estações Automáticas**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>>. Acesso em: 17 maio 2018.

JIANG, J. et al. A study on pupils' learning performance and thermal comfort of primary schools in China. **Building and Environment**, v. 134, p. 102–113, 15 abr. 2018.

KALAMEES, Targo et al. Simulated Influence of Indoor Climate and Ventilation on Schoolwork Performance in Estonian Manor Schools. **International Journal Of Ventilation**, [s.l.], v. 14, n. 2, p.153-164, set. 2015. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/14733315.2015.11684077>.

KOWALTOWSKI, D. C. K. **Arquitetura escolar: o projeto do ambiente de ensino**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LABAKI, L. C.; KOWALTOWSKI, D. C. C. K. Bioclimatic and vernacular design in urban settlements of Brazil. **Building and Environment**, v. 33, n. 1, p. 63–77, jan. 1998.

LABEEE, LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. Downloads. **Arquivos climáticos INMET em formato EPW**. Disponível em <http://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016>. Acesso em: 10 jan 2018.

LAM, J. C.; YANG, L.; LIU, J. Development of passive design zones in China using bioclimatic approach. **Energy Conversion and Management**, v. 47, n. 6, p. 746–762, 1 abr. 2006.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L; PEREIRA, F. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: Ed. PW, 2013.

LAMBERTS, Roberto. **Heat Transfer Through Roofs of Low Cost Brazilian Houses**. Tese (PhD) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Leeds. Leeds, 1988. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/node/118>>. 2015. Visualizado em abr. 2018.

LAMBERTS, Roberto; PAPST, Ana Lígia. **Comparação do desempenho térmico de três ambientes residenciais naturalmente ventilados em Florianópolis, sul do Brasil**. 2002. Disponível em: <[http://www.infohab.org.br/entac2014/2002/Artigos/ENTAC2002\\_0105\\_114.pdf](http://www.infohab.org.br/entac2014/2002/Artigos/ENTAC2002_0105_114.pdf)>. Acesso em: 04 fev. 2017.

LIDDAMENT, M. W. **Air infiltration calculation techniques - an applications guide**. Bracknell, UK: AIVC. 1986.

MARQUES, Tássia Helena Teixeira. **Influência das propriedades térmicas da envoltória opaca no desempenho de habitações de interesse social em São Carlos, SP**. 2013. 143p. Dissertação (Mestrado)- Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

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

MENDELL, M. J.; HEATH, G. A.. Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. **Indoor Air**, [s.l.], v. 15, n. 1, p.27-52, jan. 2005. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00320.x>.

MIRRAHIMI, S. et al. The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot-humid climate.

**Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1508–1519, 1 jan. 2016.

MUELLER, C. M. **Espaços de ensino-aprendizagem com qualidade ambiental: o processo metodológico para elaboração de um anteprojeto**. 2007. 258 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007

MUNEER, T. (Ed.), 2004. **Solar radiation and daylight models**, 2º edição. Elsevier.

NYERS, J.; KAJTAR, L.; TOMIĆ, S.; NYERS, A. **Investment-savings method for energy-economic optimization of external wall thermal insulation thickness**. *Energy and Buildings* 86, 2015. P. 268-274.

OLGYAY, Victor. **Arquitetura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. Barcelona [Espanha]: Gustavo Gili, 2008. 203 p. ISBN 9788425214882.

OLIVEIRA, Liader S.; SILVA, Antônio César S.B. da; CUNHA, Eduardo. G. da; ROSA, César. R. **Análise das condições de conforto térmico em habitações de interesse social na região sul do RS**. In: ENTAC 2010– XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Anais... Canela, 2010. Disponível em: <[http://www.infohab.org.br/entac2014/2010\\_5.php](http://www.infohab.org.br/entac2014/2010_5.php)> Visualizado em fev. 2019.

PALIOURAS, P; MATZAFLARAS, N; PEUHKURI, R. H; KOLARIK, J. Using measured indoor environment parameters for calibration of building simulation model- a passive house case study. 6th International Building Physics Conference. **Energy Procedia**, [S.I.], v. 78, p. 1227-1232, 2015.

PAPST, A. L.; LAMBERTS, R. Comparação do desempenho térmico de três ambientes residenciais naturalmente ventilados em Florianópolis, sul do Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2002. **Anais...** Foz do Iguaçu: ENTAC, 2002.

PASSOS, B. A, **Impacto do uso de isolante térmico em habitações de Interesse Social nas diferentes condições climáticas brasileiras**. Orientação: Fernando Simon Westphal. Florianópolis, SC. 2016. 154f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura E Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de

Santa Catarina- Florianópolis, 2016.

PASSOS, Isabela C. da S. **Clima e arquitetura habitacional em Alagoas: estratégias bioclimáticas para Maceió, Palmeira dos Índios e Pão de Açúcar**. 2009. 173f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmicas do Espaço Habitado) – Universidade Federal de Alagoas. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Maceió, 2009.

PEDRINI, A.; WESTPHAL, F.S.; LAMBERTS, R. A methodology for building energy modelling and calibration in warm climates. **Building and Environment**, [S.I.], v. 37, p. 903-912, 2002.

PEREIRA, C. D. **A Influência do Envelope no Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares Ocupadas e Ventiladas Naturalmente**. Orientação: Enedir Ghisi. Florianópolis, SC. 2009. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PEREIRA, C. D.; GHISI, E. Calibração de um modelo computacional de uma residência unifamiliar localizada em Florianópolis. In: ENCONTRO NACIONAL E ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2015. **Anais...** Campinas: ENCAC, 2015.

PEREIRA, C. D.; GHISI, E. The influence of the envelope on the thermal performance of ventilated and occupied houses. **Energy and buildings**, [S.I.], v. 43, p. 3391–3399, 2011.

PEREIRA, H. A. C.; MELO, A. P.; SORGATO, M. J.; VERSAGE, R.; MATOS, M.; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de edificios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus – versão 8.0**. Laboratório de eficiência energética (LabEEE). Florianópolis, 2013.

PEREZ, Yael Valerie; CAPELUTO, Isaac Guedi. Climatic considerations in school building design in the hot–humid climate for reducing energy consumption. **Applied Energy**, [s.l.], v. 86, n. 3, p.340-348, mar. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.05.007>.

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.

RACKES, A; FONSECA, R. W.; BECK, E. O.; SCALCO, V. A.; PALLADINI, G. D.; LAMBERTS, R. Avaliação do potencial de conforto térmico em escolas naturalmente ventiladas. In: Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC), 2015. **Anais...** Campinas: ENCAC, 2015.

RALEGAONKAR, R. V.; GUPTA, R. Review of intelligent building construction: A passive solar architecture approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 8, p. 2238–2242, 1 out. 2010.

ROBERTI, F.; OBEREGGER, U. F.; GASPARELLA, A. Calibrating historic building energy models to hourly indoor air and surface temperatures: Methodology and case study. **Energy and Buildings**, v. 108, p. 236–243, 1 dez. 2015.

RORIZ, M; CHVATAL, K.;CAVALCANTI, F. S. Sistemas construtivos de baixa resistência térmica podem proporcionar mais conforto. In: Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído, 10, Natal, 2009. **Anais...** Natal: ENCAC, 2009.

ROYAPOOR, Mohammad; ROSKILLY, Tony. Building model calibration using energy and environmental data. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 94, p.109-120, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.050>.

SADINENI, S. B.; MADALA, S.; BOEHM, R. F. Passive building energy savings: A review of building envelope components. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 8, p. 3617–3631, 1 out. 2011.

SANTAMOURIS, M. et al. Using intelligent clustering techniques to classify the energy performance of school buildings. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 39, n. 1, p.45-51, jan. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.04.018>.

SANTAMOURIS, M. Prediction methods. In: ALLARD, F. (Ed.). **Natural Ventilation in Buildings: A Design Handbook**. London: James & James Science Publishers, 1998. p.63-158.

SORGATO, M. J. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. 2009. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SPAGNUOLO, A. Y. N., PETRINI DA SILVEIRA, G. W., SERRANO,

A. C., MAGAGNIN, R. C., FARIA, O. B. Conforto térmico de edifício escolar padrão Proinfância tipo B em três regiões bioclimáticas brasileiras distintas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018.

SYNNEFA, A.; SALIARI, M.; SANTAMOURIS, M. Experimental and numerical assessment of the impact of increased roof reflectance on a school building in Athens. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 7–15, 1 dez. 2012.

TORRES, Daniela de Araújo. **Desempenho térmico de habitações populares em Alagoas: alternativas para adequação climática**. Maceió, 2015. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmicas do Espaço Habitado). Universidade Federal de Alagoas. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Maceió, 2015.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 1379–1392, 1 jan. 2018.

TUBELO, R. et al. Cost-effective envelope optimisation for social housing in Brazil's moderate climates zones. **Building and Environment**, v. 133, p. 213–227, 1 abr. 2018.

UCLA. DEPARTMENT OF ARCHITECTURE AND URBAN DESIGN UNIVERSITY OF CALIFORNIA. Climate Consultant 5.5 Los Angeles: [s.n.]. Disponível em: <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/>. Acesso: jan. 2017.

VERSAGE, Rogério de Souza. **Ventilação natural e desempenho térmico de edifícios verticais multifamiliares em Campo Grande, MS**. 2009. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFSC, Florianópolis, 2009.

VILCEKOVA, Silvia et al. Indoor environmental quality of classrooms and occupants' comfort in a special education school in Slovak Republic. **Building And Environment**, [s.l.], v. 120, p.29-40, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.001>.

WEBER, F. et al. **Elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. Florianópolis: [s.n.]. Disponível em: <<http://labeee.ufsc.br/node/714>>.

WESTPHAL, F. S. **Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais.** 2007. Tese (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

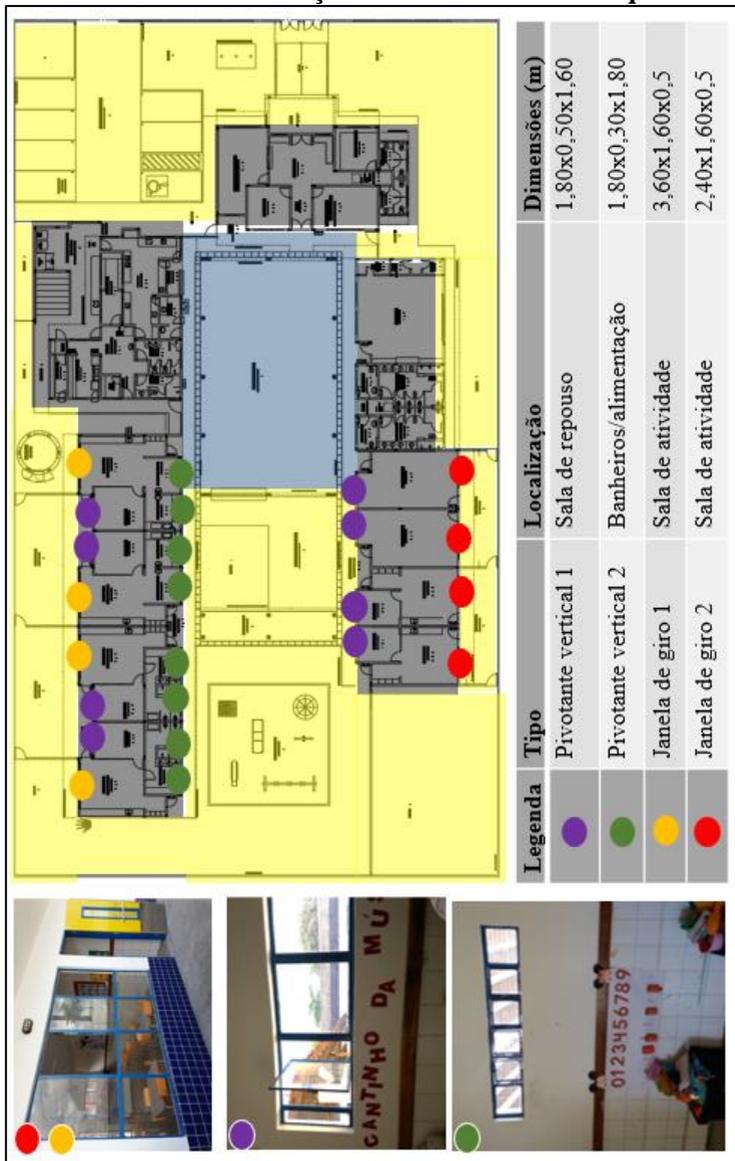
WESTPHAL, Fernando Simon; YAMAKAWA, Mary Akemi; CASTRO, Luiza Tavares de. **Thermal insulation envelope toward zero energy design in hot-humid climate.** In: Proceeding of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November.

WIT, Sten de; AUGENBROE, Godfried. Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 34, n. 9, p.951-958, out. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-7788\(02\)00070-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-7788(02)00070-1).

**APÊNDICE A- Fotos da área externa do CMEI monitorado.**

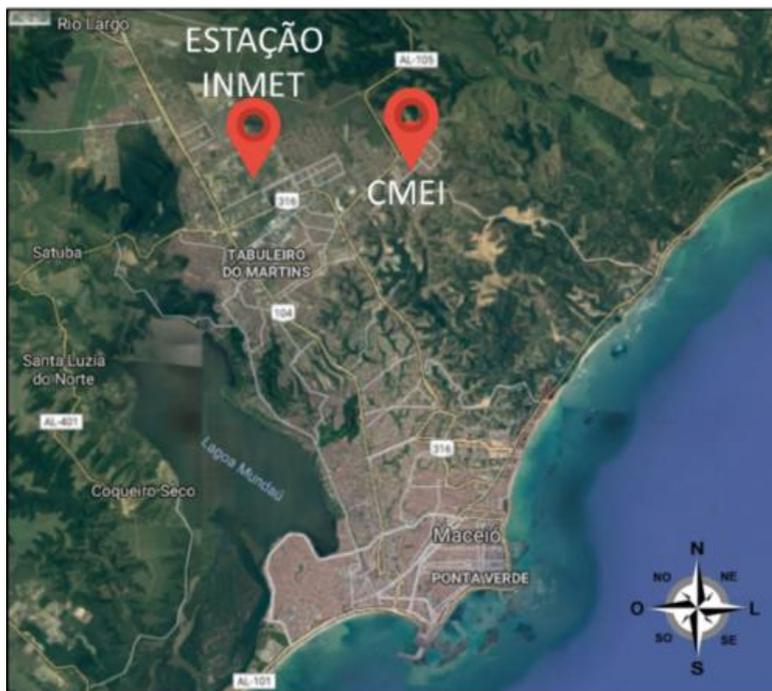
Fonte: Autora (2018).

## APÊNDICE B- Localização e detalhamento das esquadrias



Fonte: Autora (2018).

**APÊNDICE C- Localização da estação meteorológica do INMET em Maceió em relação ao CMEI monitorado.**



Fonte: Google Maps, adaptado pela autora (2018).

**APÊNDICE D- Fotos das salas de aula avaliadas com localização do hobos.**



Fonte: Autora (2018).

## APÊNDICE E- Procedimento de criação do arquivo climático.

Inicialmente foram coletados dados climáticos referentes ao período de monitoramento da edificação de análise. Esses dados foram obtidos na plataforma digital do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET e utilizados para as simulações de calibração: dados de Temperatura do ar, Umidade Relativa, Ponto de Orvalho, precipitação, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento e radiação global foram substituídos no EPW (LABEEE, 2017) pelos dados coletados durante o monitoramento da edificação.

É importante destacar que dados de pressão atmosférica e radiação global horizontal são disponibilizados em hectoPascal (hPa) e kiloJoule por metro quadrado (kJ/m<sup>2</sup>), devendo ser convertidos para Pascal (Pa) e watt-hora por metro quadrado (Wh/m<sup>2</sup>) respectivamente, de forma a adequar os dados às unidades do arquivo climático final. Também é necessário o ajuste horário, pois os dados são disponibilizados em UTM<sup>2</sup>, devendo ser convertidos para o fuso-horário da cidade em questão, nesse caso GMT-3.

Entretanto, para substituição dos dados de radiação no arquivo climático, é necessário fazer uma estimativa das radiações direta normal e difusa horizontal, tendo em vista que as estações automáticas do INMET disponibilizam apenas os dados de radiação global horizontal.

Para isso, foram feitas estimativas para radiação direta e difusa com base nas equações apresentadas em Muneer (2004)<sup>3</sup>. Com posse de todas as variáveis, essas foram inseridas no arquivo climático EPW (INMET, 2016) e o arquivo climático resultante foi utilizado nas duas etapas da calibração.

---

<sup>2</sup> O sistema Universal Transverso de Mercator (UTM) divide o globo em 60 fusos iguais de 6° de amplitude cada um, partindo do equador. Conhecendo-se o fuso em que se encontra a área a ser mapeada pode-se determinar o meridiano central referente a mesma (IBGE, 1995; CORRÊA, 2016).

<sup>3</sup> A autora contou com a colaboração do pesquisador Victor Roriz do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP/São Carlos, para a formação do arquivo climático.

## APÊNDICE F- Propriedades térmicas dos componentes construtivos dos modelos simulados.

a)

MODELO 1- ALV_CER_CON								
	Tipologia	Elemento construtivo	Conductividade térmica (W/m K)	Densidade de massa aparente (kg/m³)	Calor Específico (J/kg K)	CT (kJ/m²K)	U (W/m²K)	
Envoltória	Parede de tijolo cerâmico 6 furos	Argamassa externa (2,5cm)	1,15	2000	1000	139	2.39	
		Cerâmica (1,34cm)	0,9	1600	920			
		Câmara de ar (6,32cm)	resistência térmica = 0,175 M²-k/W					
		Cerâmica (1,34cm)	0,9	1600	920			
		Argamassa interna (2,5cm)	1,15	2000	1000			
	Piso	Concreto (9,85 cm)	1,75	2200	1000	277	2.64	
		Contra piso (2 cm)	1,15	2300	1000			
		Piso Cerâmico (0,75cm)	1,05	2000	920			
	Cobertura	Telha cerâmica (1 cm)	1,05	2000	920	338	2.02	
		câmara de ar >5,0cm	resistência térmica = 0,175 M²-k/W					
		Argamassa interna (2,5cm)	1,15	2000	1000			
		concreto maciço (10 cm)	1.75	2200	1000			
		Argamassa interna (2,5cm)	1,15	2000	1000			

b)

MODELO 2- ALV_ISO_CON								
	Tipologia	Elemento construtivo	Conductividade térmica (W/m K)	Densidade de massa aparente (kg/m³)	Calor Específico (J/kg K)	CT (kJ/m²K)	U (W/m²K)	
Envoltória	Parede de tijolo cerâmico 6 furos	Argamassa externa (2,5cm)	1,15	2000	1000	139	2.39	
		Cerâmica (1,34cm)	0,9	1600	920			
		Câmara de ar (6,32cm)	resistência térmica = 0,175 M²-k/W					
		Cerâmica (1,34cm)	0,9	1600	920			
		Argamassa interna (2,5cm)	1,15	2000	1000			
	Piso	Concreto (9,85 cm)	1,75	2200	1000	277	2.64	
		Contra piso (2 cm)	1,15	2300	1000			
		Piso Cerâmico (0,75cm)	1,05	2000	920			
	Cobertura	Telha cerâmica (1 cm)	1,05	2000	920	342	0.62	
		Lã de vidro (5cm)	0,045	100	700			
		câmara de ar >5,0cm	resistência térmica = 0,175 M²-k/W					
		Argamassa interna (2,5cm)	1,15	2000	1000			
concreto maciço (10 cm)		1,75	2200	1000				
		Argamassa interna (2,5cm)	1,15	2000	1000			

c)

MODELO 3- CON_SAN_PVC							
	Tipologia	Elemento construtivo	Condutividade térmica (W/m K)	Densidade de massa aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Calor Específico (J/kg K)	CT (kJ/m <sup>2</sup> K)	U (W/m <sup>2</sup> K)
Envoltória	Parede de concreto	PVC (0,18cm)	0,071	273	960	177	3.75
		Concreto (8cm)	1,75	2200	1000		
		PVC (0,18cm)	0,071	273	960		
	Piso	Concreto (9,85 cm)	1,75	2200	1000	277	2.64
		Contra piso (2 cm)	1,15	2300	1000		
		Piso Cerâmico (0,75cm)	1,05	2000	920		
	Cobertura	Telha aço PU (sanduíche) (4,2 cm)	0,0315	136	1670	12	0.54
		câmara de ar >5,0cm	resistência térmica = 0,175 M <sup>2</sup> -k/W				
		forro PVC (1cm)	0,071	273	960		

d)

MODELO 4- LSF_MET_ISO							
	Tipologia	Elemento construtivo	Condutividade térmica (W/m K)	Densidade de massa aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Calor Específico (J/kg K)	CT (kJ/m <sup>2</sup> K)	U (W/m <sup>2</sup> K)
Envoltória	Parede em Light steel frame	Placa cimentícia (1cm)	0,95	2200	840	32	0.67
		Câmara de ar (5cm)	resistência térmica = 0,175 M <sup>2</sup> -k/W				
		Lã de vidro (5cm)	0,045	100	700		
		Placa de gesso (1,25cm)	0,35	900	870		
	Piso	Concreto (9,85 cm)	1,75	2200	1000	277	2.64
		Contra piso (2 cm)	1,15	2300	1000		
		Piso Cerâmico (0,75cm)	1,05	2000	920		
	Cobertura	Telha metálica (0,06cm)	55	7800	460	12	0.36
		câmara de ar >5,0cm	resistência térmica = 0,175 M <sup>2</sup> -k/W				
Lã de vidro (10cm)		0,045	100	700			
Forro de PVC (1cm)		0,071	273	960			

e)

MODELO 5- EPS_FIB_EPS							
	Tipologia	Elemento construtivo	Condutividade térmica (W/m K)	Densidade de massa aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Calor Específico (J/kg K)	CT (kJ/m <sup>2</sup> K)	U (W/m <sup>2</sup> K)
Envoltória	Parede em Material Compósito	Gesso Acartonado (1,25cm)	0,35	1000	840	26	0.38
		EPS (9,5cm)	0,04	35	1420		
		Gesso Acartonado (1,25cm)	0,35	1000	840		
	Piso	Concreto (9,85 cm)	1,75	2200	1000	277	2.64
		Contra piso (2 cm)	1,15	2300	1000		
		Piso Cerâmico (0,75cm)	1,05	2000	920		
	Cobertura	Telha fibrocimento (0,6cm)	0,95	1900	840	12	0.61
		câmara de ar >5,0cm	resistência térmica = 0,175 M <sup>2</sup> -k/W				
		Forro em EPS (5cm)	0,04	35	1420		

Fonte: Weber et al (2017) adaptado pela autora.

**ANEXO 1- Planta baixa do projeto padrão tipo b - CMEI  
Rodrigues Alves**

**Ver anexo no email**

**ANEXO 2- Cortes do CMEI Rodrigues Alves**

**Ver anexo no email**

**ANEXO 3- Fachadas do CMEI Rodrigues Alves**

**Ver anexo no email**

## ANEXO 4-Coefficientes e expoentes do fluxo de ar por frestas de janelas e portas.

Tabela 2.3. Coeficientes e expoentes de fluxo de ar por fresta de janelas

Tipo de Janela	Vedação	material	Expoente de fluxo de ar (n)			Coeficiente de fluxo (convertido em kg/s.m)		
			Max	Med	Min	Max.	Med.	Min.
Pivotante – eixo vertical lateral	com vedação	Madeira		0.66		0.00013	0.00004	0.00001
		Rev.Madeira		0.66				
		Metal		0.66		0.00037	0.00035	0.00018
	sem vedação	Madeira	0.85	0.66	0.5	0.00154	0.00030	0.00005
Pivotante-eixo horizontal superior	com vedação	Madeira	0.69	0.57	0.5	0.00158	0.00054	0.00014
		Metal	0.64	0.6	0.52	0.00071	0.00041	0.00023
	sem vedação	Madeira	0.61	0.56	0.6	0.00178	0.00140	0.00114
Pivotante – eixo vertical central	com vedação	Madeira		0.78			0.00004	
		Metal	0.7	0.66	0.63	0.00016	0.00009	0.00003
Pivotante – eixo horizontal central	com vedação	Madeira		0.57			0.00003	
	sem vedação	Madeira	0.9	0.6	0.53	0.00162	0.00103	0.00005
1 folha - Deslizamento horizontal	com vedação	Madeira		0.66			0.00006	
		Rev.Madeira		0.66			0.00008	
		Metal		0.66		0.00023	0.00010	0.00006
	sem vedação	Madeira		0.66			0.00017	
2 folha - Deslizamento horizontal	com vedação	Madeira		0.66			0.00008	
		Metal		0.66		0.00017	0.00010	0.00005
		Plástico		0.66			0.00010	
	sem vedação	Madeira		0.66		0.00040	0.00025	0.00010
		Metal		0.63		0.00056	0.00028	0.00016
1 folha - Deslizamento vertical	com vedação	Metal		0.66			0.00012	
	sem vedação	Madeira		0.66			0.00021	
2 folhas - Deslizamento vertical	com vedação	Madeira		0.66				
		Rev.Madeira		0.66				
		Metal	0.79	0.66	0.56	0.00036	0.00023	0.00005
	sem vedação	Madeira		0.66			0.00022	
		Metal	0.69	0.58	0.45	0.00155	0.00058	0.00026
Clarabóia	sem vedação	Metal	0.59	0.55	0.5	0.00397	0.00023	0.00021

Fonte: Adaptado de Liddament(1986)

Tabela 2.4. Coeficientes e expoentes de fluxo de ar por fresta de portas

Material	Tipo de Porta	Vedação	Local	Expoente de fluxo de ar (n)			Coeficiente de fluxo (convertido em kg/s.m)		
				Max	Med	Min	Max	Med	Min
Porta de madeira	1 folha Pivotalite	com vedação	Interna	0.7	0.6	0.5	0.00332	0.00187	0.00105
		sem vedação	Externa	0.79	0.59	0.51	0.00160	0.00124	0.00090
	2 folhas Pivotalites	sem vedação	Interna	0.71	0.59	0.5	0.00437	0.00204	0.00063
			Externa	0.71	0.59	0.5	0.00455	0.00171	0.00102
Porta de Metal	1 folha de correr	sem vedação	Corta-fogo		0.58			0.00221	
			Interna		0.66			0.00539	
	1 folha Pivotalite	sem vedação	Interna		0.66			0.00252	
			Externa		0.6				
Porta de enroscar	Por m <sup>2</sup> de porta	sem vedação	Externa		0.66			0.00026	
			Interna		0.66			0.00005	
			Externa		0.66			0.00005	
			Externa		0.66			0.01810	

Fonte: Adaptado de Liddament(1986)