



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO – DEPARTAMENTO DE ARQUITETURA E URBANISMO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

Mônica Martins Pinto

**Avaliação preditiva de conforto térmico em ambientes de escritórios  
climatizados próximos a fachadas com alto percentual de vidro**

Florianópolis  
2023

Mônica Martins Pinto

**Avaliação preditiva de conforto térmico em ambientes de escritórios  
climatizados próximos a fachadas com alto percentual de vidro**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador(a): Prof. Fernando Simon Westphal, Dr.

Florianópolis

2023

Pinto, Mônica Martins

Avaliação preditiva de conforto térmico em ambientes de escritórios climatizados próximos a fachadas com alto percentual de vidro / Mônica Martins Pinto ; orientador, Fernando Simon Westphal, 2023.

267 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Conforto térmico. 3. Simulação termodinâmica. 4. Vidro. 5. Avaliação preditiva. I. Westphal, Fernando Simon. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Mônica Martins Pinto

**Avaliação preditiva de conforto térmico em ambientes de escritórios climatizados  
próximos a fachadas com alto percentual de vidro**

O presente trabalho em nível de Doutorado foi avaliado e aprovado, em 18 de setembro de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Martin Gabriel Ordenes Mizgier, Dr.  
Instituição PósARQ - UFSC

Prof. Alberto Hernandez Neto, Dr.  
Instituição USP

Prof. Antonio Augusto de Paula Xavier, Dr.  
Instituição UTFPR

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Doutora em Arquitetura e Urbanismo.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Fernando Simon Westphal, Dr.  
Orientador

Florianópolis, 2023.

Dedico esta tese à minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

À CAPES pelo apoio financeiro que permitiu que se desenvolvesse este trabalho.

Ao professor Fernando Simon Westphal pelo conhecimento transmitido ao longo do mestrado e do doutorado, pelo incentivo à pesquisa e pela confiança depositada em mim e no meu trabalho.

Aos professores Fernando Oscar Ruttkay Pereira, Karin Maria Soares Chvatal e Lucila Chebel Labaki pelas contribuições na fase de qualificação desta pesquisa.

Aos professores Alberto Hernandez Neto e Antonio Augusto de Paula Xavier por se dispor a avaliar o trabalho em sua forma final.

Aos professor Martin Ordenes Mizgier por aceitar prontamente o convite para participar das bancas de avaliação da minha pesquisa desde o mestrado.

Aos meus amigos e colegas de LabCon – UFSC, por todas as trocas ao longo destes anos. Terei sempre um carinho especial por este lugar.

Aos amigos que Florianópolis e a UFSC me proporcionaram. Graças a vocês, eu pude chamar essa cidade de casa.

Aos amigos e familiares que sempre me incentivaram e torceram por mim.

Ao meu companheiro Christoph Schuh, pela parceria de vida, pelo incentivo e por me acreditar tanto em mim.

Em especial, aos meus pais, Ivete Martins Pinto e Marino Antonio Pinto, e à minha irmã, Gabriela Martins Pinto de Aragão, minha base e porto seguro. Obrigado por acreditarem em mim e pelo apoio incondicional em todos os momentos desse doutorado, nas etapas até aqui e nas minhas decisões de vida. Agradeço também por me proporcionarem tudo para que eu pudesse me dedicar aos estudos.

## RESUMO

As janelas, em especial os vidros, são o componente da envoltória que mais contribui para o ganho de calor e impacta significativamente nas condições térmicas de ambientes internos devido a sua transparência à radiação solar e alta transmitância térmica. Ainda assim, estações de trabalho frequentemente são posicionadas próximo às janelas, parcela do espaço interno que sofre maior influência do clima externo e onde a ocorrência de desconforto térmico é mais provável. As condições de conforto devem ser consideradas desde as fases iniciais do projeto e devem ser igualmente importantes na tomada de decisão, assim como o desempenho energético. Mesmo que o sistema de condicionamento de ar seja dimensionado corretamente, ainda há o risco de ocorrer desconforto térmico, especialmente relacionado às trocas radiantes. Nesse sentido, as ferramentas de simulação de desempenho de edifícios podem auxiliar no processo de concepção do projeto. No entanto, essas ferramentas possuem algumas limitações, ainda pouco exploradas na estimativa de conforto. Além disso, os modelos tradicionais de conforto térmico não são adequados para avaliar esse contexto de ambientes, visto que não consideram o impacto na radiação solar sobre o ocupante. Esta pesquisa teve, portanto, o objetivo de propor um *framework* para a avaliação preditiva de conforto térmico em edifícios de escritórios climatizados artificialmente com grande área envidraçada da fachada. Pretende-se demonstrar como os modelos podem ser ajustados para uma avaliação mais apropriada dessa tipologia de edificação, por meio de um conjunto de métodos de ajuste dos índices de conforto térmico, métricas espaciais e temporais, e definições de modelagem. Na etapa de desenvolvimento abordam-se questões relacionadas às fases principais da avaliação de conforto térmico antes da análise dos resultados. Primeiro, estabeleceu-se um modelo de pavimento e salas típicas de edifício de escritório, adequado para estudos paramétricos sobre conforto térmico e que possam ser representativos do contexto brasileiro, com base em dados da literatura. A seguir, é estabelecido um conjunto de modelos e métricas adequados para a avaliação preditiva do conforto térmico para ambientes com estas características. E então, aborda-se o impacto de simplificações e definições de modelagem computacional ainda pouco exploradas no contexto da avaliação de conforto térmico por meio do *software EnergyPlus*. Um *framework* foi então proposto com descrição de procedimentos para definição do ambiente, modelagem e simulação computacional termodinâmica e avaliação do conforto térmico. Por fim, o *framework* proposto é aplicado a um estudo de caso para demonstrar sua utilização e potencialidades. Dentre as conclusões obtidas, destacam-se: a importância de considerar métricas espaciais e temporais ao avaliar o conforto térmico, bem como o impacto da radiação solar nos ocupantes; e que a modelagem computacional para a avaliação de conforto térmico não será necessariamente a mesma utilizada para a avaliação de desempenho termoenergético, pois simplificações comumente empregadas na modelagem energética podem influenciar na estimativa de conforto térmico. As investigações realizadas permitiram estabelecer diretrizes para cada etapa do processo de avaliação preditiva de conforto térmico mais adequada para essa tipologia de ambiente, as quais foram apresentadas em um *framework*.

**Palavras-chave:** Conforto térmico; Simulação termodinâmica; Vidro; Janela; Avaliação preditiva; Ajuste solar; *Framework*.

## ABSTRACT

*Windows, especially glass, are the building envelope component that contributes most to heat gain and significantly impacts the thermal conditions of indoor environments due to their transparency to solar radiation and high thermal transmittance. Even so, workstations are often located near windows, part of the internal space more affected by the external climate and more likely to thermal discomfort. Comfort conditions should be considered from the project's early stages and equally important in the decision-making process, as much as energy performance. The risk of thermal discomfort is still likely even in spaces with a correctly sized air conditioning system, specifically regarding radiant exchange. For that matter, building performance simulation tools can assist in the project design process. However, these tools present limitations that are still little explored in thermal comfort assessment. In addition, traditional thermal comfort models are not satisfactory for highly glazed buildings assessment since they do not consider the impact of solar radiation on the occupant. This research, therefore, aimed to propose a framework for the predictive evaluation of thermal comfort in mechanically conditioned office buildings with large glazed areas in the façade. It intends to demonstrate how models may be adjusted for a more appropriate evaluation of this building typology through a set of methods for thermal comfort indices correction, spatial and temporal metrics, and modeling definitions. The development stage addresses issues related to the main steps of thermal comfort assessment that come before the analyses of the results. First, typical office building floor and room models are established. This model is suitable for parametric studies on thermal comfort and is representative of the Brazilian context based on data from the current literature. A set of models and metrics suitable for thermal comfort predictive assessment in environments with these characteristics is specified. The impact of simplifications and computational modeling definitions that are still little explored in the thermal comfort evaluation context using EnergyPlus software is addressed. Therefore, a framework was proposed, describing procedures for defining the conditions, thermodynamic modeling and simulation, and thermal comfort assessment. Finally, the proposed framework is applied to a case study demonstrating its use and potential. Among the conclusions obtained, we highlight the importance of considering spatial and temporal metrics when assessing thermal comfort as well as the impact of solar radiation on occupants. Besides that, the computational modeling for thermal comfort assessment will not necessarily be the same as used for thermo-energetic performance assessment since simplifications commonly employed in energy modeling can influence the estimation of thermal comfort. The investigations made it possible to establish guidelines for each step of the predictive evaluation process of thermal comfort that is most appropriate for this type of indoor environment, which were presented in a framework.*

**Keywords:** *Thermal comfort; Thermodynamic simulation; Glazed surface; Window; Predictive assessment; Solar-adjustment; Framework.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura da Tese .....	33
Figura 2 - Os efeitos do ambiente térmico na atividade, desempenho e produtividade humana. ....	36
Figura 3 - Transmissão da radiação solar através do vidro .....	39
Figura 4 - Fotos do objeto de estudos de Hawila et al. (2018, 2019). ....	43
Figura 5 - Modelo do estudo de caso de Marino, Nucara e Pietrafesa (2015). ....	45
Figura 6 - Distribuição da amostra total por tipo de edificação .....	48
Figura 7 - Distribuição da amostra total e de escritórios por modelo de conforto térmico utilizado .....	48
Figura 8 - Distribuição da amostra total e de escritórios por modelo de ajuste solar utilizado .....	48
Figura 9 - Distribuição da amostra total (externo) e de escritórios (interno) por métrica dinâmica ou espacial utilizada .....	48
Figura 10 - Softwares relacionados às simulações térmicas utilizados pelos estudos da amostra total (externo) e de escritórios (interno) em números absolutos .....	49
Figura 11 - Isolamento de roupa ( <i>I<sub>cl</sub></i> ) representativo em função da temperatura externa às 06:00.....	57
Figura 12 - Percentual previsto de insatisfeitos (PPD) em função do voto médio predito (PMV) .....	65
Figura 13 - Comparação de limites de PMV para diferentes normas. ....	66
Figura 14 - Comparação de limites de PPD para diferentes normas. ....	66
Figura 15 - Faixas de temperatura operativa aceitáveis para ambientes naturalmente condicionados .....	68
Figura 16 - Fluxograma dos Modelos Fisiológicos e Termo Regulatórios do Corpo Humano aos Modelos de Conforto Térmico Multissegmentos .....	71
Figura 17 - Diagrama esquemático demonstrando a disposição dos elementos e do sistema circulatório no sistema de (WISSLER, 1964).....	71
Figura 18 - Seção transversal do modelo cilíndrico de (KRANING; GONZALEZ, 1997) contendo cinco compartimentos de tecido anular concêntrico. As dimensões mostradas são para um indivíduo com 70kg e área superficial da pele de 1,80m <sup>2</sup> . ....	72

Figura 19 - Diagrama esquemático do sistema passivo do modelo de Fiala. ....	73
Figura 20 - Dados de saída típicos de avaliação térmica e luminosa.....	87
Figura 21 - Modelo de tipologia predominante para Florianópolis desenvolvido por Santana (2006).....	106
Figura 22 - Arquétipo III A e B desenvolvido por Alves (2016).....	108
Figura 23 - Frequência de ocorrência do modo de condicionamento de ar presente na amostra de edificações de Veloso (2017).....	109
Figura 24 - Modelo 1 de Pereira (2017): Pavimento 35 m por 35 m e planta do escritório 27 m por 8 m de profundidade. ....	110
Figura 25 - Modelo definido por Brugnera (2018).....	111
Figura 26 - Dimensões dos edifícios representativos em cada cluster, para as formas quadrada retangular de Scheidt e Westphal (2023). ....	111
Figura 27 - resumo das plantas de pavimento tipo de modelos de escritório desenvolvidos nos estudos de referência. ....	114
Figura 28 - Representação esquemática das fases da pesquisa .....	121
Figura 29 - Planta e zoneamento do modelo de pavimento de escritório proposto para estudos futuros em três variações de divisão interna .....	124
Figura 30 - Planta e corte dos modelos de sala de escritório: sala e open space... ..	125
Figura 31 - Rotinas de ocupação e sistemas de segunda-feira a sexta-feira.....	126
Figura 32 - Zoneamento térmico do pavimento de escritório - salas analisadas em amarelo (à esquerda); planta da sala isolada com paredes internas adiabáticas (à direita acima); e corte esquemático da fachada (à direita abaixo). Unidade: metro .....	135
Figura 33 - Organização dos modelos por análises .....	137
Figura 34 - Histogramas de frequência relativa de ocorrência anual da diferença horária na temperatura das superfícies internas nos períodos ocupados, por orientação da fachada .....	139
Figura 35 - Histograma de frequência relativa de ocorrência anual da diferença horária na temperatura radiante média nos períodos ocupados.....	140
Figura 36 - Disponibilidade de conforto térmico anual (TCA): PMV .....	140
Figura 37 - Histograma de frequência relativa de ocorrência anual da diferença horária no PMV e no PPD nos períodos ocupados a 1,5m da janela .....	141
Figura 38 - Resultados de consumo anual em condicionamento térmico .....	141
Figura 39 - Consumo anual em condicionamento térmico .....	142

Figura 40 - Esquema de experimento paramétrico.....	145
Figura 41 - Planta e corte dos modelos de escritório: pontos analisados (unid.: metros) .....	146
Figura 42 - Histograma de frequência relativa de ocorrência de diferença na temperatura radiante média entre ambiente com e sem massa térmica .....	147
Figura 43 - Histograma de frequência relativa de ocorrência de diferença na temperatura das superfícies internas entre ambiente com e sem massa térmica.....	149
Figura 44 - Disponibilidade de conforto térmico anual (TCA), com base no PMV, (a) na sala e (b) no open space.....	150
Figura 45 - Consumo anual em condicionamento térmico nos modelos com WWR 60% e FS 0,5 para as quatro orientações de fachada: (a) total anual, (b) diferença entre zona integrada e adiabática e (c) diferença percentual. .....	151
Figura 46 - Consumo de energia para condicionamento térmico com diferentes configurações de janela .....	152
Figura 47 - Potencial percentual de economia anual no consumo de energia para condicionamento térmico. Modelo de referência: WWR60-FS80 .....	153
Figura 48 - Histograma anual da frequência relativa de ocorrência horária do coeficiente de convecção: modelo Oeste .....	159
Figura 49 - Perfil horário dos coeficientes de convecção e da temperatura interna das paredes 1 (externa) e 2 (interna lateral): semanas extremas de verão e inverno - Oeste.....	160
Figura 50 - Demanda anual de carga térmica: (a) total, sendo positivo para aquecimento e negativo para resfriamento; (b) diferença absolutas e (c) diferença percentual para resfriamento em relação ao TARP. ....	163
Figura 51 - Perfil anual da diferença na carga térmica diária entre os algoritmos de convecção (dias ocupados): modelos Norte e Oeste .....	165
Figura 52 - Perfil semanal de carga térmica horária: semanas extremas de verão (19-23/fevereiro) e inverno (03-07/setembro): modelo Oeste .....	166
Figura 53 - Histograma de frequência relativa de ocorrência da diferença nos índices horários de conforto térmico: (a) PMV e (b) PPD: modelo Oeste .....	167
Figura 54 - Disponibilidade anual de conforto térmico: $TCAPMV, \pm 0.5$ .....	168

Figura 55 - Índice PMV de conforto térmico a 1,5 m da janela: perfis das semanas extremas de verão (19-23/fevereiro) e inverno (03-07/setembro): modelo Oeste.....	169
Figura 56 - Framework para avaliação de conforto térmico por simulação computacional em ambientes sob influência do vidro.....	174
Figura 57 - Divisão da sala em uma malha para análise espacial de conforto térmico .....	181
Figura 58 - Disponibilidade espacial de conforto térmico no ambiente .....	182
Figura 59 - Tempo de usabilidade do ambiente em conforto térmico.....	182
Figura 60 - Mapas de disponibilidade de conforto térmico (TCA $\pm$ 0,5).....	183
Figura 61 - Disponibilidade de conforto térmico em relação à distância da janela (fileira 2) .....	184
Figura 62 - Diferença no TCA entre IGU e SGU.....	185
Figura 63 - Gráficos de dispersão da temperatura superficial interna do vidro em relação à temperatura externa e à radiação solar incidente no vidro: comparação entre IGU e SGU por fator solar.....	186
Figura 64 - Gráficos de dispersão da temperatura superficial interna do vidro em relação à temperatura externa e à radiação solar incidente no vidro: comparação entre fatores solares por sistema. ....	187
Figura 65 - Gráficos de dispersão do PMV em relação à temperatura externa e à radiação solar incidente no vidro: comparação entre IGU e SGU por fator solar.....	188
Figura 66 - Gráficos de dispersão do PMV em relação à temperatura externa e à radiação solar incidente no vidro: comparação entre fatores solares por sistema .....	188
Figura 67 - Gráficos de dispersão do delta entre modelos com SGU e IGU PMV em relação à temperatura externa e à radiação solar incidente no vidro: PMV e temperatura interna do vidro .....	189
Figura 68 - Perfil horário da temperatura na superfície interna do vidro e das condições de conforto térmico a 0,5 m da janela: semana de verão .....	190
Figura 69 - Perfil horário da temperatura na superfície interna do vidro e das condições de conforto térmico a 0,5 m da janela: semana de inverno .....	191
Figura 70 - Fração do corpo exposta ao sol (fbes).....	229
Figura 71 - Temperatura do ar e incidência de radiação solar em Florianópolis.....	233

Figura 72 - Incidência diária de radiação solar na fachada oeste em Florianópolis: dezembro a março .....	233
Figura 73 - Temperatura do ar externo e incidência de radiação solar na fachada oeste em Florianópolis ao longo dos dias (a) 06 de dezembro, (b) 15 de janeiro e (c) 26 de junho .....	234
Figura 74 - Planta e corte da sala de escritório com a localização do indivíduo no ambiente. Unidade: metros. ....	234
Figura 75 - Rotinas de ocupação e sistemas de segunda-feira a sexta-feira.....	235
Figura 76 - Fluxograma de trabalho para a estimativa dos índices de conforto térmico corrigidos pelos modelos de ajuste solar .....	240
Figura 77 - Temperatura radiante média em 06 de dezembro .....	241
Figura 78 - Temperatura das superfícies internas em 06 de dezembro .....	243
Figura 79 - Diferença no cálculo da MRT de onda-longa entre (1) EnergyPlus e calculado no ponto central na sala; (2) EnergyPlus e calculado no ponto a 1,5m da janela; e (3) calculado no ponto central na sala e no ponto a 1,5m da janela.....	245
Figura 80 - PMV por vidro testado em 06 de dezembro .....	247
Figura 81 - PPD em 06 de dezembro .....	249
Figura 82 - Assimetria na Temperatura Radiante em 06 de dezembro.....	250
Figura 83 - Percentual de desconforto localizado por assimetria na temperatura radiante devido a paredes quentes por vidro testado em 06 de dezembro .....	251
Figura 84 - Temperatura radiante média em 15 de fevereiro .....	253
Figura 85 - (a) PMV e (b) PPD em 15 de janeiro: SGU80 .....	254
Figura 86 - Temperatura radiante média em 26 de junho .....	254
Figura 87 - PPD em 26 de junho .....	255
Figura 88 - Histograma anual da frequência relativa de ocorrência horária do coeficiente de convecção [ $W/m^2.K$ ].....	260
Figura 89 - Perfil horário dos coeficientes de convecção e da temperatura interna das paredes 1 (externa) e 2 (interna lateral) para as semanas extremas de verão e inverno: modelo Sul .....	261
Figura 90 - Perfil horário dos coeficientes de convecção e da temperatura interna das paredes 1 (externa) e 2 (interna lateral) para as semanas extremas de verão e inverno: modelo Leste.....	262

Figura 91 - Perfil horário dos coeficientes de convecção e da temperatura interna das paredes 1 (externa) e 2 (interna lateral) para as semanas extremas de verão e inverno: modelo Norte.....	263
Figura 92 - Perfil anual da diferença na carga térmica diária entre os algoritmos de convecção (dias ocupados) .....	264
Figura 93 - Perfil semanal de carga térmica horária: semanas extremas de verão (19-23/fevereiro) .....	265
Figura 94 - Perfil semanal de carga térmica horária: semanas extremas de inverno (03-07/setembro).....	265
Figura 95 - Histograma de frequência relativa de ocorrência da diferença nos índices horários de conforto térmico: (a) PMV e (b) PPD. Referência: TARP ..	266
Figura 96 - Índice PMV de conforto térmico a 1,5m da janela: perfis das semanas extremas de verão (19-23/fevereiro).....	267
Figura 97 - Índice PMV de conforto térmico a 1,5m da janela: perfis das semanas extremas de inverno (03-07/setembro) .....	267

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Levantamento de estudos de avaliação do conforto térmico por simulação em ambientes envidraçados .....	50
Quadro 2 - Principais fatores de Conforto Térmico .....	54
Quadro 3 - Normas de avaliação do conforto térmico em ambientes internos.....	59
Quadro 4 - Categorias do ambiente interno nas diferentes normas .....	60
Quadro 5 – Modelos de Conforto Térmico.....	63
Quadro 6 - Modelos de ajuste solar em índices de conforto térmico.....	79
Quadro 7 - Índices Dinâmicos e Espaciais de Conforto Térmico .....	91
Quadro 8 - Resumo dos estudos encontrados .....	105
Quadro 9 - Equações aplicadas ao modelo para cada um dos algoritmos selecionados .....	157
Quadro 10 - Dados de entrada extraídos dos resultados dos modelos simulados no EnergyPlus para análise de Conforto Térmico .....	239
Quadro 11 - Dados de entrada extraídos dos resultados dos modelos simulados no EnergyPlus para análise de Assimetria na Temperatura Radiante .....	240

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escala ASHRAE de sensação térmica .....	65
Tabela 2 - Intervalos de aplicabilidade: PMV-PPD .....	65
Tabela 3 - Limites de aceitabilidade de conforto térmico: comparativo entre normas. .....	66
Tabela 4 - Equações para definição das faixas de temperatura operativa aceitáveis .....	69
Tabela 5 - Critérios de desconforto térmico localizado: comparativo entra normas ..	77
Tabela 6 - Resumo das características típicas encontradas nos estudos de referência .....	112
Tabela 7 - Sistema de condicionamento de ar .....	126
Tabela 8 - Propriedades térmicas dos elementos opacos.....	127
Tabela 9 - Limites de conforto térmico.....	129
Tabela 10 - Propriedades térmicas dos vidros .....	135
Tabela 11 - Economia anual em condicionamento térmico de todos os modelos [kWh/m <sup>2</sup> ].....	143
Tabela 12 - Teste ANOVA da economia anual em condicionamento térmico.....	143
Tabela 13 - Agrupamento do experimento ANOVA fator único da disponibilidade anual de conforto térmico (TCAPMV): modelo WWR 60% - FS 0,5.....	150
Tabela 14 - Resultados testes ANOVA fator único da disponibilidade anual de conforto térmico (TCAPMV): modelo WWR 60% - FS 0,5.....	150
Tabela 15 - Percentual de economia anual em condicionamento térmico. Modelo de referência: WWR 60 – FS 0.8 .....	153
Tabela 16 - Testes ANOVA fator único não-paramétrico .....	153
Tabela 17 - Propriedades térmicas do vidro .....	156
Tabela 18 - Testes ANOVA fator único não-paramétrico da influência do algoritmo no cálculo do coeficiente de convecção nas paredes externa e interna nas semanas extremas de verão (19-23/fevereiro) e inverno (03-07/setembro) : modelo Oeste.....	161
Tabela 19 - Teste de comparação em pares da influência do algoritmo de convecção no cálculo do coeficiente de convecção nas paredes externa e interna nas	

semanas extremas de verão (19-23/fevereiro) e inverno (03-07/setembro) : modelo Oeste .....	162
Tabela 20 - Testes ANOVA fator único não-paramétrico da influência do algoritmo no cálculo da temperatura superficial nas paredes externa e interna nas semanas extremas de verão (19-23/fevereiro) e inverno (03-07/setembro) : modelo Oeste .....	162
Tabela 21 - Teste de comparação em pares da influência do algoritmo de convecção no cálculo da temperatura superficial nas paredes externa e interna nas semanas extremas de verão (19-23/fevereiro) e inverno (03-07/setembro) : modelo Oeste .....	162
Tabela 22 - Teste ANOVA fator único não-paramétrico da influência do algoritmo de convecção na carga térmica diária no período de um ano .....	164
Tabela 23 - Teste de comparação em pares (Dwass-Steel-Critchlow-Fligner) da influência do algoritmo de convecção na carga térmica diária no período de um ano .....	164
Tabela 24 - Testes ANOVA fator único não-paramétrico da influência do algoritmo no cálculo horário da carga térmica nas semanas extremas de verão (19- 23/fevereiro) e inverno (03-07/setembro): modelo Oeste .....	166
Tabela 25 - Índices PMV horário (semana de verão, modelo Oeste, ponto a 1,5 m da janela). Destaque para os horários em que a condição de conforto varia entre algoritmos de convecção .....	170
Tabela 26 - Testes ANOVA fator único não-paramétrico da influência do algoritmo no cálculo horário do índice PMV nas semanas extremas de verão (19- 23/fevereiro) e inverno (03-07/setembro): modelo Oeste .....	170
Tabela 27 - Teste de comparação em pares (Dwass-Steel-Critchlow-Fligner) da influência do algoritmo de convecção no conforto térmico horário no período de uma semana de verão (19-23/fevereiro): modelo Oeste ....	171
Tabela 28 - Propriedades térmicas e ópticas dos vidros individuais .....	180
Tabela 29 - Resumo das propriedades térmicas das composições finais.....	180
Tabela 30 - Valores tabulados de fator de área projetada.....	228
Tabela 31 - Propriedades térmicas dos elementos opacos da envoltória .....	236
Tabela 32 - Propriedades e térmicas dos vidros .....	237
Tabela 33 - Relação fator de forma e temperatura das superfícies internas.....	246

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACH:	trocas de ar por hora ( <i>air change per hour</i> )
BPS:	simulação de desempenho de edificações ( <i>building performance simulation</i> )
CPMV:	modelo de ajuste solar PMV Corrigido ( <i>Corrected PMV</i> ) (ZHANG et al., 2018)
CFD:	simulação computacional de dinâmica dos fluídos ( <i>Computational Fluid Dynamics</i> )
DISC:	índice de desconforto térmico do modelo de conforto térmico <i>Two-node</i>
DTS:	sensação térmica dinâmica ( <i>dynamic thermal sensation</i> ) [escala sétima da ASHRAE]
ERF:	campo radiante efetivo ( <i>effective radiante field</i> ) [ $W/m^2$ ]
ERF <sub>solar</sub> :	campo radiante efetivo incluindo o efeito da radiação solar ( <i>solar effective radiante field</i> ) [ $W/m^2$ ]
FS:	fator solar
HVAC:	sistema de climatização ( <i>heating, ventilation, and air conditioning</i> )
IGU:	vidro insulado ( <i>insulated glass unit</i> )
SGU:	vidro simples ( <i>single glass unit</i> )
LC:	índice de conforto local ( <i>Local Comfort</i> )
L-MRT:	temperatura radiante média local ( <i>Local Mean Radiant Temperature</i> )
MRT:	temperatura radiante média ( <i>Mean Radiant Temperature</i> )
MSA-MRT:	modelo de ajuste solar da temperatura radiante média ( <i>Modified Solar-Adjust of Mean Radiant Temperature</i> ) (MARINO et al., 2017)
PMV:	voto médio predito ( <i>Predicted Mean Vote</i> ) [escala sétima da ASHRAE]
PPD:	percentual previsto de insatisfeitos ( <i>Predicted Percent Dissatisfied</i> ) [%]
PD:	percentual máximo de insatisfeitos ( <i>Percent Dissatisfied</i> ) [%]
p.p.:	pontos percentuais
SHARP:	ângulo horizontal solar em relação à frente da pessoa ( <i>Solar Horizontal Angle Relative to the Front of the Person</i> ) [graus]
SA-MRT:	modelo de ajuste solar da temperatura radiante média ( <i>Solar-Adjust of Mean Radiant Temperature</i> ) (LA GENNUSA et al., 2005, 2007)
TA:	autonomia térmica ( <i>Thermal Autonomy</i> ) [%]
TCA:	disponibilidade de conforto térmico ( <i>Thermal Comfort Availability</i> )
sTCA:	fração do espaço no que apresenta TCA mínimo
TCU:	usabilidade em conforto térmico ( <i>Thermal Comfort Usability</i> )
tTCU:	expressa a fração de tempo em um TCU mínimo
TCP:	percentual de conforto térmico ( <i>Thermal Comfort Percentage</i> )
TSENS:	índice de sensação térmica do modelo de conforto térmico <i>Two-node</i>
TSV:	voto de sensação térmica ( <i>thermal sensation vote</i> )
WWR:	percentual de abertura da fachada ( <i>window-to-wall ratio</i> )

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$ :	constante de controle de velocidade com que a temperatura média responde às mudanças no clima entre 0 e 1
$A_D$ :	área de pele de uma pessoa (Du Bois = 1,82m <sup>2</sup> )
$A_p$ :	área projetada de uma pessoa exposta à luz solar direta
$A_N$ :	área da superfície interna N
$C_{dn}$ :	coeficiente dia-noite (1 se dia, 0 se noite)
$C_S^{in}$ :	coeficiente de proteção do ambiente interno
$CI$ :	representa o indicador de conforto escolhido (e.g., PMV, PPD, $t_o$ )
$CI_{lim}$ :	valores limites dos indicadores de conforto
$C_s$ :	coeficiente de sombreamento
$d_p$ :	distância do ponto "p" em relação a superfície "N"
$e$ :	espessura [mm]
$E_{rsw}$ :	fluxo de calor latente da evaporação do suor [W/m <sup>2</sup> ]
$E_{max}$ :	máxima perda evaporativa de calor [W/m <sup>2</sup> ]
$E_{dif}$ :	difusão natural de água através da pele [W/m <sup>2</sup> ]
$F_{p-N}$ :	fator de forma entre a pessoa e a superfície N
$F_{p-J}$ :	fator de forma entre a pessoa e a superfície transparente J
$F_{N-J}$ :	fator de forma entre a superfície transparente J e a superfície N
$F_{AT \rightarrow N}$ :	fator de forma entre o plano (área de teste) e a superfície N
$F_{AT \rightarrow J}$ :	fator de forma entre o plano (área de teste) e a janela J
$F_{(sf-sr)}$ :	fator de forma entre o segmento do corpo e o entorno
$f_{svv}$ :	fração visível da abóboda celeste
$f_p$ :	fator de área projetada
$f_{bes}$ :	fração da superfície do corpo exposta ao sol
$f_{eff}$ :	fração da superfície do corpo exposta à radiação proveniente do ambiente, sendo 0,696 para pessoas sentadas e 0,725 para pessoas em pé
$f_{cl}$ :	fração da superfície do corpo coberta pela vestimenta
$h_c$ :	coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m <sup>2</sup> .K]
$h_r$ :	coeficiente de transferência de calor por radiação [W/m <sup>2</sup> .K]
$h_s$ :	coeficiente de transferência de radiação solar [W/m <sup>2</sup> .K]
$h_o$ :	coeficiente de transferência de calor por radiação e convecção combinados [W/m <sup>2</sup> .K]
$I$ :	intensidade de radiação solar [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{dif}$ :	intensidade de radiação solar difusa [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{dif,J}$ :	intensidade da radiação solar difusa que atravessa a superfície transparente J [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{TH}$ :	intensidade de radiação solar horizontal total [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{dir}$ :	intensidade de radiação solar direta [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{dir,J}$ :	intensidade de radiação solar direta que atinge a pessoa e entra através da superfície transparente J, estimado ortogonalmente aos raios solares [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{dir,h}$ :	intensidade de radiação solar direta no plano horizontal [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{dir \perp}$ :	radiação solar direta perpendicular a superfície da área de teste [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{cl}$ :	isolamento da vestimenta [m <sup>2</sup> .K/W]
$M$ :	taxa metabólica [W/m <sup>2</sup> ]
$N_t$ :	número de time steps em um período T

$N_p$ :	número total de pontos na malha de avaliação espacial
$P_a$ :	pressão parcial de vapor d'água no ar [Pa]
PPUA:	percentual inaceitável [%]
$q_{solar \rightarrow N}$ :	taxa da radiação solar incidente absorvida pela superfície N [W]
$q_{lw,s \rightarrow N}$ :	taxa de transferência de radiação de onda longa da superfície s para a superfície N [W]
$q_{lw,source \rightarrow N}$ :	taxa de transferência de radiação de onda longa das fontes de calor para a superfície N [W]
$q_{lw,HVAC \rightarrow N}$ :	taxa de transferência de radiação de onda longa dos componentes do sistema HVAC para a superfície N [W]
$q_{conv,N \rightarrow z}$ :	transferência de calor por convecção da superfície N para zona [W]
$q_{cond,N \rightarrow m}$ :	transferência de calor por condução da superfície N através do material [W]
$q_{sk}$ :	densidade de fluxo de calor através da pele [W/m <sup>2</sup> ]
$q_{conv}$ :	densidade de fluxo de calor por convecção [W/m <sup>2</sup> ]
$q_R$ :	densidade de fluxo calor por radiação de ondas longas [W/m <sup>2</sup> ]
$q_{sR}$ :	densidade de fluxo calor por radiação de ondas curtas absorvidas pela superfície do segmento do corpo [W/m <sup>2</sup> ]
$q_{se}$ :	densidade de fluxo de calor por evaporação [W/m <sup>2</sup> ]
$R_{floor}$ :	refletância do piso e móveis baixos
$R_i$ :	componente de carga térmica por radiação de onda longa
$R_{dir}$ :	componente de carga térmica por radiação solar direta
$R_{dif}$ :	componente de carga térmica por radiação solar difusa
$S_i$ :	sensação térmica local no segmento i
$S_o$ :	sensação térmica global do corpo
$S_{o,modifier}$ :	efeito da mudança da sensação térmica local na sensação global do corpo
$S_N$ :	área da superfície "N" [m <sup>2</sup> ]
$T_a, t_a$ :	temperatura do ar [K, °C]
$t_{a(out,6)}$ :	temperatura do ar externo às 6 horas da manhã [°C]
$t_b$ :	temperatura corporal média [°C]
$t_{cl}$ :	temperatura superficial da vestimenta [°C]
$\bar{t}_{pma(out)}$ :	temperatura média predominante do ar externo (7- 30 dias anteriores) [°C]
$\bar{t}_{mda(out)}$ :	média das temperaturas do ar externo médias (7- 30 dias anteriores) [°C]
$t_{e(n-1)}$ :	temperatura média diária do dia anterior ao dia em questão [°C]
$t_{rm(n-1)}$ :	temperatura média consecutiva do dia anterior ao dia em questão [°C]
$T_{out}, t_{out}$ :	temperatura do ar externo [K, °C]
$T_{op}, t_{op}$ :	temperatura operativa [K, °C]
$T_o^*, t_o^*$ :	temperatura operativa corrigida [K, °C]
$\bar{T}_r, \bar{t}_r$ :	temperatura radiante média [K, °C]
$\bar{t}_{r,local}$ :	temperatura radiante média local [°C]
$\bar{T}_{r,irr}, \bar{t}_{r,irr}$ :	temperatura radiante média, com o efeito da radiação solar [K, °C]
$\bar{T}_{rlw}, \bar{t}_{rlw}$ :	temperatura radiante média em ondas longas [K, °C]
$\bar{T}_{rsw}, \bar{t}_{rsw}$ :	temperatura radiante média em ondas curtas [K, °C]
$T_N, t_N$ :	temperatura na superfície N [K, °C]
$\bar{T}_{N,irr}, \bar{t}_{N,irr}$ :	temperatura radiante média do objeto irradiado, com o efeito da radiação solar [K, °C]
$T_{pr}, t_{pr}$ :	temperatura radiante do plano [K, °C]

$t_{pr,1}$ :	temperatura radiante no plano (plano com incidência de radiação solar direta) [°C]
$t_{pr,2}$ :	temperatura radiante no plano (plano oposto a incidência da radiação solar direta) [°C]
$\Delta t_{pr}$ :	assimetria na temperatura radiante [°C]
$t_{pr,sol}$ :	temperatura radiante do plano incluindo o efeito da radiação solar [°C]
$t_s$ :	temperatura equivalente da radiação solar [°C]
$t_{sca}$ :	temperatura do ar com correção solar [°C]
$T_{sk}, t_{sk}$ :	temperatura da pele [K, °C]
$\bar{T}_{sk}, \bar{t}_{sk}$ :	temperatura média da pele [K, °C]
$T_{sk,i}, t_{sk,i}$ :	temperatura da pele no segmento i [K, °C]
$T_{sf}$ :	temperatura média superficial no setor do corpo [K]
$T_{sr,m}$ :	temperatura média das superfícies vistas pelo setor do corpo [K]
$\Delta T_{sk,m}$ :	signal de erro da temperatura da pele [K]
$T_{hy}$ :	temperatura no núcleo da cabeça (hipotálamo) [K]
$\Delta T_{hy}$ :	signal de erro da temperatura no núcleo da cabeça (hipotálamo) [K]
$T_{cr}$ :	temperatura de core [K]
$T_{sol}$ :	transmitância solar combinada do sistema de janela e elemento de sombreamento
$T_{sol-ar}$ :	temperatura Sol-Ar [K]
$t$ :	tempo/período de avaliação [s]
$t_i$ :	horas ocupadas [horas]
$T$ :	período de referência (e.g., período ocupado no ano, estação ou mês)
$TCA_{min}$ :	disponibilidade de tempo mínima aceitável
$TCU_{min}$ :	usabilidade de espaço mínima aceitável
$U$ :	transmitância térmica [W/(m <sup>2</sup> .K)]
$W$ :	potência mecânica efetiva produzida pelo corpo [W/m <sup>2</sup> ]
$wf_i$ :	fator de ponderação dependendo do limiar do modelo escolhido
$wf_j$ :	fator de ponderação dep. da disponibilidade de tempo mínima aceitável
$x$ :	indicador do limite do modelo de conforto escolhido
$y$ :	indicador do $TCA_{min}$ ou $TCU_{min}$
$u_a$ :	velocidade relativa do ar [m/s]

## SÍMBOLOS GREGOS

$\alpha$ :	absortância solar
$\alpha_{SW}$ :	absortância a radiação de ondas curtas pelo corpo
$\alpha_{LW}$ :	absortância a radiação de ondas longas pelo corpo
$\alpha_{irr,dif}$ :	absortância relativa à radiação solar difusa
$\alpha_{irr,dir}$ :	absortância relativa à radiação solar direta
$\alpha_{sf}$ :	coeficiente de absorção da superfície do segmento do corpo
$\varepsilon$ :	emissividade
$\varepsilon_N$ :	emissividade da superfície interna N
$\varepsilon_e$ e $\varepsilon_i$ :	emissividade da superfície externa e interna do vidro
$\varepsilon_{AT}$ :	emissividade da área de teste
$\varepsilon_p$ :	emissividade a ondas longas da pessoa

$\eta_{ev}$ :	eficiência evaporativa (assume-se 0,85)
$\rho_N$ :	coeficiente de reflexão na superfície N do envelope
$\rho_{floor}$ :	coeficiente de reflexão do piso
$\rho_{eE}$ e $\rho_{eI}$ :	reflexão de energia externa e interna do vidro
$\sigma$ :	constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^2.\text{K}^{-4}$ )
$\tau_e$ :	transmissão de energia solar do vidro
$\theta_1$ :	azimute solar [graus]
$\theta_2$ :	azimute do corpo humano [graus]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>25</b>
1.1	TEMA .....	25
1.2	JUSTIFICATIVA .....	25
1.3	PROBLEMA DE PESQUISA .....	30
1.4	OBJETIVOS .....	30
<b>1.4.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>30</b>
<b>1.4.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>31</b>
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	31
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>34</b>
2.1	QUALIDADE DO AMBIENTE INTERNO E DESEMPENHO EM ATIVIDADES LABORAIS .....	35
2.2	CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES COM ALTO PERCENTUAL DE VIDRO NA FACHADA .....	37
2.3	AVALIAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO .....	54
<b>2.3.1</b>	<b>Requisitos de conforto térmico</b> .....	<b>54</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Normas de Conforto e Qualidade Ambiental em Edifícios</b> .....	<b>58</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Modelos de Conforto Térmico em Ambientes Internos</b> .....	<b>61</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Avaliação a Longo Prazo das Condições Gerais de Conforto Térmico</b> .....	<b>74</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Desconforto Térmico Localizado</b> .....	<b>76</b>
<b>2.3.6</b>	<b>Contribuição da Radiação Solar no Conforto Térmico e Modelos de Ajuste Solar</b> .....	<b>78</b>
<b>2.3.7</b>	<b>Avaliação Dinâmica e Espacial de Conforto Térmico</b> .....	<b>86</b>
2.4	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NA PREVISÃO DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO .....	91
<b>2.4.1</b>	<b>Ferramentas de simulação de desempenho de edifícios</b> .....	<b>92</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Incertezas e definições na modelagem computacional</b> .....	<b>95</b>
2.5	MODELO DE ESCRITÓRIO REPRESENTATIVO .....	104
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO DE LITERATURA.....	117
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO <i>FRAMEWORK</i></b> .....	<b>120</b>
3.1	MODELO DE ESCRITÓRIO REPRESENTATIVO PARA SIMULAÇÃO DE CONFORTO E DESEMPENHO TÉRMICO .....	122

3.2	AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO EM AMBIENTES COM INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR: MODELOS E MÉTRICAS.....	128
3.3	AVALIAÇÃO PREDITIVA DE CONFORTO TÉRMICO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	133
3.3.1	<b>Simulação de Ambientes Representativos.....</b>	<b>134</b>
3.3.2	<b>Influência da Massa Interna na Estimativa das Condições Térmicas..</b>	<b>144</b>
3.3.3	<b>Algoritmo de Convecção nas Superfícies Internas .....</b>	<b>155</b>
4	<b>APRESENTAÇÃO DO <i>FRAMEWORK</i> .....</b>	<b>173</b>
4.1	DEFINIÇÃO DO ESCRITÓRIO OU OBJETO DE ESTUDO .....	173
4.2	MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	175
4.3	AVALIAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO.....	176
5	<b>APLICAÇÃO DO <i>FRAMEWORK</i> .....</b>	<b>178</b>
5.1	DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO .....	178
5.2	RESULTADOS .....	181
5.3	DISCUSSÃO .....	193
6	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>195</b>
6.1	LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	198
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	199
6.3	PUBLICAÇÕES.....	200
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>202</b>
	<b>APÊNDICE A – MODELOS DE CONFORTO TÉRMICO MULTISSEGMENTO ....</b>	<b>218</b>
	<b>APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DOS MODELOS DE AJUSTE SOLAR .....</b>	<b>224</b>
	<b>APÊNDICE C – DEFINIÇÃO DO MODELO DE AJUSTE SOLAR .....</b>	<b>232</b>
	<b>APÊNDICE D – RESULTADOS DOS ALGORITMOS DE CONVECÇÃO NAS SUPERFÍCIES INTERNAS.....</b>	<b>260</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A presente pesquisa se insere na temática de Conforto Térmico em Edificações e foi desenvolvida junto ao Laboratório de Conforto Ambiental – LabCon, na área de concentração Projeto e Tecnologia do Ambiente Construído, linha de pesquisa Comportamento Ambiental do Espaço Urbano e das Edificações.

### 1.1 TEMA

A pesquisa aborda a avaliação preditiva do conforto térmico e o potencial desconforto térmico local relacionado ao desempenho de fachadas envidraçadas de edifícios, por meio de simulação computacional. O estudo concentra-se principalmente em ambientes de escritórios com grandes áreas envidraçadas, onde há permanência de ocupantes próximo às janelas.

### 1.2 JUSTIFICATIVA

“Qualquer um que já se sentou próximo a uma janela fria em um dia de inverno ou sob a luz direta do sol em um dia quente reconhece que as janelas podem causar desconforto térmico. (...) Os sistemas de condicionamento térmico são projetados para responder aos sensores de temperatura, o que não reflete de fato os problemas de radiação causados pelas janelas”. (HUIZENGA et al., 2006, tradução própria)

Assim se inicia o relatório final para o Conselho Nacional de Avaliação da Fenestração sobre o desempenho de janelas para conforto térmico humano, publicado em 2006 pelos CBE (*Center for the Build Environment*) da Universidade da Califórnia. Esta citação reflete a necessidade contínua de estudar o impacto das áreas transparentes no conforto térmico de pessoas em espaços internos.

Ao abordar a transferência de calor através da envoltória do edifício, enfatiza-se a preocupação com as áreas transparentes. O desempenho térmico e energético da janela depende principalmente da sua transmitância térmica, transmitância solar e estanqueidade do sistema de esquadrias (GASPARELLA et al., 2011). Esses elementos são mais suscetíveis às trocas de calor devido à transparência à radiação solar e à alta transmitância térmica, que é cerca de cinco vezes maior do que outros componentes opacos do envelope do edifício (LEE et al., 2013). À vista disso, as

janelas tendem a ser o componente da envoltória que mais contribui para o ganho de calor e impactam significativamente o conforto térmico dos ocupantes em espaços internos, quando não estão em contato direto com a cobertura. Ainda assim, estações de trabalho frequentemente são posicionadas próximo às janelas, onde a ocorrência de desconforto térmico é mais provável.

Embora a vista externa seja altamente desejável, Huang, Niu e Chung (2014) enfatizam que o uso de amplas áreas envidraçadas na fachada intensifica consideravelmente a carga térmica no interior do edifício. Sob outra perspectiva, Tzempelikos, Athienitis e Nazos (2010) afirmam que fachadas totalmente envidraçadas, mas com alto desempenho térmico, podem reduzir a demanda de aquecimento em climas predominantemente frios, como em Montreal, no Canadá.

“Um projeto otimizado da envolvente do edifício é vital para alcançar economia de energia e conforto térmico” (HAWILA et al., 2019). Além das questões relacionadas à carga interna e demanda para condicionamento térmico, as fachadas envidraçadas também afetam a percepção térmica dos ocupantes em espaços internos (CAPPELLETTI et al., 2014). As pessoas podem experimentar desconforto térmico devido à incidência de radiação solar e à possibilidade de assimetria radiante, além do desconforto visual causado pelo ofuscamento. Para mitigar esse desconforto, os ocupantes tendem a acionar as persianas para reduzir a entrada de radiação solar e mantê-las fechadas depois disso. Esse comportamento aumenta o consumo energético com iluminação artificial, pois reduz a admissão de luz natural no ambiente e aumenta a dependência do sistema de iluminação (BAVARESCO; GHISI, 2017; HUANG; KANG, 2021).

Cappelletti et al. (2014) ressaltam que a contribuição da radiação solar direta e difusa não pode ser negligenciada, pois frequentemente é a causa de desconforto de ocupantes. Zygmunt e Gawin (2018) enfatizam a necessidade de controle na admissão de radiação solar para melhorar o conforto térmico em ambientes internos e reduzir a demanda por resfriamento no período de verão.

As trocas de calor por radiação são uma parcela relevante na avaliação do balanço térmico do corpo humano em ambientes internos e externos (THORSSON et al., 2007) e representam até 30% das trocas térmicas totais de uma pessoa (LA GENNUSA et al., 2005). Além disso, a radiação solar que incide no corpo humano afeta significativamente a sensação térmica percebida pelo ocupante de um espaço (MARINO et al., 2017).

O campo radiante é normalmente representado pela temperatura radiante média (MRT), que é definida como “a temperatura uniforme de um invólucro imaginário no qual a transferência de calor por radiação do corpo humano é igual à transferência de calor por radiação em um invólucro real não uniforme” (ASHRAE, 2020). Esse parâmetro ambiental está mais diretamente relacionado às características do envelope do edifício do que outros parâmetros, especialmente na presença de elementos transparentes (CAPPELLETTI et al., 2014).

Este índice não pode ser obtido diretamente através de medições. Existem dois métodos principais recomendados por normas. O primeiro calcula a MRT com base na temperatura do ar e na temperatura de globo. Esse indicador inclui a contribuição da radiação de ondas longas e curtas sem diferenciá-las. O segundo método utiliza a temperatura das superfícies ao redor do sujeito juntamente com o fator de forma entre a pessoa e as superfícies para calcular a MRT. Portanto, expressa apenas a temperatura radiante média devido à radiação de ondas longas e negligencia a radiação solar que incide sobre o indivíduo.

Os modelos tradicionais de conforto térmico não são adequados para avaliar essa tipologia de ambiente, visto que, com base no cálculo da MRT, não consideram o impacto na radiação solar sobre o ocupante. Essa problemática é particularmente relevante em climas com alta incidência de radiação solar, como no Brasil. Devido a essa limitação, principalmente em relação à avaliação preditiva de conforto térmico, novas ferramentas e métodos têm sido desenvolvidos e constantemente aprimorados para corrigir o efeito da radiação solar direta e difusa. A maioria desses métodos corrige a MRT e pode ser aplicada tanto ao modelo de conforto térmico adaptativo quanto ao modelo PMV-PPD (ARENS et al., 2015; LA GENNUSA et al., 2007; MARINO et al., 2018a). Esses métodos também podem ser aplicados ao modelo *Two-nodes*, como em Bessoudo et al. (2010) e Tzempelikos et al. (2010). Zhang et al. (2018) propuseram a correção diretamente no cálculo do PMV (*predicted mean vote*) ou na temperatura operativa. Huang e Zhai (2020) incluem a radiação solar como um componente na temperatura do ar e substituem este valor na equação do PMV. Os modelos possuem diferenças significativas no cálculo da contribuição da radiação solar. Entretanto, há poucos estudos que comparem os resultados de condições de conforto térmico obtidos com cada modelo. Além disso, os modelos de ajuste solar foram definidos para climas específicos e pouco explorados no contexto climático brasileiro.

No que diz respeito às principais normas internacionais e nacionais de conforto térmico em edificações, apenas a ASHRAE 55 (2020) considera a contribuição da radiação solar nos ocupantes. As demais normas, como a ISO 7730 (2005), a ISO 17772 partes 1 e 2 (2017, 2018) e a EN 16798-1 (2019b), abordam apenas a parcela infravermelha das trocas térmicas por radiação, i.e., superfícies aquecidas.

Apesar da radiação solar ser frequentemente citada como uma das principais fontes de desconforto em ambientes com amplas áreas envidraçadas e alguns modelos de ajuste solar terem sido desenvolvidos, o seu efeito sobre o ocupante é frequentemente negligenciado. A maioria dos estudos de avaliação preditiva ainda não inclui o ajuste solar nos índices de conforto como parte essencial na avaliação preditiva de conforto térmico.

Zomorodian e Tahsildoost (2017) enfatizam que a MRT varia de acordo com a localização do ocupante no ambiente interno, principalmente em relação à proximidade com as superfícies externas. Marino et al. (2018a) destacam que a sensação térmica do ocupante segue essa variação, tornando essencial avaliar o conforto térmico no local exato, real ou previsto, onde a estação de trabalho está situada.

Alunos em salas de aula, por exemplo, têm dificuldade em se adaptar à presença de brilho e desconforto local por meio do acionamento de cortinas ou reposicionamento da carteira (ZOMORODIAN; TAHSILDOOST, 2017). O mesmo problema ocorre em relação à localização das estações de trabalho, agravando-se em escritórios de planta aberta. Portanto o *layout* de posicionamento das estações de trabalho é tão importante quanto a escolha dos sistemas construtivos da envoltória, como o vidro, e dos sistemas de sombreamento internos ou externos.

A condição de assimetria térmica em ambientes com amplas áreas de vidro é frequentemente observada. Contudo, a maioria dos estudos que avaliam o impacto das características das janelas nas condições de conforto térmico de um ambiente ou edifício aplica um método simplificado. Costuma-se considerar a temperatura operativa homogênea ou em um ponto central no ambiente. Além disso, embora os modelos tradicionais de conforto térmico não considerem o efeito da radiação solar que entra através das janelas e incide no ocupante, eles são geralmente aplicados nesses estudos sem nenhum ajuste dos índices de conforto. Ambas as abordagens

negligenciam a possibilidade de desconforto térmico local nas áreas próximas às paredes externas.

Em pesquisa desenvolvida anteriormente (PINTO, 2017; PINTO; WESTPHAL, 2016, 2017, 2019a, 2019b, 2021), foi investigado o impacto do uso de vidros insulados (IGU) no desempenho termo energético de edifícios de escritórios com sistemas de climatização mecânica em diferentes climas do Brasil. Nos climas tropicais, observou-se um desempenho semelhante entre vidro insulado e não insulado, com uma ligeira tendência de melhor desempenho para o sistema IGU. Todavia, a economia anual de energia para o condicionamento de ar foi baixa, representando até 2,8% de redução. Já na região sul, de clima temperado, o uso do IGU resultou em um desempenho inferior em comparação aos vidros não insulados, gerando um aumento de consumo de energia de resfriamento entre 2,1% e 9,3%. Os resultados indicaram que o investimento adicional em IGU não é justificado pelo seu desempenho térmico ou pela economia de energia em edifícios de escritórios no Brasil. No entanto, esta pesquisa se concentrou no desempenho termo energético, analisando o consumo de energia para climatização, e não foram exploradas as possibilidades de melhoria no conforto térmico interno com o uso do sistema insulado. A intenção inicial era avaliar também o conforto térmico nessas condições, mas diversas limitações foram observadas no uso de ferramentas de simulação computacional para essa finalidade em ambientes com elevado percentual de vidro na fachada.

As ferramentas de simulação computacional de desempenho de edifícios permitem, além de outros propósitos, realizar análises rápidas de desempenho térmico e investigar o impacto dos sistemas de fachada. O seu uso possibilita prever o impacto do uso de certos materiais e sistemas nas condições térmicas de ambientes internos, por exemplo. Desta forma, pode auxiliar na tomada de decisão desde as fases iniciais de projeto, ou ampliar o alcance da investigação na pesquisa científica. Entretanto, as simulações térmicas envolvem fatores múltiplos e fenômenos físicos complexos.

As condições de conforto devem ser igualmente importantes na tomada de decisões desde as fases iniciais do projeto. Apesar de a BPS ser amplamente validada e consolidada para estimar o desempenho energético, as análises de conforto térmico abrangem aspectos adicionais dos fenômenos de transferência de calor. Dentre estes fatores, destacam-se a distribuição espacial e as trocas radiantes entre o ocupante e

o ambiente circundante. A estimativa do conforto térmico se torna ainda mais complexa em edifícios com alto percentual de vidro na fachada, devido ao impacto significativo da radiação solar. No entanto, esses aspectos ainda são pouco explorados na modelagem computacional e no uso de *softwares* para a previsão de conforto térmico. Além disso, as incertezas de modelagem podem não ser as mesmas nas avaliações do consumo de energia e das condições de conforto térmico.

Portanto, a presente pesquisa pretende demonstrar como os modelos de conforto térmico podem ser ajustados para uma avaliação preditiva mais apropriada para essa tipologia de edificação, estruturado na forma de um *framework*. Este contempla um conjunto de métodos de ajuste dos índices de conforto térmico, métricas espaciais e temporais, e definições de modelagem. Para tanto, foram realizadas investigações do impacto dessas definições focando nas três etapas na avaliação preditiva de conforto térmico: (a) definição e caracterização do objeto de estudo, (b) modelagem e simulação computacional e (c) índices e métricas para caracterização das condições de conforto.

### 1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

A presente pesquisa pretende abordar a seguinte questão: como estimar adequadamente, por meio de simulação computacional, as condições de conforto térmico em ambientes de trabalho climatizados com alto percentual de transparência da fachada?

### 1.4 OBJETIVOS

#### 1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolver um *framework* para a avaliação preditiva de conforto térmico em edifícios de escritórios climatizados artificialmente com grande área envidraçada da fachada.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Estabelecer um modelo de pavimento/sala de escritório em edifício em altura que possa ser utilizado em estudos paramétricos com foco em conforto térmico e que seja representativo para o Brasil.
- b) Investigar conjunto de modelos e métricas adequados para a avaliação preditiva do conforto térmico em ambientes de escritório com alto percentual de vidro da fachada e/ou estações de trabalho localizadas próximo a áreas envidraçadas.
- c) Verificar o impacto de simplificações e definições do modelo de simulação computacional nos resultados de avaliação de conforto térmico.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento está dividido em 6 capítulos, conforme descrito a seguir e ilustrado na Figura 1.

No **primeiro capítulo** foram apresentados o tema desta pesquisa, justificativa e objetivos.

O **segundo capítulo** aborda a revisão de literatura sobre o tema de avaliação de conforto térmico relacionado a ambientes de trabalho com alto percentual de área transparente na fachada. Além disso, investigou-se o estado da arte em relação aos modelos, métodos e métricas utilizados para avaliar o conforto térmico de ambientes internos, bem como o uso de simulações computacionais na previsão das condições de conforto térmico. Por fim, foram pesquisados modelos de escritórios que representassem a realidade brasileira para serem aplicados em pesquisas sobre o desempenho energético e térmico de sistemas construtivos.

No **terceiro capítulo**, é apresentado o desenvolvimento de um *framework* para a avaliação preditiva das condições de conforto térmico em ambientes de trabalho com fachadas envidraçadas por meio de simulação. Neste capítulo, abordam-se questões relacionadas às fases principais antes da análise dos resultados, estando dividido em três etapas. Na primeira etapa, discute-se a revisão de literatura específica e definição de um modelo de escritório para ser utilizado em estudos paramétricos com foco em conforto térmico e que possam ser representativos para o Brasil. A

seguir, é estabelecido um conjunto de modelos e métricas adequados para a avaliação preditiva do conforto térmico em escritórios climatizados com influência significativa das áreas do vidro. A última etapa aborda o impacto de simplificações e definições de modelagem computacional ainda pouco exploradas no contexto da avaliação de conforto térmico em ambientes de escritório por meio do *software EnergyPlus*.

No **quarto capítulo**, propõe-se um *framework* desenvolvido com base nos resultados e discussões apresentadas no capítulo anterior. Os procedimentos para definição do ambiente, modelagem e simulação computacional termodinâmica e avaliação do conforto térmico são descritos. Após, no **quinto capítulo**, o *framework* proposto é aplicado a um estudo de caso para demonstrar sua utilização e potencialidades.

Por fim, no **sexto capítulo**, são apresentadas as considerações gerais, agregando todas as etapas da pesquisa. Ademais, comentam-se as limitações da pesquisa, sugestões para trabalhos futuros e artigos publicados até o momento.

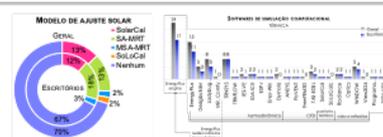
Figura 1 - Estrutura da Tese

## 1 INTRODUÇÃO

apresentação do tema da pesquisa, justificativa e objetivos.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

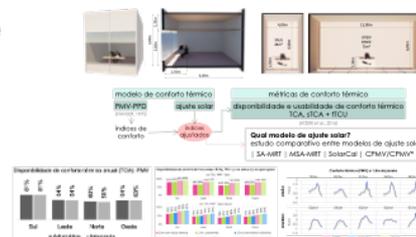
revisão de literatura sobre avaliação preditiva de conforto térmico relacionado a ambientes de trabalho com alto percentual de área transparente na fachada.



## 3 DESENVOLVIMENTO DO FRAMEWORK

desenvolvimento de um *framework* para avaliação preditiva de conforto térmico em ambientes de trabalho com fachadas envidraçadas por simulação, em três etapas:

- Modelo de escritório representativo para simulação de conforto e desempenho térmico.
- Avaliação do conforto térmico em ambientes com influência da radiação solar: modelos e métricas.
- Avaliação preditiva de conforto térmico por simulação computacional termodinâmica.



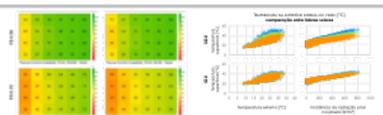
## 4 APRESENTAÇÃO DO FRAMEWORK

apresentação e descrição de cada uma das etapas do *framework* proposto.



## 5 APLICAÇÃO DO FRAMEWORK

aplicação do framework proposto em um estudo de caso para demonstrar sua utilização e potencialidades.



## 6 CONCLUSÕES

conclusões gerais, limitações, sugestões para trabalhos futuros e artigos publicados.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A ASHRAE *Standard* 55 e a ISO 7730 definem o conforto térmico como “a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico” (ASHRAE, 2020; ISO, 2005). A avaliação do conforto térmico em ambientes internos ocupados é realizada por meio de uma análise integrada de fatores ambientais e pessoais, que podem resultar em um ambiente térmico aceitável ou não para o ocupante. Em edifícios com grandes áreas envidraçadas na fachada, a avaliação adequada se torna ainda mais importante, devido à maior influência das condições térmicas externas.

Existem duas formas principais de avaliar as condições de conforto térmico: de forma preditiva para ambientes projetados, estimando as condições por meio de simulações termodinâmicas, ou por meio de medição dos fatores ambientais e pessoais em edifícios existentes. Em ambas as situações, são utilizados modelos de conforto térmico para determinar a aceitabilidade do ambiente, levando em conta a sensação térmica, o desconforto localizado e a porcentagem de pessoas insatisfeitas. As normas nacionais e internacionais definem os requisitos para o conforto térmico e padronizam os métodos de avaliação da qualidade do ambiente interno.

As duas primeiras seções desse capítulo têm como objetivo entender como a qualidade do ambiente interno afeta o desempenho de atividades em escritórios, e quais são as principais causas de desconforto térmico na presença de fachadas envidraçadas. Em seguida, investigaram-se os principais requisitos, normas e modelos relacionados à avaliação de conforto térmico. Além disso, fatores relacionados ao desconforto térmico local, contribuição da radiação solar e métodos de avaliação dinâmica e espacial do conforto térmico foram abordados. Discutiu-se também o uso de ferramentas computacionais de simulação termodinâmica na avaliação preditiva de conforto térmico. Por fim, buscaram-se modelos de pavimento ou salas típicas de edifício de escritório, adequados para estudos paramétricos sobre conforto térmico e que possam ser representativos do contexto brasileiro.

## 2.1 QUALIDADE DO AMBIENTE INTERNO E DESEMPENHO EM ATIVIDADES LABORAIS

O projeto e planejamento de ambientes de escritórios deve considerar as condições ambientais dos espaços de trabalho e seu impacto no desempenho das atividades dos ocupantes. A má qualidade do ambiente pode resultar em custos extras para os empregadores, como abordado nas normas EN 16798-1 e ISO 17772-1. Um espaço com boa qualidade ambiental pode melhorar o desempenho e também reduzir as ausências e afastamentos do trabalho (EN, 2019b; ISO, 2017).

Vários estudos mostram que a sensação de desconforto térmico está significativamente relacionada ao bem-estar, produtividade, desempenho cognitivo, capacidade de concentração e emoções das pessoas (ALTOMONTE et al., 2020; NIEMELÄ et al., 2002; WANG et al., 2019; YEGANEH et al., 2018; ZHANG, F.; DE DEAR; HANCOCK, 2019). A revisão do ASHRAE *Handbook Fundamentals* de 2017 incluiu um item sobre a relação entre o conforto térmico e o desempenho de tarefas em ambientes de escritório (ASHRAE, 2017c).

Estudos apontam que o desempenho cognitivo tende a ser mais afetado pela sensação térmica de calor do que de frio ou neutra (YEGANEH et al., 2018). Os ambientes aquecidos tendem a exigir mais carga mental do que os ambientes frios (WANG et al., 2019). O estresse térmico também pode diminuir a precisão da realização das tarefas (YEGANEH et al., 2018). Estudos mostram que uma mudança de 1°C na temperatura pode indicar uma variação de cerca de 2% na produtividade em uma faixa de temperatura entre 21,9 °C e 28,5 °C em ambientes de *call center* (Niemelä et al., 2002), por exemplo. Neste estudo, notou-se uma redução geral da produtividade entre 5% e 7% quando a temperatura do ar interno excedeu 25°C.

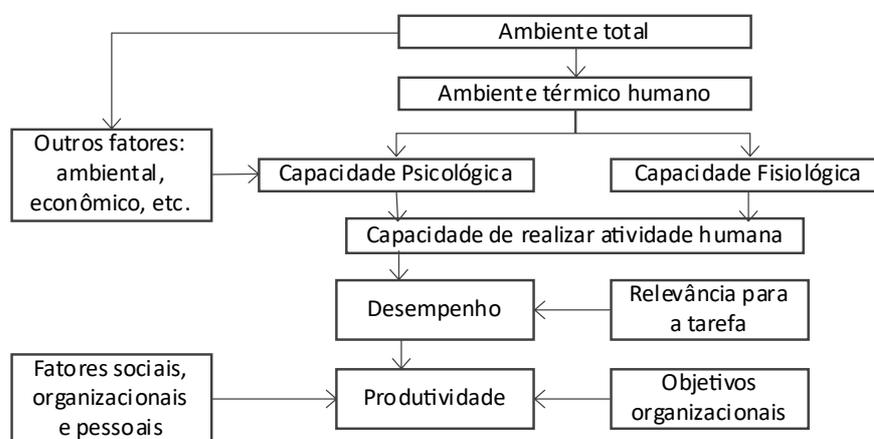
O impacto das condições térmicas nas pessoas, principalmente em ambientes moderados, pode não ser notado diretamente no desempenho de tarefas, mas na carga mental necessária para mantê-la (WANG et al., 2019). A correlação entre a temperatura e o desempenho cognitivo é afetada pelo tipo de tarefa, seu indicador e o tempo de exposição (YEGANEH et al., 2018).

A maioria dos estudos que investigam a relação entre o ambiente térmico e o desempenho laboral utilizam a temperatura do ar interno como indicador principal. No entanto, outros fatores ambientais, tais como a velocidade do ar, a temperatura do ar insuflado, a umidade relativa e a exposição à radiação solar, podem influenciar

significativamente. O estudo realizado por Lipczynska, Schiavon e Graham (2018), em Singapura, indica preferência por uma temperatura mais elevada quando há possibilidade de aumentar a velocidade do ar. Durante o estudo, os participantes relataram uma sensação térmica desagradável quando o ar-condicionado e os ventiladores foram desligados e a temperatura atingiu 28°C, o que os distraiu da realização de suas atividades usuais. Embora haja uma quantidade significativa de pesquisas sobre a influência da temperatura do ar no desempenho, não foram encontrados estudos que investiguem diretamente a relação entre a exposição à radiação solar e o desempenho de tarefas.

Autores enfatizam que a qualidade do ambiente interno tem impacto significativo no bem-estar, desempenho cognitivo e produtividade em espaços de trabalho. Além dos fatores térmicos, a concentração de dióxido de carbono, poluentes no ar, ambiente acústico e níveis de iluminação também podem ter impacto (AL TOMONTE et al., 2020; NIEMELÄ et al., 2002). Devido às limitações relacionadas aos experimentos e discrepâncias metodológicas, bem como à ampla gama de variáveis ambientais, psicológicas e fisiológicas, é complexo medir a relação entre os fatores térmicos e o desempenho cognitivo e a produtividade (AL TOMONTE et al., 2020; WANG et al., 2019; ZHANG; DE DEAR; HANCOCK, 2019). Estes efeitos são demonstrados em revisão multidisciplinar realizada por Zhang, De Dear e Hancock (2019), que destaca os efeitos de ambientes térmicos moderados no desempenho cognitivo (Figura 2).

Figura 2 - Os efeitos do ambiente térmico na atividade, desempenho e produtividade humana.



Fonte: traduzido de Zhang, De Dear e Hancock (2019).

No entanto, fica claro que a sensação térmica dos ocupantes é um fator importante que influencia o desempenho e a produtividade no local de trabalho, especialmente quando há desconforto por calor. Estes estudos destacam a necessidade de pesquisas e ações para melhorar a qualidade do ambiente térmico em espaços de trabalho, a fim de garantir o conforto e bem-estar dos ocupantes.

## 2.2 CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES COM ALTO PERCENTUAL DE VIDRO NA FACHADA

A escolha adequada dos sistemas construtivos de um edifício é determinante para manter a qualidade do ambiente interno e otimizar a eficiência energética, independentemente das condições ambientais externas. Ao considerar a transferência de calor pela envoltória do edifício, destaca-se a atenção com o vidro. Devido à sua alta transmitância térmica e transparência à radiação solar, as trocas de calor são mais diretas e intensas nesses elementos. Por esta razão, as janelas são os componentes da envoltória que mais contribuem para o ganho de calor e impactam o conforto térmico dos ocupantes, especialmente em edifícios em altura.

Ulpiani (2017) observa um padrão arquitetônico global dominado por fachadas envidraçadas, apesar da grande diversidade de climas existentes e de ser um modelo altamente vulnerável a essas variações. Inúmeros argumentos são atribuídos ao seu uso, principalmente sobre aspectos estéticos, integração visual entre interior e exterior e custos de manutenção. Além disso, os avanços na tecnologia de fabricação de vidro resultaram em produtos com maior capacidade de controle solar, o que também incentiva projetistas e desenvolvedores a optarem por esse modelo arquitetônico (HUANG; NIU; CHUNG, 2014; TRAPANO; BASTOS, 2010).

Huang, Niu e Chung (2014) destacam que, embora a vista externa seja altamente desejável, grandes áreas envidraçadas aumentam significativamente a carga térmica interna. Sob outra perspectiva, Tzempelikos et al. (2010) afirmam que fachadas envidraçadas de alto desempenho térmico reduzem a demanda por aquecimento em locais com clima frio, como Montreal, Canadá.

Fachadas totalmente envidraçadas também podem levar ao desconforto térmico, devido à incidência de radiação solar direta e assimetria radiante, além do desconforto visual causado por ofuscamento. No entanto, áreas de permanência, como estações de trabalho ou carteiras em salas de aula, frequentemente estão

localizadas próximas às janelas, onde há maior probabilidade de ocorrer desconforto. Bavaresco e Ghisi (2017) destacam que, para reduzir a incidência solar, os ocupantes tendem a fechar as cortinas. Conseqüentemente, há um incremento no consumo de energia devido à diminuição da entrada de luz natural e ao aumento no uso de iluminação artificial.

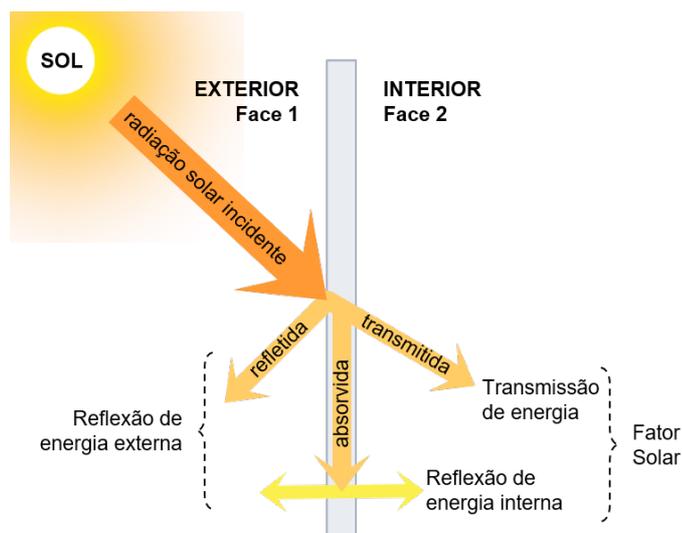
No entanto, reduzir as janelas ao mínimo não é a melhor solução para lidar com o ganho de calor, uma vez que estudos demonstram a importância da vista através da janela e da conexão com o ambiente externo tanto para o desempenho de tarefas quanto para o bem-estar dos ocupantes de escritórios. A presença de janelas no ambiente de trabalho proporciona uma sensação maior de bem-estar e melhora a produtividade, pois aprimora a memória de trabalho e a capacidade de concentração (KO et al., 2020).

A visão através da janela também pode afetar a percepção térmica dos ocupantes. Ko et al. (2020) apresentam um experimento realizado em câmaras climáticas, que investigou o efeito da presença de uma janela com vista externa na percepção térmica, nas emoções e no desempenho cognitivo de pessoas em espaços de trabalho. O estudo demonstrou que as pessoas tendem a ser mais tolerantes a condições fora dos limites de conforto quando estão próximas de uma vista externa. Houve uma redução média de 0,3 no voto de sensação térmica, o que corresponde a aproximadamente 0,74 °C. Esse estudo reforça ainda mais a necessidade de fazer escolhas conscientes em relação aos sistemas de janelas, contemplando questões de bem-estar, desempenho energético e conforto térmico, visual e acústico.

O desempenho térmico e energético da janela depende principalmente de sua capacidade de transmitir calor e radiação solar e a estanqueidade do sistema (GASPARELLA et al., 2011). A capacidade de transmitir calor de um sistema é geralmente descrita pela transmitância térmica. Este índice representa a taxa de transferência de calor por condução através do material ou sistema, incluindo também o efeito convectivo nas superfícies interna e externa (ASHRAE, 2017c). Em estudo realizado por Lee et al. (2013), na Coreia, os autores enfatizam que a transmitância das janelas costuma ser cinco vezes maior que a de outros componentes opacos do envelope do edifício, tornando-se o elemento da edificação mais influenciado pelo ambiente externo. A transmissão de radiação solar de um sistema de janelas é caracterizada principalmente pelo SHGC (*Solar Heat Gain Coefficient* – Coeficiente de Ganho de Calor Solar), ou Fator Solar (FS), e pela transmissão de energia solar

( $\tau_E$ ). O primeiro é definido com a fração da energia solar que é transmitida ao ambiente interno, por transmissão direta através do vidro e absorvida pelo sistema, sendo posteriormente transmitida para o ambiente por convecção. Enquanto a  $\tau_E$  descreve apenas a parcela da radiação solar incidente que é transmitida diretamente através do sistema, conforme esquematizado na Figura 3.

Figura 3 - Transmissão da radiação solar através do vidro



Fonte: Pinto (2017), adaptada de ABNT (2011).

Cappelletti et al. (2014) avaliaram a demanda energética para o condicionamento térmico de um escritório de planta aberta de 100m<sup>2</sup>, em que todas as paredes e a cobertura estão expostas às condições externas. Os parâmetros variáveis foram o tipo de vidro (variando entre composições duplas e trilhas, com baixo e alto fator solar), a área da janela (WWR: 45% - 75%), o número de fachadas com abertura (uma ou duas) e a orientação solar das aberturas (leste, leste e oeste, sul, sul e norte). Três contextos climáticos foram analisados: Paris, Milão e Roma, classificados na escala de Köppen-Geiger como Cfb, Cfa e Csa, respectivamente. Foram avaliadas também as condições de conforto térmico a longo prazo no verão e no inverno, considerando apenas o período de ocupação. O modelo de conforto térmico de Fanger (PMV-PPD) foi utilizado, com adição da influência da radiação solar direta e difusa no ocupante, utilizando o modelo de La Gennusa et al. (2007). O conforto também foi avaliado espacialmente, com nove pontos distribuídos no ambiente. As simulações termodinâmicas foram realizadas no *software* TRNSYS, que possibilita a análise espacial das condições térmicas. Em Roma, onde há demanda

de resfriamento ao longo de todo o ano, o vidro duplo com baixo FS apresentou melhor desempenho térmico e condições de conforto. Comparado ao vidro triplo, ele reduz a entrada de radiação solar direta sem aumentar a resistência térmica da janela. Para climas com demanda de aquecimento no inverno e resfriamento no verão, os autores recomendam sistemas com maior resistência térmica (vidro triplo), baixo FS e ampla área de janela. Dessa forma, redução na admissão de radiação solar durante o inverno, devido ao FS, é compensada pela área de janela, garantindo melhores índices de conforto térmico.

Ulpiani et al. (2017) investigaram o superaquecimento de edifícios com fachadas completamente envidraçadas, tendo como estudo de caso um pequeno escritório na Universidade Policlínica, em Ancona (Itália). Buscou-se quantificar o nível de desconforto no local e suas características por meio de medições durante um dia ensolarado, variando a forma de controle do sistema de condicionamento. O conforto térmico foi avaliado com base nas faixas de temperatura operativa e PMV, e a possibilidade de desconforto localizado devido a gradientes verticais e correntes de ar foi analisada. Os autores não consideraram a influência da radiação solar nem aplicaram nenhum tipo de ajuste na temperatura radiante média (MRT). Ainda assim, evidenciaram fortes indícios da contribuição radiante no desconforto térmico devido às elevadas temperaturas superficiais do vidro, que chegaram a 40°C.

Zygmunt e Gawin (2018) realizaram uma análise de demanda de energia em um complexo de escritórios em Gdansk, Polônia. Os edifícios desse complexo são caracterizados por serem amplos escritórios de planta aberta com fachadas envidraçadas. A partir de um modelo-base, foram propostas e aplicadas seis alterações de forma isolada. Em relação às áreas envidraçadas, propôs-se o uso de vidro reflexivo na fachada ou a aplicação de vidro fotovoltaico na fachada principal (sudeste). O conforto térmico também foi avaliado, considerando-se um valor médio de PMV para o ambiente. No verão, os melhores índices de conforto térmico foram obtidos com o vidro reflexivo. A redução na admissão de radiação solar contribuiu para melhorar o conforto térmico e proporcionar economia no consumo de energia durante a estação. Os autores ressaltam a importância de garantir o conforto térmico em ambientes destinados a permanência prolongada de pessoas.

Hodder e Parsons (2007) investigaram o efeito da radiação solar direta na sensação térmica de ocupantes de veículos, variando a intensidade e o espectro da radiação solar. Foi realizado um experimento com pessoas, simulando o interior de

um carro e a exposição à radiação solar em uma câmara climática controlada, mantendo a condição de neutralidade térmica na ausência de radiação solar. Observou-se que a sensação térmica está principalmente relacionada à intensidade de radiação solar que incide no indivíduo, enquanto as propriedades espectrais demonstraram pouco ou nenhum efeito significativo. Os resultados indicaram que, para cada aumento de  $200 \text{ W/m}^2$  na intensidade da radiação solar incidente sobre o ocupante, o voto de sensação térmica tende a aumentar em uma unidade.

Uma consequência pouco enfatizada é a possibilidade de desconforto térmico por calor, mesmo em climas com baixas temperaturas médias do ar externo. Este fenômeno ocorre devido à presença de radiação solar e é agravado por grandes áreas envidraçadas. Pinto e Westphal (2019a) avaliaram, por meio de simulações computacionais, o potencial de melhoria das condições de conforto térmico em escritórios com fachada envidraçada utilizando vidro insulado duplo em Florianópolis, cidade de clima temperado úmido. Apesar de o sistema de condicionamento de ar manter a temperatura do ar constante durante a ocupação, houve ocorrência de desconforto térmico por calor, principalmente no verão, mas também no inverno em períodos com temperatura externa abaixo de  $15^\circ\text{C}$ .

O desconforto por calor pode ocorrer mesmo em locais com invernos rigorosos. Tzempelikos et al. (2010) investigaram o impacto das condições climáticas externas no ambiente térmico interno de uma sala individual de escritório com fachada envidraçada em Montreal, Canadá. Foram testados três tipos de vidro (duplo, duplo com *Low-e* e triplo com *Low-e*) e duas absortâncias da persiana de rolo (20% e 70%). Apenas condições de frio foram analisadas: um dia frio e nublado e um dia frio e ensolarado. O conforto térmico foi analisado por meio do modelo de conforto térmico *Two-Node*, aplicando o modelo de ajuste do efeito da radiação solar de La Gennusa et al. (2007). Considerou-se um ocupante sentado de lado para a fachada, no centro da sala (a 1,5m da janela). Os dias claros de inverno foram as condições mais desafiadoras para manter o conforto e gerenciar o condicionamento térmico devido à radiação solar direta. O maior isolamento do vidro proporcionou melhora no conforto térmico, reduzindo a influência do clima externo no ambiente interno e, no contexto de inverno rigoroso, também resultou em uma redução na demanda por aquecimento. Outro fator interessante é que, mesmo com a temperatura externa inferior a  $-15^\circ\text{C}$ , houve ocorrência de desconforto por calor nos modelos de vidro duplo no dia de céu claro. Os picos de desconforto por calor, DISC (índice de desconforto térmico), de

+3,1 e +2,1 com o vidro duplo sem e com revestimento *Low-e*, respectivamente, coincidem com o período de exposição à radiação solar. Os autores também relatam que o sombreamento interno pode melhorar as condições de conforto, como a redução da assimetria na temperatura radiante, independentemente do tipo de vidro.

Huang e Kang (2021) obtiveram resultados semelhantes em uma investigação sobre os efeitos da radiação solar nas condições térmicas de uma sala de escritório não condicionada em Lhasa, no Tibet, que apresenta clima frio de altitude. A pesquisa foi conduzida em quatro etapas: (1) avaliação das condições térmicas na sala por meio de medições; (2) verificação do comportamento adaptativos dos ocupantes em situação de incidência de radiação solar no inverno; (3) investigação das condições térmicas da sala ao longo do ano por meio de simulação computacional utilizando os softwares *DesignBuilder* e *Ladybug Tools*; e (4) estudo de uma tecnologia aprimorada de aquecimento solar passivo que atenua os efeitos de superaquecimento nesse clima. Os resultados das simulações anuais demonstraram a ocorrência de superaquecimento ( $T_{op\_winter} > 24,2^{\circ}\text{C}$ ) entre 77% e 93% das horas do dia durante o inverno, enquanto não houve ocorrência de superaquecimento no verão. Os autores enfatizam a necessidade de ajuste dos indicadores de conforto considerando o efeito da radiação solar sobre os ocupantes. Neste estudo, foi utilizado o modelo de ajuste solar *SolarCal*. Também foi observada uma discrepância significativa na temperatura operativa corrigida entre as regiões irradiadas e não irradiadas, evidenciando a necessidade de análise espacial do conforto térmico em ambientes com uma alta proporção de vidro na fachada.

Hawila et al. (2018) investigaram a sensibilidade do sistema de ar condicionado às condições climáticas externas, utilizando uma estratégia de controle do condicionamento baseada no PMV em vez da temperatura do ar. Também foram identificados os parâmetros que afetam significativamente o consumo de energia de aquecimento em um saguão de convivência de um prédio da Escola de Engenharia, em Troyes, na França (Figura 4). O ambiente está localizado no térreo e possui duas fachadas altamente envidraçadas, voltadas para sul e leste. Para a simulação térmica, foi utilizada a ferramenta de modelagem e simulação ambiental *Dymola*, que é baseada na linguagem de modelagem *Modelica*. A análise de sensibilidade foi realizada com a técnica *Design of Experiments* (DoE). Os indicadores de conforto térmico utilizados foram o PMV, o EQI (*Environment Qualit Index* – Índice de Qualidade Ambiental) (EN, 2007) e a temperatura sol-ar, a fim de investigar a

confiabilidade do controle por conforto térmico sob diferentes condições climáticas. Mesmo em situação de inverno, com a temperatura do ar externo variando entre 0 e 12 °C, os resultados indicam risco de sobreaquecimento e desconforto por calor. Esses resultados são atribuídos às fachadas envidraçadas e ao aumento significativo da MRT devido à intensa radiação solar.

Figura 4 - Fotos do objeto de estudos de Hawila et al. (2018, 2019).



Fonte: Hawila et al. (2018).

Posteriormente, Hawila et al. (2019) estudaram a otimização do projeto de edifícios, particularmente aqueles com fachadas de vidro, visando o conforto térmico, com base no uso combinado de simulações numéricas, técnica DoE e abordagem de função de necessidade. Utilizou-se o mesmo objeto de estudo de Hawila et al. (2018). Os estudantes relataram grande diferença entre a temperatura desse ambiente e das demais salas do prédio, indicando insatisfação com as condições térmicas. Os autores reforçam a relação entre o PMV e a MRT em ambientes com grandes áreas envidraçadas, devido ao efeito da radiação solar. No entanto, os estudos não aplicaram nenhum tipo de ajuste solar no PMV. Na análise de sensibilidade, a radiação solar é adicionada por meio da temperatura Sol-Ar ( $T_{sol-ar}$ ), considerando o ganho por radiação de forma uniforme e não levando em conta os efeitos da radiação direta e a possibilidade de desconforto local. O vidro é incluído como um único fator, abrangendo o sistema de janela, o FS e transmitância térmica. Os fatores que apresentaram maior significância foram a atividade metabólica e a  $T_{sol-ar}$ . Isto também demonstra a importância de fazer a escolha correta do sistema de janelas, uma vez que a  $T_{sol-ar}$  é uma relação entre a temperatura externa do ar ( $T_{out,i}$ ), a irradiação solar horizontal total ( $I_{TH,i}$ ), a absorvância solar do vidro ( $\alpha$ ) e o coeficiente de transferência de calor da superfície externa ( $h_{c,out}$ ), ponderada pelo número de janelas ( $n$ ) conforme equação (1).

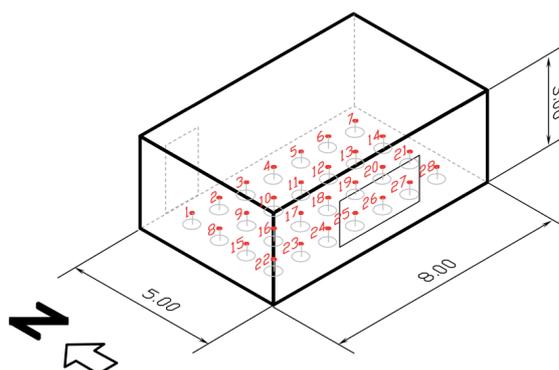
$$T_{sol-ar} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( T_{out,i} + \frac{\alpha \cdot I_{TH,i}}{h_{c,out}} \right)}{n} \quad (1)$$

O conforto térmico de uma pessoa é altamente impactado pela sua posição de permanência no ambiente e pelo período de ocupação. Em espaços coletivos de trabalho ou estudo, as pessoas que ocupam espaços próximo às fachadas externas, especialmente junto às janelas, estão mais propensas a experimentar episódios de correntes de ar e assimetria na temperatura radiante, vivenciando diferentes níveis de conforto (CHINAZZO et al., 2020). A incidência de radiação solar direta e difusa é responsável por uma parcela significativa deste efeito e pode tornar as condições ambientais intoleráveis em determinadas áreas do espaço, dependendo do tempo de permanência (MARINO; NUCARA; PIETRAFESA, 2015). A admissão de radiação solar direta tende a aquecer as superfícies nas quais incide, gerando uma distribuição térmica desigual e gerando desconforto localizado devido à assimetria na temperatura radiante (CANNISTRARO, M.; TRANCOSSI, 2019). Espaços de escritório com planta aberta e fachadas envidraçadas agravam ainda mais a não uniformidade térmica, tornando inadequado o uso de um único índice médio de conforto térmico para o ambiente como um todo. Nesses ambientes, as sensações térmicas experimentadas em diferentes pontos podem diferir significativamente (CANNISTRARO, M.; TRANCOSSI, 2019).

Chinazzo et al. (2020) ressaltam a importância de avaliar o conforto térmico espacialmente e considerar a localização das estações de trabalho ou mesas de estudo, a fim de obter ambientes com maior uniformidade térmica e luminosa. Zomorodian e Tahsildoost (2017) enfatizam a necessidade de avaliar o conforto térmico a longo prazo levando em conta sua distribuição no ambiente. A MRT varia dependendo da localização no espaço, especialmente em relação à proximidade com as superfícies externas, ao longo da fachada e em relação às condições climáticas externas, como a temperatura do ar e a posição e intensidade de radiação solar. Portanto, os índices de conforto, como o PMV e o PPD, também se alteram conforme esses fatores. A abordagem espacial não é comumente considerada na avaliação do conforto térmico de ambientes internos. Além disso, os modelos de conforto tradicionais subestimam o efeito da radiação solar, que pode passar despercebido na avaliação preditiva das condições térmicas de um ambiente quando nenhum tipo de ajuste é aplicado (MARINO; NUCARA; PIETRAFESA, 2015).

Marino, Nuncara e Pietrafesa (2015) propuseram um procedimento de avaliação e classificação do conforto térmico considerando o efeito da radiação solar e a variação espacial e temporal. O procedimento foi aplicado a um modelo de uma sala de escritório em Roma, Itália (classificação climática Csa), simulado no *software EnergyPlus*, e a temperatura radiante média foi obtida em uma malha de pontos (Figura 5). No entanto, os autores não explicam como a malha de pontos foi aplicada por meio do *EnergyPlus*. Durante o inverno, quando a altitude solar é mais baixa, a diferença da MRT calculada com e sem o ajuste solar chegou a 15 °C em um ponto a 2 m de distância da janela. Os autores ressaltam a importância de avaliar tanto os efeitos no consumo energético quanto no conforto térmico, levando em consideração as variações no tempo e no espaço.

Figura 5 - Modelo do estudo de caso de Marino, Nucara e Pietrafesa (2015).



Fonte: Marino, Nuncara e Pietrafesa (2015).

Zomorodian e Tahsildoost (2017) avaliaram os efeitos de alterações nos fechamentos transparentes na uniformidade do conforto térmico e visual, de forma espaço-temporal, utilizando métricas dinâmicas. O estudo foi realizado em uma sala de aula para o clima de Teerã, Irã (clima semiárido). Os autores utilizam a métrica de disponibilidade de conforto térmico espacial (sTCA), proposta por Atzeri et al. (2016), que é a porção espacial na qual a temperatura operativa está dentro da faixa de conforto em mais de 80% do tempo de ocupação. O efeito da radiação solar é ajustado no cálculo da MRT conforme modelo *SolarCal* (ARENS et al., 2015) aplicado no *software Honeybee* para *Grashopper*. Os resultados demonstram que as áreas próximas às janelas são realmente mais suscetíveis à ocorrência de desconforto térmico, porém em diferentes intensidades ao longo da fachada. Observou-se que o alcance do desconforto varia de forma significativa conforme a configuração das

janelas. Os autores sugerem que novos estudos devem investigar limites de métricas espaço-temporais na avaliação de conforto em edifícios para diferentes climas e tipos de construção.

Cannistraro e Trancossi (2019) avaliaram a influência da distância em relação às janelas nas condições de conforto local utilizando um sistema de condicionamento baseado em células *Peltier*. Utilizou-se um modelo de escritórios de planta aberta com uma fachada envidraçada voltada para o oeste em Messina, Itália. Foram distribuídos 16 pontos no ambiente. O período de verão foi analisado por meio do modelo de conforto de Fanger (PMV-PPD) associado à temperatura radiante média local (CANNISTRARO; CANNISTRARO; RESTIVO, 2015), e foi utilizado o método de ajuste solar do índice MRT proposto por Marino et al. (2017). Considerando a temperatura média do ar em 26 °C em um determinado momento, o PMV local variou de 2,2 no ponto a 0,75 m da janela para 0,9 a 2,25 m e 0,6 a 5,25 m. Demonstrou-se que utilizar um índice médio do ambiente não é suficiente para prever as condições térmicas encontradas pelos ocupantes em diferentes pontos do ambiente, como no caso de estações de trabalho distribuídas em um escritório.

Atzeri et al. (2018) analisaram a variação no conforto térmico utilizando diferentes sistemas e controles de operação de vidros com sombreamento acoplado em um escritório de planta aberta em Roma (classificação climática Csa) por meio das métricas TCA (*Thermal Comfort Availability*), sTCA (*spatial TCA*), TCU (*Thermal Comfort Usability*) e tTCU (*time TCU*). Os autores utilizaram o PMV-PPD como modelo de conforto, corrigido com o modelo de ajuste solar de La Gennusa et al. (2005, 2007). Avaliou-se também o desempenho da iluminação natural por meio da métrica *Daylight Autonomy* (DA) e o conforto visual utilizando o índice simplificado de probabilidade de ofuscamento por luz do dia (eDGPs – *Daylight Glare Probability simplified*). Os autores afirmam que um controle adequado de sombreamento permite a distribuição uniforme da luz natural e o equilíbrio entre o ganho solar e a iluminação, proporcionando maior conforto visual e térmico.

Além da uniformidade térmica em um dado momento e durante o ano, a combinação de grandes áreas envidraçadas e incidência de radiação solar também tende a causar maior flutuação térmica ao longo do dia. Zhen et al. (2017) realizaram um estudo de campo para investigar as condições térmicas de um terminal de aeroporto em Lhasa, Tibete. O local possui aquecimento por piso radiante durante o inverno e sistema de condicionamento mecânico. Houve relatos de desconforto

devido a uma fachada do tipo cortina de vidro ( $U=2,3 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ), voltada para o sul, que, devido à altitude de 3600 m, recebe alta intensidade de radiação solar direta. A avaliação do conforto térmico foi realizada com base no modelo de Fanger (PMV-PPD). O gradiente de temperatura vertical e a temperatura superficial do vidro também foram observados. A flutuação na Temperatura de Globo (TG) ao longo do dia é significativamente maior na faixa próxima à fachada sul, chegando a ser de até  $3,5 \text{ }^\circ\text{C}$  em um período de 15 minutos.

Elaborou-se um quadro com 47 estudos realizados entre 2005 e 2023, que analisam, por meio de simulação computacional termodinâmica, o conforto térmico em ambientes de permanência com amplas áreas envidraçadas (Quadro 1). Esse painel foi criado com o objetivo de observar de maneira abrangente como essas avaliações têm sido conduzidas. Primeiramente, é indicado qual modelo de conforto térmico foi aplicado, se algum tipo de ajuste do impacto da radiação solar foi realizado e qual modelo foi utilizado para esse fim. Também é verificado se foram utilizadas métricas de avaliação dinâmica ou espacial, além das métricas e índices de conforto térmico empregados nas análises. Em seguida, contextualiza-se o tipo de edificação estudada e os climas analisados. Observa-se, então, a área de abrangência dos indicadores analisados, i.e., se são utilizados indicadores para o edifício como um todo, para uma sala ou um ponto (ou conjunto de pontos) no espaço, e quais foram os períodos observados. Por fim, são listados os programas computacionais utilizados, incluindo não apenas os de simulação termodinâmica, mas também outros relacionados à térmica de edifícios.

Dentre esses estudos, 72% da amostra avalia ambientes de escritório ou relacionados, incluindo espaços comerciais, salas de conferência e quando não restringe ou especifica o tipo de ambiente (Figura 6). Observa-se que, de forma geral, prevalece o emprego do modelo de conforto térmico de Fanger (PMV-PPD), mas esse percentual aumenta nos estudos relacionados ao grupo de ambientes de escritório, em que 62% da amostra utiliza este modelo (Figura 7). A maioria dos escritórios possui sistema de condicionamento térmico e, nos casos em que há condicionamento mecânico ou híbrido, as normas indicam o uso do PMV-PPD em vez do modelo Adaptativo. Alguns autores justificam essa escolha pelo fato de o modelo PMV-PPD considerar mais fatores do ambiente interno, enquanto o modelo Adaptativo foca nas temperaturas operativa e externa (histórico dos dias anteriores).

Figura 6 - Distribuição da amostra total por tipo de edificação

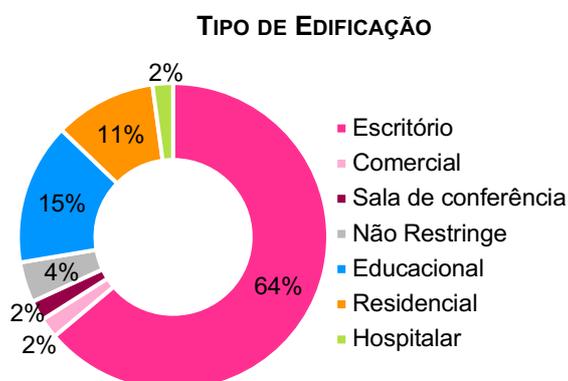
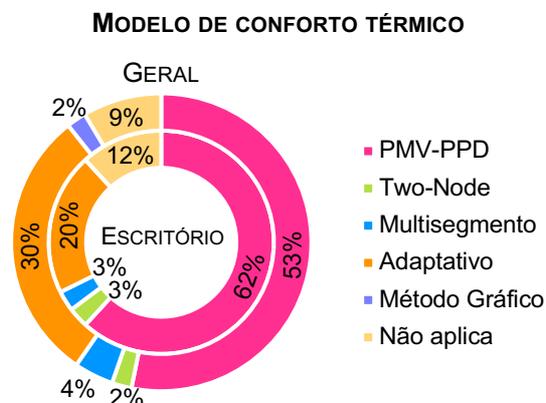


Figura 7 - Distribuição da amostra total e de escritórios por modelo de conforto térmico utilizado



Embora a radiação solar seja frequentemente considerada um dos fatores de desconforto em ambientes com alto WWR (acima de 50%), apenas 30% dos estudos desta amostra aplicou algum ajuste para incluir o efeito da radiação solar sobre os ocupantes (Figura 8). Além disso, uma parcela ainda menor, menos de 24% dos estudos, utilizou métricas que possibilitam a avaliação do conforto térmico ao longo do tempo e/ou espaço (Figura 9). Alguns estudos consideraram apenas pontos isolados no ambiente, calculando a MRT com base no fator de forma. No entanto, a maioria dos estudos adotou um indicador único para todo o ambiente, assumindo uma distribuição térmica homogênea.

Figura 8 - Distribuição da amostra total e de escritórios por modelo de ajuste solar utilizado

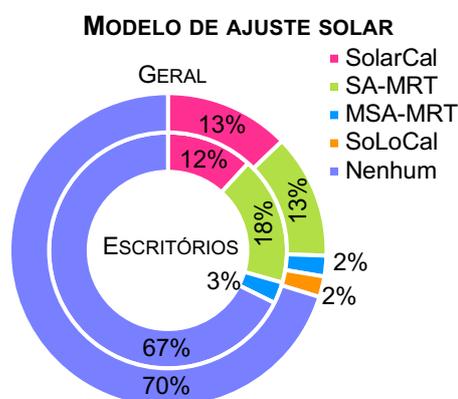
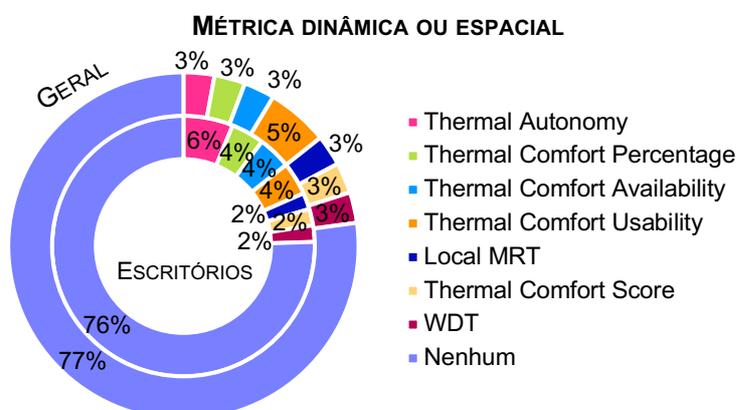


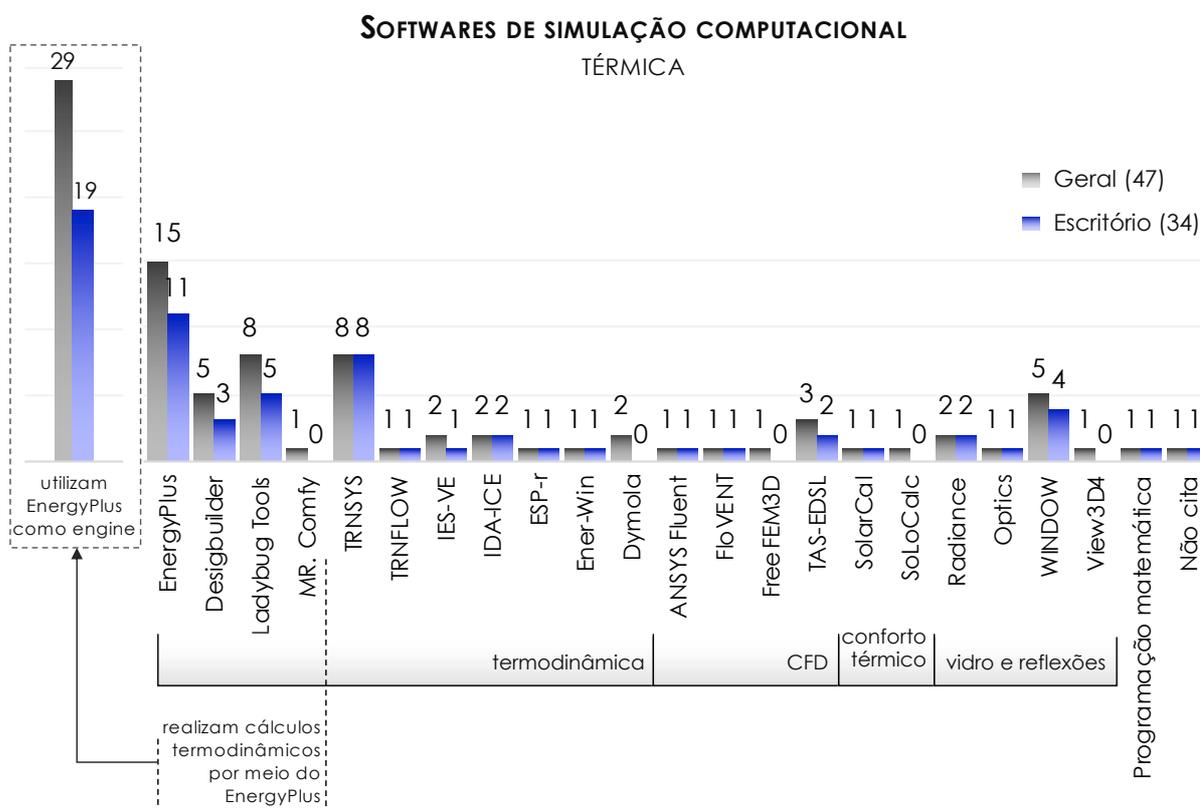
Figura 9 - Distribuição da amostra total (externo) e de escritórios (interno) por métrica dinâmica ou espacial utilizada



O *EnergyPlus* é o mecanismo de simulação mais amplamente utilizado para o cálculo das trocas térmicas, seja diretamente ou como ferramenta de cálculo,

representando 61% da amostra, conforme ilustrado na Figura 10. Em alguns estudos, também é utilizado para o cálculo de índices de conforto térmico. No entanto, esse software apresenta a limitação de adotar uma temperatura homogênea em todo o volume de ar da zona, e os índices de conforto são calculados para um ponto central do ambiente. Diversos estudos recorrem ao *software* TRNSYS (17% da amostra), que permite a avaliação espacial dos índices de conforto. Outro conjunto de ferramentas frequentemente utilizado é o *Grasshopper* para *Rhino*, associado aos *plug-ins* *Ladybug* e *Honeybee*, representando 17% da amostra. Seu uso tem apresentado crescimento nos últimos anos. Esses *plug-ins* utilizam o *EnergyPlus* como mecanismo de simulação térmica, mas possibilitam a análise espacial por meio do cálculo dos fatores de forma em cada ponto da malha. Além disso, eles já incorporam o modelo de ajuste solar *SolarCal* no cálculo do índice PMV.

Figura 10 - Softwares relacionados às simulações térmicas utilizados pelos estudos da amostra total (externo) e de escritórios (interno) em números absolutos



Quadro 1 - Levantamento de estudos de avaliação do conforto térmico por simulação em ambientes envidraçados

Estudo	Modelo de Conforto	Modelo de Ajuste Solar	Métrica Espacial ou Dinâmica	Índices	Tipo de Edificação	Local	Clima (Köppen)	Área de Análise	Período de Análise	Softwares de Simulação
Hien et al. (2005)	PMV-PPD	-	-	PMV; PPD; Temperatura superficial do vidro	Escritório; Planta aberta	Singapura	Af	Por zona térmica; 2°, 4° e 6° pavtos	Um dia de verão; um dia de inverno	TAS + CFD
Stegou-sagia et al. (2007)	PMV-PPD	-	-	PMV	Escritório; Planta aberta	Atenas e Tessalônica (Grécia)	Csa	Global do edifício	Mensal	Ener-Win
Bessoudo et al. (2010) e Tzempelikos et al. (2010)	Two-Node	SA-MRT	-	MRT <sub>irr</sub>	Escritório; Sala	Montreal (Canadá)	Dfb	Do ambiente	Um dia frio e nublado; um dia frio e ensolarado	Programação matemática de código aberto
Besen e Westphal (2012)	PMV-PPD	-	-	% de horas em (des)conforto	Escritório; Planta aberta	São Paulo, Rio de Janeiro, Fortaleza e Curitiba (Brasil)	Cfa; Aw; As; Cfb	Por zona térmica	Anual	EnergyPlus
Buratti, Moretti e Belloni (2012)	PMV-PPD	-	-	PMV; PPD	Sala de Conferência	Perugia (Itália)	Csb	Do ambiente	Mês de maio (primavera)	EnergyPlus; TRNSYS
Cappelletti, Gasparella e Pernigotto (2012)	PMV-PPD	SA-MRT	-	PMV; PMV <sub>irr</sub>	Escritório	Milão e Roma (Itália) e Paris (França)	Cfa; Csa; Cfb		Anual; Sazonal (verão e inverno)	TRNSYS
Gasparella et al. (2012)	PMV-PPD	-	-	PMV	Escritório; Planta aberta	Milão e Roma (Itália)	Cfa; Csa	Nove pontos distribuídos no ambiente	Sazonal (verão e inverno)	TRNSYS
Hoffmann, Jedek e Arens (2012)	Multissegmento: Modelo de Conforto Térmico de Berkeley	SoLoCalc*	-	Sensação térmica local e global; Conforto térmico global.	Quarto de hospital	Denver (USA)	Bsk	Ponto no espaço; Manequim térmico	Uma tarde	SoLoCalc; WINDOW; View3D <sup>4</sup>
Knera e Heim (2013)	PMV-PPD	-	-	PMV; PPD; PPD <sub>médio</sub>	Escritório; Sala	Zona climática: Europa Central	-	Do ambiente	Sazonal (verão e inverno); anual	ESP-r
Levitt et al. (2013)	Adaptativo	-	Thermal Autonomy	TA; T <sub>o</sub> ; Graus-hora desconforto;	Educacional	Oakland (USA)	Csb		Anual; mensal; diário	EnergyPlus
Cappelletti et al. (2014)	PMV-PPD	SA-MRT	WDT <sub>PPD</sub>	PMV <sub>irr</sub> ; PPD <sub>irr</sub> ; WDT <sub>PPD</sub>	Escritório; Planta aberta	Paris (França), Milão e Roma (Itália)	Cfb; Cfa; Csa	Nove pontos distribuídos no ambiente	Para verão e para inverno	TRNSYS
Arens et al. (2015)	PMV-PPD	SolarCal	-	T <sub>r</sub> ; PMV	Não restringe	Miami (USA)	Am		Momento	SolarCal
Marino, Nucara e Pietrafesa (2015)	PMV-PPD	SA-MRT	-	t <sub>r,irr</sub> ; PPD <sub>irr</sub> ; EQI	Não restringe	Roma (Itália)	Csa		Anual; Mensal	EnergyPlus

Quadro 1 - Levantamento de estudos de avaliação do conforto térmico por simulação em ambientes envidraçados (continuação)

Estudo	Modelo de Conforto	Modelo de Ajuste Solar	Métrica Dinâmica ou Espacial	Índices	Tipo de Edificação	Local	Clima (Köppen)	Área de Análise	Período de Análise	Softwares de Simulação
Elarga, Zarrella e Carli (2016)	-	-	-	Temperatura superficial do vidro	Escritório; Sala	Abu-Dhabi (Emirados Árabes), Veneza (Itália) e Wurzburg (Alemanha)	BWh Cfa Cfb	Do ambiente	Uma semana durante período de ocupação	TRNSYS
Zomorodian e Tahsildoost (2017)	Adaptativo	<i>SolarCal</i>	TCA; TCP	sTCA; TCP	Educacional; Sala de aula	Teerā (Irã)	Csa	Do ambiente	Período letivo (outubro a junho)	Rhinoceros; Grasshopper; Ladybug; Honeybee <i>EnergyPlus</i> .
Dussault e Gosselin (2017)	PMV-PPD	-	-	PPD	Escritório; Planta aberta	Atlanta, Chicago, Miami, New-Orleans, San Francisco e Washington (EUA) e Calgary, Montreal, Toronto e Vancouver (Canadá)	Csc; Dfa; Am; Csc; Csb; Dsb; Dfc; Dfb; Dfb; Cfb	Uma zona térmica; Diferentes orientações solares	Para verão e para inverno (condições de seis meses)	TRNSYS
Hweij et al. (2017)	Multissegmento: Modelo de Conforto Térmico de Berkeley	-	-	Escala de Conforto por segmento do corpo	Escritório; Sala	Riyadh (Líbano)	BWh	Do ambiente	Dia típico de verão (14h e 17h)	ANSYS <i>Fluent</i> (CFD)
Basurto, Kämpf e Scartezzini (2017)	-	-	-	Ganho Solar	Escritório	Zacatecas (México)	BSk		Solstício de verão e de inverno; Equinócio	WINDOW; <i>EnergyPlus</i> ; RADIANCE
Jakubiec et al. (2017)	Adaptativo	-	Thermal Autonomy	TA	Residencial	Singapura	Af		Anual	Mr. Comfy; <i>EnergyPlus</i> ; Daysim
Pomponi, Barbosa e Piroozfar (2017)	Adaptativo	-	-	T <sub>o</sub> ; % de horas em desconforto	Escritório	Rio de Janeiro (Brasil); Londres (Inglaterra)	Am Cfb	Um pavimento	Anual	IES VE; FLOVENT (CFD)
Zygmunt e Gawin (2018)	PMV-PPD	-	-	PMV	Escritório	Gdansk (Polônia)	Cfb	Global do edifício	Semana de verão e de inverno	<i>EnergyPlus</i>
Hawila et al. (2018)	PMV-PPD	-	-	PMV	Educacional	Troyes (França)	Cfb		Inverno	Dymola
Ko et al. (2018)	Adaptativo	<i>SolarCal</i>	Thermal Autonomy	TA	Comercial	Phoenix e Helena (USA)	Bwh Dfb		Anual	Honeybee; Grasshopper; <i>EnergyPlus</i>
Atzeri et al. (2018)	PMV-PPD	SA-MRT	TCA; TCU	PPDirr; TCA; sTCA; TCU; tTCU	Escritório; Planta aberta	Roma (Itália)	Csa	Do ambiente	Anual	Ladybug; Honeybee; <i>EnergyPlus</i> ; MATLAB

Quadro 1 - Levantamento de estudos de avaliação do conforto térmico por simulação em ambientes envidraçados (continuação)

Estudo	Modelo de Conforto	Modelo de Ajuste Solar	Métrica Dinâmica ou Espacial	Índices	Tipo de Edificação	Local	Clima (Köppen)	Área de Análise	Período de Análise	Softwares de Simulação
Ramírez-Balas et al. (2018)	Adaptativo	-	-	$T_o$	Residencial; Dormitório	Paris (França)	Cfb		Dois dias de verão; Dois dias de inverno	FreeFEM3D (CFD); DesignBuilder
Hawila et al. (2019)	PMV-PPD	-	-	PMV	Educacional	Troyes (França)	Cfb			Dymola; Minitab
Barbosa e Alberto (2019)	Adaptativo	-	-	% de horas em (des)conforto	Educacional; Sala de aula	Porto Alegre (Brasil)	Cfa		Mensal	IESVE
Yang et al. (2019)	Adaptativo	-	-	horas em desconforto; $t_o$	Escritório	Darwin, Sidnei e Canberra (Austrália)	Aw Cfa Cfb		Mensal	TRNSYS; TRNFLOW; WINDOW
Cannistraro e Trancossi (2019)	PMV-PPD	MSA-MRT	L-MRT	$T_r$ PMV/PPD	Escritório; Planta aberta	Messina (Itália)	Csa		Verão	Não cita
Bayraktar e Ok (2019)	PMV-PPD	-	-	MRT; PMV; PPD	Escritório	Balikesir (Turquia)	Csa	3 pontos no ambiente	Um dia	<i>EnergyPlus</i>
Chinazzo et al. (2019)	PMV-PPD	<i>SolarCal</i>	$TC_{score}$	$T_{score}$ (dentro/fora da faixa de conforto); TDfraction (térmico + visual)	Escritório	Genebra (Suíça); Casablanca (Marrocos); Helsinki (Finlândia)	Cfb Csa Dfb		Anual; Período ocupado	Ladybug; Honeybee; <i>EnergyPlus</i> ; Matlab
Çildir, Köktürk e Tokuç (2020)	PMV-PPD	-	-	PMV; horas em desconforto	Escritório	Izmir (Turquia)	Csa	Do ambiente	Mensal; Anual	DesignBuilder/ <i>EnergyPlus</i>
Zhao e Du (2020)	PMV-PPD	-	-	Horas em desconforto	Escritório	Hohhot, Tianjin, Shanghai, Guagzhou (China)	BSk DWA Cfa Cfa	Global do edifício		DesignBuilder/ <i>EnergyPlus</i>
Hwang, Shih e Huang (2020)	-	-	-	$T_o$	Escritório	Taipei, Taichung, Kaohsiung (Taiwan)	Csc Cwa Aw	Do pavimento	Anual (média, máxima e mínima)	<i>EnergyPlus</i>
Zhang et al. (2020b)	PMV-PPD	<i>SolarCal</i>	-	PMV	Residencial	Toronto (Canadá)	Dfb	Média dos pontos à 1m da janela	Anual	Ladybug Tools
Kuru et al. (2021)	Adaptativo	-	-	Horas em desconforto	Escolar	Sidney (Austrália)	Csc	Do ambiente	Anual	<i>Energyplus</i> (EMS)
Huang e Kang (2021)	Adaptativo	<i>SolarCal</i>	TCP	MRT; $T_o$	Escritório	Lhasa (Tibet)	Dwb	Do ambiente	Anual	DesignBuilder/ <i>EnergyPlus</i> ; Ladybug Tools

Quadro 1 - Levantamento de estudos de avaliação do conforto térmico por simulação em ambientes envidraçados (continuação)

Estudo	Modelo de Conforto	Modelo de Ajuste Solar	Métrica Dinâmica ou Espacial	Índices	Tipo de Edificação	Local	Clima (Köppen)	Área de Análise	Período de Análise	Softwares de Simulação
Rabani, Madessa e Nord (2021)	PMV-PPD	-	-	Graus-hora; PPD	Escritório	Oslo (Noruega)	Dfb	Média ponderado dos ambientes	Anual (média)	IDA-ICE; GenOpt (otimização)
Nasrollahzadeh (2021)	PMV-PPD	-	-	PPD	Residencial	Amol (Irã)	Cfa	De cada ambiente e média dos ambientes	Anual (média); Mensal (média)	Rhino/ Grasshopper; Ladybug Tools/ EnergyPlus/ Radicance; Octopus
Ganji Kheybari et al. (2021)	PMV-PPD	-	-	PPD; % horas ocupadas em desconforto	Escritório	Mannheim (Alemanha)	Cfb	4 pontos no ambiente	Anual (horário; média)	WINDOW; Radiance; TRNSYS
Abdullah e Alibaba (2022)	Adaptativo	-	-	Horas em conforto	Escritório	Famagusta (Chipre)	Csa	Do ambiente	Anual	TAS-EDSL
Shen et al. (2022)	Adaptativo	-	-	T <sub>o</sub> ; horas ocupadas em desconforto	Escritório	Beijing (China)	Dwa	1 ponto no ambiente (1,2m da janela)	Anual; verão e inverno	Optics; WINDOW; EnergyPlus
Talaei et al. (2022)	-	-	-	MRT	Escritório	Masshad (Irã)	BSk	Do ambiente	Hora (meio dia dos dias mais frios e mais quentes)	Rhino/ Grasshopper; Ladybug/ Honeybee/ EnergyPlus
Pagel et al. (2022)	Adaptativo <sup>1</sup>	-	-	FDT (% horas em desconforto por dia); IDT (graus-hora por dia)	Escolar	Vitória, Belém (Brasil)	Aw Af	Do ambiente	Anual	DesignBuilder (simulação de desempenho e CFD)
Moschetti et al. (2022)	Adaptativo	-	-	% horas em conforto	Escritório	Trondheim (Noruega)	Dfc	Média global do edifício	Anual	IDA-ICE
Hwang e Chen (2022)	PMV-PPD	SA-MRT	TCU	PPD; tTCU <sub>PPD10%-80%</sub>	Escritório	Taipei (Taiwan), Hong Kong (China), Manila (Filipinas), Bangkok (Tailândia), Kuala Lumpur, (Malásia), Singapore	Csc Cwa As Aw Af Af	Do ambiente (malha de 40 pontos <sup>2</sup> )	Anual	EnergyPlus
Viana et al. (2022)	Método Gráfico	-	-	Graus-hora de desconforto	Residencial	São Paulo (Brasil)	Cfa	Do ambiente	Anual	TAS-EDSL

1: corrigido para conforto infantil com base em Teli, James e Jentsch (2015)

2: pós-processamento de dados para aplicar o ajuste solar e calcular o conforto na malha de pontos.

## 2.3 AVALIAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO

O capítulo de Conforto Térmico do *ASHRAE Handbook Fundamentals* (ASHRAE, 2017a) define o conforto como “um processo cognitivo que envolve diversas informações influenciadas por processos físicos, fisiológicos, psicológicos e outros”. A sensação térmica de uma pessoa está relacionada principalmente ao balanço térmico de seu corpo com o ambiente em que se encontra. Estas trocas térmicas ocorrem principalmente por meio da perda de calor sensível pela pele, perda de calor evaporativo e perdas respiratórias.

### 2.3.1 Requisitos de conforto térmico

As condições térmicas de um ambiente são tipicamente expressas em termos de fatores ambientais e humanos (Quadro 2), os quais influenciam na aceitabilidade do ambiente térmico. Além desses fatores, a literatura também aborda outros índices ambientais que auxiliam na caracterização do ambiente térmico, bem como no estresse térmico que ele impõe (ASHRAE, 2020). Além dos principais fatores que influenciam no conforto térmico em ambientes internos, outros fatores secundários também podem afetá-lo, como idade, sexo, condição de saúde, adaptação, histórico de experiência, sazonalidade e ciclo circadiano.

Quadro 2 - Principais fatores de Conforto Térmico

Variáveis		
<b>Humanas</b>	Taxa metabólica	[met]
	Isolamento de roupa	[clo]
<b>Ambientais</b>	Temperatura do ar	[°C]
	Temperatura radiante média	[°C]
	Velocidade do ar	[m/s]
	Umidade relativa do ar	[%]

Fonte: (ASHRAE, 2020).

A diferença entre a temperatura do ar e a temperatura da pele atua no componente convectivo do balanço térmico entre o corpo da pessoa e o ambiente térmico. A MRT caracteriza o componente de trocas radiantes neste balanço. A velocidade do ar influencia na velocidade da troca convectiva e na sensação de

resfriamento da pele. A umidade relativa atua no componente de trocas evaporativas através da pele.

Em um ambiente de escritório, condicionado artificialmente e com ampla área de vidro na fachada, dentre estes fatores, a temperatura radiante média irá expressar de forma mais efetiva as condições de conforto térmico. Durante o período de ocupação, a temperatura, a velocidade e a umidade relativa do ar são mantidas pelo sistema de condicionamento de acordo com as definições pré-estabelecidas. A temperatura radiante média, por sua vez, considera também as trocas radiantes que variam a despeito do condicionamento térmico.

A perda de calor sensível pela pele é um dos principais mecanismos de troca de calor do organismo com o ambiente térmico. Ela é composta pela soma das perdas por condução e radiação. No cálculo do balanço energético do corpo, a temperatura radiante média atua na redução da perda térmica da pele por radiação.

Por definição, a MRT “é uma temperatura uniforme de um invólucro imaginário no qual a transferência de calor radiante de um corpo humano é igual a transferência de calor radiante no compartimento real não uniforme” (ASHRAE, 2017a). Em outras palavras, representa a troca radiante entre a pessoa que está ocupando o ambiente e todas as superfícies circundantes (radiação de onda longa). Entre as principais normas relacionadas ao conforto térmico, apenas a ASHRAE 55 (ASHRAE, 2020) requer que o ganho térmico por radiação de ondas curtas seja considerado por meio de um ajuste da MRT.

A temperatura radiante média é um valor único para todo o corpo. Esse índice pode ser calculado com base na temperatura de globo (TG) ou nas temperaturas das superfícies ao redor do indivíduo. Por não ser um índice diretamente medido, ambos os métodos apresentam imprecisões no efeito das trocas radiantes entre o sujeito e o ambiente, principalmente em relação à radiação de onda curta, ou seja, a radiação solar.

A TG é obtida por meio de um termômetro de globo. A temperatura registrada nesse sensor tende a ser um balanço térmico resultante dos efeitos das trocas de calor por radiação proveniente das superfícies aquecidas adjacentes e também dos efeitos de convecção. A TG, em situação de balanço térmico, pode ser usada para determinar a MRT (ISO, 1998).

A MRT também pode ser calculada com base nas temperaturas superficiais das superfícies “visíveis” e suas posições em relação ao ocupante. Para isso, a

Equação (2) é utilizada com base no fator forma (ASHRAE, 2017a). Esse fator determina a fração de radiação emitida por uma superfície e recebida pelo ocupante. Ele pode ser calculado ou definido por meio de ábacos, como os encontrados no capítulo de conforto térmico do ASHRAE *Handbook Fundamentals* (ASHRAE, 2017a).

$$\bar{T}_r^4 = T_1^4 \cdot F_{p-1} + T_2^4 \cdot F_{p-2} + \dots + T_N^4 \cdot F_{p-N} \quad (2)$$

onde,  $\bar{T}_r$  é a temperatura radiante média (K);  $T_N$  é a temperatura na superfície N (K);  $F_{p-N}$  é o fator de forma entre a pessoa e a superfície N.

As variáveis humanas, taxa metabólica e isolamento térmico da roupa, também são pré-definidas no contexto da simulação computacional de acordo com as atividades previstas para o ambiente. Ambas são determinantes na estimativa das condições de conforto térmico, pois definem a participação da pessoa nas trocas térmicas com o ar.

A taxa metabólica (M) é “a taxa de conversão de energia química em trabalho térmico e mecânico pelas atividades metabólicas de um indivíduo, por unidade de área de superfície da pele” (ASHRAE, 2020). Portanto, está relacionada à atividade realizada por cada ocupante individualmente. Essa variável pode ser expressa em W/m<sup>2</sup> ou em met, que seria o valor em W/m<sup>2</sup> pela área de superfície corporal média de uma pessoa. A área da superfície corporal de uma pessoa pode ser obtida por meio da equação de *DuBois*, em função do peso e altura. Usualmente, utiliza-se como referência um adulto mediano com altura de 1,73 m e peso de 70 kg, resultando em uma área corporal de 1,82 m<sup>2</sup>.

A taxa metabólica é um dado difícil de ser medido e pode variar amplamente, dependendo da atividade, da pessoa e das condições em que a atividade é realizada. No entanto, algumas normas, como a ASHRAE 55 (ASHRAE, 2020), o *Handbook Fundamentals* (ASHRAE, 2017a), a ISO 8996 (ISO, 2021) e a ISO 7730 (ISO, 2005), apresentam tabelas com a geração típica de calor metabólico para uma variedade de atividades considerando um adulto mediano e executando a atividade de forma contínua.

O isolamento térmico da roupa ( $I_{cl}$ ) refere-se à resistência da vestimenta do ocupante à troca de calor sensível e, portanto, influencia a sensibilidade do indivíduo ao clima no ambiente. Pode ser expresso em unidades de resistência (m<sup>2</sup>.K/W) ou em clo, que corresponde a 0,155 (m<sup>2</sup>.K)/W. Esse fator considera as trocas térmicas em todo o corpo, incluindo as áreas expostas (ASHRAE, 2020). Assim como a taxa

metabólica, esse dado deve ser definido para cada ocupante. Estimar o isolamento térmico da roupa também não é uma tarefa simples em aplicações rotineiras e na estimativa do conforto. A vista disto, as normas também incluem tabelas com valores estimados para combinações típicas de vestuário ou por peça de roupa.

A ASHRAE 55 (2020) também inclui um método para determinar o isolamento dinâmico de vestimenta para o ocupante representativo, que é definido em função da temperatura do ar externo às 6 horas da manhã de cada dia ( $t_{a(out,6)}$ ). O  $I_{cl}$  diário é calculado usando as equações de (3) a (6) e é ilustrado na Figura 11. Esse método pressupõe que as pessoas escolhem suas roupas com base nas condições climáticas tanto do ambiente interno quanto do ambiente externo. A norma indica que esse método é adequado para simulação computacional de desempenho de edifícios com condicionamento artificial.

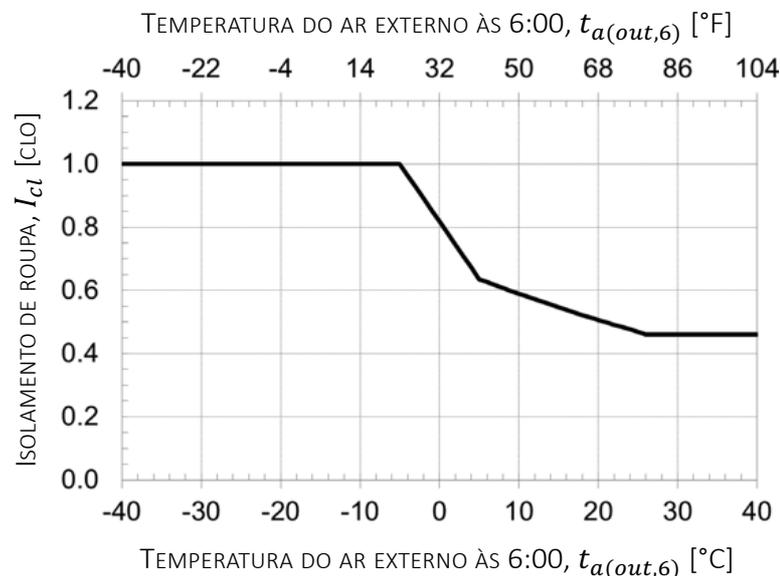
$$\text{Se, } t_{a(out,6)} < -5^{\circ}\text{C} \quad I_{cl} = 1,00 \quad (3)$$

$$\text{se, } -5^{\circ}\text{C} \leq t_{a(out,6)} < 5^{\circ}\text{C} \quad I_{cl} = 0,818 - 0,0364 \times t_{a(out,6)} \quad (4)$$

$$\text{se, } 5^{\circ}\text{C} \leq t_{a(out,6)} < 26^{\circ}\text{C} \quad I_{cl} = 10^{(-0,1635 - 0,0066 \times t_{a(out,6)})} \quad (5)$$

$$\text{ou se, } t_{a(out,6)} > 26^{\circ}\text{C} \quad I_{cl} = 0,46 \quad (6)$$

Figura 11 - Isolamento de roupa ( $I_{cl}$ ) representativo em função da temperatura externa às 06:00



Fonte: traduzido de ASHRAE (2020)

É importante ressaltar que esse método foi desenvolvido para o contexto americano, onde os prédios são aquecidos constantemente durante o inverno e geralmente possuem um isolamento térmico mais robusto em comparação com a

realidade brasileira. Para edifícios ventilados naturalmente ou com condicionamento híbrido, esse método pode não ser adequado, uma vez que estima valores de isolamento ainda baixos para temperaturas abaixo de 20 °C. Por exemplo, a uma temperatura externa de 0 °C às 6:00 da manhã, estima-se um valor de clo de aproximadamente 0,80, o que seria equivalente a calças, camisa de manga longa e um blusão fino. No entanto, entende-se que este método é apropriado para o contexto de ambientes selados e condicionados apenas artificialmente ao longo de todo o período ocupado.

### **2.3.2 Normas de Conforto e Qualidade Ambiental em Edifícios**

A avaliação de um ambiente térmico é usualmente conduzida de acordo com as diretrizes estabelecidas por normas internacionais ou nacionais de qualidade do ambiente interno. Essas normas definem critérios de avaliação considerando uma combinação de fatores ambientais e humanos, a fim de proporcionar um ambiente térmico aceitável. Algumas se concentram exclusivamente no ambiente térmico ou mesmo um modelo de avaliação do conforto térmico, enquanto outras abordam a qualidade do ambiente interno de maneira mais abrangente, aspectos de qualidade do ar, iluminação e acústica. Em geral, os critérios de um ambiente térmico são expressos por meio de parâmetros como PMV e PPD ou faixas de temperatura operativa. Além disso, é comum considerar o desconforto térmico localizado na caracterização do ambiente térmico. O Quadro 3 apresenta as principais normas internacionais que estabelecem diretrizes para avaliação do conforto térmico em ambientes internos, bem como a norma brasileira vigente no momento.

A ISO 7730 (ISO, 2005) faz parte de uma série de normas da ISO que padronizam medições e avaliações de ambientes térmicos aos quais pessoas são expostas. Essa norma fornece métodos de previsão das condições térmicas gerais e do nível de desconforto de pessoas, por meio dos índices PMV e PPD, em ambientes térmicos moderados, como escritórios. Além disso, também apresenta métodos de avaliação de possível desconforto localizado e métodos para avaliar a condição geral de conforto térmico a longo prazo.

A ISO 17772, partes 1 e 2 (ISO, 2017, 2018), define requisitos para os parâmetros ambientais em espaços internos, abrangendo o ambiente térmico, a qualidade do ar interno, a iluminação e a acústica. Essa norma também especifica como utilizar esses critérios no dimensionamento de sistemas prediais, como

aquecimento, resfriamento e ventilação, além do cálculo do desempenho energético. Ela também aborda critérios de projeto relacionados ao desconforto térmico localizado e inclui parâmetros para avaliação do ambiente interno a longo prazo.

Quadro 3 - Normas de avaliação do conforto térmico em ambientes internos

Identificação	Título	Versão atual	Abrangência
ANSI/ ASHRAE 55	<i>Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy</i>	2020	Estados Unidos da América
ISO 7730	<i>Ergonomics of the thermal environment -- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria</i>	2005	Internacional
ISO 17772-1	<i>Energy performance of buildings — Indoor environmental quality — Part 1: Indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings</i>	2017	Internacional
ISO/TR 17772-2	<i>Energy performance of buildings -- Overall energy performance assessment procedures-- Part 2: Guideline for using indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings</i>	2018	Internacional
EN 16798-1	<i>Energy performance of buildings — Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics — Module M1-6</i>	2019	Europa
CEN/TR 16798-2	<i>Energy performance of buildings — Part 2: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics — Module M1-6 — Technical report — Interpretation of the requirements in EN 16798-1</i>	2019	Europa
NBR 16401-2	Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários Parte 2: Parâmetros de conforto térmico	2008	Brasil

A norma europeia EN 16798, partes 1 e 2 (EN, 2019a, 2019b), foi desenvolvida para substituir a norma EN 15251 (EN, 2007). Esta norma é bastante similar à ISO 17772 em termos de escopo e requisitos estabelecidos. Ambas as normas oferecem certa flexibilidade em relação a limites e valores aceitáveis de PMV, PPD, temperatura operativa, desconforto térmico localizado, entre outros, permitindo adaptação às condições climáticas e culturais locais para criação de normas nacionais.

Todas essas três normas apresentam requisitos de conforto térmico categorizados. A ISO 17772-1 e a EN 16798-1 utilizam uma categorização de I a IV, identificando diferentes níveis de expectativa dos ocupantes em relação à qualidade

do ambiente interno, sendo a categoria I associada a um alto nível de expectativa e a categoria IV a um baixo nível. Um local considerado normal, sem a presença de pessoas com necessidades especiais (como crianças, idosos e pessoa com deficiência), é classificado como categoria IEQ (*Indoor Environment Quality*) II, ou seja, com um nível médio de expectativa em relação ao ambiente (EN, 2019a). A ISO 7730 estabelece três categorias, de A a C, porém não há uma explicação explícita no texto da norma sobre o significado de cada categoria. No entanto, a antiga EN 15251 estabelece uma correlação entre as categorias de diferentes normas, incluindo a ISO 7730 (EN, 2007). A ISO 17772-1 também estabelece que essas diferentes categorias também podem ser usadas no dimensionamento de sistemas prediais. O Quadro 4 apresenta uma descrição da aplicabilidade de cada uma das categorias do ambiente interno nas diferentes normas.

Quadro 4 - Categorias do ambiente interno nas diferentes normas

<b>Categoria</b>	<b>EN 15251:2007</b>	<b>ISO 7730:2005</b>	<b>ISO 17772-1:2017 EN 16798-1:2019</b>
I	Categoria I: Alto nível de expectativa e é recomendado para espaços ocupados por pessoas muito sensíveis e frágeis, com necessidades especiais.	A	IEQI: Alto nível de expectativa. Ocupantes com necessidades especiais.
II	Categoria II: Nível normal de expectativa e deve ser utilizada para novos edifícios e reformas.	B	IEQII: Nível médio de expectativa. Níveis normais utilizados para projeto e operação.
III	Categoria III: Aceitável, nível moderado de expectativa e deve ser usado para edifícios existentes.	C	IEQIII: Nível moderado de expectativa. Ainda fornecerá um ambiente aceitável, mas poderá diminuir o desempenho dos ocupantes.
IV	Categoria IV: Valores fora dos critérios para as categorias acima. Esta categoria só deve ser aceita para uma parte limitada do ano.	-	IEQIV: Baixo nível de expectativa. Não produz nenhum risco a saúde, mas pode apresentar conforto reduzido.

Fonte: EN 15251 (2007); EN 16798-1 (2019); ISO 7730 (2005) e ISO 17772-1 (2017).

A ASHRAE 55 (2020), por sua vez, define as condições necessárias para um ambiente térmico aceitável. O objetivo dessa norma é determinar quais combinações de fatores ambientais e humanos resultarão em um ambiente interno com condições térmicas aceitáveis para a maioria dos ocupantes. Em comparação com outras normas, a ASHRAE 55 é mais detalhada em termos de métodos e procedimentos.

A norma brasileira atual para conforto térmico, ABNT NBR 16401-2:2008 (ABNT, 2008), também tem como objetivo especificar as combinações de variáveis ambientais e pessoais que proporcionem condições térmicas aceitáveis para a maioria dos ocupantes em um determinado ambiente. No entanto, essa versão da norma considera apenas espaços com sistemas de condicionamento de ar. Embora tenha havido estudos para atualizar a norma desde 2013 (LAMBERTS et al., 2013), a versão oficial ainda é a de 2008, que é extremamente simplificada.

Atualmente, há um processo de revisão da norma ABNT NBR 16401-2 em andamento, conforme indicado pelo site da ABNT, e está na fase de análise da consulta nacional. O projeto de revisão da norma de 2019 (ABNT, 2019) faz parte do mesmo projeto de pesquisa no qual o relatório e proposta de revisão de 2013 estão incluídos. Essa versão tem o mesmo objetivo da versão vigente, mas incorpora ambientes naturalmente ventilados ou com condicionamento híbrido. Ela indica os métodos de estimativa e/ou medição descritos no capítulo de conforto térmico do *ASHRAE Handbook Fundamentals* (ASHRAE, 2017b). Em geral, essa revisão da norma segue as mesmas recomendações da ASHRAE 55:2017 (ASHRAE, 2017a), sem apresentar especificidades quando a adaptação térmica para o contexto climático no Brasil.

### **2.3.3 Modelos de Conforto Térmico em Ambientes Internos**

Ao longo de mais de 50 anos, foram conduzidas pesquisas com o intuito de compreender a interação das pessoas com o ambiente térmico no qual estão inseridas. Inicialmente, modelos fisiológicos e termo regulatórios do corpo humano foram desenvolvidos com o propósito de compreender e prever, por meio de abordagens matemáticas, as respostas do corpo humano às condições térmicas e variações climáticas (GORDON, 1974; STOLWIJK, 1971; WISSLER, 1964). Com o passar do tempo, esses modelos foram continuamente aprimorados (KRANING; GONZALEZ, 1997; TANABE; NAKANO; KOBAYASHI, 2001; WERNER; WEBB, 1993), culminando em modelos capazes de prever tanto a sensação térmica localizada em diferentes partes do corpo quanto o conforto global dos indivíduos (FIALA; LOMAS; STOHRER, 1999, 2003; HUIZENGA; HUI; ARENS, 2001; ZHANG et al., 2010a, 2010b, 2010c).

Embora esses estudos tenham inicialmente se concentrado no indivíduo, também foram realizadas pesquisas ao longo desse período com o objetivo de medir

e prever a aceitabilidade térmica do ambiente, especialmente em ambientes internos. Modelos foram desenvolvidos com base no entendimento adquirido por meio dos processos fisiológicos e termo regulatórios do corpo humano, bem como em dados obtidos por meio de experimentos com pessoas. Esses modelos relacionaram as respostas de percepção do ambiente aos fatores climáticos no momento das respostas. Atualmente, os modelos mais amplamente utilizados são o Modelo de Fanger, conhecido como PMV-PPD (FANGER, 1970), e o Modelo Adaptativo (DE DEAR; BRAGER, 1998; HUMPHREYS; NICOL, 1998).

O Capítulo 9 (*Thermal Comfort*) do *ASHRAE Handbook Fundamentals* (ASHRAE, 2017a) apresenta uma variedade de modelos de conforto térmico que permitem a avaliação preditiva das condições de conforto em um ambiente. Esses modelos podem ser classificados em zonas de conforto e desconforto, balanço energético em estado estacionário, modelo *Two-node*, modelos de conforto multissegmento e modelos adaptativos. Nas normas internacionais e na norma brasileira, são abordados dois modelos principais de conforto térmico: modelo analítico PMV/PPD e modelo adaptativo (ABNT, 2008, 2019; ASHRAE, 2020; EN, 2019a; ISO, 2005, 2017). O Quadro 5 resume os principais modelos de conforto térmico. Os três primeiros modelos - Modelo Gráfico, PMV-PPD e Adaptativo - têm foco nas condições térmicas do ambiente, enquanto os outros três modelos - *Two-node* e Multissegmentos IESD-Fiala e Berkeley - têm foco na sensação térmica do indivíduo.

Quadro 5 – Modelos de Conforto Térmico

Modelo de Conforto	Publicação (s)	Descrição	Índices	Indicações de Aplicação	Limites de Aplicabilidade	Principais Dados Considerados
Método Gráfico*	-	Limites de conforto térmico aplicados à carta psicrométrica.	Faixa de temperatura operativa aceitável [°C]	-	M: 1,0 a 1,3 met; Icl: 0,5 a 1,0 clo; $V_{ar} < 0,2 \text{ m/s}$ ; $w < 0,012 \text{ kg.H}_2\text{O/kg.ar seco}$	- Temperatura operativa - Temperatura de ponto de orvalho - Umidade absoluta/relativa
PMV-PPD	Fanger (1970) Fanger e Toftum (2002)	Previsão da sensação térmica e grau de desconforto dos ocupantes.	PMV [escala sétima da ASHRAE de sensação térmica]; PPD [%]	Ambientes que possuam sistema de condicionamento mecânico do ar instalado.	M: 0,8 a 4,0 met; Icl: 0 a 2 clo; $t_a$ : 10 a 30 °C; $t_r$ : 10 a 40 °C; var: 0 a 1 m/s; $P_a$ : 0 a 2700 Pa	- Atividade (taxa metabólica) - Isolamento da vestimenta - Temperatura do ar - Temperatura média radiante - Velocidade relativa do ar - Pressão parcial de vapor d'água
Adaptativo	Humphreys e Nicol (1998) De Dear e Brager (1998)	Baseia-se no princípio adaptativo no qual uma pessoa em desconforto, tende a reagir de maneira a tentar restaurar seu conforto.	Faixas de aceitabilidade térmica da temperatura operativa [°C]	Ambientes naturalmente ventilados	Sem HVAC instalado; Aquecimento desligado; M: 1,0 a 1,3 met; Icl: 0,5 a 1,0 clo; $t_{ar\_média}$ : 10 a 33,5°C*/30°C**	- Atividade (taxa metabólica) - Isolamento da vestimenta - Temperatura operativa - Histórico de temperaturas dos dias anteriores ao dia analisado - Umidade
Two-Node	Gagge, Fobelets e Berglund (1986) Gagge, Stolwijk e Nishi (1971) Stolwijk e Hardy (1966)	Considera o corpo humano como dois compartimentos térmicos concêntricos: core (mais interno) e pele (mais externo).	TSENS [escala térmica de +5 a -5]  DISC: desconforto térmico [escala de 0 a 5]	Situações de regime transiente com atividades leves a moderadas	Apenas atividades leves a moderadas	- Temperatura corporal - Evapotranspiração - Índices relacionados as trocas de calor através do fluxo sanguíneo - Atividade (taxa metabólica)
Multissegmento: Modelo de Conforto IESD-Fiala	Fiala, Lomas e Stohrer (1999, 2001, 2003)	Modelo termo regulatório do corpo humano computacional e modelo de previsão da sensação térmica local, dividindo o corpo em 10 segmentos.	DTS: sensação térmica dinâmica [escala sétima ASHRAE]	Todo tipo de condição: estáticas e transientes; moderadas a estresse térmico; ambiente homogêneo a exposições complexas.	-	Densidades de fluxo de calor: - através da pele ( $q_{sk}$ ), - por convecção ( $q_c$ ), - por radiação ondas longas ( $q_R$ ), - por radiação de onda curta ( $q_{sR}$ ), - por evaporação ( $q_e$ )
Multissegmento: Modelo de Conforto Térmico de Berkeley	Huizenga, Hui e Arens (2001) Zhang et al. (2010a, 2010b, 2010c)	Modelo de predição de sensação e conforto térmico local e global. Divide o corpo humano em 19 partes.	Sensação térmica [escala de -4 a +4] Conforto térmico [escala de -4 a 4]	Atividades sedentárias em ambientes uniformes e não uniformes, estáveis ou transientes.	Apenas atividades sedentárias	- Dados obtidos com base no modelo fisiológico de Berkeley: - Temperatura da pele - Temperatura no core - Efeito da temperatura geral do corpo na sensação térmica local e a influência de cada segmento na sensação global

\*Este método era apresentado na ASHRAE 55 (2017), mas foi removido na versão atual (ASHRAE, 2020). Segundo os editores, este método era incorretamente mais tolerante do que o método analítico (PMV-PPD).

### 2.3.3.1 Modelo Analítico ou Modelo PMV-PPD

O modelo PMV-PPD, desenvolvido por Fanger (1970), é o modelo analítico de zona de conforto térmico mais aceito e amplamente utilizado. É um modelo de balanço energético em estado estacionário, mas em situações em que há pouca flutuação de uma ou mais variáveis e em um intervalo de tempo de até 1 hora. O modelo tem como objetivo prever a sensação térmica e o grau de desconforto dos ocupantes por meio da combinação de variáveis ambientais e pessoais. Essas condições são descritas por meio de dois índices: PMV (voto médio predito - *predicted mean vote*) e PPD (percentual previsto de insatisfeitos - *predicted percent dissatisfied*). O PMV é caracterizado como a previsão da resposta média de um grande grupo de pessoas, de acordo com a escala sétima de sensação térmica da ASHRAE (Tabela 1). A partir de uma condição ótima de conforto térmico (neutralidade), o PMV classifica a sensação térmica em uma escala que varia de -3 (muito frio) a +3 (muito quente). O modelo é descrito na equação (7), e os limites de aplicabilidade podem ser encontrados na Tabela 2. A ISO (2005) disponibiliza uma programação computacional em código BASIC para o cálculo o PMV em seu anexo D, utilizando como dados de entrada os parâmetros listados na Tabela 2, além da umidade relativa.

$$\begin{aligned}
 PMV = & [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \\
 & \cdot \{(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - P_a] - 0,42 \\
 & \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - P_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\
 & - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\} \quad (7)
 \end{aligned}$$

Sendo,  $M$  a taxa metabólica ( $W/m^2$ );  $W$  a potência mecânica efetiva produzida pelo corpo ( $W/m^2$ ) – para a maioria das atividades humanas é nulo;  $P_a$  a pressão parcial de vapor d'água (Pa);  $t_a$  a temperatura do ar interno ( $^{\circ}C$ );  $f_{cl}$  o fator de área de superfície coberta pela vestimenta;  $t_{cl}$  a temperatura superficial da vestimenta ( $^{\circ}C$ );  $\bar{t}_r$  a temperatura radiante média no ambiente ( $^{\circ}C$ ); e  $h_c$  o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $W/m^2.K$ ).

Devido às diferenças individuais entre as pessoas, é impossível definir um ambiente que seja termicamente agradável para todos. Portanto, sempre há um percentual de indivíduos insatisfeitos. O PPD, por sua vez, prevê o percentual de pessoas insatisfeitas com as condições térmicas do ambiente, seja devido ao frio ou ao calor. Este valor é determinado com base no PMV, conforme apresentado na equação (8) e na Figura 12.

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad (8)$$

Tabela 1 - Escala ASHRAE de sensação térmica

PMV	Sensação Térmica
+ 3	Muito quente
+ 2	Quente
+ 1	Levemente quente
0	Neutro
- 1	Levemente frio
- 2	Frio
- 3	Muito Frio

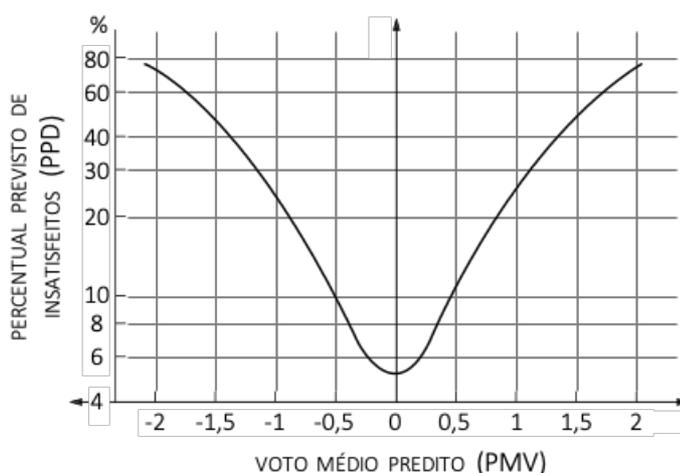
Fonte: ASHRAE (2020)

Tabela 2 - Intervalos de aplicabilidade: PMV-PPD

Taxa Metabólica (M)	0,8 a 4 met
Resistência da vestimenta ( $I_{cl}$ )	0 a 2 clo
Temperatura do ar ( $t_a$ )	10 a 30 °C
Temperatura radiante média ( $\bar{t}_r$ )	10 a 40 °C
Velocidade do ar ( $v_a$ )	0 a 1 m/s
Pressão parcial de vapor d'água ( $P_a$ )	0 a 2700 Pa

Fonte: ISO (2005)

Figura 12 - Percentual previsto de insatisfeitos (PPD) em função do voto médio predito (PMV)



Fonte: adaptado de ISO (2005).

As normas ASHRAE 55 (2020), ISO 17772-1 (2017) e EN 16798-1 (2019a) definem o modelo PMV-PPD como método de avaliação de conforto térmico em ambientes com sistemas de condicionamento de ar instalado. A proposta de revisão da norma brasileira ABNT NBR 16401-2 (ABNT, 2019) segue as mesmas diretrizes. A ISO 7730 (2005) normatiza o uso dos índices PMV e PPD para prever a sensação térmica e o grau de desconforto dos ocupantes.

Tanto a ASHRAE 55 (2020) quanto a NBR 16401-2 e seu projeto de revisão (ABNT, 2008, 2019) definem faixas de valores para o PMV e limites para o PPD, indicando se o ambiente é considerado termicamente aceitável. A ISO 7730 (2005), a ISO 17772-1 (2017) e a EN 16798-1 (2019a) estabelecem limites específicos para as diferentes categorias de qualidade do ambiente interno. A Tabela 3 apresenta uma comparação dos limites de aceitabilidade do ambiente térmico por meio dos índices PMV e PPD estabelecidos pelas diferentes normas. A Figura 13 e a Figura 14 ilustram esta comparação.

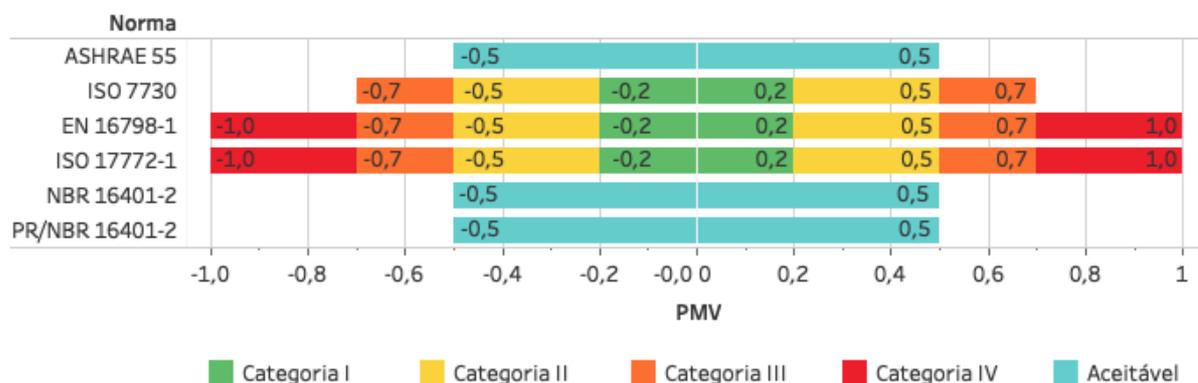
Tabela 3 - Limites de aceitabilidade de conforto térmico: comparativo entre normas.

Norma	Categoria/Classe	Limites PMV	Limites PPD
ASHRAE 55	Aceitável	$-0,5 < PMV < +0,5$	$< 10\%$
ISO 7730	Categoria A	$-0,2 < PMV < 0,2$	$< 6\%$
	Categoria B	$-0,5 < PMV < +0,5$	$< 10\%$
	Categoria C	$-0,7 < PMV < +0,7$	$< 15\%$
ISO 17772-1	Categoria I	$-0,2 < PMV < +0,2$	$< 6\%$
	Categoria II	$-0,5 < PMV < +0,5$	$< 10\%$
EN 16798-1	Categoria III	$-0,7 < PMV < +0,7$	$< 15\%$
	Categoria IV	$-1,0 < PMV < +1,0$	$< 25\%$
NBR 16401-2	Aceitável	$-0,5 < PMV < 0,5^*$	$< 20\%^*$
PR/NBR 16401-2	Aceitável	$-0,5 < PMV < 0,5$	$< 10\%$

\* a norma não nomeia como índice PMV, mas requer que o ambiente esteja dentro destes limites na escala ASHRAE de sensação térmica. Também não nomeia como índice PPD, mas requer que a aceitabilidade do ambiente térmico seja de pelo menos 80%.

Fonte: ABNT (2008); ABNT (2019); ASHRAE (2020); EN (2019a); ISO (2005) e ISO (2017).

Figura 13 - Comparação de limites de PMV para diferentes normas.



Fonte: ABNT (2008); ABNT (2019); ASHRAE (2020); EN (2019a); ISO (2005) e ISO (2017).

Figura 14 - Comparação de limites de PPD para diferentes normas.



Fonte: ABNT (2008); ABNT (2019); ASHRAE (2020); EN (2019a); ISO (2005) e ISO (2017).

A Categoria II ou B é utilizada para edifícios novos ou reformas e representa níveis normais de expectativa (ISO, 2005). Portanto, pode-se observar que todas as normas estabelecem os mesmos limites para a previsão de conforto térmico em ambientes de escritórios, com o PMV variando entre -0,5 e +0,5 e PPD sendo inferior a 10%.

### 2.3.3.2 Modelos Adaptativos

Segundo De Dear e Brager (1998), o modelo PMV-PPD de conforto térmico estacionário, desenvolvido por Fanger (1970), é um modelo parcialmente adaptativo e adequado para ambientes com condicionamento térmico mecânico, nos quais há pouco ou nenhum controle por parte dos ocupantes. No entanto, a extrapolação deste modelo para ambientes naturalmente ventilados não se mostrou adequada, uma vez que os ocupantes tendem a tolerar uma faixa mais ampla de temperatura nestes espaços.

Como resultado, foi desenvolvido o Modelo Adaptativo, o qual foi produzido por meio de modelos de regressão e meta-análise, utilizando dados de experimentos anteriores realizados em uma ampla variedade de condições climáticas. Esses modelos foram alimentados com os mesmos indicadores utilizados no PMV-PPD, como temperatura operativa, umidade relativa, velocidade do ar, isolamento da vestimenta e atividade metabólica (DE DEAR; BRAGER, 1998).

Os modelos adaptativos se baseiam no princípio de que “se ocorre uma mudança que causa desconforto, as pessoas reagem de maneiras que tendem a restaurar seu conforto” (HUMPHREYS; NICOL, 1998). Portanto, esses modelos não preveem respostas específicas de conforto, mas sim as condições sob as quais as pessoas provavelmente se sentirão confortáveis. Acredita-se que as pessoas possam se manter confortáveis em uma faixa mais ampla de temperaturas por meio de ações adaptativas. Essas ações podem ser o ajuste da roupa, postura ou atividade, ou alterações na ventilação, movimentação do ar e temperatura local, por meio de acionamento de janelas, por exemplo (ASHRAE, 2017a).

O modelo adaptativo define faixas de temperaturas operativas aceitáveis a partir de uma temperatura média predominante do ar externo ( $\bar{t}_{pma(out)}$ ), como ilustrado na Figura 15. A ASHRAE 55 recomenda duas opções de cálculo desta temperatura. Na primeira, a  $\bar{t}_{pma(out)}$  é simplificada como a média aritmética das

temperaturas externas – equação (9). Entretanto, para o uso de simulação computacional com base em arquivos climáticos TMY, recomenda-se a média ponderada, conforme equação (10), que pode ser reduzida na forma da equação (11) para os dias anteriores. O método já considera a possibilidade de desconforto térmico localizado no percentual de insatisfeitos.

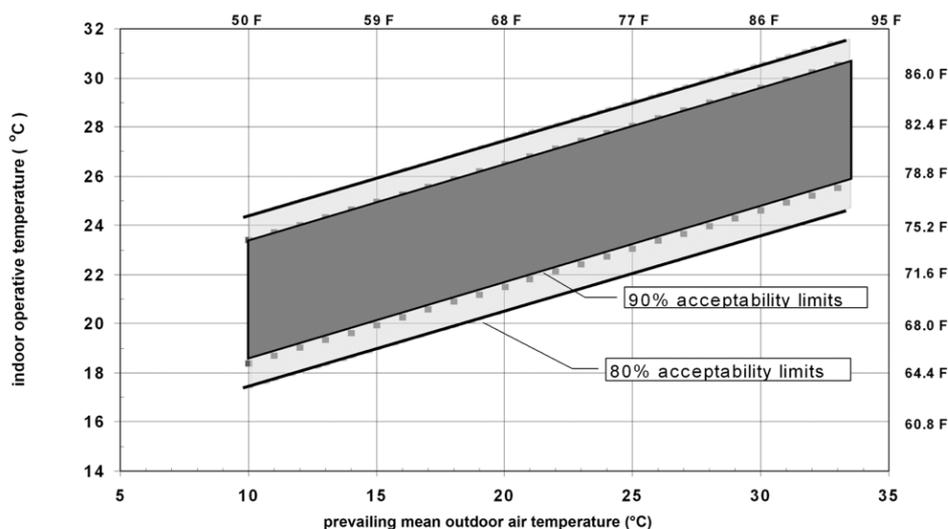
$$\bar{t}_{pma(out)} = \sum_{i=1}^n \bar{t}_{mda(out)} / n \quad (9)$$

$$\bar{t}_{pma(out)} = (1 - \alpha)[t_{e(d-1)} + \alpha t_{e(d-2)} + \alpha^2 t_{e(d-3)} + \alpha^3 t_{e(d-4)} + \dots] \quad (10)$$

$$\bar{t}_{pma(out)} = (1 - \alpha)t_{e(n-1)} + \alpha t_{rm(n-1)} \quad (11)$$

Sendo,  $n$  o número de dias do período anterior definido;  $\alpha$  a constante de controle de velocidade com que a temperatura média responde às mudanças no clima entre 0 e 1, sendo maior quando mais lenta é a resposta (ASHRAE 55 recomenda entre 0,6 e 0,9);  $(d - 1)$  o dia anterior ao dia em questão,  $(d - 2)$  o segundo dia anterior a ele e assim por diante;  $t_{e(n-1)}$  a temperatura média diária do dia anterior ao dia em questão; e  $t_{rm(n-1)}$  a temperatura média contínua para o dia anterior ao dia em questão.

Figura 15 - Faixas de temperatura operativa aceitáveis para ambientes naturalmente condicionados



Fonte: ASHRAE (2020).

As normas internacionais estabelecem diferentes faixas de temperatura operativa aceitável em função da temperatura média diária do ar externo (Tabela 4). Enquanto a ASHRAE 55 e o projeto de revisão da NBR 16401-2 definem uma faixa de temperaturas que garante 80% de aceitabilidade térmica, a ISO 17772-1 e a EN 16798-1 definem faixas de temperatura por categoria. A norma brasileira vigente de

conforto térmico não aborda o modelo adaptativo. Conforme ASHRAE 55, este modelo pode ser adotado em ambientes nos quais os ocupantes estejam realizando atividades leves a moderadas, utilizando isolamento térmico de vestimenta entre 0,5 e 1,0 clo, sem a presença de sistemas de resfriamento mecânico e com o sistema de aquecimento inativo.

Tabela 4 - Equações para definição das faixas de temperatura operativa aceitáveis

Norma	Categoria/Classe	$t_o$ , limite superior (°C)	$t_o$ , limite inferior (°C)
ASHRAE 55	Aceitável*	$0,31 \cdot t_{pma(out)} + 21,3$	$0,31 \cdot t_{pma(out)} + 14,3$
ISO 17772-1 e	Categoria I	$0,33 \cdot t_{pma(out)} + 20,8$	$0,33 \cdot t_{pma(out)} + 15,8$
	Categoria II	$0,33 \cdot t_{pma(out)} + 21,8$	$0,33 \cdot t_{pma(out)} + 14,8$
EN 16798-1	Categoria III	$0,33 \cdot t_{pma(out)} + 22,8$	$0,33 \cdot t_{pma(out)} + 13,8$
PR/NBR 16401-2	Aceitável	$0,31 \cdot t_{pma(out)} + 21,3$	$0,31 \cdot t_{pma(out)} + 14,3$

\* para 80% de aceitabilidade térmica

Fonte: ABNT (2019); ASHRAE (2020); EN (2019a); ISO (2005) e ISO (2017).

### 2.3.3.3 Modelo Two-Node

O Modelo *Two-Node* pode ser aplicado em situações em regime transiente e com atividade de leve a moderada. Este modelo considera o corpo humano como dois compartimentos térmicos concêntricos, nos quais o compartimento interno representa o núcleo, ou seja, as condições internas do organismo, enquanto o compartimento externo corresponde à pele. O modelo leva em consideração todo o calor gerado internamente pelo organismo, bem como os mecanismos de termorregulação da pele. Esses mecanismos atuam por meio de tremores e tensão muscular em situações de frio, e por condução de calor através da roupa, troca convectiva com o ar e evapotranspiração em situações de calor.

Dois índices empíricos são utilizados para prever a sensação térmica (TSENS) e o desconforto térmico (DISC). O TSENS usa uma escala de conforto térmico semelhante à escala ASHRAE utilizada no índice PMV, porém inclui 4 pontos extras:  $\pm 4$  (muito quente/frio) e  $\pm 5$  (intoleravelmente quente/frio). Já o DISC é definido em uma escala de 0 a 5, na qual 0 representa conforto térmico e 5 representa desconforto térmico intolerável. As equações (12) e (13) descrevem o cálculo do TSENS e do DISC, respectivamente.

$$TSENS = \begin{cases} 0,4685(t_b - t_{b,c}) & t_b < t_{b,c} \\ 4,7\eta_{ev}(t_b - t_{b,c}) / (t_{b,h} - t_{b,c}) & t_{b,c} \leq t_b \leq t_{b,h} \\ 4,7\eta_{ev} + 0,4686(t_b - t_{b,h}) & t_{b,h} < t_b \end{cases} \quad (12)$$

$$DISC = \begin{cases} 0,4685(t_b - t_{b,c}) & t_b < t_{b,c} \\ \frac{4,7(E_{rsw} - E_{rsw,req})}{E_{max} - E_{rsw,req} - E_{dif}} & t_{b,c} \leq t_b \end{cases} \quad (13)$$

Onde,  $t_b$  é a temperatura corporal média (°C);  $t_{b,c}$  e  $t_{b,h}$  são os limites inferior e superior de  $t_b$  para a zona de regulação evaporativa (°C);  $\eta_{ev}$  é a eficiência evaporativa (assume-se 0,85);  $E_{rsw}$  é o fluxo de calor latente da evaporação do suor ( $W/m^2$ );  $E_{rsw,req}$  é o fluxo calor latente da evaporação do suor requerido ( $W/m^2$ );  $E_{max}$  é a máxima perda evaporativa de calor ( $W/m^2$ ,  $E_{max} = E_{sk}$  quando  $w_{sk} = 1$ ); e  $E_{dif}$  é a difusão natural de água através da pele ( $W/m^2$ ).

Ao comparar as equações do TSENS e do DISC com as equações dos modelos anteriores, observa-se a diferença essencial entre esses dois grupos de modelos. O *Two-Node* é um modelo fisiológico e, portanto, as variáveis analisadas estão relacionadas às trocas térmicas no corpo humano de forma individual. Prever ou mensurar cada uma dessas variáveis é extremamente complexo. Por outro lado, os modelos PMV-PPD e Adaptativo utilizam variáveis ambientais para prever se as condições térmicas seriam aceitáveis para a maioria das pessoas, focando, assim, no ambiente em si.

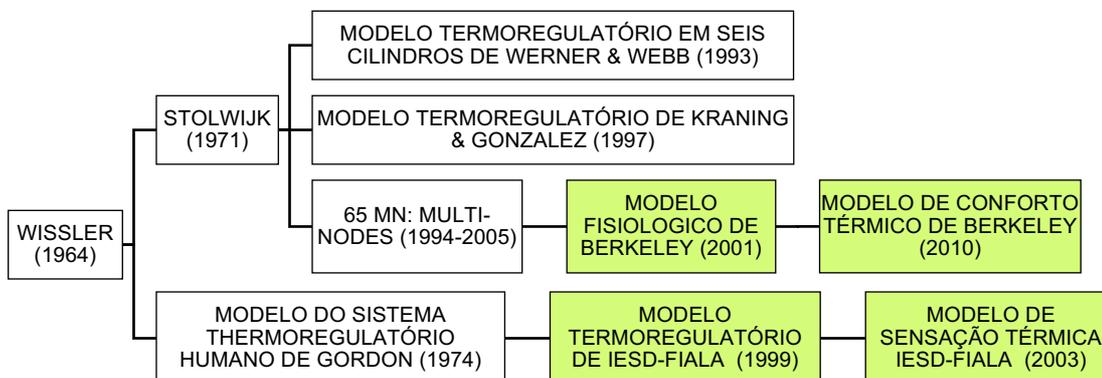
#### 2.3.3.4 Modelos de Conforto Térmico Multissegmento

Os modelos térmicos multissegmento são utilizados para analisar a distribuição de temperatura no corpo humano, considerando-o dividido em múltiplos segmentos (como cabeça, peito, mãos, pés, etc.) e camadas de tecidos (núcleo, músculos, adiposa, pele, etc.), de forma que cada segmento possa apresentar diferentes sensações térmicas. Esses modelos são frequentemente aplicados a ambientes não-uniformes e transientes. Semelhante ao modelo *Two-node*, considera-se tanto a transferência de calor passiva quanto o controle ativo da termorregulação pelo corpo humano. Além de prever a temperatura de cada segmento do corpo, esses modelos também consideram outros parâmetros fisiológicos (ASHRAE, 2017c). O objetivo principal dos modelos multissegmentos é avaliar como a não uniformidade térmica do ambiente afeta o indivíduo.

Os modelos fisiológicos e de termorregulação do corpo humano começaram a ser desenvolvidos por Wissler (1964), Gordon (1974) e Stolwijk (1971). Os modelos

de conforto multissegmentos surgiram a partir da evolução desses modelos do corpo humano, como esquematizado na Figura 16.

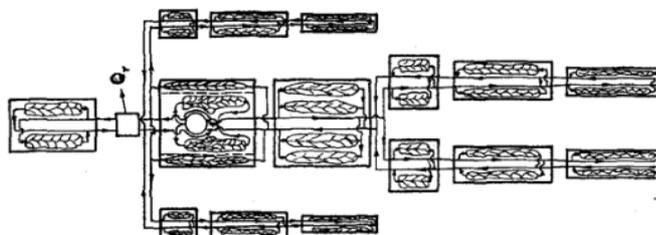
Figura 16 - Fluxograma dos Modelos Fisiológicos e Termo Regulatórios do Corpo Humano aos Modelos de Conforto Térmico Multissegmentos



Fonte: elaborado pela autora.

Wissler (1964) desenvolveu um modelo matemático utilizando a técnica de diferenças finitas com o objetivo de simular as características físicas do sistema térmico humano em estado transiente. Esse modelo divide o corpo em 15 regiões geométricas em forma de cilindros. Cada segmento é dividido em camadas (tecido, osso, gordura e pele) e sistema vascular (Figura 17). O modelo considera a temperatura instantânea em cada elemento, a perda de calor através do sistema respiratório, as trocas de calor com o ambiente circundante e as trocas do sistema vascular em cada elemento simultaneamente.

Figura 17 - Diagrama esquemático demonstrando a disposição dos elementos e do sistema circulatório no sistema de (WISSLER, 1964).

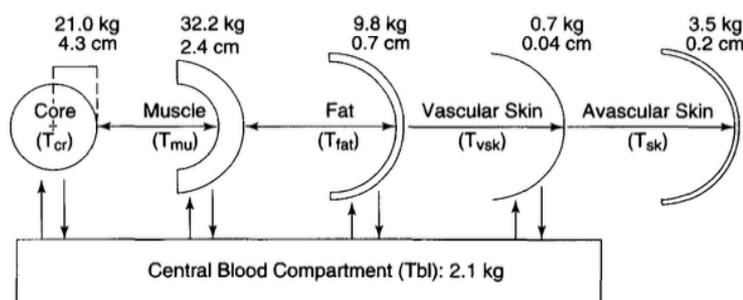


Fonte: Wissler (1964).

Com base nesse modelo, Werner e Webb (1993) criaram um modelo básico de seis cilindros da termorregulação do corpo humano utilizando programação em MS-FORTRAN para possibilitar simulações em computadores. Kraning e Gonzalez

(1997) desenvolveram um modelo voltado a situações de atividades intensas, com alta taxa metabólica e em ambientes industriais com estresse térmico. Ao contrário dos modelos mencionados anteriormente, esses autores dividiram o corpo humano em seis compartimentos (camadas): núcleo, músculos, camada de gordura subcutânea, sistema vascular da pele, camada avascular superficial da pele e compartimento central sanguíneo, como demonstrado na Figura 18.

Figura 18 - Seção transversal do modelo cilíndrico de (KRANING; GONZALEZ, 1997) contendo cinco compartimentos de tecido anular concêntrico. As dimensões mostradas são para um indivíduo com 70kg e área superficial da pele de 1,80m<sup>2</sup>.

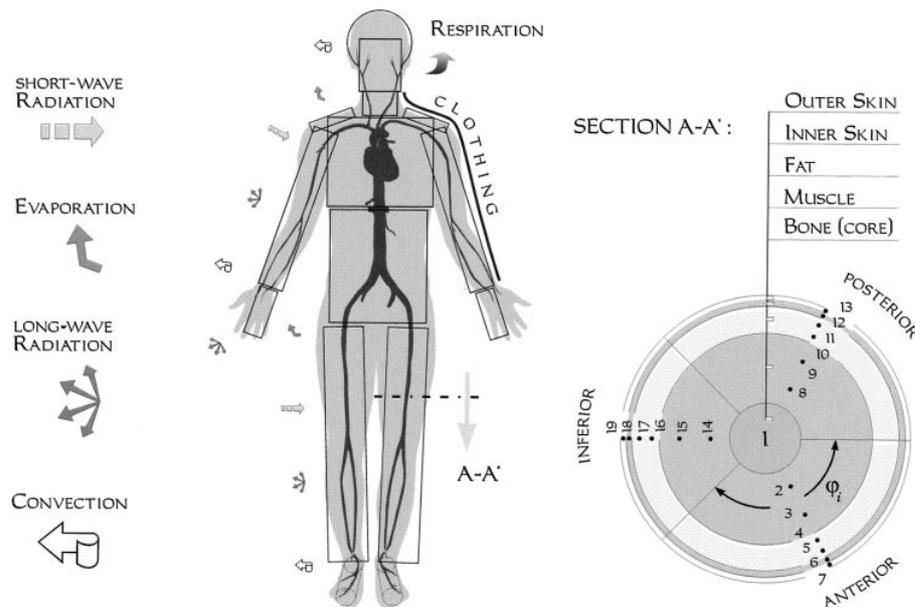


Fonte: Kraning e Gonzalez (1997).

Gordon (1974) desenvolveu um modelo matemático dinâmico de regulação fisiológica da temperatura do corpo humano. Nesse modelo, o corpo humano é composto por 25 nós distribuídos em seis segmentos (cabeça, tronco, braços, mãos, pernas e pés) e sistema circulatório. Em cada nó, são consideradas a produção de calor metabólico, a troca de calor por convecção com o compartimento central do sistema sanguíneo e a troca de calor com os compartimentos adjacentes. Nos nós mais externos, que representam a pele, são incluídas as trocas de calor com o ambiente por convecção, condução e radiação. A maioria dos modelos posteriores de termorregulação e modelos de conforto térmico multissegmentos baseiam-se nesse modelo. Por exemplo, o Modelo Térmico 65MN (65 *Multi-Nodes*) de Tanabe et al. (1994, 1995, 2001, 2002). Esse modelo consiste em um modelo térmico com 65 nós de regulação térmica: 16 segmentos divididos em quatro camadas, além do sistema de circulação sanguínea. O modelo considera a produção de calor em cada camada, a transferência de calor através fluxo sanguíneo, a perda de calor pela respiração, a perda de calor evaporativo pela pele e as trocas de calor sensível na superfície da pele.

O modelo termo regulatório desenvolvido por Fiala, Lomas e Stohrer (1999, 2001) é uma extensão do modelo proposto por Gordon (1974) e concentra-se na modelagem passiva do sistema, considerando as trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente. Esse modelo é especialmente adequado para analisar a resposta ao ambiente térmico em diversas condições, incluindo situações de estresse térmico e exposições complexas. Ele divide o corpo em 14 segmentos, além do sistema circulatório, com subdivisões em nós (Figura 19). Um avanço importante desse modelo foi a incorporação de um modelo de vestimenta com isolamento não uniforme, levando em consideração diferentes fatores de isolamento para cada segmento ou região do corpo. Além disso, a radiação proveniente de fontes de alta temperatura, como o sol, também é considerada no cálculo do fluxo de calor na superfície da pele de cada segmento do corpo.

Figura 19 - Diagrama esquemático do sistema passivo do modelo de Fiala.



Fonte: Fiala, Lomas e Stohrer (1999, 2001) .

Com base nesse modelo termo regulatório aprimorado, os autores criaram um modelo para prever a sensação térmica de pessoas em atividades sedentárias, tanto em condições térmicas estacionárias quanto transientes. Introduziram o índice de sensação térmica dinâmica (DTS – *Dynamic Thermal Sensation*), utilizando a escala de sensação térmica da ASHRAE como referência. Embora seja calculado com base em um modelo fisiológico e termo regulatório do corpo humano, a DTS é um indicador geral da sensação térmica do indivíduo. Seu cálculo leva em consideração a

temperatura da pele e a temperatura do núcleo da cabeça (hipotálamo). Mais detalhes sobre o modelo e suas equações principais podem ser encontrados no APÊNDICE A.

Huizenga, Hui e Arens (2001) também desenvolveram um modelo para prever a resposta fisiológica do corpo humano a um ambiente térmico transiente e não uniforme. Esse modelo é uma extensão do modelo termo regulatório proposto por Stolwijk e do modelo 65MN de Tanabe et al. (1994). Algumas melhorias importantes incluem a capacidade de considerar um número ilimitado de segmentos do corpo, aprimoramentos no modelo de fluxo sanguíneo, inclusão de um nó para representar as roupas, modelagem da transferência de calor por condução entre o corpo e superfícies em contato, bem como melhorias nos coeficientes de transferência de calor por radiação e convecção. Além disso, o modelo leva em consideração a radiação solar incidente no corpo. Cada segmento é dividido em quatro camadas corporais e uma camada de roupa, e as informações ambientais e pessoais podem ser inseridas em diferentes cenários sequenciais, chamados de fases.

Baseado nesse modelo fisiológico, Zhang et al. (2010a, 2010b, 2010c) desenvolveram um modelo para prever a sensação térmica e o conforto localizado nos diferentes segmentos do corpo humano, bem como a resposta térmica do corpo como um todo. O modelo divide o corpo humano em 19 segmentos e é aplicável a pessoas em atividades sedentárias em diversos tipos de ambientes. A sensação térmica local ( $S_{local}$ ) é uma função da temperatura local e geral da pele e da taxa de variação entre as temperaturas local da pele e central do corpo ao longo do tempo (ZHANG et al., 2010c). A definição da sensação térmica global depende da presença de assimetria térmica (ZHANG et al., 2010a). O conforto térmico local é definido em função da sensação térmica local e global, e um índice de conforto local (LC – *Local Comfort*) foi desenvolvido com base em experimentos com pessoas. (ZHANG et al., 2010b). O conforto térmico global é determinado pela média dos votos mínimos e máximos de conforto, dependendo das condições térmicas e do controle do ambiente pelo indivíduo (ZHANG et al., 2010a). Mais detalhes sobre o modelo e suas equações principais podem ser encontrados no APÊNDICE A.

#### **2.3.4 Avaliação a Longo Prazo das Condições Gerais de Conforto Térmico**

Os modelos de conforto térmico discutidos anteriormente neste item fornecem índices de conforto ou desconforto térmico para um dado instante. No entanto, em simulações computacionais dinâmicas e medições *in loco*, as condições de conforto

são frequentemente avaliadas ao longo de um intervalo de tempo prolongado, abrangendo diferentes períodos do ano, estações ou dias. Nesses casos, é interessante analisar como as condições de conforto térmico variam ao longo do tempo. A ISO 7730 (2005) apresenta 5 métodos para avaliar as condições gerais de conforto térmico a longo prazo com base nos resultados obtidos para um conjunto de dados horários em um ponto específico do ambiente interno. São estes:

- a) Método A - **Horas Excedidas**: calcula-se a soma ou percentual de horas em que o índice de conforto está fora do intervalo especificado. Considera-se apenas o período em que o ambiente é ocupado.
- b) Método B - **Graus-Hora**: calcula-se o número de horas em que a temperatura operativa momentânea excede a faixa especificada, ponderado por um fator que depende da magnitude do desvio da faixa. Também considera apenas o período em que o ambiente é ocupado.
- c) Método C - **Ponderação pelo PPD**: calcula-se o número de horas em que o PMV momentâneo excede os limites de conforto, ponderado por um fator em função do PPD. Neste método não há referência explícita às horas ocupadas.
- d) Método D: calcula-se o PPD médio horário ao longo do tempo durante os períodos de ocupação.
- e) Método E: soma-se o PPD horário ao longo do tempo durante os períodos de ocupação.

As normas ISO 17772-2 (2018), EN 16798-2 (2019b) e EN 15251 (2007) indicam os métodos A, B e C para avaliação a longo prazo. A ASHRAE 55 (2020) e a proposta de revisão da NBR 16401-2 (2019) recomendam apenas o método A, sendo o cálculo das horas em que o PMV é excedido recomendado para edifícios condicionados artificialmente, e o cálculo das horas em que os limites de temperatura operativa são extrapolados para o modelo adaptativo (ambientes condicionados naturalmente). Esses métodos permitem apenas observar as condições de conforto térmico em um período de tempo específico. Entretanto, as normas não estabelecem limites de aceitabilidade em relação ao percentual máximo de tempo em desconforto. Além disso, consideram apenas o conforto térmico médio ou um único ponto no ambiente, sem levar em conta a variabilidade espacial das condições térmicas.

### 2.3.5 Desconforto Térmico Localizado

Os índices de conforto térmico, como PMV, PPD e temperatura operativa, fornecem uma medida global da sensação de conforto ou desconforto térmico de uma pessoa. Entretanto, o corpo humano responde às trocas de calor de maneira diferenciada em cada um dos seus segmentos (NILSSON, 2007), conforme demonstrado pelos modelos de conforto térmico multissegmento. Assim, é possível que uma pessoa apresente uma sensação global de conforto enquanto se sente termicamente insatisfeita em alguma parte específica do corpo devido ao resfriamento ou aquecimento indesejado dessa região (ISO, 2005). O desconforto térmico localizado é caracterizado, portanto, pela insatisfação térmica devido à diferença na sensação térmica em diferentes regiões do corpo.

As pessoas tendem a apresentar maior sensibilidade ao desconforto térmico localizado quando o corpo todo está com maior sensação de frio do que de neutralidade térmica, enquanto a sensibilidade é reduzida quando o corpo está com mais sensação de quente do que de neutralidade térmica (ASHRAE, 2020). Um experimento realizado com manequins e pessoas em câmaras climáticas na Hungria indicou que as mãos e o rosto são as regiões mais afetadas pela troca radiante com paredes frias, e pode reduzir a temperatura homogênea equivalente (EHT – *equivalente homogeneous temperature*) em até 2 °C. Por outro lado, as partes inferiores do corpo são mais afetadas pela temperatura do ar do que pelas trocas radiantes (BARNA; BÁNHIDI, 2012).

Estas situações ocorrem devido à possível falta de uniformidade do ambiente. Elencam-se as seguintes fontes de desconforto localizado: (1) convecção localizada, que consiste na presença de corrente de ar indesejável; (2) gradiente vertical de temperatura, quando há uma diferença sensível entre a temperatura do ar na altura dos tornozelos e na cabeça; (3) temperatura superficial do piso, quando o ocupante está em contato com o piso e tem a sensação de chão frio ou quente; e (4) assimetria na temperatura radiante, quando há uma diferença significativa na temperatura radiante entre planos opostos.

As principais normas de conforto térmico estabelecem requisitos para evitar o desconforto localizado. Para cada um destes fatores, são apresentados limites aceitáveis e um percentual máximo de insatisfeitos (PD - *Percent Dissatisfied*) admissível. A Tabela 5 compara os critérios de desconforto térmico localizado entre

as normas. A ISO 7730 (2005) fornece equações para o cálculo do PD para cada uma das fontes de desconforto. É importante ressaltar que, nesse contexto, a palavra "parede" refere-se a qualquer superfície vertical.

Tabela 5 - Critérios de desconforto térmico localizado: comparativo entre normas

Norma	Categoria	Convecção Localizada			Gradiente Vertical de Temp.		Temperatura Superficial do Piso		Assimetria na Temperatura Radiante				
		PD (%)	Velocidade máx. do ar (m/s)		PD (%)	$\Delta T$ (°C)	PD (%)	Faixa de Temp. (°C)	PD (%)	Teto Quente	Parede Fria	Teto Frio	Parede Quente
			Inv.	Ver.						Diferença Máxima ( $\Delta t_{pr} - ^\circ C$ )			
ASHRAE 55	Expectativa	<20	0,20 <sup>1</sup>		<5	3	<10	19 – 29	<5	5	10	14	23
ISO 7730;	Categoria I	<10	0,10	0,12	<3	2	<10	19 – 29	<5	5	10	14	23
ISO 17772;	Categoria II	<20	0,16	0,19	<5	3	<10	19 – 29	<5	5	10	14	23
EN 16798	Categoria III	<30	0,21	0,24	<10	4	<15	17 – 31	<10	7	13	18	35
NBR 16401-2	Aceitável	-	0,20	0,25	-	3	-	-	-	5	10	14	23
PR/NBR 16401-2	Aceitável	<20 <sup>2</sup>	0,15 <sup>2</sup>		<5	3	<10	19 – 29	<5	5	10	14	23

1: para temperaturas operativas abaixo de 23,0 °C

2: para temperaturas operativas abaixo de 22,5 °C

Fonte: ABNT (2008); ABNT (2019); ASHRAE (2020); EN (2019a); ISO (2005) e ISO (2017).

A temperatura radiante média é uma medida global do campo radiante sobre o corpo humano, entretanto pode não ser uniforme devido a superfícies que estejam muito aquecidas ou frias. Essa assimetria na temperatura radiante tende a reduzir a aceitabilidade térmica do ambiente, pois pode causar desconforto localizado (ASHRAE, 2020). Por definição, a assimetria na temperatura radiante “é a diferença nas temperaturas radiantes observadas por um pequeno elemento plano olhando em direções opostas” (ASHRAE, 2017a). Essa assimetria é determinada no nível da cintura, sendo 0,60 m para um ocupante sentado e 1,10 m para um ocupante em pé. Em geral, as normas estabelecem os mesmos limites aceitáveis de assimetria na temperatura radiante, que podem ser observados na Tabela 5.

Tanto a ASHRAE 55 (2020) quanto a ISO 7730 (2005) afirmam que, de forma geral, as pessoas são mais sensíveis à assimetria radiante causada por tetos quentes do que por superfícies verticais frias ou quente. Por outro lado, um experimento conduzido por Barna e Bánhidi (2012) indicou que tanto a sensação térmica quanto a temperatura superficial da pele são mais influenciadas por paredes frias do que por pisos aquecidos. No contexto de edifícios corporativos atuais, altamente envidraçados, a assimetria na temperatura radiante causada por paredes, ou superfícies verticais, quentes ou frias, torna-se uma preocupação e uma fonte significativa de desconforto localizado. O uso de vidros, que possuem alta

transmitância térmica e espessura reduzida, amplifica os efeitos de paredes quentes, especialmente quando há alta incidência de radiação solar, e de paredes frias, quando a temperatura do ar externo é muito inferior a temperatura interna e dissipa calor mais rapidamente.

A radiação solar direta que incide sobre os ocupantes também pode resultar em uma distribuição desigual da MRT, frequentemente acompanhada por problemas de desconforto térmico, principalmente para aqueles que ocupam uma posição fixa no ambiente (CANNISTRARO; TRANCOSSI, 2019; ZOMORODIAN; TAHSILDOOST, 2017). Zomorodian e Tahsildoost (2017) destacam a inter-relação entre as configurações das janelas, a orientação solar das fachadas e o potencial de desconforto térmico localizado devido à assimetria na temperatura radiante.

### **2.3.6 Contribuição da Radiação Solar no Conforto Térmico e Modelos de Ajuste Solar**

Como discutido na seção 2.2, vários estudos destacam a incidência de radiação solar como um fator chave no desconforto térmico em edificações com alto percentual de transparência da fachada. No entanto, os modelos tradicionais de conforto térmico subestimam o impacto da radiação solar (MARINO; NUCARA; PIETRAFESA, 2015). Entre as normas revisadas, apenas a ASHRAE 55 (2020) e o Projeto de Revisão da NBR 16401-2 (ABNT, 2019) consideram a contribuição da radiação solar que incide no ocupante. As demais normas abordam apenas as trocas de calor por radiação infravermelha, i.e., objetos e superfícies aquecidas.

Com o intuito de realizar avaliações mais precisas do conforto térmico, novas ferramentas e métodos estão sendo desenvolvidos e aprimorados para corrigir os efeitos da radiação solar direta e difusa nos índices de conforto térmico. Muitos desses métodos corrigem a MRT e podem ser aplicados tanto no Modelo Adaptativo quanto no modelo PMV-PPD (ARENS et al., 2015; LA GENNUSA et al., 2007; MARINO et al., 2018a). Eles também podem ser aplicados a modelos multissegmento, como demonstrado por Bessouto et al. (2010) e Tzempelikos et al. (2010), nos quais o ajuste é aplicado ao Modelo *Two-Nodes*. Zhang et al. (2018) propõem uma correção diretamente na equação do PMV. Os autores também apresentam um ajuste da temperatura operativa ao adicionar o coeficiente de radiação solar e a temperatura equivalente de radiação solar à sua ponderação. Huang e Zhai (2020) incluem o efeito

da radiação solar como um componente da temperatura do ar, substituindo-a na equação do PMV.

O Quadro 6 apresenta um resumo dos modelos de ajuste solar nos índices de conforto térmico. Neste, fornece-se informações sobre quais modelos de conforto térmico cada método pode ser aplicado, as referências dos estudos, uma breve descrição de como a correção é considerada, os índices propostos e indicações de aplicação dos mesmos. Dos sete modelos apresentados no Quadro 6, cinco deles (incluindo a correção do CPMV) são discutidos em maior detalhe a seguir. Uma descrição mais aprofundada dos modelos mencionados nos itens 2.3.6.1 a 2.3.6.4 e suas equações são apresentadas no APÊNDICE B. Essa seleção de modelos foi estudada numericamente no Apêndice C e discutida na seção 3.2.

Quadro 6 - Modelos de ajuste solar em índices de conforto térmico

Modelo de Conforto Aplicáveis	Modelo de Ajuste Solar	Publicação	Descrição	Índices	Indicações para aplicação
PMV-PPD Adaptativo	SA-MRT (item 2.3.6.1)	La Gennusa et al. (2005) La Gennusa et al. (2007)	AS-MRT: Ajuste solar da temperatura média radiante ( <i>solar-adjusted mean radiant temperature</i> ). O modelo ajusta a temperatura radiante média considerando a radiação incidente no sujeito. Adiciona módulo de radiação de ondas curtas (radiação solar direta e difusa) no fluxo de calor por radiação. Permite avaliação espacial, visto que utiliza os fatores de forma para definir a quantidade de radiação incidente (mesmo de onda longa). $\bar{T}_{r,irr}^4 = \sum_{N=1}^N F_{p \rightarrow N} T_N^4 + \frac{C_{dn}}{\varepsilon \sigma} \left( \alpha_{irr,dif} \sum_{J=1}^M F_{p \rightarrow J} I_{d,J}^{in} + C_S^{in} \alpha_{irr,dif} f_p I_{bn}^{in} \right)$	$\bar{T}_{r,irr}$ : temperatura radiante média do objeto irradiado [K]  PMV <sub>irr</sub> : voto médio predito com ajuste solar	Ambientes internos termicamente moderados
PMV-PPD Adaptativo	SolarCal (item 2.3.6.2)	Arens et al. (2015)	Este é o método que consta na ASHRAE 55:2017, para ajuste de radiação solar. É um modelo simplificado com a intensão de rápida estimativa da radiação solar. Usa o campo radiante efetivo (ERF) para mensurar o fluxo de energia radiante no corpo. Baseado na lei de Kirchohoff, assume-se que o calor solar absorvido é igual a quantidade de radiação de onda longa adicional emitida pelo corpo. $\bar{T}_r = \bar{t}_{rLW} + \bar{t}_{rsw}$ $ERF_{solar} = \left[ 0,5 f_{svv} (I_{diff} + 0,6 \cdot I_{TH}) + f_p f_{bes} I_{dir} \right] \cdot f_{eff} T_{sol} \left( \frac{\alpha_{SW}}{\alpha_{LW}} \right)$	ERF <sub>solar</sub> : campo radiante efetivo incluindo o efeito da radiação solar [W/m <sup>2</sup> ]	Ambientes internos com geometria simples.
PMV-PPD Adaptativo	MSA-MRT (item 2.3.6.3)	Marino et al. (2017) Marino, Nucara e Pietrafesa (2017) Marino et al. (2018b)	MSA-MRT: Ajuste solar da temperatura média radiante modificado ( <i>modified solar-adjusted mean radiant temperature</i> ) Além de considerar a radiação de onda longa proveniente das superfícies circundantes, o fluxo de radiação solar (ondas curtas) direta e difusa, também considera o fluxo de radiação solar oriundo de reflexões internas nas superfícies do ambiente. $\bar{T}_r^4 = \sum_{N=1}^N F_{p \rightarrow N} T_N^4 + \frac{\alpha_{sw}}{\varepsilon_p \sigma} \left[ \sum_{J=1}^N F_{p \rightarrow J} I_{dif,J} + f_p I_{dir} + 0,5 \rho_{floor} I_{dir,h} + \sum_{N=1}^N \rho_N \left( \sum_{J=N}^N F_{N \rightarrow J} I_{dif,J} \right) F_{p \rightarrow N} \right]$	$\bar{T}_r$ : temperatura radiante média [K]	Ambientes internos

Quadro 6 - Modelos de ajuste solar em índices de conforto térmico  
(continuação)

Modelo de Conforto Aplicáveis	Modelo de Ajuste Solar	Publicação	Descrição	Índices	Indicações para aplicação
Adaptativo	C-OT	Zhang et al. (2018)	<p>C-OT: temperatura operativa corrigida (<i>corrected operative temperature</i>).</p> <p>Corrige a temperatura operativa adicionando o efeito da radiação solar por meio de uma temperatura equivalente da radiação solar (<math>T_s</math>) e um coeficiente de radiação solar (<math>h_s</math>) ao seu cálculo.</p> $t_o^* = \frac{h_r t_r + h_c t_a + h_s t_s}{h_r + h_c + h_s} \quad h_s = \frac{\alpha f_{\text{eff}} f_p I}{(t_{cl} - t_a)}$ $t_s = \left[ (t_{cl} + 273)^4 + \frac{\alpha f_p I}{\varepsilon \sigma} \right]^{0,25} - 273$	$t_o^*$ : temperatura operativa corrigida [°C]	Ambientes internos
PMV-PPD	CPMV (item 2.3.6.4)	Zhang et al. (2018)	<p>CPMV: PMV corrigido.</p> <p>Proposta de índice PMV que englobe a influência da radiação solar no conforto térmico de pessoas em ambientes internos. Seria uma correção do índice PMV adicionando um componente à sua equação.</p> $R_1 = \{ \varepsilon f_{cl} f_{\text{eff}} \sigma [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] \}$ $R_{\text{dir}} = \alpha_{\text{sw}} f_{cl} f_{\text{eff}} f_p I_{\text{dir}}$ $\text{CPMV} = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,0275] \cdot \{ (M - W) - 3,05 \cdot [5,733 - 0,007 \cdot (M - W) - P_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,73 \cdot 10^{-2} \cdot M \cdot (5,867 - P_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - (R_1 - R_{\text{dir}}) - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \}$	CPMV: corrected predicted mean vote	Ambientes internos com radiação solar
PMV-PPD	CPMV* (item 2.3.6.4)	Zhang et al. (2020a)	<p>CPMV*: autores ajustam o CPMV para incluir o impacto da radiação solar difusa no conforto térmico.</p> $R_{\text{dif}} = \alpha f_{cl} f_{\text{eff}} \sum_{j=1}^{N_d} (F_{N-j} I_{\text{dif},j})$ $\text{CPMV}^* = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,0275] \cdot \{ (M - W) - 3,05 \cdot [5,733 - 0,007 \cdot (M - W) - P_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,73 \cdot 10^{-2} \cdot M \cdot (5,867 - P_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - (R_1 - R_{\text{dir}} - R_{\text{dif}}) - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \}$	CPMV*: corrected predicted mean vote	Ambientes internos com radiação solar
PMV-PPD	SC-PMV	Huang e Zhai (2020)	<p>SC-PMV: correção solar do PMV (<i>PMV solar-corrected</i>).</p> <p>O modelo considera a radiação solar como um componente da temperatura do ar através do índice <math>t_{\text{sca}}</math>. Este índice substitui a temperatura do ar na equação do PMV.</p> $t_{\text{sca}} = t_a + \frac{\alpha_{\text{sw}}}{h_0} (C_s I_{\text{dir}} + I_{\text{dif}})$	$t_{\text{sca}}$ : temperatura do ar com correção solar [°C]	-

\*A definição dos termos apresentados nas equações do Quadro 6 podem ser encontradas no item Lista de Símbolos.

### 2.3.6.1 Solar-Adjusted Mean Radiant Temperature (SA-MRT)

O modelo desenvolvido por La Gennusa et al. (2005, 2007) realiza um ajuste na temperatura radiante média levando em consideração a radiação incidente no ocupante por meio da inclusão de um módulo de radiação solar direta e difusa no

cálculo do fluxo de calor por radiação. Esse modelo permite a avaliação espacial, uma vez que utiliza os fatores de forma para determinar a quantidade de radiação incidente no ocupante. O ajuste considera todos os aspectos geométricos, incluindo dimensões, fatores de forma entre o sujeito e as superfícies circundantes (opacas e transparentes), além da altitude solar e do azimute. Recomenda-se a aplicação desse ajuste em ambientes internos termicamente moderados, como escritórios, e pode ser utilizado na correção tanto dos índices PMV e PPD quanto da temperatura operativa no modelo adaptativo.

Em La Gennusa et al. (2007), os autores apresentam procedimento detalhado para determinar a temperatura radiante média do objeto irradiado ( $T_{r,irr}$ ). O índice  $T_{r,irr}$  é definido como a soma quadrática da temperatura radiante média no sujeito não irradiado e do incremento na temperatura radiante média devido à radiação solar direta e difusa. O componente de radiação solar difusa leva em consideração a intensidade da radiação solar difusa que atravessa a superfície transparente. Já o componente da radiação direta considera a intensidade da radiação solar direta que entra através da superfície transparente e atinge a pessoa além do fator de forma projetado do sujeito na direção do feixe solar.

O método também inclui um ajuste na temperatura radiante no plano para prever o desconforto localizado causado por assimetria no campo radiante considerando a exposição do indivíduo à radiação solar. Os mesmos parâmetros utilizados no cálculo da  $T_{r,irr}$  são aplicados nesse ajuste.

#### 2.3.6.2 *SolarCal*

O SolarCal (ARENS et al., 2015) também é um modelo de ajuste da MRT devido ao impacto da radiação solar no ocupante. Esse é o método especificado na norma ASHRAE 55 (2020). Trata-se de um modelo simplificado, desenvolvido para fornecer uma rápida estimativa da radiação solar, e utiliza o conceito de campo radiante efetivo (ERF) para calcular o fluxo de energia radiante no corpo. Assim como os modelos anteriores, o *SolarCal* pode ser aplicado como ajuste tanto no modelo de conforto térmico PMV-PPD quanto no modelo Adaptativo. Ele foi baseado em um modelo desenvolvido por Arens, Gonzalez e Berglund (1986) para ambientes externos.

Neste modelo, a temperatura radiante média ( $\bar{t}_r$ ) é definida como a soma da temperatura radiante média por ondas longas ( $\bar{t}_{rlw}$ ) e da temperatura radiante média

por ondas curtas ( $\bar{t}_{rsw}$ ). O componente de radiação de ondas curtas é calculado com base no ganho solar no corpo humano através do campo radiante (*solar effective radiant field* –  $ERF_{solar}$ ). O  $ERF_{solar}$  é determinado considerando as intensidades de radiação solar difusa, direta normal e horizontal total no exterior do edifício, ponderadas pela transmitância solar combinada do sistema de janela e elemento de sombreamento. O componente de radiação solar difusa é calculado em função da fração da superfície do corpo exposta à radiação ( $f_{eff}$ ), da fração visível da abóboda celeste ( $f_{svv}$ ) e da refletância do piso ( $R_{floor}$ ). Já o componente de radiação solar direta considera a área projetada de uma pessoa exposta à luz solar direta e a fração da superfície do corpo exposta ao sol ( $f_{bes}$ ) pela área de pele de uma pessoa.

O modelo não aborda nenhum método para ajustar a assimetria na temperatura radiante. Entretanto, a norma ASHRAE 55 (2020), que utiliza esse estudo para definir o efeito da radiação solar no conforto térmico do ocupante, recomenda também um ajuste para a assimetria na temperatura radiante. Esse cálculo inclui a contribuição da MRT de ondas curtas quando há incidência de radiação solar no ocupante, substituindo a temperatura radiante no plano ( $t_{pr}$ ) na direção em que há exposição à radiação solar.

#### 2.3.6.3 *Modified Solar-Adjusted Mean Radiant Temperature (MSA-MRT)*

O modelo desenvolvido por Marino *et al.* e divulgado em uma série de publicações (MARINO *et al.*, 2017, 2018b; MARINO; NUCARA; PIETRAFESA, 2017) apresenta semelhanças com o modelo proposto por La Gennusa *et al.* (2005, 2007). No entanto, além de considerar a radiação por ondas longas proveniente das superfícies circundantes e o fluxo de radiação solar direta e difusa que atravessa as janelas, esse modelo também considera o fluxo de radiação solar resultante de reflexões internas nas superfícies do ambiente. Para o cálculo, consideram-se a intensidade de radiação solar direta no plano horizontal interno e os coeficientes de reflexão do piso e das superfícies internas. Esse modelo é recomendado para ambientes internos e pode ser aplicado como ajuste dos índices PMV-PPD, assim como na temperatura operativa no modelo adaptativo.

Além disso, o método também inclui um ajuste na temperatura radiante no plano para prever o desconforto localizado devido à assimetria no campo radiante, incorporando o efeito da radiação solar (MARINO *et al.*, 2018a). Nesse ajuste,

considera-se a radiação solar direta que incide perpendicularmente à superfície da área de teste.

#### 2.3.6.4 *Corrected Predicted Mean Vote (CPMV)*

O modelo desenvolvido por Zhang et al. (2018) aborda a influência direta da radiação solar no conforto térmico de pessoas em ambientes internos, aplicando uma correção no cálculo do índice PMV. Esse modelo é recomendado para ambientes internos com exposição à radiação solar. A correção ocorre por meio da adição de um componente de carga térmica por radiação solar direta ( $R_{dir}$ ). O  $R_{dir}$  é definido como o produto dos seguintes parâmetros: absorvância à radiação de ondas curtas, fator de área de superfície coberta pela vestimenta ( $f_{cl}$ ), fração da superfície do corpo exposta à radiação ( $f_{eff}$ ), fator de área projetada ( $f_p$ ) e radiação solar direta que incide na pessoa.

No entanto, o estudo não apresenta uma forma de ajuste no cálculo da assimetria na temperatura radiante. Além disso, não é possível utilizar a recomendação da ASHRAE 55 (2020) para o cálculo ajustado da temperatura radiante no plano, pois o modelo CPMV não corrige a temperatura radiante média, mas sim o índice PMV. Uma outra limitação deste método é o fato de ele não considerar o efeito da radiação difusa no conforto térmico de ocupantes.

Em um experimento de campo posterior, que coletou 916 respostas térmicas em edifícios com fachadas envidraçadas (ZHANG et al., 2020a), os autores concluíram que o CPMV apresenta desvio significativo dos votos de sensação térmica relatados, especialmente em condições de alta radiação solar difusa. Como resultado, eles propuseram o índice CPMV\*, que incorpora um componente relacionado à radiação solar difusa. Esse componente leva em consideração a intensidade de radiação solar difusa que atravessa a superfície transparente, ponderada pelo fator de forma entre a pessoa e a janela.

O índice PPD também foi ajustado em acordo com os resultados obtidos no experimento. Constatou-se que, devido à variabilidade na aceitação da radiação solar, não seria consistente substituir apenas o PMV pelo CPMV\* no cálculo do PPD. Portanto, os autores sugeriram a utilização de um novo índice, o percentual inaceitável (PPUA).

### 2.3.6.5 Considerações sobre os Modelos de Ajuste Solar

Os modelos de ajuste solar apresentam diferenças importantes entre si. O modelo SA-MRT, desenvolvido por La Gennusa et al. (2007), foi pioneiro na incorporação do efeito da radiação solar na MRT, considerando seu impacto no conforto térmico e percepção dos ocupantes. O modelo MSA-MRT, proposto por Marino et al. (2017), avança com o modelo SA-MRT ao incluir o fluxo de radiação solar proveniente das reflexões das superfícies do ambiente. Por sua vez, o *SolarCal*, desenvolvido por Arens et al. (2015), utiliza dados de radiação solar do meio externo, que podem ser facilmente obtidos a partir de estações climáticas ou arquivos climáticos, simplificando assim a obtenção desses dados. Uma vantagem do modelo CPMV, proposto por Zhang et al. (2018), é a exigência de menos dados de entrada, o que simplifica o processo de aplicação. Entretanto, o ajuste é feito diretamente no PMV. Além disso, não considera os efeitos da radiação solar difusa, o que pode levar a discrepâncias significativas na percepção térmica dos indivíduos. Apesar de a radiação direta ser mais intensa quando incidindo no ocupante, a radiação solar difusa contribui na taxa de radiação solar total e costuma estar presente em um período mais prolongado ao longo do dia. Conscientes dessa limitação, os autores publicaram uma correção deste modelo, chamado CPMV\*, que incorpora um componente ao cálculo do PMV relativo à radiação solar difusa.

Em um estudo recente, Huang e Zhai (2020) compararam nove diferentes modelos de ajuste solar, incluindo um modelo proposto pelos próprios autores. O estudo utilizou medições realizadas em uma sala de escritório em Lhasa, Tibet, que possuía uma fachada voltada para o sul, com WWR 60%, vidro simples 6 mm e caixilho de alumínio. Foram realizadas 72 horas de medições no período de inverno, caracterizado por alta intensidade de radiação solar e baixas temperaturas do ar (-10 a 10 °C). Durante as medições, nenhum sistema de condicionamento de ar foi utilizado e nenhuma ventilação natural foi permitida. Os nove modelos de ajuste solar analisados foram: (1) Modelos de temperatura uniforme equivalente (WRAY, 1980); (2) Temperatura operativa corrigida (ZHANG et al., 2018); (3) SA-MRT (LA GENNUSA et al., 2005, 2007); (4) MSA-MRT (MARINO; NUCARA; PIETRAFESA, 2017); (5) *SolarCal* (ARENS et al., 2015); (6) Temperatura Global (ATHIENITIS; HAGHIGHAT, 1992); (7) CPMV (ZHANG et al., 2018); (8) PMV modificado (HODDER; PARSONS, 2007); e (9) SC-PMV, modelo proposto pelos autores.

Entre os modelos que sugerem uma temperatura equivalente, o modelo 6 de Athienitis e Haghighat (1992) apresentou menor correlação com a temperatura operativa equivalente em comparação aos modelos 1 ( $R^2=0,999$ ) e 2 ( $R^2=0,946$ ) de Wray (1980) e Zhang et al. (2018), respectivamente. Entre os modelos de ajuste da MRT (modelos 3 a 6), o modelo 3 de La Gennusa et al. (2005, 2007) apresentou a menor convergência com os valores medidos in loco, resultando em valores de MRT consideravelmente menores durante os horários de pico (aproximadamente 15 °C menos). Dentre os modelos 7, 8 e 9, que ajustam diretamente o índice PMV, o modelo proposto pelos autores (9) apresentou a melhor convergência com o PMV calculado a partir das medições, variando em até 0,7 durante os momentos de pico. Os modelos 7 e 8, de Zhang et al. (2018) e Hooder e Parsons (2007), destoaram significativamente, especialmente nos períodos de pico, divergindo mais de 4,0 do PMV medido. Ao comparar o modelo 4 de Marino, Nucara e Pietrafesa (2017) com o modelo proposto pelos autores (9), foi observada uma forte correlação com um  $R^2=0,9866$ , demonstrando uma relação consistente entre os resultados obtidos pelos dois modelos. A radiação solar direta e difusa apresentaram forte correlação com a MRT, impactando significativamente a sensação térmica do ocupante. Além disso, todos os modelos apresentaram uma redução na precisão da MRT quando a latitude solar foi menor do que 20°.

No entanto, este estudo de Huang e Zhai (2020) apresenta limitações importantes que afetam a avaliação do modelo de ajuste solar mais adequado. Durante o período de medições, não houve operação de condicionamento de ar ou ventilação mecânica, e a presença de um ocupante não é explicitada. Esse cenário não reflete a realidade de um escritório em uso, o que pode influenciar significativamente os resultados. Além disso, a presença de uma pessoa foi considerada nos cálculos de conforto. A utilização de um ambiente real com ocupação poderia proporcionar resultados mais fiéis à realidade. Outro ponto a ser considerado é que, embora cinco termômetros de globo tenham sido usados ao longo de uma linha central perpendicular à janela, apenas um valor de MRT, de PMV e de temperatura operativa foram utilizados nas comparações. No estudo não é esclarecido se esses valores são uma média ou se apenas um ponto específico foi considerado. Como mencionado anteriormente, tanto a MRT quanto o impacto da radiação solar podem variar significativamente em diferentes pontos no espaço, principalmente em relação

à distância da janela. Seria essencial verificar se o cálculo dos índices de conforto utilizando em diferentes pontos do espaço mantém as correlações descritas.

O estudo realizado por Fernandez et al. (2020) comparou os efeitos do ajuste solar da temperatura radiante média em quatro índices: Fanger (PMV), Pierce (TSENS), Takada (TSV – *thermal sensation vote*) e Fiala (DTS – *dynamic thermal sensation*). Para essa análise, utilizou-se um modelo de escritório padrão com 100m<sup>2</sup> de área de piso e uma fachada envidraçada voltada para o sul, considerando o clima de Milão, Itália. As paredes e teto do modelo foram considerados expostos ao ambiente externo, enquanto o piso foi configurado como adiabático. Os resultados foram apresentados em duas situações: como irradiados, quando a contribuição solar na MRT foi aplicada conforme modelo SA-MRT de La Gennusa et al. (2005), e padrão, quando o ajuste solar não foi aplicado. As métricas de conforto *Thermal Comfort Availability* (TCA - Disponibilidade de Conforto Térmico) e *Thermal Comfort Usability* (TCU - Usabilidade de Conforto Térmico), propostas por Atzeri et al. (2016), foram utilizadas para apresentar os resultados anuais e espaciais.

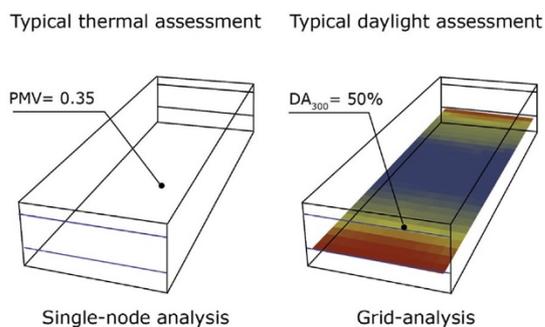
Os índices estacionários obtiveram distribuições semelhantes de TCA e TCU e se mostraram mais sensíveis à presença de radiação solar. O índice DTS demonstrou menor influência da MRT. Por exemplo, a variação no TCA entre DTS padrão e DTS irradiado foi muito reduzida, abrangendo apenas o primeiro metro em relação à janela, enquanto a influência se estendeu a até 5 metros nos demais índices irradiados. De forma geral, a implementação do ajuste solar teve um grande impacto nas condições de conforto térmico previstas. O alcance do desconforto causado pela janela (TCA) passou de 2 m para 4-5 m nos índices PMV, TSENS e TSV, e houve redução de até 20% no TCA em alguns pontos. A TCU também foi significativamente reduzida nos índices irradiados, sendo inferior a 50% na maior parte do verão.

### **2.3.7 Avaliação Dinâmica e Espacial de Conforto Térmico**

Conforme destacado por Zomorodian e Tahsildoost (2017), a temperatura radiante média (MRT) varia de acordo com a localização no ambiente, principalmente em relação à proximidade com as superfícies externas, inclusive ao longo da fachada. Desta forma, os índices de conforto também se alteram em função desses fatores. Entretanto, essa espacialidade raramente é abordada na avaliação de conforto térmico, em contraste com o conforto visual, que se encontra mais avançado na utilização de métricas espaciais e dinâmicas. Hee et al. (2018) apresentam um

paralelo visual entre a avaliação típica de conforto luminoso e a do conforto térmico, demonstrado na Figura 20.

Figura 20 - Dados de saída típicos de avaliação térmica e luminosa



Fonte: Hee et al. (2018).

As áreas próximas a fachadas envidraçadas tendem a apresentar maior sensibilidade às variações climáticas e às mudanças no uso da edificação (PINTO; WESTPHAL, 2019a). No entanto, as pesquisas que estudam a influência de alterações nas áreas transparentes da envoltória nos índices de conforto, em geral, utilizam um método simplificado que considera uma temperatura operativa homogênea em todo ambiente. Com isto, a possibilidade de desconforto local em áreas próximas às janelas é desprezada.

Em geral, os modelos utilizados nesses estudos não aplicam nem mesmo a recomendação dos requisitos de modelagem para cálculo de desempenho de edificações, estabelecidos pela ASHRAE Standard 90.1 (ASHRAE, 2007), que divide o perímetro limítrofe à fachada, com largura de 4,57 metros (ou 15 pés), em uma nova zona térmica. Ao atender a essa recomendação, os resultados demonstrariam maior precisão. Ainda assim, questiona-se se a divisão com uma faixa perimetral de 4,57 m seria suficiente para uma avaliação adequada do conforto térmico dos ocupantes em postos de trabalho mais próximos às fachadas envidraçadas.

Os modelos de conforto térmico possuem índices que expressam o conforto, o desconforto ou a sensação térmica em um dado momento ou a média de uma hora. Como visto na seção 2.3.4, algumas normas incluem métodos de avaliar o conforto térmico a longo prazo, mas ainda consideram um ambiente térmico uniforme. Ao longo dos últimos anos, alguns índices espaciais e/ou dinâmicos de conforto térmico vêm sendo desenvolvidos para melhorar a avaliação da qualidade dos ambientes internos.

Cannistraro, G., Cannistraro e Restivo (2015) sugerem a temperatura radiante média local (L-MRT), que modifica a equação da temperatura radiante média para considerar um ponto no espaço e sua distância de objetos radiantes – equação (14).

$$\bar{t}_{r,local}^4 = \frac{\sum_{N=1}^b \left( \frac{F_{p-N}}{f_p} \cdot \frac{S_N}{d_p} \cdot t_N^4 \right)}{\sum_{p=1}^b \left( \frac{F_{p-N}}{f_p} \cdot \frac{S_N}{d_p} \right)} \quad (14)$$

Sendo  $F_{p-N}$  o fator de forma entre a pessoa e a superfície radiante N;  $S_N$  a área da superfície N (m<sup>2</sup>);  $f_p$  o fator de área projetada;  $d_p$  a distância da pessoa em relação a superfície N (m); e  $t_N$  a temperatura superficial da superfície N (°C).

Levitt et al. (2013) propõe um índice de autonomia térmica do ambiente com a intenção de atrelar o conforto do usuário diretamente à arquitetura, ao clima e à função do ambiente, e não tanto aos sistemas. Esse índice, denominado *Thermal Autonomy* (TA), é definido como a porcentagem do período ocupado em que uma zona térmica atende a um conjunto de critérios de conforto térmico, somente por meios passivos, ao longo de um ano. Embora considere apenas meios passivos, os autores afirmam que a TA pode ser usada para avaliar edifícios com sistemas de condicionamento mecânico ou misto, servindo como uma ferramenta de calibração para o contexto climático, prolongando os períodos sem a necessidade de condicionamento. Esse método de análise é temporal e não espacial, pois considera um valor para todo o ambiente.

Hee et al. (2018) propõem um novo fluxo de trabalho que avalia simultaneamente a autonomia luminosa, térmica e de ventilação por meio de estratégias projetuais passivas, utilizando o índice TA baseado no modelo adaptativo. TA pode ser descrita conforme equações (15) e (16).

$$TA = \frac{\sum_{i=1}^{N_t} (wf_i \cdot t_i)}{\sum_{i=1}^{N_t} (t_i)} \in [0,1] \rightarrow wf_i \quad (15)$$

$$wf_i = \begin{cases} 0 & \text{se } t_{op} > 21,3^\circ\text{C} + 0,31\bar{t}_{pma(out)} \\ 1 & \text{se } 14,3^\circ\text{C} + 0,31\bar{t}_{pma(out)} \leq t_{op} \leq 21,3^\circ\text{C} + 0,31\bar{t}_{pma(out)} \\ 0 & \text{se } t_{op} < 14,3^\circ\text{C} + 0,31\bar{t}_{pma(out)} \end{cases} \quad (16)$$

Os autores utilizaram o *plug-in Honeybee* para *Grasshopper* para simular a distribuição espacial da TA. Este *software* utiliza o *EnergyPlus* como mecanismo de cálculo de transferência de calor e demanda dos sistemas, o qual considera que há distribuição homogênea do ar em toda a zona térmica. Portanto, a avaliação espacial

das condições térmicas do ambiente é calculada pelo *Honeybee* com base em uma malha onde a MRT de cada ponto é calculada em função dos fatores de forma e da temperatura nas superfícies circundantes. Neste estudo, os autores também incluíram o componente que considera a influência da radiação solar no cálculo da MRT com base no modelo *SolarCal* (ARENS et al., 2015). Em estudo sobre o desempenho energético e conforto térmico na avaliação de placas fotovoltaicas semi-transparentes, Chinazzo et al. (2020) utilizam a matriz de avaliação de conforto integrada de Hee et al. (2018) para criar o *Discomfort Score*. Este é um método de avaliação multicritério que avalia de forma individual e integrada a autonomia térmica, luminosa e de ventilação.

O *Thermal Comfort Percentage* (TCP) foi desenvolvido por Rakha (2015) para mapeamento temporal e espacial do conforto térmico anual em áreas urbanas. O TCP anual (TCPa) é definido como o “percentual de tempo ativo do ano em que uma pessoa, em um determinado espaço, está em conforto térmico, com crédito parcial linear à medida que o conforto diminui”. Este crédito parcial está relacionado à natureza de adaptação humana e dado em condições de estresse moderado por calor ou frio. Segundo o autor, as pessoas tendem a se ajustar em uma situação levemente desconfortável, o que é considerado nesta medida e evita os limites severos entre condições de conforto e desconforto. Mackey (2015) propõe a aplicação desta métrica em ambientes internos, sendo então TCP definido como o percentual de tempo que um dado ponto no espaço encontra-se dentro da faixa de conforto adaptativo. Os autores mencionam que a métrica proposta só está disponível no contexto do uso de *softwares* de simulação. O componente de cálculo do TCP também está disponível no *Honeybee* para *Grasshopper* e o modelo de cálculo da MRT utiliza o mecanismo de cálculo do *Radiance* para contribuição da radiação. Estudo de Abdullah e Alibaba (2018) apontou resultados semelhantes ao utilizar os índices TCP e TA.

Atzeri et al. (2016) propõem um conjunto de métricas para avaliar de forma integrada o conforto ambiental em espaços internos, com o objetivo de obter um índice de conforto térmico temporal e espacial compatível com os índices já existentes para o conforto visual. Essas métricas abrangem o conforto visual e a disponibilidade de luz natural, o conforto térmico e métricas globais. As métricas globais referem-se a situações em que tanto as condições de conforto visual quanto térmico estão sendo atendidas. As métricas estão divididas em quatro grupos: disponibilidade local e da zona (tempo), usabilidade momentânea (espaço) e a longo prazo.

Em relação à avaliação de conforto térmico, as métricas propostas são *Thermal Comfort Availability* (TCA), *Spatial Thermal Comfort Availability* (sTCA), *Thermal Comfort Usability* (TCU) e *Time Thermal Comfort Usability* (tTCU). TCA é definida como a disponibilidade local de conforto térmico suficiente durante o tempo ocupado, conforme equação (17). O fator de ponderação é obtido por meio da equação (18). A sTCA é a fração do espaço que apresenta TCA mínima, conforme equação (19). O fator de ponderação da sTCA é obtido por meio da equação (20).

$$TCA_x = \sum_{i=1}^{N_t} wf_i \cdot \frac{t}{T} \in [0,1] \quad (17)$$

$$wf_i = \begin{cases} 1 & \text{se } CI \geq CI_{lim} \\ 0 & \text{se } CI < CI_{lim} \end{cases} \quad (18)$$

$$sTCA_{x|y} = \sum_{j=1}^{N_p} wf_j \cdot \frac{1}{N_p} \in [0,1] \quad (19)$$

$$wf_j = \begin{cases} 1 & \text{se } TCA \geq TCA_{min} \\ 0 & \text{se } TCA < TCA_{min} \end{cases} \quad (20)$$

Onde,  $x$  é o indicador do limite do modelo de conforto escolhido;  $N_t$  é o número total de etapas no período  $T$ ;  $wf_i$  é o fator de ponderação dependendo do limiar do modelo escolhido;  $t$  é a etapa de avaliação;  $T$  é o período de referência (como o período ocupado durante um ano ou um mês);  $CI$  representa o indicador de conforto escolhido;  $CI_{lim}$  são os valores limites dos indicadores de conforto;  $y$  é o indicador do  $TCA_{min}$ ;  $wf_j$  é o fator de ponderação da sTCA;  $N_p$  é o número total de pontos na malha de avaliação espacial; e  $TCA_{min}$  é a disponibilidade de tempo mínima aceitável em TCA.

A TCU expressa a usabilidade do ambiente em um determinado momento, ou seja, a fração do espaço que apresenta condições de conforto térmico em uma dada hora. A TCU é descrita pela equação (21). Em avaliações a longo prazo, o índice tTCU é utilizado para expressar a fração de tempo em que o ambiente atende a uma TCU mínimo, conforme equação (22). O fator de ponderação do tTCU ( $wf_i$ ) depende da disponibilidade de tempo mínima aceitável e é descrito na equação (23).

$$TCU_x = \sum_{j=1}^{N_p} wf_j \cdot \frac{1}{N_p} \in [0,1] \quad (21)$$

$$tTCU_{x|y} = \sum_{i=1}^{N_t} wf_i \cdot \frac{t}{T} \quad (22)$$

$$wf_i = \begin{cases} 1 & \text{se } TCU \geq TCU_{min} \\ 0 & \text{se } TCU < TCU_{min} \end{cases} \quad (23)$$

Onde,  $TCU_{min}$  é usabilidade de espaço (TCU) mínima aceitável.

Zomorodian e Tahsildoost (2017) utilizam a métrica sTCA na avaliação do efeito de alterações nos fechamentos transparentes na uniformidade do conforto térmico e visual de uma sala de aula no Teerã, Irã (clima semiárido frio). Atzeri et al. (2018) analisam a variação no conforto térmico utilizando diferentes sistemas de vidro

com sombreamento acoplado de um escritório de planta aberta em Roma (classificação climática Csa) por meio das métricas TCA, sTCA, TCU e tTCU. Os autores utilizaram o PMV/PPD como modelo de conforto corrigido com o modelo de ajuste solar da MRT de La Gennusa et al. (2005, 2007).

Os índices dinâmicos e espaciais de conforto térmico são apresentados de forma resumida no Quadro 7.

Quadro 7 - Índices Dinâmicos e Espaciais de Conforto Térmico

Modelo de Conforto	Modelo dinâmico/ espacial	Publicação (s)	Descrição	Índices
PMV-PPD	L-MRT	Cannistraro, G., Cannistraro e Restivo (2015)	L-MRT: Temperatura radiante média local ( <i>local mean radiant temperature</i> ). Proposta de temperatura radiante média local, a qual modifica a equação da temperatura radiante média de forma a considerar um ponto no espaço e sua distância de objetos radiantes.	$t_{r,local}$ : temperatura radiante média local [°C]
Adaptativo <i>SolarCal</i>	Thermal Autonomy	Levitt et al. (2013) Hee et al. (2018)	<i>Thermal Autonomy</i> (TA) é definido como porcentagem do período ocupado em que uma zona térmica atende a um determinado conjunto de critérios de aceitabilidade de conforto térmico, apenas por meios passivos, ao longo de um ano. Originalmente é um método de análise temporal, mas posteriormente foi trazido para análise espacial, considerando a distribuição espacial do conforto térmico com base na variação da temperatura média radiante.	TA: thermal autonomy [%]
Adaptativo	Thermal Comfort Percentage	Rakha (2015) Mackey (2015)	O <i>Thermal Comfort Percentage</i> (TCP) foi desenvolvido para mapeamento temporal e espacial do conforto térmico anual em áreas urbanas. Mackey (2015) propõe a aplicação desta métrica em ambientes internos, onde TCP é o percentual de tempo que um dado ponto no espaço encontra-se dentro da faixa de conforto adaptativo. A métrica proposta só está disponível no contexto do uso de <i>softwares</i> de simulação.	TCP: percentual de conforto térmico [%]  TCPooc: percentual de conforto térmico no período ocupado [%]
PMV-PPD Adaptativo	Thermal Comfort Availability	Atzeri et al. (2016)	Método desenvolvido para ser um índice de conforto térmico temporal e espacial compatível com os índices já existentes para conforto visual, permitindo uma avaliação de conforto integrada. <i>Thermal Comfort Availability</i> (TCA) é a disponibilidade local de conforto térmico suficiente durante o tempo ocupado. <i>Spatial TCA</i> (sTCA) é a fração do espaço que apresenta TCA mínimo.	TCA: Thermal Comfort Availability [%]  sTCA: Spatial Thermal Comfort Availability [%]
PMV-PPD Adaptativo	Thermal Comfort Usability	Atzeri et al. (2016)	Propostos em conjunto com a TCA, os índices de <i>Thermal Comfort Usability</i> (TCU) referem-se à fração do espaço em conforto. A TCU expressa a usabilidade, em termos da fração de espaço, com um conforto térmico adequado em um determinado momento. A <i>Time TCU</i> (tTCU) expressa a fração de tempo em um TCU mínimo (avaliação a longo prazo).	TCU: Thermal Comfort Usability [%]  tTCU: Time of Thermal Comfort Usability [%]

## 2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NA PREVISÃO DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO

Edifícios são um conjunto de sistemas complexos, interrelacionados e impactados pelas condições climáticas e ação das pessoas que o ocupam. A compreensão e o cálculo dessas interações representam um desafio significativo. As

simulações termo energéticas oferecem uma abordagem que permite considerar simultaneamente várias representações dos fenômenos físicos. Essas simulações consistem em uma série de modelos matemáticos interconectados, usados para representar matematicamente a física do ambiente construído.

As ferramentas de simulação de desempenho de edifícios (BPS - *building performance simulation*) desempenham um papel fundamental na estimativa e entendimento destes fenômenos complexos e multifatoriais. Elas possibilitam que pesquisadores investiguem o desempenho de sistemas e materiais, ao mesmo tempo em que permitem que projetistas avaliem a influência de suas escolhas. Com base em dados de entrada relacionados ao clima local, à geometria do edifício, às propriedades dos materiais, às especificações técnicas dos sistemas instalados e aos padrões de ocupação e uso da edificação, as ferramentas BPS permitem modelar e estimar o comportamento e desempenho termoenergético do edifício.

Tal complexidade exige do usuário destas ferramentas conhecimento dos fenômenos físicos e dos sistemas envolvidos. Em pesquisa sobre método de apoio à calibração de modelos de simulação de desempenho energético de edifícios desenvolvida por Westphal (2007), estimou-se incerteza de  $\pm 11\%$  na previsão do consumo anual de energia elétrica por simulação. A previsão de consumo de energia para condicionamento térmico é usualmente uma análise em escala macro, no âmbito do edifício. Por outro lado, a estimativa das condições de conforto térmico tem como foco o ocupante – escala micro – variando espacialmente de forma relevante. As possibilidades na definição de cada um dos dados de entrada de uma BPS são extensas e implicam em incertezas, as quais não serão necessariamente as mesmas entre as avaliações de consumo de energia e condições de conforto térmico.

Esta seção está, portanto, dividido em duas partes. Primeiramente são abordadas as principais BPS utilizadas atualmente. Em seguida, são abordados três pontos críticos entre simplificações e definições necessárias na modelagem computacional que são pouco explorados, principalmente em relação à estimativa das condições de conforto em ambientes de escritório com influência de amplas áreas envidraçadas.

#### **2.4.1 Ferramentas de simulação de desempenho de edifícios**

Em revisão de literatura realizada por Bahri et al. (2022) sobre o desempenho de fachadas paramétricas em relação ao conforto térmico, verificou-se que, dos 30

estudos que analisaram o conforto térmico no desempenho de fachadas paramétricas, 25 utilizaram método de BPS. Dentre esses, 13 usaram diretamente o *EnergyPlus* ou outros *softwares* que o utilizam como mecanismo de cálculo, tais como *DesignBuilder* e o *Ladybug Tools* para *Rhino/Grasshopper*. Essa proporção é consistente com os resultados encontrados na amostra de estudos que investigaram o conforto térmico em ambientes com grande área envidraçada por meio do BPS, conforme apresentado no Quadro 1.

O *software EnergyPlus* é a ferramenta BPS mais amplamente difundida atualmente e tem sido extensivamente validado para cálculos térmicos relacionados a edifícios e seus sistemas. Ele é um programa computacional gratuito que faz parte de um programa de modelagem energética de edificações financiado pelo *Building Technologies Office* (BTO – Escritório de Tecnologias em Edificações) do *US Department of Energy* (DOE – Departamento de Energia dos Estados Unidos). Embora o *EnergyPlus* seja amplamente utilizado para análises de demanda energética e avaliação do conforto térmico global ou de um ambiente, ele apresenta algumas limitações na análise da incidência de radiação e na avaliação espacial. O *software* não permite a estimativa de conforto em vários pontos do ambiente e considera apenas um ponto médio na sala, sendo que a MRT é “calculada com base em uma média ponderada da emissividade da área de todas as superfícies na zona”, conforme expresso na Equação (24) (DOE, 2020, p. 1479). Além disso, o *EnergyPlus* não permite a incorporação de modelos de ajuste solar.

$$\bar{t}_r = \frac{\sum \varepsilon_N A_N t_N}{\sum \varepsilon_N A_N} \quad (24)$$

Onde,  $\varepsilon_N$  é a emissividade na superfície interna N e  $A_N$  é a área desta superfície.

Como abordado na seção 2.2, vários estudos utilizam o *software* TRNSYS. Esse programa é utilizado para simular o comportamento de sistemas em regime transiente, principalmente focado na avaliação do desempenho dos sistemas de energia térmica e elétrica. A possibilidade de se analisar o conforto térmico em pontos distribuídos pelo ambiente mostra-se um avanço em relação ao *EnergyPlus*. No entanto, o TRNSYS não é um *software* gratuito, mesmo em sua versão acadêmica.

No estudo realizado por Pernigotto e Gasparella (2013) foi conduzida uma análise comparativa entre os *softwares* *EnergyPlus* e TRNSYS para calcular a demanda de energia para condicionamento térmico e os picos de carga. Os resultados

revelaram que houve diferenças significativas entre os dois programas quando modelos com vidro simples foram comparados, enquanto os modelos com vidro duplo apresentaram resultados equivalentes. No entanto, os autores não realizaram comparações relacionadas ao conforto térmico.

O conjunto de ferramentas *Ladybug Tools* foi desenvolvido por Mostapha Sadeghipour Roudsari em colaboração com Chris Mackey, com o objetivo de aprimorar o fluxo de trabalho no projeto e na avaliação do ambiente construído. Essas ferramentas são um *software* livre e de desenvolvimento colaborativo, disponibilizado como um conjunto de aplicativos gratuitos em formato de *plug-in* para o *Grasshopper/Rhinoceros* (LADYBUG TOOLS LLC, 2022). Essa plataforma integra diversos mecanismos de simulação computacional amplamente validados, como o *EnergyPlus*, o *Radiance* e o *Therm*. O *software* é composto por quatro aplicativos principais interconectados: *Ladybug*, *Honeybee*, *Dragonfly* e *Butterfly*. O *Dragonfly* é utilizado para análise urbana, enquanto o *Butterfly* é empregado para simulação computacional avançada de dinâmica dos fluídos (CFD). O *Ladybug* é voltado para análise detalhada de dados climáticos, e o *Honeybee* é utilizado para modelagem térmica, energética e de iluminação natural.

O uso do *Ladybug Tools* tem se tornado cada vez mais frequente devido à sua capacidade de analisar o desempenho de edificações em várias instâncias e escalas, incluindo desempenho energético, térmico e lumínico, conforto térmico, análise do clima urbano, entre outros, com base em um único modelo base. Além disso, permite o pré e pós-processamento de dados no próprio *software* usando ferramentas do *Grasshopper*. Essas ferramentas também facilitam a parametrização dos dados de entrada e das especificações do modelo.

Para a modelagem e análise de conforto térmico de ambientes internos, utilizam-se principalmente os aplicativos *Ladybug* e *Honeybee*. Esses aplicativos permitem a modelagem e processamento de dados para obter mapas com a distribuição das condições térmicas do ambiente em planta. O *plug-in* possibilita a visualização espacial do conforto térmico por meio dos componentes “*HB PMV Comfort Map*” ou “*LB Comfort Map*”. O “*HB PMV Comfort Map*” realiza uma simulação direta, obtendo a temperatura das superfícies internas, a temperatura e a umidade relativa do ar interno, utilizando o *EnergyPlus*. As malhas de sensores do *Radiance* são empregadas para mapear os pontos de análise. Nesse método, a radiação solar de ondas curtas já é incorporada ao modelo, e as MRT são calculadas utilizando o

*Radiance*. As MRT de ondas longas são obtidas com base nos fatores de forma em cada ponto. Esse mapa gera resultados de Percentual de Conforto Térmico (TCP), considerando o período de ocupação. Já o “*LB Comfort Map*” calcula o PMV com base nos resultados da simulação termo energética pelo *OpenStudio*, que utiliza o *EnergyPlus* nos cálculos de transferência de calor. Esse componente não distingue entre horas ocupadas e não ocupadas, mas é possível criar uma programação para considerar apenas o período de ocupação. Também permite calcular o conforto distribuído espacialmente quando se insere um grid de sensores no ambiente.

O *Ladybug* possui um componente chamado “LB Indoor Solar MRT” que aplica o *SolarCal*, calculando os índices de conforto térmico com base na MRT ajustada devido à exposição do ocupante à radiação solar. Esse componente utiliza como base os dados de temperatura obtidos na simulação por meio do *OpenStudio*. É possível configurar todos os dados de entrada do *SolarCal* através desse componente. Ele pode ser conectado com o “*LB Comfort Map*” que passará a utilizar a MRT ajustada nos cálculos de conforto térmico. Por outro lado, o “*HB PMV Comfort Map*” não permite modificações nos dados de entrada para o *SolarCal*, como a rotação dos ocupantes, por exemplo.

#### **2.4.2 Incertezas e definições na modelagem computacional**

A modelagem termo energética de edifícios apresenta desafios significativos devido às incertezas associadas aos dados de entrada, que podem ser complexos de medir ou desconhecidos (HONG; LEE, 2019). Uma das principais dificuldades está nas incertezas relacionadas às características físicas e operacionais dos edifícios, as quais são muito difíceis de quantificar (GONZÁLEZ; BANDERA, 2022). Essas incertezas englobam a massa térmica interna, a operação das aberturas e sistemas, a infiltração de ar, as condições de contorno e os modelos matemáticos utilizados para estimar o balanço térmico.

Nesta seção, serão abordadas três fontes de incertezas na modelagem termo energética de edifícios que são pouco exploradas no contexto do uso de ferramentas de BPS, especialmente no que diz respeito à previsão das condições de conforto térmico. Primeiramente, é discutida a influência das condições de contorno das superfícies internas. Em seguida, é abordada a incerteza associada à massa térmica interna irregular. Por fim, trata-se da seleção do algoritmo de convecção aplicado às superfícies internas.

#### 2.4.2.1 *Condições de contorno das superfícies internas*

O programa computacional *EnergyPlus* permite configurar as superfícies das zonas térmicas como adiabáticas, ou seja, permitindo troca térmica apenas através da superfície interna. Nesta condição de contorno, ambas as faces das superfícies do elemento construtivo são mantidas na mesma temperatura, pressupondo as mesmas condições térmicas aos ambientes adjacentes (DOE, 2022a).

Ao utilizar essa configuração, é possível simplificar as simulações térmicas para as zonas térmicas específicas do estudo, quando elas se repetem ao longo de um mesmo andar ou ao longo dos pavimentos. Isso permite a simulação de um único pavimento-tipo (com cobertura e piso adiabáticos) ou mesmo de uma única zona térmica. Essa abordagem reduz o tempo necessário para modelagem, simulação e processamento de dados, o que pode ser vantajoso quando o foco não é o edifício como um todo, mas um ambiente específico, por exemplo.

Normalmente, as condições nos ambientes adjacentes à zona térmica não serão exatamente iguais. Ao considerar um edifício real, fatores como dimensões, padrão de ocupação, exposição solar, função do ambiente, entre outros, variam nos ambientes adjacentes. No entanto, muitas vezes não é possível obter essas informações em edifícios existentes ou não há previsão disponível durante a fase de projeto. Em decorrência, pode haver variações nas temperaturas superficiais das paredes internas nos resultados das simulações. Isso afetaria as trocas convectivas e radiantes com as superfícies e ar interno, alterando as condições térmicas do ambiente.

Além disso, na área de pesquisa científica, frequentemente são utilizados modelos hipotéticos de edifícios para investigar parâmetros construtivos ou sistemas. A análise energética por meio da simulação de zonas térmicas independentes pode simplificar os procedimentos de avaliação, como no caso de normas e programas de etiquetagem de desempenho, agilizando avaliação em fase de projeto.

Estudos paramétricos, especialmente aqueles que focam em variações de elementos de fachada, tendem a adotar condições de contorno adiabáticas para as paredes internas. Exemplos de estudos incluem Marino et al. (2018), Ochoa et al. (2012), Papachristou et al. (2021), Becherini et al. (2018), Melo et al. (2016) e Bueno et al. (2015). Algumas pesquisas, como a de Sorgato et al. (2014), avaliaram o impacto do uso da configuração adiabática no piso, em contraste ao contato com o solo.

Observou-se uma diferença de temperatura interna de 2,7 °C mais alta no verão e 3,5 °C mais baixa no inverno.

Um estudo de caso conduzido por Buratti, Palladino e Moretti (2017) em uma sala de aula em Perugia, Itália, examinou o impacto da definição das condições de contorno das paredes internas na simulação térmica de um ambiente. Verificou-se um maior erro em relação aos dados experimentais ao considerar as condições de contorno adiabáticas. As temperaturas estimadas na superfície transparente simuladas foram superiores às medidas experimentalmente, com uma diferença de até 2,5 K nas condições adiabáticas e uma discrepância de até 1,5 K na condição com temperatura constante. No entanto, utilizou-se *software* de simulação CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e a condição de comparação foi de temperatura constante das paredes. Não foram encontrados estudos que investigassem o impacto nas condições térmicas dos ambientes internos a partir da escolha da configuração de contorno das paredes internas para as condições disponíveis no *EnergyPlus*.

#### 2.4.2.2 *Massa térmica interna*

A massa térmica desempenha um papel importante nas trocas térmicas de um edifício e na estimativa das cargas térmicas para resfriamento e aquecimento. Hong e Lee (2019) enfatizam que a maior parte dos estudos avaliam a influência da massa térmica externa do edifício, com os *softwares* de BPS incluindo modelagem avançada para essa análise. No entanto, a influência da massa térmica interna, principalmente relacionada ao mobiliário e às partições, tem sido pouco investigada.

A presença de massa térmica interna aumenta a capacitância térmica do edifício e pode auxiliar na redução dos picos de carga térmica para aquecimento e resfriamento (DZELZITIS et al., 2019). A massa interna fixa engloba as estruturas internas do edifício, como paredes internas e lajes, enquanto a massa interna irregular é composta principalmente pelo mobiliário (LI et al., 2016).

Há um extenso corpo de pesquisa dedicado à definição e influência da massa térmica da envoltória no desempenho de edifícios. No entanto, a massa térmica interna recebe pouca atenção nas práticas de simulação energética de edifícios, apesar de desempenhar um papel importante na estimativa das cargas de aquecimento e resfriamento. Além disso, a maioria dos estudos que investigam o impacto da carga térmica interna concentra-se nos elementos fixos da massa interna.

Um exemplo é o estudo realizado por Wu, Benner e Luo (2023), que desenvolveram um modelo analítico para resfriamento noturno da massa térmica interna, focando especificamente nas lajes de concreto.

Alguns estudos avaliam o efeito da inclusão de objetos de massa térmica interna referente às divisórias, com o objetivo de simplificar a modelagem e reduzir o tempo de simulação sem comprometer os resultados de consumo de energia para condicionamento térmico. Silva e Ghisi (2014) analisaram as incertezas da modelagem computacional no *EnergyPlus* em relação ao consumo de energia para condicionamento térmico em edifícios. Dentre as estratégias de simplificação adotadas, os pavimentos foram modelados agrupando-se os ambientes em zonas térmicas condicionadas e não condicionadas, onde a massa térmica das divisórias equivalente às partições originais foi adicionada em cada uma das zonas simplificadas. Os modelos com essa simplificação obtiveram maior aproximação no consumo anual de energia para resfriamento comparado a modelagem detalhada (diferença entre 0,8 e 4,1 kWh/m<sup>2</sup>.ano).

*Softwares* avançados de modelagem termo energética de edificações, como o *EnergyPlus*, permitem a inclusão de massa interna nas zonas térmicas. No entanto, a definição precisa da massa térmica interna irregular apresenta desafios devido à sua complexidade e variabilidade (GONZÁLEZ; BANDERA, 2022). Além disso, a obtenção das propriedades físicas necessárias como dados de entrada nos modelos de simulação atuais também é uma tarefa difícil (DOE, 2022a). Conforme destacado por Li et al. (2016), a principal limitação atual reside no fato de que os dados de entrada relacionados ao mobiliário são impossíveis de prever com precisão, devido às suas formas irregulares e distribuição aleatória no ambiente.

Para edificações existentes, desenvolveram-se metodologias de estimativa da massa térmica. Li et al. (2016) propõem um método de Área Efetiva, que parte do pressuposto de que o mobiliário e suas propriedades são conhecidos. Além disso, foram desenvolvidas metodologias com base em técnicas de modelagem inversa, que combinam medições e modelagem (GONZÁLEZ; BANDERA, 2022; HONG; LEE, 2019; LEE; HONG, 2019). Nessas abordagens, os dados facilmente mensuráveis no ambiente real são utilizados para estimar a massa térmica interna ou a taxa de infiltração da zona, por meio da inversão na equação de balanço térmico do edifício.

A capacidade térmica estimada pode, então, ser adicionada à zona térmica do modelo calibrado.

Ambos métodos mencionados não são aplicáveis no desenvolvimento de projetos arquitetônicos em fases iniciais. Além disso, frequentemente edifícios de escritórios são projetados e construídos com pavimentos que possuem amplas áreas abertas e sem divisórias internas, permitindo às empresas que ocuparão o espaço determinarem o layout conforme suas necessidades. Nesse contexto, a previsão da área das divisórias já é complexa, tornando impraticável uma estimativa precisa da massa interna dos mobiliários.

Gupta, Jain e Rajasekar (2016) conduziram um estudo que teve como objetivo avaliar o impacto das cargas internas e do padrão operacional de um edifício no conforto térmico e no consumo em condicionamento, por meio de simulação computacional no *EnergyPlus*. Os autores selecionaram os materiais a serem analisados com base em um levantamento em uma edificação existente, e considerando aqueles comumente encontrados em mobiliário de escritório. Verificou-se que materiais como espuma, papel e madeira apresentaram os maiores impactos na demanda por condicionamento térmico. Ao comparar com os outros parâmetros analisados, alterar a massa térmica interna resultou na menor variação no consumo para condicionamento (0,4% no aquecimento e 0,5% no resfriamento). Vale ressaltar que os autores não analisam o conforto térmico, mas apenas mantém o termostato do HVAC ajustado com a temperatura de conforto adaptativo para cada mês.

Raftery et al. (2014) avaliaram o efeito da massa interna (mobiliário) no pico de carga para resfriamento em um modelo de zona térmica. Além disso, discutiram o impacto das simplificações nos métodos de modelagem em ferramentas de simulação de energia de edifícios inteiros, em particular no *EnergyPlus*. Os parâmetros de massa interna avaliados foram a quantidade, a área e o tipo de material utilizado. Observou-se que o aumento na massa térmica interna resultou em uma diminuição no pico de carga para resfriamento, variando de 0,67% a 5,54% entre todos os casos estudados.

É importante ressaltar ausência de orientação ou falta de clareza na definição de valores adequados ou razoáveis para a inclusão da massa interna irregular nas simulações (LI et al., 2016; RAFTERY et al., 2014). Além disso, um aspecto comum em todos os estudos mencionados anteriormente é que a inserção da massa térmica interna está centrada na capacidade térmica adicionada à zona e em sua influência

na estimativa da carga térmica para condicionamento. No entanto, os efeitos da massa térmica interna nas condições de conforto térmico não são abordados.

No *software EnergyPlus*, o objeto “*InternalMass*” é utilizado para especificar construções ou materiais que contribuem para os cálculos de transferência de calor, mas cuja geometria não é relevante na simulação térmica. Esses objetos incluem mobiliário e divisórias internas (DOE, 2022b). A massa interna participa do balanço térmico do ar da zona e das trocas radiantes de ondas longas, mas não participam nos ganhos solares, uma vez que sua localização espacial não é considerada (DOE, 2022a). O *EnergyPlus* realiza o cálculo do Fator de Forma considerando que todas as superfícies do ambiente veem o objeto de massa interna e, portanto, participa na estimativa das temperaturas superficiais e da temperatura radiante (DOE, 2022b).

Os objetos de massa interna têm condições de contorno adiabáticas, o que significa que não há diferença de temperatura através da superfície ou entre seus lados (DOE, 2022a). Além disso, o *software* considera apenas a área inserida (um lado da superfície) para as trocas térmicas. Caso seja necessário representar a troca de calor em ambos os lados da superfície com a zona, a área deve ser duplicada (DOE, 2022b).

É importante ressaltar que o uso do objeto “*InternalMass*” deve ser feito com cautela quando a distribuição solar for configurada como “*FullInteriorAndExterior*” ou “*FullInteriorAndExteriorWithReflections*”. Nessas configurações, os objetos de massa térmica interna não participam da distribuição solar. No entanto, outras configurações possíveis (*MinimalShadow*, *FullExterior*, *FullExteriorWithReflections*) simplificam a distribuição solar. Essas configurações admitem que toda a radiação solar direta que entra no ambiente incide sobre o piso, sendo parte absorvida de acordo com a absorvância solar do piso, enquanto a parcela refletida é adicionada à radiação difusa e uniformemente distribuída entre as demais superfícies (DOE, 2022b).

#### 2.4.2.3 Algoritmo de convecção nas superfícies internas

O desempenho térmico de uma edificação ou ambiente é determinado pelo balanço térmico resultante dos diferentes modos de transferência de calor, como radiação, convecção e condução. O balanço térmico do ar em uma zona com volume controlado é caracterizado pelo armazenamento de energia no volume da zona térmica. Esse armazenamento é resultado do somatório da transferência de calor por convecção (através as superfícies e de fontes de calor internas), infiltração e

ventilação, troca de ar com outras zonas e demanda do sistema de condicionamento de ar.

Peeters, Beausoleil-Morrison e Novoselac (2011) destacam a transferência de calor por convecção como um aspecto crítico na modelagem de transferência de calor em edifícios, pois envolve a mecânica de fluidos, apresentando correlações mais complexas. Além disso, Beausoleil-Morrison (2021) ressalta a importância de estabelecer coeficientes de convecção adequados ao modelar a convecção nas superfícies internas. Esses coeficientes variam de superfície para superfície e do regime de fluxo, podendo variar ao longo do tempo. Diversos autores enfatizaram a sensibilidade significativa do algoritmo de convecção das superfícies internas nos resultados da simulação de desempenho térmico (BATISTA, 2011; BATISTA; LAMBERTS; GÜTHS, 2011; BEAUSOLEIL-MORRISON, 2002; PEETERS; BEAUSOLEIL-MORRISON; NOVOSELAC, 2011).

Um estudo de Clarke (1991) citado por Peeters, Beausoleil-Morrison e Novoselac (2011) encontrou impacto significativo na previsão do conforto térmico em um edifício residencial com elevada área envidraçada no Reino Unido ao aplicar diferentes modelos de transferência de calor por convecção. A variação no PPD chegou a 42%.

Batista, Lamberts e Güths (2011) estudaram a influência dos algoritmos de condução e convecção disponíveis no *EnergyPlus* na simulação do comportamento térmico de uma residência naturalmente ventilada durante o verão em Florianópolis. Foram testados os algoritmos de convecção TARP, *Adaptive* e *Simple Natural*, além de diferentes combinações desses algoritmos, dependendo do tipo de superfície (parede, teto ou piso). O algoritmo *Simple Natural* apresentou o menor desvio em relação aos dados de temperatura das superfícies e do ar medidos *in loco*. Todas as combinações simuladas superestimaram a soma de graus-hora para resfriamento, com um desvio de até 78% no caso do TARP. A combinação do *Simple Natural* nas paredes com o *Adaptive* no piso e teto apresentou o menor desvio, embora ainda resultasse em 44% mais horas em desconforto do que as medições indicaram.

Posteriormente, a autora estimou os coeficientes de convecção forçada com base em medições *in loco* da velocidade do ar e comparou esses valores com os coeficientes calculados pelo *EnergyPlus* (BATISTA, 2011). Embora as temperaturas superficiais e do ar no modelo configurado com *Simple Natural* nas paredes e *Adaptive* no piso e teto tenham apresentado o menor desvio em relação aos dados de medição,

os algoritmos TARP e *Adaptive* obtiverem a melhor correlação com os coeficientes de convecção forçada estimados. Poucos estudos fazem essa comparação entre modelos de convecção no contexto de simulação de desempenho térmico no *EnergyPlus* e seu impacto nas condições de conforto térmico e na carga térmica requerida pelo sistema de condicionamento.

A transferência de calor por convecção nas superfícies desempenha um papel fundamental no balanço térmico do ar em uma zona térmica. As superfícies internas, como paredes, teto e piso, recebem calor por radiação, são aquecidas, parte desse calor é transferida por condução através dos elementos construtivos, enquanto outra parte é adicionada ao ar do ambiente por meio de convecção do ar. A equação (25) descreve o balanço térmico nas superfícies internas (BEAUSOLEIL-MORRISON, 2021).

$$q_{solar \rightarrow N} + q_{lw,s \rightarrow N} + q_{lw,source \rightarrow N} + q_{lw,HVAC \rightarrow N} = q_{conv,N \rightarrow z} + q_{cond,N \rightarrow m} \quad (25)$$

Sendo,  $q_{solar \rightarrow N}$  a taxa da radiação solar incidente absorvida pela superfície N [W];  $q_{lw,s \rightarrow N}$  a taxa de transferência de radiação de onda longa da superfície s para a superfície N [W];  $q_{lw,source \rightarrow N}$  a taxa de transferência de radiação de onda longa das fontes de calor (iluminação, equipamentos e ocupantes) para a superfície N [W];  $q_{lw,HVAC \rightarrow N}$  a taxa de transferência de radiação de onda longa dos componentes do sistema HVAC para a superfície N [W];  $q_{conv,N \rightarrow z}$  a transferência de calor por convecção da superfície N para a zona [W]; e  $q_{cond,N \rightarrow m}$  a transferência de calor por condução da superfície N através do material [W].

De acordo com o manual de engenharia do *software EnergyPlus* (DOE, 2022a), o fluxo de convecção em cada superfície pode ser expresso pela relação entre o coeficiente de convecção, a área da superfície e a diferença de temperatura entre o ar e a superfície. O coeficiente de convecção interna ( $h_c$ ) pode ser calculado de diferentes maneiras, dependendo principalmente do tipo de fluxo de ar: natural, forçado ou misto. A contribuição de todas as superfícies ( $q_{conv}$ ) é a soma de  $q_{conv,N \rightarrow z}$  para todas as superfícies do ambiente e pode ser expressa pela equação (26).

$$q_{conv} = \sum_{N=1}^{n_{surfaces}} h_{c,N} A_N (T_a - T_N) \quad (26)$$

Sendo,  $h_{c,N}$  o coeficiente de convecção na superfície N [ $W/m^2K$ ];  $A_N$  a área da superfície interna N;  $T_N$  a temperatura da superfície N; e  $T_a$  a temperatura do ar na zona térmica.

No *EnergyPlus*, é possível escolher entre cinco algoritmos para calcular o coeficiente de transferência de calor por convecção nas superfícies internas ( $h_{c,N}$ ) por meio do objeto "*SurfaceConvectionAlgorithm:Inside*" (DOE, 2022a). Esses algoritmos são os seguintes: *Simple Natural*, *TARP*, *Ceiling Diffuser*, *Adaptive* e *ASTMC340*.

- a) **TARP**: Trata-se de um modelo de convecção natural que correlaciona o coeficiente de transferência de calor por convecção com a orientação da superfície (inclinação) e a diferença entre as temperaturas do ar e da superfície. Este algoritmo utiliza as equações de Walton (1983), e é indicado apenas para superfícies planas (DOE, 2022b). É o algoritmo *default* no *EnergyPlus*.
- b) **Simple Natural Convection Algorithm** (SimN): Este algoritmo determina coeficientes constantes para cada superfície, definidos com base na sua inclinação, e também foram obtidos com base em Walton (1983) (DOE, 2022a).
- c) **Adaptive Convection Algorithm** (Adap): Trata-se de um modelo dinâmico em que o *software* seleciona automaticamente o coeficiente de convecção mais adequado para cada superfície, dentre uma série de equações disponíveis (DOE, 2022b). Esse algoritmo considera 45 categorias de superfícies e 29 possíveis equações para calcular o  $h_c$ , classificando as superfícies de acordo com o regime de fluxo e a orientação. Alguns aspectos são definidos apenas uma vez, no início da simulação, enquanto outros são atualizados a cada *timestep*. Essa metodologia dinâmica foi desenvolvida por Beausoleil-Morrison (BEAUSOLEIL-MORRISON, 2000, 2002) e continua sendo expandida no *EnergyPlus* conforme novas equações e pesquisas são realizadas (DOE, 2022a).
- d) **Ceiling Diffuser**: Nesse algoritmo, o coeficiente de convecção é calculado com base nas trocas de ar no ambiente (ACH), utilizando equações de Fisher e Pedersen (FISHER; PEDERSEN, 1997). A equação utilizada depende do tipo de superfície (teto, piso ou parede). No entanto, essas equações são aplicadas somente quando a taxa de troca de ar é igual ou superior a 3,0 por hora. Quando  $ACH \geq 0,5$ , as equações de convecção natural de TARP são automaticamente selecionadas. Para valores de  $0,5 < ACH < 3,0$ , o *software* realiza uma interpolação entre o valor calculado para convecção natural e o valor calculado pelas equações de Fisher e Pedersen (DOE, 2022a). Esse algoritmo é adequado para convecção forçada ou mista e deve ser

usado em ambientes com sistema de condicionamento de ar instalado, especialmente quando a saída de ar está localizada no teto (DOE, 2022b).

- e) **ASTMC1340**: Esse algoritmo se baseia na norma ASTM C1340 (ASTM, 2015) e é específico para simular fluxos de calor em áticos e sótãos. Ele “correlaciona os coeficientes de convecção mista com a diferença de temperatura superfície-ar, a direção do fluxo de calor, o ângulo de inclinação da superfície, o comprimento característico da superfície e a velocidade do ar além da superfície” (DOE, 2022b).

Esses algoritmos incluem equações para diferentes condições, dependendo da orientação da superfície, condições de fluxo de ar e direção do fluxo de calor. No caso do algoritmo *Adaptive*, também incluem modelos distintos para as mesmas situações, desenvolvidos por diferentes pesquisadores, permitindo uma escolha personalizada. No documento do *EnergyPlus*, é ressaltado que não é possível afirmar qual desses métodos é o melhor ou mais correto (DOE, 2022a).

## 2.5 MODELO DE ESCRITÓRIO REPRESENTATIVO

Ao realizar um estudo paramétrico para analisar o impacto das decisões de projeto e construtivas em edifícios por meio de simulação, a primeira etapa é definir o objeto de estudo. Por exemplo, delimitar o estudo para “edifício de escritórios em altura no Brasil”. No entanto, ainda há uma série de variáveis a serem determinadas.

Frequentemente, em tais estudos, são utilizados modelos hipotéticos simplificados, como modelos “*shoe-box*”, salas individuais de tamanhos variados ou plantas quadradas com um núcleo central. Muitas vezes, esses modelos são baseados em referências de estudos científicos realizados em outros países. Outra alternativa seria utilizar um edifício real e local. Entretanto, é necessário questionar o quão representativos esses modelos são da realidade a qual está sendo estudada.

Alguns estudos individuais buscam responder essa pergunta de forma local, no recorte de uma cidade ou região específica. Contudo, seria viável definir um modelo de edifício, com determinada função, representativo de todo o Brasil?

Como mencionado anteriormente, a proximidade com as janelas pode ter um impacto significativo no conforto térmico dos ocupantes. Além disso, à medida que

espaços de escritórios compartilhados ou com configuração de planta aberta se tornam mais comuns, a não uniformidade térmica do ambiente é acentuada. Nesse cenário, indivíduos posicionados em diferentes pontos no espaço podem experimentar sensação térmica divergentes.

Com base nesse contexto, realizou-se uma revisão de literatura que abrangeu estudos que levantaram informações sobre as características formais, construtivas, de sistemas e ocupação de edifícios de escritórios localizados no Brasil, com o objetivo de obter um modelo de referência ou estoque local.

Foram encontrados diversos estudos que realizaram levantamentos em edifícios de escritórios para desenvolver benchmarks de consumo de energia deste tipo de edificação. No entanto, esses estudos geralmente apresentam informações bastante resumidas sobre as características físicas (em geral apenas números de pavimentos, área construída e área útil por função). Mesmo as informações sobre sistemas tendem a ser limitadas ou não são fornecidas.

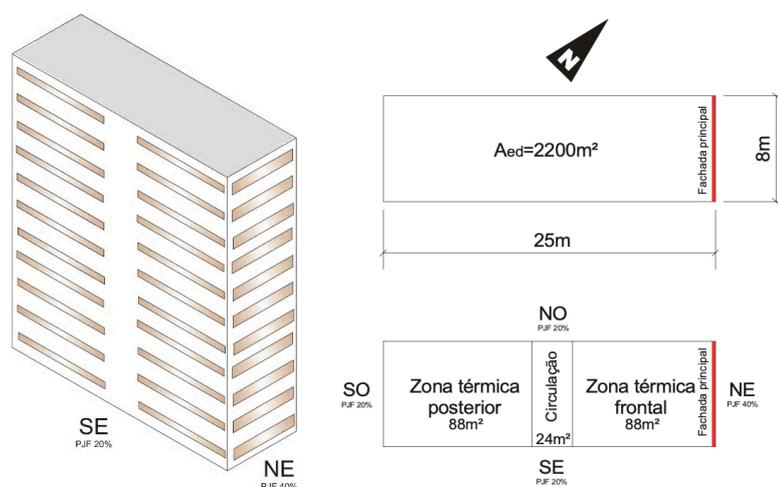
Dentro do recorte estabelecido, foram identificados oito estudos. O resumo desses estudos, incluindo a abrangência, a delimitação e as amostras utilizadas, está apresentado no Quadro 8.

Quadro 8 - Resumo dos estudos encontrados

Referência	Local / abrangência	Universo	Amostra
Santana (2006)	Florianópolis (SC)	Edifícios de escritório privados na cidade (>5 pavimentos): 35 edifícios	35 edifícios (algumas características, apenas 14)
Carlo (2008)	Florianópolis, Salvador, Recife, Belo Horizonte e São Paulo	Edificações comerciais nos centros das cidades que possuíssem apenas um tipo de atividade	1103, sendo 357 escritórios
Alves (2016) Alves et al. (2017)	Belo Horizonte (MG)	Edifícios em altura (>10pav.)	298 edifícios
Veloso (2017)	Belo Horizonte (MG)	Edificações de escritórios construídas até 2011. 1095 edificações de uso comercial e/ou serviços.	568 edificações (>3 pavimentos e área bruto superior a 1000 m <sup>2</sup> )
Costa, Oliveira e Amorim (2017)	Brasília (DF)	Edifícios de escritórios na zona central de Brasília	223 edifícios
Pereira (2017)	São Paulo (SP)	Edifícios de escritório com certificação LEED ou AQUA, construídos entre 2000 e 2016 = 43 edifícios	28 edifícios
Brugnera (2018) Brugnera et al. (2019)	São Paulo (SP)	Edifícios de planta livre nas regiões da Avenida Berrini, da Paulista e do bairro Pinheiros.	142 edifícios
Scheidt e Westphal (2023)	Florianópolis (SC)	Edifícios de escritório em Florianópolis.	197 edifícios

Santana (2006) teve como objetivo caracterizar um modelo de edifícios de escritório para simulação computacional que representasse a tipologia predominante na cidade de Florianópolis. Em um levantamento realizado junto à Secretaria de Urbanismo e Serviços Públicos (SUSP), foram identificados 35 edifícios privados de escritórios com pelo menos 5 pavimentos na cidade. Foram coletados dados sobre a “tipologia construtiva, localização, profissionais responsáveis, ano de início de ocupação, número de pavimentos, dimensões, áreas, orientações, área de janela por fachada, sistemas de aberturas e elementos de proteção solar”. No entanto, informações mais detalhadas, como tipos de vidros, paredes, coberturas e sistemas de abertura, foram obtidas para apenas 14 desses prédios. Com base nos resultados, a autora definiu uma tipologia predominante, contendo as características mais recorrentes identificadas no levantamento (Figura 21).

Figura 21 - Modelo de tipologia predominante para Florianópolis desenvolvido por Santana (2006).



Fonte: Santana (2006).

Com o objetivo de elaborar protótipos representativos para diferentes atividades de edifícios não residenciais, a serem utilizados em simulações de desempenho energético, Carlo (2008) realizou coleta de dados em cinco capitais brasileiras: Florianópolis, São Paulo, Salvador, Recife e Belo Horizonte. Realizou-se um levantamento fotográfico de 1103 edifícios, divididos em 10 atividades identificadas, incluindo escritórios grandes e pequenos, hotéis, pousadas, lojas grandes e pequenas, restaurantes, supermercados, hospitais ou clínicas médicas e escolas. Dessa amostra, 357 eram escritórios (pequenos ou grandes). Em seguida, foram realizados levantamentos in loco, porém, apenas em Florianópolis, para um

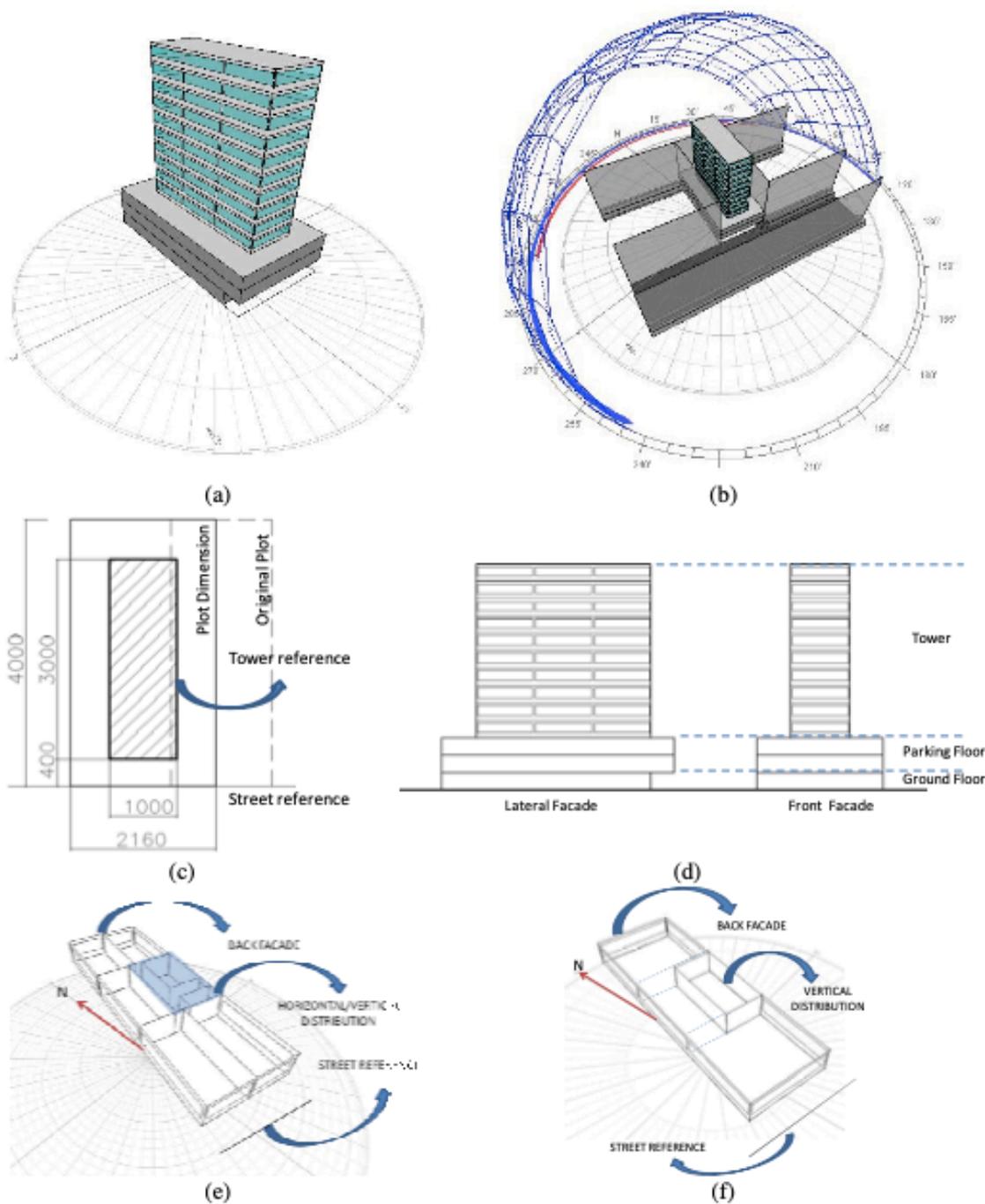
edifício de cada tipo identificado. Após os levantamentos, a autora constatou a necessidade de incluir uma terceira categoria de edifícios de escritórios: os escritórios verticais. O estudo resultou em três modelos distintos para edifícios com função de escritório. Apesar da amostra pequena e das limitações no método de obtenção dos modelos de referência, esse foi um dos primeiros estudos a tentar definir modelos representativos de escritórios abrangendo diferentes cidades brasileiras.

Alves et al. (2017) apresentaram um método para estimar um consumo de energia de referência para edifícios de escritório, utilizando a legislação local de uso do solo e edifícios de referência. Como estudo de caso, desenvolveram-se tipologias representativas de edifícios de escritório em altura (*high-rise office buildings*; > 10 pavimentos) em Belo Horizonte (MG). Os modelos foram estabelecidos com base em uma amostra de 298 edifícios. O levantamento foi realizado com base no plano diretor, na legislação de uso do solo, no código de obras da cidade e na base de dados da secretaria municipal adjunta de planejamento urbano e informações do Imposto sobre Propriedade Territorial Urbana (IPTU). A partir desse levantamento, foram identificados três arquétipos representativos mais uma variação, definidos de acordo com os sistemas e rotinas de operação, bem como as características físicas e de envoltória. Como exemplificação, a Figura 22 apresenta o arquétipo III, o qual é subdividido em A e B com base na configuração interna (salas ou planta livre).

Com o objetivo de desenvolver um benchmarking de consumo de energia elétrica de torres de escritórios, Veloso (2017) realizou um levantamento de dados de consumo de energia elétrica e das características de edifícios de escritórios também em Belo Horizonte (MG). Para isso, a autora também utilizou o banco de dados do IPTU, arquivos em formato \*.dwg fornecidos pela Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte (Prodabel) e imagens no *Google Maps/Street View*. O levantamento abrangeu todas as edificações existentes até 2011, com três pavimentos ou mais e área bruta superior a 1000 m<sup>2</sup>, totalizando 568 edificações. No entanto, a autora não realizou uma análise dos dados formais, construtivos e de operação dos edifícios. Os resultados obtidos foram apresentados diretamente relacionados à classificação energética dos edifícios, uma vez que o foco foi o benchmarking energético. Contudo, foram apresentadas algumas tendências relevantes para a definição de um modelo representativo, tais como a presença de elementos externos de sombreamento, a cor da fachada, o tipo de vidro e o sistema

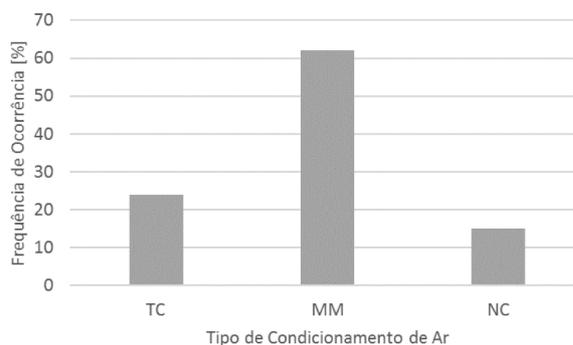
de condicionamento. Essas informações foram apresentadas por meio de gráficos de frequência de ocorrência, como exemplificado na Figura 23.

Figura 22 - Arquétipo III A e B desenvolvido por Alves (2016)



Legenda: (a) geometria, (b) contexto urbano, (c) planta de localização, (d) vistas frontal e lateral, (e) subdivisão do pavimento tipo III\_A e (f) do pavimento tipo III\_B. Fonte: Alves (2016).

Figura 23 - Frequência de ocorrência do modo de condicionamento de ar presente na amostra de edificações de Veloso (2017).



Legenda: TC – totalmente condicionado; MM – modo misto; NC – não condicionado.

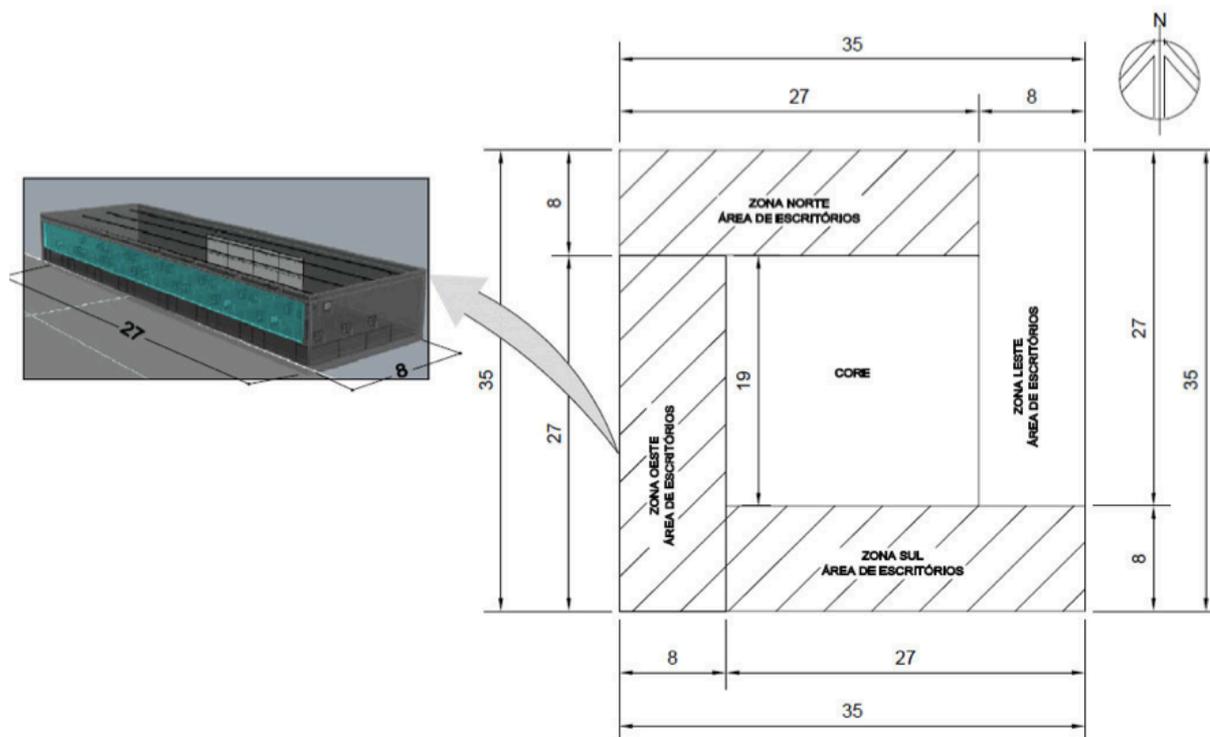
Fonte: Veloso (2017).

Costa, Oliveira e Amorim (2017) realizaram um levantamento das características morfológicas e do consumo de energia elétrica de edifícios de escritórios localizados na zona central de Brasília. Esse levantamento foi realizado com o intuito de atualizar o banco de dados criado por Lima (2011). A amostra do estudo consistiu em 223 edifícios localizados nos setores Norte e Sul. O estudo não resultou em um modelo de referência, mas apresentou as características predominantes locais. Verificou-se uma predominância de plantas retangulares (88% da amostra), sem preferência significativa quanto ao número de pavimentos. Além disso, foi constatada uma preferência por fachadas envidraçadas (42% das fachadas com WWR > 75%), utilizando vidros com FS inferior a 0,6 (80% da amostra), e uma baixa ocorrência do uso de elementos de sombreamento solar (30%).

Como parte de pesquisa sobre avaliação do desempenho luminoso em edifícios de escritório do tipo panorâmico na cidade de São Paulo, Pereira (2017) desenvolveu modelos de referência para a avaliação da iluminação natural com base em levantamento de edifícios existentes. A pesquisa abrangeu edifícios de escritórios com certificação LEED ou AQUA, construídos entre 2000 e 2016, na cidade de São Paulo, totalizando 43 edifícios. A amostra selecionada consistiu em 28 edificações (70% do universo), dos quais foram obtidos dados sobre o formato da planta, proteção solar (externa e interna), presença de um núcleo central, profundidade da planta (do escritório/zona), características dos vidros, WWR e altura do pé-direito. Observou-se uma predominância de plantas retangulares e quadradas, com núcleo central, sistemas construtivos de fachadas em pele de vidro, WWR em torno de 60%, FS de cerca de 36% e pé-direito de 2,80 m. Em relação à profundidade do ambiente, a

amostra foi dividida em três grupos: pequena (5 m a 9 m), média (10 m a 16 m) e grande (17 m a 22 m). Com base nos dados levantados, foram estabelecidos três modelos de referência da amostra, como exemplificado pelo Modelo 1 apresentado na Figura 24.

Figura 24 - Modelo 1 de Pereira (2017): Pavimento 35 m por 35 m e planta do escritório 27 m por 8 m de profundidade.



Fonte: Pereira (2017).

Em sua pesquisa sobre a análise integrada do desempenho energético, impacto ambiental e custo de soluções de fachada para edifícios de escritórios no Brasil, Brugnera (2018) coletou dados com foco em escritórios em planta livre a fim de estabelecer um modelo de estudo. A autora baseou-se em revisão de literatura, em entrevistas e na base de dados da *Buildings*. Foi realizado um recorte em regiões específicas da cidade de São Paulo (Avenida Berrini, Paulista e bairro Pinheiros), resultando em uma amostra de 142 edificações. Com base nesse levantamento, a autora definiu um modelo de edifício, conforme ilustrado na Figura 25.

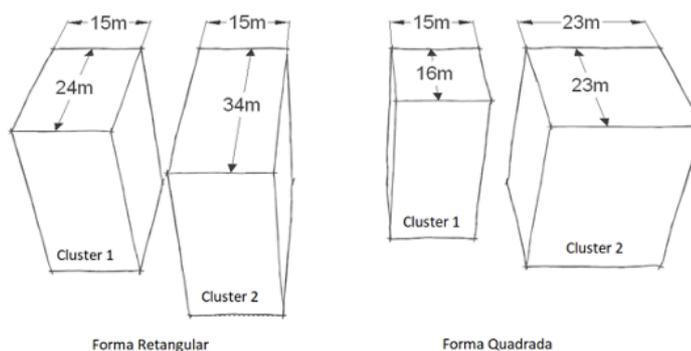
Figura 25 - Modelo definido por Brugnera (2018).



Fonte: Adaptado de Brugnera (2018).

No estudo realizado por Scheidt e Westphal (2023), o objetivo foi identificar edifícios de escritórios representativos do parque urbano de Florianópolis. Para isso, foram realizados levantamentos na base de dados da *Buildings*, visitas *in loco* e investigações no *Google Maps*, *Google Earth Pro* e *Google Street View*. Foram verificadas características relacionadas ao sistema de condicionamento de ar, formais e construtivas de uma amostra de 197 edifícios. Como resultado, foram apresentadas as características de um edifício de escritórios típico em Florianópolis em termos de forma e dimensão em planta, número de pavimentos, percentual de abertura da fachada e tipo de sistema de condicionamento de ar (Figura 26).

Figura 26 - Dimensões dos edifícios representativos em cada cluster, para as formas quadrada retangular de Scheidt e Westphal (2023).



Fonte: Scheidt e Westphal (2023) .

A Tabela 6 apresenta um resumo dos modelos representativos desenvolvidos ou das tendências identificadas nos estudos de referência. A tabela está dividida em cinco seções. A primeira seção contém informações gerais sobre o estudo e o levantamento, além de nomear as variações do modelo de referência desenvolvido. Em seguida, são apresentadas as características formais, construtivas, do sistema de condicionamento de ar, das cargas internas e da operação.

Tabela 6 - Resumo das características típicas encontradas nos estudos de referência

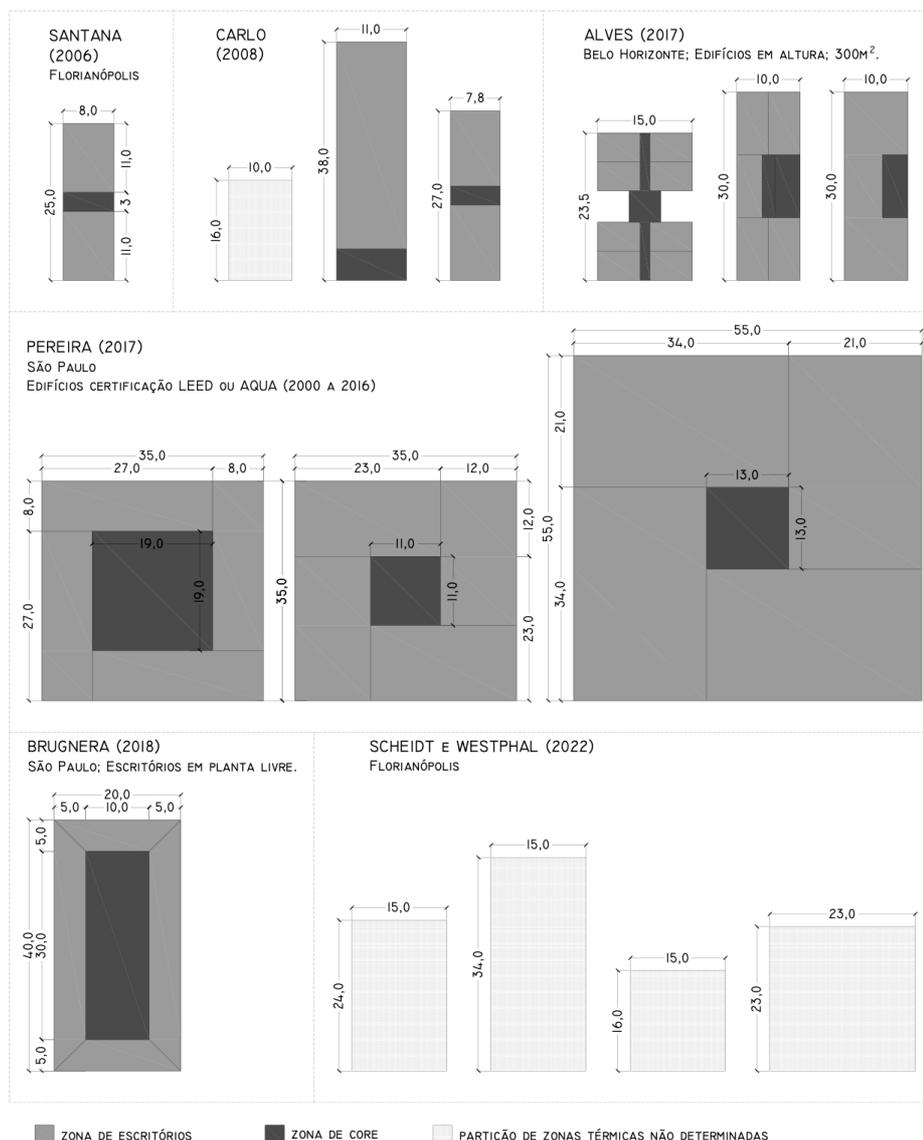
Referência	Alves (2017)				Veloso (2017)	Costa (2017)	Pereira (2017)			Brugnera (2018)	Scheidt e Westphal (2023)				Santana (2006)	Carlo (2008)			
Cidade da coleta de dados	Belo Horizonte (MG)				Belo Horizonte (MG)	Brasília (DF)	São Paulo (SP)			São Paulo (SP)	Florianópolis (SC)				Florianópolis (SC)	várias			
Universo	Edifícios em altura (>10pav.)				Edifícios de escritórios construídos até 2011. 1095 edificações.	Edifícios de escritórios na zona central de Brasília	Edifícios de escritório com certificação LEED ou AQUA, construídos entre 2000 e 2016 = 43 edifícios			Edifícios de planta livre nas regiões da Avenida Berrini, da Paulista e do bairro Pinheiros.	Edifícios de escritório em Florianópolis.				Edifícios de escritório na cidade.	Edificações não-residenciais nos centros das cidades que possuísem apenas um tipo de atividade em Florianópolis, Salvador, Recife, Belo Horizonte e São Paulo.			
Amostra	298 edifícios				568 edificações (>3 andares e área bruta superior à 1000 m²)	223 edifícios	28 edifícios			142 edifícios	197 edifícios				35 edifícios	1103, sendo 357 escritórios			
Variação do modelo de referência	Arquetipo I	Arquetipo II	Arquetipo IIIA	Arquetipo IIIB	-	*preferência	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Pavimento tipo	Retangular Pequeno	Retangular Grande	Quadrado Pequeno	Quadrado Grande	Tipologia predomin.	Grandes escritórios	Pequenos escritórios	Escritórios Verticais	
<b>Características formais</b>																			
Tipo de escritório	Salas	Salas	Salas	Planta livre	-	-	Planta livre (4 zonas + core)			Planta livre (4 zonas + core)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Formato pavimento tipo	Retangular (balcão de luz)	Retangular	Retangular	Retangular	-	Retangular (88%)	Quadrado	Quadrado	Quadrado	Retangular	Retangular	Retangular	Quadrado	Quadrado	Retangular (1:3)	Retangular	Retangular	Retangular	Retangular
Área pavimento tipo (m²)	300	300	300	300	-	-	1225	1225	3025	800	360	510	240	529	200	210.6	418	160	
Profundidade da zona (m)	-	-	-	-	-	-	8	12	21	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pé-direito (m)	-	-	-	-	-	-	2.8	2.8	2.8	2.7	-	-	-	-	2.7	2.6	2.6	2.6	
Nº de andares	15	15	13	13	-	1 a 4 (34%); 5 a 10 (24%); 11 a 16 (30%)	-	-	-	-	2 a 5 (19.3% amostra); 6 a 9 (37.6% amostra); 10 a 13 (38.6% amostra); >14 (4.5% amostra)				-	5	2	15	
WWR (frontal/fundos)	50%	50%	50%	50%	-	>75% (42%)	60%	60%	60%	50% a 80% (entrevistas)	em torno de 30%				40% / 20%	25%	15%	35%	
WWR (laterais)	0%	25%	50%	50%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20%	-	-	-	
Elementos de sombreamento externo	-	-	-	-	sim (17%); não (83%)	sem somb. (70%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>Características construtivas</b>																			
Parede ext. U [W/m².K]	U: 1.85 α: 0.4	U: 1.85 α: 0.4	U: 1.85 α: 0.5	U: 1.85 α: 0.5	amarelo (39%) cinzas (33%) marrons (24%)	-	Pele de vidro	Pele de vidro	Pele de vidro	U: 2.88 α: 0.3	-	-	-	-	U: 2.47 α: 0.65	U: 2.39 α: 0.35	U: 2.39 α: 0.35	U: 2.39 α: 0.5	
Paredes Int. U [W/m².K]	U: 2.39	U: 2.39	U: 2.39	U: 2.39	-	-	-	-	-	U: 1.6	-	-	-	-	-	-	-	-	
Piso	-	-	-	-	-	-	-	-	-	U: 1.19	-	-	-	-	-	-	-	-	
Forro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	U: 1.05	-	-	-	-	-	-	-	-	
Cobertura	U: 2.06 α: 0.4	U: 2.06 α: 0.4	U: 2.22 α: 0.5	U: 2.22 α: 0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	U: 2.42 α: 0.70	U: 1.17 α: 0.60	U: 2.04 α: 0.30	U: 1.17 α: 0.50	
Vidro	transparente 6mm FS 0.81	fumê 6mm FS 0.62	fumê 6mm FS 0.62	verde 6mm FS 0.56	Incolor (40%) Cinza (27%)	FS < 0.6 (80%) FS < 0.3 (20%)	FS 0.36	FS 0.36	FS 0.36	baixo FS (entrevistas)	-	-	-	-	fumê 6mm FS 0.83	Fumê FS 0.83	Fumê FS 0.83	Claro 3mm FS 0.87	

Tabela 6 - Resumo das características típicas encontradas nos estudos de referência (continuação)

Referência	Alves (2017)				Veloso (2017)	Costa (2017)	Pereira (2017)			Brugnera (2018)	Scheidt e Westphal (2023)	Santana (2006)	Carlo (2008)		
<b>Sistema de condicionamento de ar</b>															
Tipo	Expansão direta (janela)	Expansão direta (janela)	Expansão direta (janela)	Central	Totalmente condicionado (23%); misto (61%); não cond. (16%)	-	-	-	-	VRF - sistema unitário (entrevistas); Central (levant.)	Predominância: sistemas individuais (janela, split)	Expansão direta (janela)	<i>Auto size</i>		
Operação	Híbrido	Híbrido	Híbrido	6h às 20h	-	-	-	-	-	8h às 19h	- - - -	8h às 19h	-		
COP (W/W)	2.94	2.94	2.94	3.2	-	-	-	-	-	-	- - - -	2.8	-		
Heating setpoint (°C)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	- - - -	18	18		
Cooling setpoint (°C)	25	25	25	25	-	-	-	-	-	24	- - - -	24	24		
Área condicionada (m²)	área de escritório	área de escritório	área de escritório	área de escritório	-	-	864 (70%)	1081 (88%)	2584 (85%)	300 (63%)	- - - -	176	-		
Infiltração	3.8 L.s/pessoa	3.8 L.s/pessoa	3.8 L.s/pessoa	3.8 L.s/pessoa	-	-	-	-	-	-	- - - -	0.5 ACH	0.067m³/s		
<b>Cargas Internas e operação</b>															
Densidade de potência de iluminação (W/m²)	19.04	19.04	19.04	10.5	-	-	-	-	-	9.7	- - - -	6.4	6.7	36.7	6.7
Nível de iluminação requerido (lux)	500	500	500	500	-	-	-	-	-	-	- - - -	-	-		
Operação da iluminação	2500 h/ano	2500 h/ano	2500 h/ano	3200 h/ano	-	-	-	-	-	-	- - - -	-	8h à 22h	9h às 22h	8h às 18h
Densidade de carga de equipamentos (W/m²)	12	12	12	14	-	-	-	-	-	-	- - - -	9.7	9.6	17.3	9.6
Operação dos equipamentos	2500 h/ano	2500 h/ano	2500 h/ano	3750 h/ano	-	-	-	-	-	-	- - - -	-	8h às 19h	9h às 22h	8h às 18h
Ocupação (m²/pessoa)	7	7	7	7	-	-	-	-	-	8	- - - -	14,7	19.57	8.19	19.57
Período de ocupação	10h (8 às 18)	10h (8 às 18)	10h (8 às 18)	14h (6 às 20)	-	-	-	-	-	8h às 19h	- - - -	8h às 19h	8h à 12h; 14h às 18h	9h às 22h	8h à 12h; 14h às 18h

De modo geral, observa-se uma predominância de plantas retangulares e quadradas, com ambientes de planta livre ou subdivisão em salas. A área do pavimento tipo tende a ser maior na cidade de São Paulo (entre 800 e 3025 m<sup>2</sup>), possivelmente influenciada pelo recorte de pesquisa de Pereira (2017) e Brugnera (2018). O estudo de Pereira (2017) focou apenas em edifícios com certificação LEED ou AQUA e construídos após 2000, enquanto o estudo de Brugnera (2018) se concentrou em regiões específicas da cidade. Os demais modelos de referência apresentam uma área do pavimento tipo entre 200 e 530 m<sup>2</sup>. A Figura 27 resume as plantas dos pavimentos tipo dos modelos de escritório pesquisados.

Figura 27 - resumo das plantas de pavimento tipo de modelos de escritório desenvolvidos nos estudos de referência.



Fonte: Baseado em Santana (2006), Carlo (2008), Alves (2016), Pereira (2017), Brugnera (2018a) e Scheidt e Westphal (2023)

A profundidade das salas ou zonas térmicas foi abordada em apenas dois estudos. Brugnara (2018) definiu o valor de 5 m, em conformidade com os requisitos de modelagem para cálculo de desempenho de edificações da *ASHRAE Standard 90.1* (ASHRAE, 2007). O levantamento em edifícios existente de Pereira (2017) verificou três faixas de ocorrência diferentes, sendo a profundidade do ambiente entre 10 m e 16 m a mais frequente (64.7% da amostra).

O número de pavimentos tipo também variou significativamente, sendo entre 2 e 15 andares. Em todos os estudos, foi observada uma baixa ocorrência de edifícios de escritórios com mais de 17 pavimentos. Contudo, é importante frisar que algumas dessas pesquisas já limitaram o número mínimo de pavimentos na seleção da amostra. Por exemplo, Alves (2016) restringiu o levantamento a edifícios com 10 pavimentos ou mais.

Identificou-se uma tendência de aumento do percentual de abertura da fachada atualmente. Os estudos mais antigos (CARLO, 2008; SANTANA, 2006) descrevem uma WWR entre 15% e 40%. No entanto, os estudos mais recentes, publicados a partir de 2017, indicam maior ocorrência de WWR entre 50% e 80% (ALVES, 2016; BRUGNERA, 2014; COSTA; OLIVEIRA; AMORIM, 2017; PEREIRA, 2017), com exceção do levantamento realizado em Florianópolis por Scheidt e Westphal (2023). Essa diferença pode ser reflexo tanto de uma tendência local quanto da delimitação de pesquisa dos demais estudos, uma vez que esses autores consideraram todos os edifícios com função de escritório.

Os estudos verificaram a preferência crescente pelo uso de fachadas do tipo pele de vidro, especialmente a partir de 2010. Contudo, todos os estudos observaram uma tendência significativa de ausência de elementos de sombreamento externo. Veloso (2017) verificou que 83% dos 568 edifícios de escritórios analisados não possuíam nenhum tipo de sombreamento externo.

Os estudos mais antigos, Santana (2006) e Carlo (2008), apresentaram uma maior frequência no uso de vidros com alto FS ( $\approx 0,85$ ). Contudo, os estudos mais recentes identificaram uma tendência para o uso de vidros com FS mais baixo, predominando valores em torno de 0,60. Para os modelos representativos da amostra de edifícios certificados em São Paulo (PEREIRA, 2017), definiu-se um FS de 0,36. O uso de vidros insulados/duplos não foi abordado em nenhum dos estudos,

impossibilitando a conclusão se esse sistema não é utilizado ou se não pôde ser identificado nos levantamentos realizados.

Os estudos estabeleceram uma absorvância solar típica de paredes e coberturas entre 0,3 e 0,7, com predominância de 0,5, e a transmitância térmica das paredes externas entre 1,85 e 2,88 W/m<sup>2</sup>.K e da cobertura entre 1,17 e 2,42 W/m<sup>2</sup>.K. Poucos estudos analisaram ou definiram a transmitância térmica e absorvância de paredes internas. Alves (2016) definiu a transmitância térmica das paredes internas como 2,39 W/m<sup>2</sup>.K (parede de alvenaria com tijolo 8 furos), enquanto Brugnera (2018) utilizou 1,60 W/m<sup>2</sup>.K (gesso acartonado sem material isolante). No entanto, nenhum dos estudos utilizou dados coletados de edifícios existentes. Brugnera (2018) é o único estudo que apresenta dados de transmitância térmica para piso e teto, sendo ambos estabelecidos com base na coleta de dados.

Os sistemas de condicionamento de ar mais recorrentes foram os sistemas unitários, como sistema de expansão de janela, VRF e *Split*. Entretanto, em edifícios de planta livre há uma maior tendência ao uso de sistemas centrais. Alves (2016) e Veloso (2017) verificaram uma maior predisposição para sistemas de condicionamento misto/híbrido, alternando entre ventilação natural e condicionamento mecânico. Os *setpoints* de temperatura variaram entre 18°C e 20°C para aquecimento, e entre 24°C e 25°C para resfriamento. É importante destacar que a temperatura de aquecimento não foi definida em alguns estudos, como Alves (2016) e Santana (2006). O levantamento realizado por Alves (2016) em Belo Horizonte constatou que os edifícios da amostra não possuíam qualquer tipo de sistema de aquecimento do ar. Essa constatação reflete o clima local, classificado como subtropical úmido com invernos secos e verões quentes (classificação Köppen-Geiger Cwa), o qual não requer aquecimento durante todo o ano.

Identificou-se uma significativa variação nos horários de ocupação e operação dos sistemas entre os modelos representativos, tanto em relação ao número de horas em operação quanto aos horários de início e fim. Alves (2016) constatou diferença no funcionamento entre escritórios de planta livre e escritórios divididos em salas. Nos escritórios de planta livre, observou-se que a ocupação e operação dos sistemas tendem a iniciar duas horas mais cedo e a encerrar duas horas mais tarde. Além disso, as densidades de carga de equipamentos, iluminação e ocupação também demonstraram divergências entre os estudos.

## 2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO DE LITERATURA

Esta revisão de literatura buscou compreender os principais fatores que influenciam o conforto térmico das pessoas em espaços de trabalho com uma alta proporção de vidro na fachada. Inicialmente, foram analisadas as informações disponíveis na literatura que abordam os efeitos da transparência do vidro nos espaços de trabalho e no conforto dos ocupantes. Além disso, realizou-se uma investigação detalhada do estado da arte em relação aos modelos, métodos e métricas utilizados para avaliar o conforto térmico de ambientes internos. Também foi investigado o uso de simulações computacionais de desempenho na previsão das condições de conforto térmico em ambientes em fase de projeto ou em situações hipotéticas. Por fim, foram pesquisados modelos de escritórios que representassem a realidade brasileira e pudessem ser aplicados em pesquisas sobre o desempenho energético e térmico de sistemas construtivos no contexto do Brasil.

Os estudos destacam a relevância de pesquisas e ações para melhorar a qualidade do ambiente térmico em espaços de trabalho, visando assegurar o conforto, o bem-estar e o bom desempenho dos ocupantes. O conforto térmico de uma pessoa é fortemente impactado pela sua localização no ambiente e pelo tempo em que é exposta a determinadas condições climáticas. Ambientes com fachadas com amplos panos de vidro tendem a ser termicamente não uniformes, além de apresentar flutuações térmicas mais acentuadas ao longo do tempo. Destaca-se a importância de avaliar o conforto térmico de forma espacial e temporal. Contudo, as pesquisas que investigam a influência de parâmetros relacionados às áreas envidraçadas nos índices de conforto térmico em ambientes internos geralmente utilizam métodos simplificados de avaliação, considerando uma temperatura operativa homogênea em todo ambiente.

Foram investigados os fatores de maior influência no conforto térmico em ambientes de permanência e as principais causas de desconforto quando há presença de fachadas envidraçadas, com base em estudos anteriores. Destaca-se que ambientes com alto percentual de abertura da fachada (>50%) tendem a ser mais vulneráveis às condições climáticas externas. Nessas situações, problemas como superaquecimento e desconforto devido à radiação solar são relatados, mesmo em climas com invernos rigorosos. Apesar de ser frequentemente citado como uma das principais fontes de desconforto em ambientes com elevado WWR, o efeito da

radiação solar direta e difusa sobre o ocupante é negligenciado. A maioria dos estudos de avaliação preditiva não considera qualquer tipo de ajuste solar nos índices de conforto.

A avaliação do conforto térmico é mais complexa do que a avaliação do desempenho térmico e energético de um ambiente interno. Em edifícios com fachadas altamente transparentes, essa avaliação se torna ainda mais desafiadora devido à necessidade de utilizar um modelo de conforto térmico em conjunto com um modelo de ajuste solar. Além disso, é essencial avaliar espacialmente o ambiente e considerar sua variação ao longo do tempo, não sendo suficiente apenas considerar um valor médio para o ambiente.

As condições de conforto devem ser consideradas desde as fases iniciais do projeto e devem ser igualmente importantes na tomada de decisões, assim como o desempenho energético. Mesmo que o sistema de condicionamento de ar seja dimensionado corretamente, ainda há o risco de ocorrer desconforto térmico, especialmente relacionado às trocas radiantes. Nesse sentido, as ferramentas de simulação de desempenho de edifícios podem auxiliar no processo de concepção do projeto. Elas permitem avaliar a interação entre os diferentes fenômenos e sistemas presentes em um edifício, como as condições climáticas e a ação das pessoas. Isso é realizado por meio de modelos matemáticos interrelacionados. No entanto, essas ferramentas possuem algumas limitações, pois estão mais focadas no desempenho térmico e de sistemas. A previsão de consumo de energia para condicionamento geralmente é uma análise em escala macro, no nível do edifício. Por outro lado, a estimativa das condições de conforto térmico tem como foco o ocupante, escala micro, variando espacialmente de forma significativa.

O *EnergyPlus* é uma ferramenta acessível, amplamente validada e em constante atualização, que permite estimar a transferência de calor no edifício. Contudo, para uma estimativa adequada do conforto térmico, deve ser conduzido um pós-processamento extenso dos dados de saída das simulações. Isso é necessário para estimar as condições de conforto térmico de forma espacial e aplicar ajustes solares aos índices de conforto, uma vez que o *EnergyPlus* ainda não possibilita esses cálculos diretamente. Para facilitar esse processo, o conjunto de ferramentas *Ladybug Tools* pode ser utilizado. Essas ferramentas permitem a parametrização, análise do espacial do conforto térmico e ajuste solar, eliminando a necessidade de pós-processamento adicional. Além disso, essas ferramentas possibilitam a visualização

das condições térmicas por meio de mapas. Entretanto, é importante destacar que os cálculos de transferência de calor no *Ladybug Tools* são realizados usando o *EnergyPlus*. Outro aspecto a ser considerado é que a modelagem nas ferramentas BPS oferece extensas possibilidades na definição dos dados de entrada, o que implica em incertezas. Essas incertezas podem não ser as mesmas nas avaliações do consumo de energia e das condições de conforto térmico.

No âmbito dos estudos paramétricos sobre o desempenho de sistemas construtivos em edifícios de escritórios, é comum o uso de modelos genéricos de edificação ou ambiente. O desempenho térmico está intrinsecamente relacionado à interação entre a física da construção e o clima local, portanto, o modelo adotado deve refletir as características representativas da região. No entanto, foi identificada uma escassez de estudos que investigassem as características dos edifícios de escritórios no Brasil, visando estabelecer um modelo de referência ou estoque local. Essas pesquisas foram conduzidas apenas em alguns centros urbanos de maior porte, tornando inconclusiva a representatividade dessas amostras para o Brasil como um todo. Para obter uma compreensão abrangente, seriam necessários mais estudos semelhantes, cobrindo diferentes regiões do país. Contudo, esta revisão esclareceu várias preferências e características predominantes, as quais podem ser utilizadas para definir um modelo de escritório representativo a ser empregado em simulação de conforto e desempenho térmico, com base nas informações atualmente disponíveis.

### 3 DESENVOLVIMENTO DO *FRAMEWORK*

O processo de avaliação preditiva do conforto térmico por meio de simulação computacional pode ser dividido em três etapas principais antes da análise dos resultados, que são abordadas pelas seguintes questões:

- a) Qual é o objeto de estudo a ser avaliado?
- b) Quais índices e métricas serão utilizadas nessa análise?
- c) Quais ferramentas de simulação podem auxiliar na estimativa desses índices e como o objeto de estudo deve ser modelado?

Na primeira etapa, é necessário definir o objeto de estudo, que pode ser um ambiente real, existente ou em fase de projeto, ou um ambiente hipotético para pesquisas relacionadas ao desempenho de materiais, sistemas, ou outros parâmetros do edifício. São determinadas informações detalhadas sobre a geometria, materiais, ocupação e sistemas que serão inseridas no modelo computacional durante a fase de modelagem e simulação.

Em seguida, é estabelecido um conjunto de índices e métricas de conforto térmico para a avaliação preditiva das condições térmicas dadas as características e pontos críticos desse ambiente. Nesta fase, é necessário definir qual o modelo de conforto térmico mais adequado e quais métricas são permitir uma análise mais efetiva das condições térmicas desse espaço.

Uma vez conhecidos os índices a serem calculados, é possível escolher as ferramentas ou *softwares* mais adequados para estimá-los. O ambiente ou edifício é então modelado e as simulações térmicas são executadas para estimar as condições térmicas internas. Por fim, os índices são calculados e a avaliação do conforto térmico é realizada.

No entanto, a avaliação de conforto térmico em ambientes com alto percentual de vidro na fachada apresenta diversos fatores de incerteza, como mencionado na introdução e na revisão de literatura. A presente pesquisa desenvolveu, portanto, um *framework* para a avaliação de conforto térmico em escritórios climatizados e com ocupação próxima às janelas. Neste contexto, um *framework* consiste em uma estrutura de trabalho a qual guia o pesquisador ou profissional através de um conjunto de práticas de modelagem, simulação e avaliação de conforto térmico que podem ser adaptáveis a diferentes contextos.

O desenvolvimento do *framework* está dividido em três etapas, incorporando os questionamentos apresentados acima. Uma representação gráfica ilustrando as fases do desenvolvimento é apresentada na Figura 28. No capítulo seguinte o *framework* é apresentado, com base nos resultados obtidos nesse capítulo.

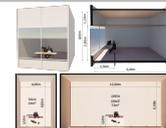
Figura 28 - Representação esquemática das fases da pesquisa

### 1 DEFINIÇÃO DO MODELO DE ESCRITÓRIO

Definir um modelo de escritório representativo da realidade brasileira para testar e avaliar métricas de conforto térmico e definições de modelagem no desenvolvimento do *framework*.

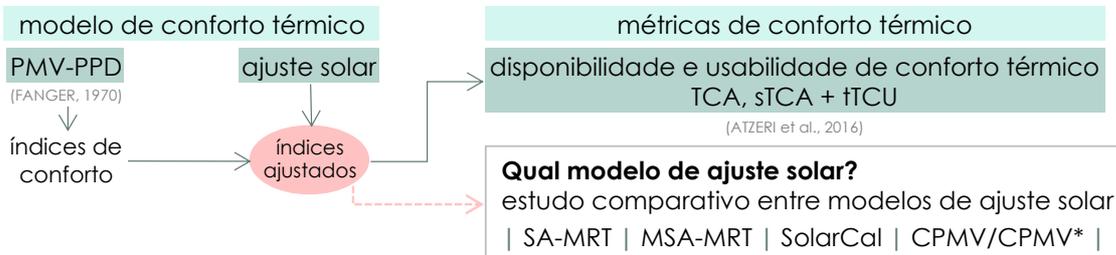
**Revisão de literatura:** identificar estudos com levantamento de características formais, construtivas, de sistemas e ocupação de edifícios de escritórios no Brasil, que buscassem obter um modelo de referência ou estoque local.

**Definição de modelo de escritório representativo:** um modelo de pavimento e salas típicas de edifício de escritório, adequado para estudos paramétricos sobre conforto térmico e que possam ser representativos do contexto brasileiro.



### 2 AVALIAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO: MODELOS E MÉTRICAS

Estabelecer um conjunto de modelos e métricas adequados para a avaliação preditiva do conforto térmico em ambientes com influência significativa de áreas de vidro – escritórios climatizados com estações de trabalho próximas às janelas –



### 3 AVALIAÇÃO PREDITIVA DE CONFORTO TÉRMICO: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Verificar o impacto de simplificações e definições de modelagem computacional pouco exploradas na estimativa das condições de conforto térmico

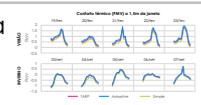
**Simulação de ambientes representativos:** avaliar se o uso de modelo de sala isolada (paredes adiabáticas) é adequado para a estimativa de conforto térmico por simulação computacional.



**Influência da massa interna na estimativa das condições térmicas:** avaliar a influência da massa interna na estimativa das condições térmicas de um ambiente.



**Algoritmo de convecção nas superfícies internas:** verificar se a escolha do algoritmo de convecção nas superfícies internas tem impacto na estimativa das condições térmicas por simulação computacional.



### 3.1 MODELO DE ESCRITÓRIO REPRESENTATIVO PARA SIMULAÇÃO DE CONFORTO E DESEMPENHO TÉRMICO

Nesta etapa, buscou-se estabelecer um modelo de pavimento e salas típicas de edifício de escritório, adequado para estudos paramétricos sobre conforto térmico e que possam ser representativos do contexto brasileiro. Foram realizadas duas etapas principais: uma revisão de literatura específica e a definição dos modelos representativos de pavimento e sala de escritório.

A revisão de literatura específica teve como objetivo identificar estudos com levantamento de características formais, construtivas, de sistemas e ocupação de edifícios de escritórios no Brasil, visando obter um modelo de referência ou estoque local. A busca foi conduzida nas plataformas de pesquisa científica Scopus e Google Scholar. Também foram selecionados artigos e teses referenciados nos estudos encontrados na busca. O resultado desta revisão foi documentado no item 2.5 do capítulo de revisão de literatura.

Com base na discussão da revisão de literatura específica, foi definido um modelo de escritório representativo levando em consideração os principais fatores que podem influenciar o conforto térmico de ocupantes, além do clima. Foram consideradas as características do sistema de condicionamento e os materiais da envoltória. Os fatores são os seguintes:

- a) dimensões da sala: a profundidade e comprimento da sala, especialmente a proximidade do usuário com as superfícies, influenciam a distribuição e as trocas radiantes entre as superfícies e o indivíduo;
- b) distância do ocupante perpendicularmente à janela: essa distância é mais influenciada pela localização da estação de trabalho do que propriamente pelas dimensões da sala em si. Entretanto, é importante notar que em escritórios de planta livre, a densidade de ocupação tende a ser maior, aumentando a probabilidade de estações de trabalho muito próximas às janelas;
- c) orientação solar: tem impacto na influência do clima externo no ambiente interno, especialmente em relação à geometria e intensidade solar;

- d) percentual de abertura da fachada (WWR): influencia na transferência de calor através da envoltória do edifício e na admissão e distribuição da radiação solar no ambiente interno;
- e) propriedade de transmissão térmica do vidro (transmitância térmica, transmissão de energia solar, absorvância e refletância): influenciam na admissão de radiação solar e nas trocas térmicas por radiação de ondas curtas e longas com o ocupante.

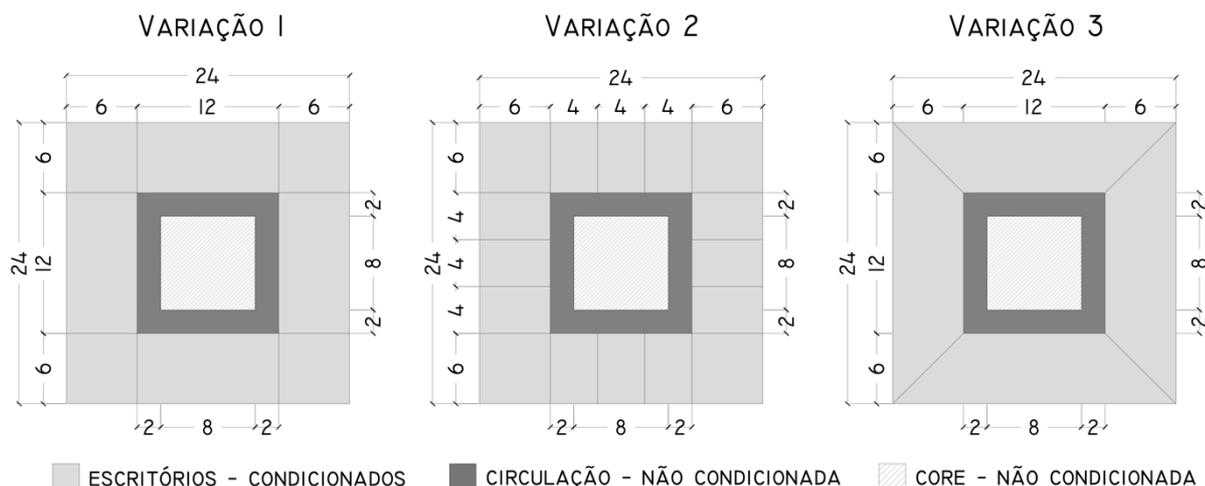
Dentre os estudos encontrados, destacam-se os levantamentos, análises e definições de modelos de referência desenvolvidos por Alves et al. (2017) e Pereira (2017). Alves et al. (2017) obtiveram acesso a bancos de dados junto a órgãos da prefeitura, permitindo uma amostra significativa. Pereira (2017), por sua vez, obteve informações relevantes ao definir um recorte bastante específico de edifícios com certificação LEED ou AQUA, que usualmente têm suas características melhor documentadas. A dificuldade de acesso ou a inexistência de bancos de dados completos é apontada como uma das maiores limitações para realizar um levantamento mais exaustivo dentro dos universos delimitados.

Os estudos encontrados abrangeram principalmente quatro cidades brasileiras: Belo Horizonte, Brasília, São Paulo e Florianópolis. Além disso, cada estudo apresenta um recorte diferente, não sendo possível afirmar qual modelo é mais representativo da realidade geral de edifícios de escritório no Brasil.

Considerando todos os fatores abordados, entende-se que o modelo mais adequado para este estudo teórico é o Arquétipo III desenvolvido por Alves et al. (2017), o qual converge com a maioria dos demais estudos, principalmente com o mais recente, de Scheidt e Westphal (2023).

Entretanto, tendo em vista estudos teóricos, um pavimento com formato de planta quadrada é mais adequado na análise da influência da orientação solar no conforto térmico. Portanto, o modelo de pavimento terá dimensões de 24 m por 24 m, uma área de *core* central de 64 m<sup>2</sup> e um corredor de 2 m de largura ao redor desse núcleo. Esse pavimento pode ter diferentes configurações de divisão das zonas térmicas, dependendo do objetivo do estudo, conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 - Planta e zoneamento do modelo de pavimento de escritório proposto para estudos futuros em três variações de divisão interna



As dimensões totais são compatíveis com os estudos de Alves et al. (2017) e Scheidt e Westphal (2023), e também se aproximam dos modelos de referência propostos por Carlo (2008) e Santana (2006), considerando a medida da maior fachada. A profundidade do escritório foi definida com base no estudo de Pereira (2017), único estudo que levantou esse dado. Optou-se pela menor profundidade, uma vez que o foco está no desempenho da fachada e em sua influência no conforto térmico do ocupante. A distribuição das zonas permitirá analisar o impacto de ambientes com uma ou duas fachadas externas.

Nesta configuração de pavimento, foram definidas duas dimensões de sala ocupando a área central de cada fachada, conforme ilustrado na Figura 30. A primeira sala foi projetada como um espaço de trabalho para duas pessoas e será identificado como “Sala”, com 4 m de fachada e 6 m de profundidade. A segunda configura um espaço de trabalho coletivo para 6 a 7 pessoas e será identificada como “Open Space”, com 12 m de fachada e a mesma profundidade da Sala. O ambiente foi configurado com uma área de *plenum*, que é um espaço entre a laje e o forro utilizado como retorno do ar condicionado. Definiu-se que o piso do pavimento está localizado a uma altura de 30 m, equivalente a um sétimo andar.

Os estudos levantados na revisão do modelo típico de escritório apresentaram grande variação e algumas características podem corresponder a prédios antigos. Devido às tecnologias atuais, a densidade de carga interna é significativamente menor do que há 10-20 anos. Além disso, optou-se por utilizar regulamentos internacionais para a definição das cargas internas, em vez das normas nacionais, pois são mais

atualizadas e os sistemas de iluminação e equipamentos se tornaram mais eficientes nos últimos 15 anos. Algumas destas tendências incluem o uso de lâmpadas LED e *laptops* em vez de computadores de mesa, ambos gerando significativamente menos calor do que os modelos antigos.

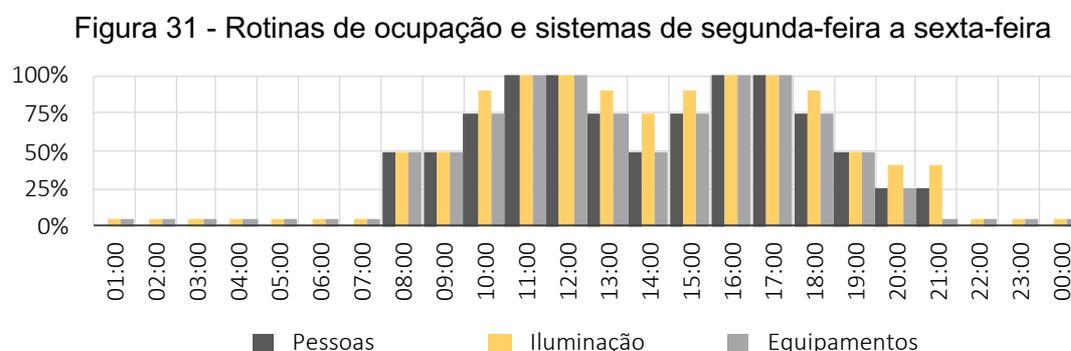
Figura 30 - Planta e corte dos modelos de sala de escritório: sala e *open space*



Considerou-se, portanto, uma densidade de ocupação de  $11,6 \text{ m}^2$  por pessoa, uma densidade de equipamento de  $7,44 \text{ W/m}^2$  (que corresponde ao uso individual de um notebook e uma segunda tela) e uma densidade de potência de iluminação  $10,6 \text{ W/m}^2$ , com base no capítulo 18 do *ASHRAE Fundamentals Handbook* (ASHRAE, 2017a). Estabeleceu-se uma taxa metabólica de  $126 \text{ W/pessoa}$ , equivalente a atividade sedentária de escritório conforme descrito no capítulo 9 do mesmo documento. Para definir o isolamento de vestimenta das pessoas, optou-se pelo método dinâmico da *ASHRAE Standard 55* (ASHRAE, 2020), que determina o

isolamento da roupa do ocupante representativo em função da temperatura do ar externo às 6 horas da manhã. Os valores resultantes são calculados automaticamente pelo *software EnergyPlus*, com base no arquivo climático.

As rotinas de uso dos sistemas da edificação foram estabelecidas de acordo com a Figura 31. A ocupação e a utilização dos sistemas são reduzidas no período entre 12 e 15 horas para horário de almoço. Durante o fim de semana, não há ocupação. Determinou-se que 5% da iluminação e dos equipamentos permanecem em funcionamento durante os períodos sem ocupação. O acionamento da iluminação artificial foi configurado de forma estática, sem levar em consideração a disponibilidade de iluminação natural.



Os estudos de referência indicaram uma preferência pelo uso de sistemas de condicionamento térmico unitários. Portanto, os ambientes foram configurados com um sistema de condicionamento de expansão direta do tipo PTHP (*Packaged Terminal Heat Pump*), que é equivalente ao uso de aparelho *Split*, conforme especificações apresentadas na Tabela 7. As temperaturas de aquecimento e resfriamento foram definidas de acordo com a norma ASHRAE 90.1 (2007). O sistema opera das 7h às 21h e a capacidade foi dimensionada com base em dados de simulação. Optou-se pelo auto dimensionamento do *EnergyPlus*, pois não foram encontradas informações mais específicas na amostra quanto à capacidade e dimensionamento dos sistemas. Nos fins de semana, a edificação é desocupada e, portanto, o sistema de condicionamento é desativado.

Tabela 7 - Sistema de condicionamento de ar

Sistema	COP	Termostato	Capacidade	Renovação de ar	Taxa de infiltração
PTHP	3,0	Aquecimento: 21 °C Resfriamento: 24 °C	Auto dimensionamento do <i>EnergyPlus</i>	0,0075 m³/s por pessoa	0,3 trocas de ar por hora

Edifícios com fachadas em pele de vidro geralmente possuem janelas seladas. Portanto, as salas são ventiladas mecanicamente durante todo o período de ocupação, sem uso da ventilação natural.

As propriedades térmicas dos fechamentos opacos estão apresentadas na Tabela 8. Nenhum tipo de sombreamento interno ou externo foi utilizado, a fim de maximizar a influência da radiação. Diferentes dimensões de janelas e tipos de vidros foram testadas, variando os elementos transparentes, que serão descritos em cada etapa da pesquisa.

Tabela 8 - Propriedades térmicas dos elementos opacos

<b>Elemento</b>	<b>Composição</b>	<b>U [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>Absortância</b>
Paredes Externas	Placa Cimentícia (10 mm) + Lã de Vidro (50 mm) + Placa de gesso (12,5 mm)	0,77	0,297
Paredes Internas	Placa de Gesso (15 mm) + Lã de Vidro (50 mm) + Placa de Gesso (15 mm)	0,69	0,297
Forro	Placa de gesso (15 mm)	1,40	0,297
Laje/Piso	Piso Cerâmico (7.5 mm) + Reboco (25 mm) + Laje Concreto (200 mm) + Reboco (25 mm)	2,74	Piso: 0,418 Teto: 0,297

### 3.2 AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO EM AMBIENTES COM INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR: MODELOS E MÉTRICAS

A escolha adequada dos métodos de avaliação das condições de conforto é fundamental ao avaliar um ambiente ou edifício. A presente pesquisa concentra-se na avaliação preditiva das condições de conforto térmico em ambientes internos e do desempenho de fachadas, mais especificamente de vidros, por meio de simulação computacional termodinâmica. Essa avaliação é focada nas fases iniciais de projeto ou em estudos paramétricos de desempenho de materiais e sistemas. Neste contexto e com base na revisão de literatura realizada, conclui-se que o modelo de conforto térmico PMV-PPD (FANGER, 1970) continua sendo a melhor opção para ambientes condicionados, considerando as variáveis envolvidas. Embora os modelos Multissegmento proporcionem avaliações mais detalhadas, eles são mais adequados para avaliações pontuais e não para a parametrização de múltiplos fatores e níveis, ou para a avaliação geral do ambiente e do desempenho de edifícios.

Um ambiente deve proporcionar condições de conforto térmico aceitáveis em todo o espaço interno durante a maior parte do tempo de ocupação. Portanto, as métricas utilizadas devem caracterizar as condições térmicas no ambiente tanto espacialmente como em função do tempo.

Dentre as métricas abordadas na seção 2.3.7, destacam-se aquelas desenvolvidas por Atzeri et al. (2016), as quais proporcionam uma compreensão abrangente das condições de conforto, relacionando espacialidade com variabilidade temporal. Essas métricas são adaptáveis ao modelo de conforto térmico e aos limites definidos pelo pesquisador. Sugerem-se, portanto, o uso das seguintes métricas:

- a) TCA: essa métrica permite plotar os pontos e visualizar espacialmente a disponibilidade de conforto no período de ocupação ao longo de um ano ou do período de interesse;
- b) sTCA: essa métrica é adequada para realizar comparações gerais entre diferentes modelos de escritórios com projetos de fachada distintos;
- c) tTCU: essa métrica permite avaliar tanto a espacialidade quanto a variabilidade temporal das condições de conforto, utilizando um único índice por ambiente.

Conforme discutido no item 2.3.3, há um consenso entre as normas internacionais em relação aos limites de conforto térmico e percentual de insatisfeitos ao utilizar o modelo de conforto térmico PMV-PPD em ambientes com níveis normais de expectativa térmica. A norma brasileira ainda considera um PPD máximo de 20%, entretanto é uma norma antiga que está em processo de revisão.

Para aplicar essas métricas, também é necessário definir:

- a) qual é a fração mínima de tempo em que um indivíduo deve estar em uma situação de conforto térmico em um determinado ponto no espaço?
- b) qual é a fração mínima do espaço que deve apresentar condições de conforto para considerar que o ambiente oferece disponibilidade de conforto térmico em um dado momento?

Atualmente, ainda não há regulamentações ou consensos estabelecidos para esses valores. Na aplicação das métricas, Atzeri et al. (2016) estabeleceram que o ambiente deve apresentar condições de conforto térmico em pelo menos 90% do tempo de ocupação e em uma fração mínima de 90% do espaço. Zomorodian e Tahsildoost (2017) consideraram que 80% do tempo de ocupação e 80% do espaço em conforto já poderiam ser considerados suficientes.

Em uma janela de 15 horas com alguma ocupação do ambiente, um TCA mínimo de 80% representa possibilidade de 3 horas de desconforto no dia. Considerando uma sala de escritório com 5m de fachada e 10m de profundidade, uma fração mínima de TCU de 80% representa uma faixa de 2m da fachada que poder estar constantemente sujeita a desconforto. Levando em consideração que esta pesquisa está sendo realizada com o intuito de melhorar as condições ambientais e o conforto de ocupantes de escritórios com fachadas envidraçadas, entende-se que adotar os limites utilizados por Zomorodian e Tahsildoost (2017) seria incoerente com essa proposta. Portanto, foram utilizados os limites mais rigorosos, propostos por Atzeri et al. (2016).

A Tabela 9 apresenta um resumo dos limites de conforto térmico adotados nesta pesquisa e sugeridos para futuras avaliações de conforto térmico em condições semelhantes.

Tabela 9 - Limites de conforto térmico

Limites PMV	Limite PPD	% mínimo do espaço em condições de conforto	% mínimo de tempo em condições de conforto
$-0,5 < PMV < +0,5$	$< 10\%$	90%	90% (ocupado)

Considerando as métricas TCA, sTCA e tTCU aplicadas ao índice PMV e de acordo com os limites acima estabelecidos,  $TCA_{i_{\pm 0,5}}$  representa o percentual do tempo com ocupação em que o PMV está entre -0,5 e +0,5 no ponto i. A métrica  $sTCA_{\pm 0,5|90}$  indica a fração do espaço em que obtém TCA mínimo de 90%. Já a métrica  $tTCU_{\pm 0,5|90}$  representa a fração do tempo em que pelo menos 90% do espaço apresenta PMV entre -0,5 e +0,5.

Além disso, a revisão de literatura revelou a necessidade de corrigir os modelos tradicionais de conforto térmico para considerar os efeitos da radiação solar direta e difusa na percepção térmica dos ocupantes. Isso é particularmente importante ao avaliar ambientes internos com grandes áreas envidraçadas. Vários modelos de ajuste solar foram desenvolvidos nos últimos anos, porém apresentam diferenças em seus procedimentos de cálculo, as quais não foram amplamente investigadas.

Realizou-se um estudo com o objetivo verificar divergências nos resultados de conforto térmico entre os modelos de ajuste solar, considerando uma pessoa sentada próximo à fachada envidraçada em um escritório. Compararam-se quatro modelos de ajuste solar entre os abordados na seção 2.3.6: (1) *Mean Radiant Temperature Solar-Adjust* (SA-MRT), (2) *Mean Radiant Temperature Solar-Adjust Modified* (MSA-MRT), (3) *SolarCal*, e (4) *Corrected Predicted Mean Vote* (CPMV) e sua versão corrigida, o CPMV\*. Os três primeiros foram selecionados com base na amostra de estudos anteriores que investigaram o conforto térmico em ambientes com áreas envidraçadas por meio de simulação termodinâmica (seção 2.2- Quadro 1 e Figura 8).

Dados ambientais<sup>1</sup> foram obtidos por meio de simulação no *software EnergyPlus* para o clima temperado e úmido de Florianópolis, utilizando o arquivo climático “BRA\_Florianopolis.838990\_SWERA.epw” (DOE, 2017). Os modelos foram utilizados para calcular os índices de conforto térmico MRT, PMV e PPD, variando-se o tipo de vidro. Além disso, foram analisadas as correções na assimetria na temperatura radiante. O estudo completo, com detalhes dos procedimentos

---

<sup>1</sup> Do ambiente externo (radiação solar global horizontal, radiação solar direta na direção normal ao feixe, radiação solar difusa, ângulo azimute solar, ângulo da altitude solar, radiação solar que incide na superfície externa da janela) e do ambiente interno (temperatura média do ar, umidade relativa do ar, temperatura das superfícies internas, transmitância, refletância e absorvância solar do sistema de janela, radiação solar transmitida através da janela e taxa de ganho de radiação solar no piso).

metodológicos, resultados e discussões, está disponível no Apêndice C. A seguir, é apresentado um resumo dos resultados e discussões.

Foram observadas diferenças significativas nos resultados obtidos para um mesmo espaço. Por exemplo, a diferença horária máxima no PMV entre os modelos de ajuste solar foi de 1,7, e a MRT foi até 17,6 °C maior em relação ao valor médio calculado pelo *EnergyPlus*.

Os modelos CMPV/CPMV\* apresentaram estimativas de PMV significativamente mais altas em comparação aos demais modelos, sugerindo uma superestimação do impacto da radiação solar no conforto dos ocupantes em climas temperados, como em Florianópolis. Essa diferença pode ser atribuída, além do clima, à forma como o modelo considera os componentes de radiação solar direta e difusa em seu cálculo. Em vez de ajustar o componente de perda de calor sensível à radiação na equação do PMV, os autores acrescentaram dois componentes adicionais aos seis parâmetros ambientais e pessoais, sem ponderá-los. Isso aumenta a influência da transferência de calor radiante no balanço de calor do corpo.

O modelo MSA-MRT apresentou resultados semelhantes ao SA-MRT para PMV e MRT, mesmo considerando as reflexões da radiação de ondas curtas nas superfícies internas opacas. A influência reduzida das reflexões no chão pode estar associada à baixa altitude solar na fachada Oeste. Ainda assim, esperava-se que o MSA-MRT estimasse valores mais altos de MRT. Isso pode ser atribuído ao procedimento de cálculo das frações de radiação solar direta e difusa no SA-MRT, que depende de dados climáticos e geometria solar, resultando em incertezas consideráveis nos coeficientes envolvidos. O MSA-MRT não possui um procedimento específico para calcular a intensidade de radiação e, portanto, foram utilizados dados de saída do *EnergyPlus* referentes à radiação solar transmitida através da janela. Isso resultou em estimativas de maior admissão de radiação solar com o SA-MRT. Além disso, o MSA-MRT não considera coeficientes de sombreamento ou exposição corporal.

Os modelos SA-MRT e *SolarCal* apresentaram resultados aparentemente mais coerentes, com os valores ajustados pelo *SolarCal* sendo menores. Ambos aplicam coeficientes que determinam se a radiação solar que entra pela janela atinge o ocupante em um determinado ponto da sala, diferentemente dos modelos MSA-MRT e CMPV/CPMV\*.

O modelo SA-MRT é mais detalhado em termos de geometria solar e espacial, oferecendo uma vantagem significativa em relação aos outros modelos, pois determina com precisão se a radiação solar atinge o ocupante de um determinado local e momento. Entretanto, o procedimento de cálculo da radiação solar que entra pela janela pode conter imprecisões relevantes.

Por outro lado, o modelo *SolarCal* também possui um coeficiente para determinar se o feixe de radiação solar atinge o ocupante, mas que pode ser estimado de maneira simplificada, não havendo um procedimento de cálculo específico para isso. Em geral, o *SolarCal* é mais simples de ser implementado e produz resultados semelhantes ao SA-MRT.

Embora os resultados não tenham sido confrontados com dados de medição ou percepção térmica de pessoas em um ambiente real, realizou-se uma análise numérica das limitações e vantagens de cada modelo de ajuste solar. Essa análise contribui para ampliar as discussões sobre a necessidade de ajuste solar e as consequências da escolha entre os modelos no contexto de um clima temperado na América do Sul.

### 3.3 AVALIAÇÃO PREDITIVA DE CONFORTO TÉRMICO POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação de desempenho de edifícios (BPS) consiste em uma representação matemática dos fenômenos físicos complexos e multifatoriais que envolvem uma edificação. Essas ferramentas permitem avaliar a interação entre os diferentes sistemas e fenômenos, incluindo as condições climáticas e a ação das pessoas, por meio de modelos matemáticos interrelacionados. No contexto do desempenho térmico, as BPS possibilitam estimar as condições térmicas dos ambientes e o consumo de energia do edifício, por exemplo. Todavia, tal complexidade exige que o usuário destas ferramentas possua conhecimento dos fenômenos físicos e dos sistemas envolvidos.

A previsão de consumo de energia para condicionamento térmico normalmente é uma análise em escala macro, no âmbito do edifício. Por outro lado, a estimativa das condições de conforto térmico tem como foco o ocupante, em uma escala micro, variando espacialmente de maneira relevante. As BPS oferecem diversas possibilidades na definição dos dados de entrada, o que gera incertezas que podem não ser as mesmas para a estimativa do consumo de energia ou para as condições de conforto térmico.

O *Ladybug Tools* simplifica o processo de parametrização e análise do conforto térmico de forma espacial, por meio de um *software* que dispensa o pós-processamento dos dados de saída das simulações e permite visualização em mapas. Desse modo, optou-se por desenvolver o *framework* com base nesta interface. No entanto, os cálculos de transferência de calor são realizados pelo *EnergyPlus*. Além disso, para facilitar o processo de modelagem, os componentes do *Ladybug* utilizam várias configurações *default* que exigem um conhecimento mais detalhado do *EnergyPlus* e dos processos de transferência de calor em edificações. Portanto, entende-se que é necessário explorar inicialmente as incertezas da simulação no *software* que calcula o comportamento térmico do ambiente modelado.

Essa seção aborda o impacto de simplificações e definições de modelagem computacional ainda pouco exploradas na estimativa das condições de conforto térmico em ambientes de escritório por meio do *software EnergyPlus*. Além disso, é feito um paralelo entre as implicações dessas configurações nas estimativas de conforto térmico e no desempenho termoenergético.

Três desses pontos críticos são abordados em estudos distintos. Analisa-se o impacto das condições de contorno adiabáticas nas paredes internas, a adição de massa interna nas zonas térmicas e a escolha do algoritmo de convecção nas superfícies internas sobre as condições térmicas em ambientes de escritório em um clima temperado úmido.

### 3.3.1 Simulação de Ambientes Representativos

Na revisão de literatura, observou-se que estudos paramétricos de desempenho de edifícios frequentemente utilizam condições de contorno adiabáticas nas paredes internas. Entretanto, não foram encontrados estudos que investigassem o impacto dessa configuração na previsão das condições térmicas do ambiente, especialmente em relação ao conforto térmico, utilizando o *software EnergyPlus*.

Diante da importância de avaliar a disponibilidade de conforto térmico de forma local, em contraste com o consumo energético, surge a questão: quando o foco da simulação está na escala da sala ou zona térmica, é necessário modelar todo o pavimento? Considerando o objetivo principal de estimar as condições de conforto térmico, essa indagação se torna relevante.

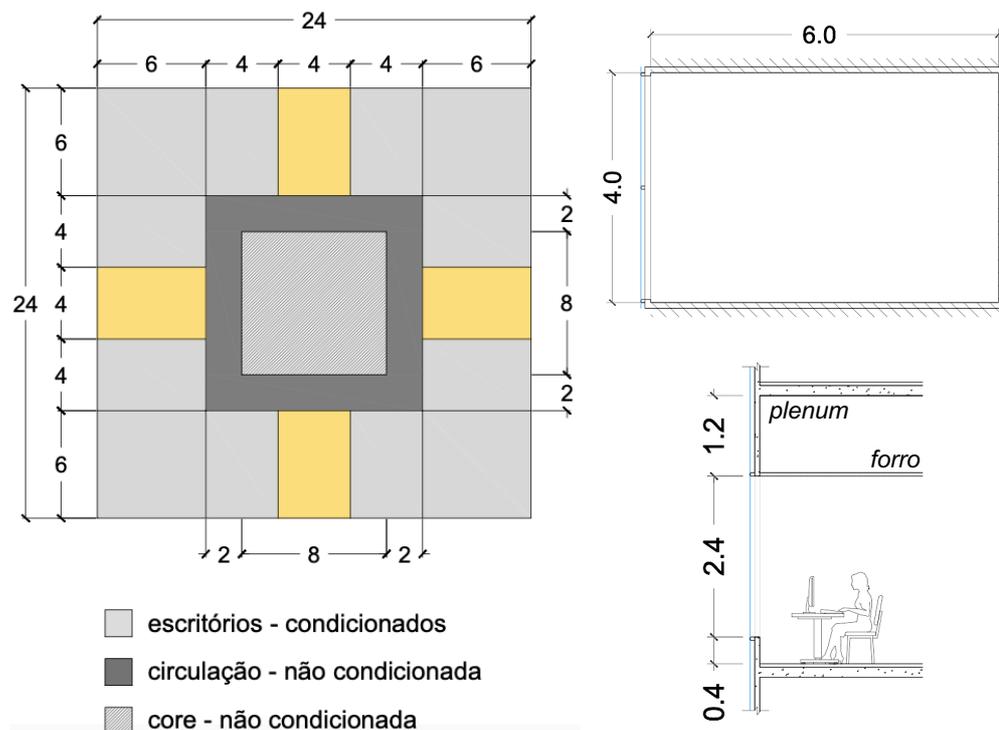
O objetivo desta etapa da pesquisa é avaliar a adequação do uso de um modelo de sala adiabática para o estudo paramétrico do desempenho de elementos construtivos da envoltória em relação à previsão de conforto térmico, por meio de simulação computacional. Comparam-se as condições térmicas e o consumo de energia para o condicionamento de uma zona quando simulada isoladamente ou integrada ao pavimento.

#### 3.3.1.1 Método

Para esta etapa, utilizou-se o modelo representativo de um pavimento de escritórios descrito na seção 3.1, com foco nas salas centrais (ambiente “Sala”), destacadas em amarelo na Figura 32. No modelo do pavimento, apenas o teto do *plenum* e o piso da sala foram configurados como adiabáticos. Nos modelos isolados, foi representada uma única sala com 4 m de fachada por 6 m de profundidade, que foi rotacionada para norte, sul, leste e oeste. Nesse modelo, todas as superfícies internas foram configuradas como adiabáticas, com exceção do forro. As cargas internas, rotinas de ocupação e de sistemas, características das pessoas,

configuração do sistema de ar condicionado e materiais da envoltória foram estabelecidos conforme descrito no modelo representativo (ver em 3.1).

Figura 32 - Zoneamento térmico do pavimento de escritório - salas analisadas em amarelo (à esquerda); planta da sala isolada com paredes internas adiabáticas (à direita acima); e corte esquemático da fachada (à direita abaixo). Unidade: metro



Variaram-se as características de percentual de abertura da fachada (*window-to-wall ratio*, WWR) e fator solar (FS) do vidro. Essas alterações permitiram verificar se o desempenho térmico do ambiente com diferentes características de fachada se manteria ao simular o ambiente adiabático ao invés de integrado no pavimento. Foram selecionados dois valores de WWR (60% e 30%) e dois valores de FS (0,5 e 0,8). As propriedades térmicas dos vidros são apresentadas na Tabela 10. Nenhum tipo de sombreamento interno ou externo foi aplicado nas janelas.

Tabela 10 - Propriedades térmicas dos vidros

Denominação	Processo	e	te	peE	pel	εe	εi	U	FS
FS50	laminado	8,00	0,41	0,17	0,13	0,89	0,89	5,56	0,51
FS80	monolítico	6,00	0,78	0,07	0,07	0,84	0,84	5,60	0,82

e: espessura [mm]  
 te: transmissão de energia solar  
 peE e pel: reflexão de energia externa e interna

εe e εi: emissividade externa e interna  
 FS: fator solar  
 U: transmitância térmica [W/m<sup>2</sup>.K]

As simulações foram realizadas para o clima de Florianópolis, classificado como Cfa na escala Köppen-Geiger. Esse clima é caracterizado como temperado, com estações bem definidas, úmido e verões quentes (KOTTEK et al., 2006). Utilizou-se o arquivo climático “BRA\_Florianopolis.838990\_SWERA.epw”, do tipo SWERA, como entrada para as simulações computacionais. Esse arquivo está disponível no banco de arquivos climáticos do *EnergyPlus* (DOE, 2017).

Tendo em vista que o ambiente é artificialmente condicionado durante todo o período de ocupação, as condições térmicas internas foram avaliadas por meio da temperatura radiante média (MRT), da temperatura das superfícies internas, dos índices de conforto térmico e do consumo de energia para condicionamento térmico. As análises se restringiram aos períodos de ocupação.

O conforto térmico foi avaliado em um ponto localizado a 1,5 m da janela e centralizado entre as paredes laterais, seguindo as definições descritas na seção 3.2. O modelo PMV-PPD, desenvolvido por Fanger (1970), foi utilizado para a análise de conforto térmico. Para a análise anual, a métrica TCA (*thermal comfort availability*) foi adotada. Os índices de conforto térmico foram ajustados utilizando o modelo de ajuste solar *SolarCal*, desenvolvido por Arens et al. (2015).

Inicialmente, os resultados de um dos modelos de escritório (WWR 60 e FS 50) foram analisados, verificando as diferenças horárias entre a sala integrada (simulada no contexto de um pavimento) e a sala isolada (paredes adiabáticas). As diferenças horárias entre as zonas integrada e isolada foram apresentadas em histogramas de frequência relativa de ocorrência, sendo definidas como  $\Delta_{(integrada-adiabática)}$ . Além disso, os resultados anuais de consumo de energia para condicionamento térmico e de disponibilidade de conforto térmico (TCA) também foram analisados.

Após, verificou-se se as diferenças na economia de energia para condicionamento térmico se manteriam em uma análise paramétrica das características das janelas, independentemente da configuração de contorno das paredes internas. A Figura 33 ilustra quais modelos foram incluídos em cada análise.

Para testar as hipóteses de similaridade e diferença neste estudo e nos demais estudos da seção 3.3, utilizou-se o método estatístico de análise de variância (ANOVA) com um nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). (BARAGONA; BATTAGLIA; POLI, 2011) indicam este método para experimentos fatoriais que tem como objetivo estimar o impacto dos fatores nas variáveis de resposta, que é medido como o efeito

médio de cada fator sobre todas as unidades. Na área de desempenho térmico de edificações, diversas pesquisas utilizam a ANOVA como principal método adotado (HAWILA et al., 2018, 2019; NAJJAR et al., 2021; SADEGHIFAM et al., 2015).

Figura 33 - Organização dos modelos por análises

	WWR	Fator Solar	
análises horárias (MRT, Tsup, PMV e PPD) + análises anuais (TCA e consumo)	60%	0,5	economia de energia referência no cálculo de economia
	30%	0,8	
	30%	0,5	
	60%	0,8	

A análise de variância (ANOVA) permite verificar a hipótese nula de que as médias dos tratamentos ou grupos são idênticas, por meio da análise de variância das amostras. A ANOVA fator único é utilizada para comparar um único fator de interesse em pelo menos três tratamentos. Para aplicar este teste, pressupõe-se a normalidade na distribuição dos dados amostrais. Esta verificação foi realizada por meio do teste Shapiro-Wilk. Caso a normalidade dos dados não tenha sido verificada ( $p \leq 0,05$ ), utilizou-se o teste de fator único não-paramétrico Kruskal-Wallis.

O teste ANOVA tradicional compara as médias dos tratamentos com a média da amostra dos valores do fator de interesse. Por outro lado, o teste Kruskal-Wallis não-paramétrico distribui todos os valores em escala ordinal e os transforma em postos, de forma que a comparação entre tratamentos ocorre por meio da média dos postos e não dos valores originais. Em ambos os testes, considera-se que há forte evidência contra a hipótese de igualdade entre os grupos quando  $p < 0,05$ , evidência moderada contra a hipótese de igualdade quando  $0,05 \leq p < 0,10$  e pouca ou nenhuma evidência contra a hipótese de igualdade quando  $p \geq 0,10$ .

Quando a hipótese de igualdade entre os grupos não foi verificada, realizou-se a comparação em pares aplicando o teste de Dwass-Steel-Critchlow-Fligner. Nesta análise, as hipóteses de igualdade são verificadas entre pares, permitindo determinar se todos os grupos são diferentes entre si ou se apenas um grupo difere dos demais.

Todos os testes estatísticos foram conduzidos no *software* jamovi, uma plataforma de estatística aberta e gratuita (THE JAMOVI PROJECT, 2021).

### 3.3.1.2 Resultados

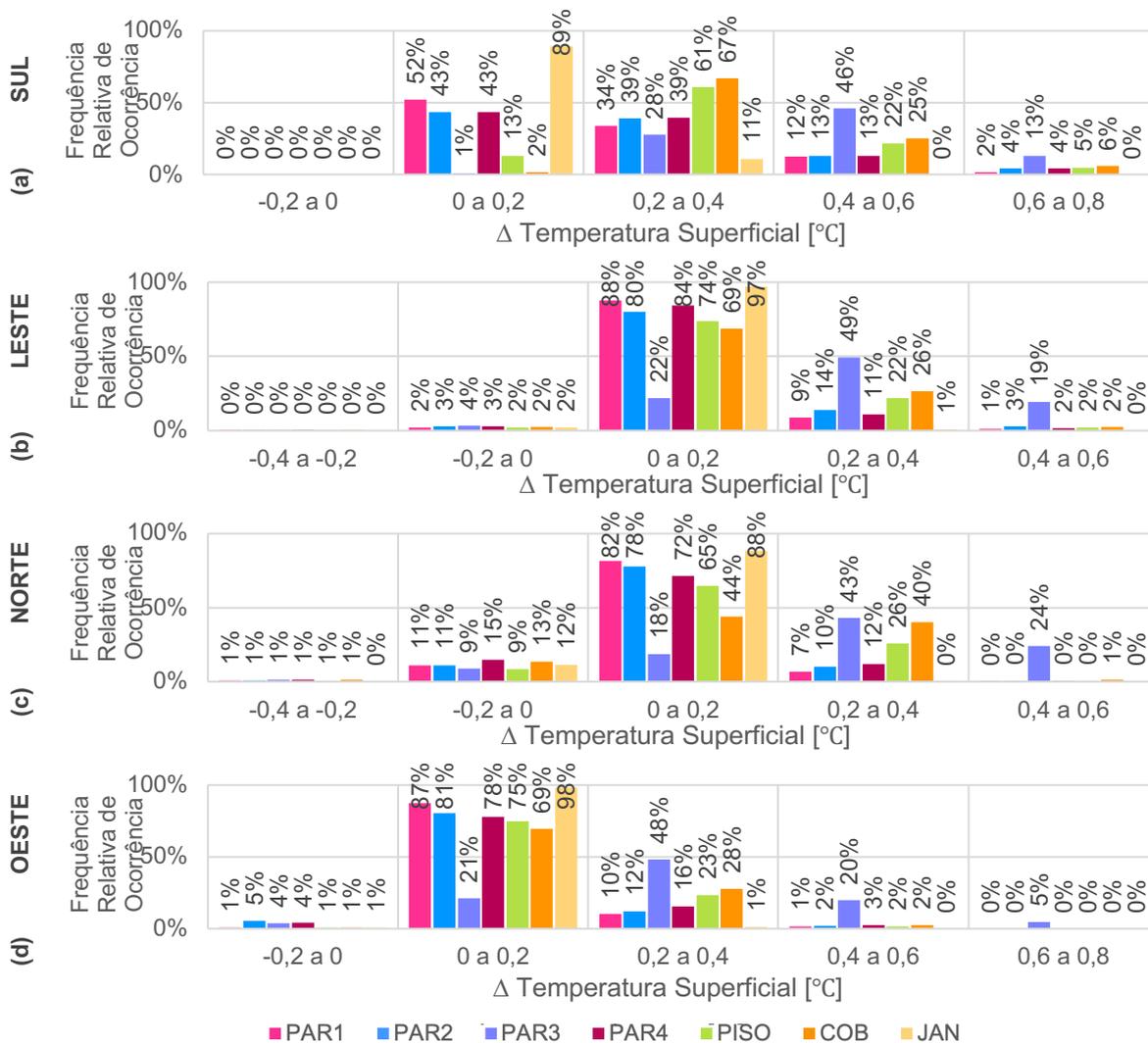
A configuração de contorno de superfícies adiabáticas, como explicado na revisão de literatura, implica em ter a mesma temperatura nos dois lados do componente construtivo. Consequentemente, não há troca de calor por condução através dele, apenas o armazenamento de calor. Essa configuração pode influenciar a estimativa da temperatura das superfícies internas e, por consequência, afetar as condições de conforto térmico. Portanto, o primeiro aspecto a ser investigado é a variação na temperatura das superfícies internas ao considerar paredes adiabáticas em comparação com paredes integradas ao pavimento.

Os gráficos na Figura 34 exibem histogramas da frequência relativa de ocorrência da diferença horária na temperatura das superfícies internas entre as salas. Para essa análise, PAR1 representa a parede de fachada com uma janela, PAR2 e PAR4 correspondem às paredes laterais, e PAR3 representa a parede oposta à fachada, adjacente ao corredor no modelo completo do pavimento.

Nota-se que o modelo integrado ao pavimento tende a apresentar temperaturas superficiais mais altas (valores positivos), embora as diferenças se concentrem na faixa de até 0,6 °C. Nas orientações leste, norte e oeste, a diferença de temperatura da maioria das superfícies internas entre as salas integrada e adiabática é de até 0,4 °C durante 97% a 100% das horas ocupadas (exceto PAR3). Na sala com fachada sul, essa diferença é ligeiramente maior, mas ainda entre 94% a 100% das horas ocupadas, as superfícies no modelo integrado apresentam temperatura até 0,6 °C mais elevada.

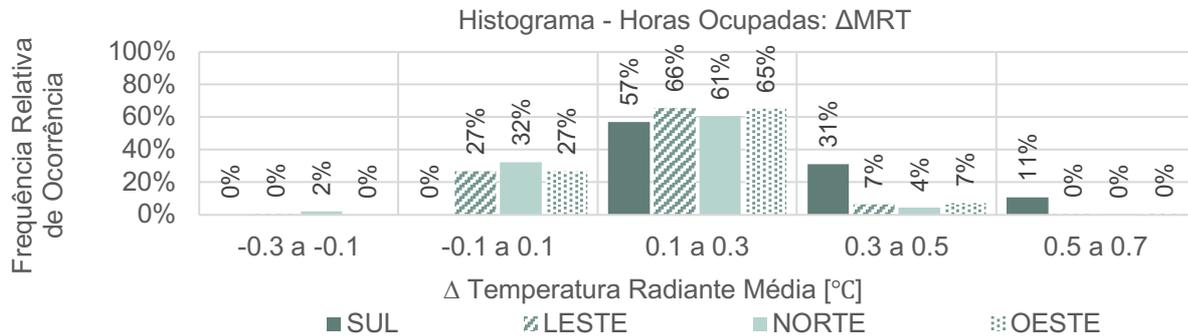
Destaca-se que a PAR3, localizada ao fundo da sala, apresenta a maior diferença na sua temperatura superficial. Para todas as orientações, a temperatura no modelo integrado é mais de 0,4 °C superior ao modelo adiabático em entre 19% e 59% das horas ocupadas. Isso ocorre porque, na sala integrada, essa parede faz divisa com uma área de passagem (corredor) que possui cargas térmicas diferentes do escritório, sem condicionamento térmico e sem exposição direta ao exterior. Por outro lado, quando configurada como adiabática, considera-se que a zona adjacente possui as mesmas condições térmicas da sala.

Figura 34 - Histogramas de frequência relativa de ocorrência anual da diferença horária na temperatura das superfícies internas nos períodos ocupados, por orientação da fachada



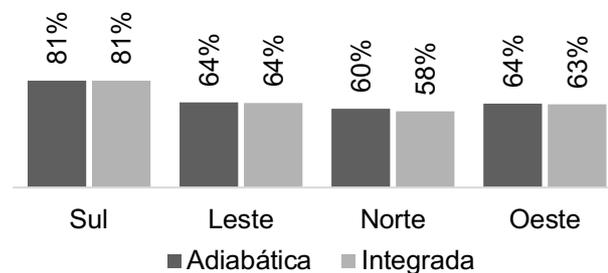
Em seguida, verificou-se se essa variação na temperatura das superfícies internas teria um impacto significativo nas condições térmicas do ambiente. A Figura 35 apresenta a frequência de ocorrência da diferença horária na MRT entre as salas integrada e adiabática. Assim como nas temperaturas superficiais, a MRT tende a ser mais elevada no modelo integrado. No entanto, ao longo de todo o período de ocupação, essa diferença foi de, no máximo, 0,5 °C, com exceção da sala voltada para sul, na qual 11% das horas ultrapassaram essa diferença.

Figura 35 - Histograma de frequência relativa de ocorrência anual da diferença horária na temperatura radiante média nos períodos ocupados



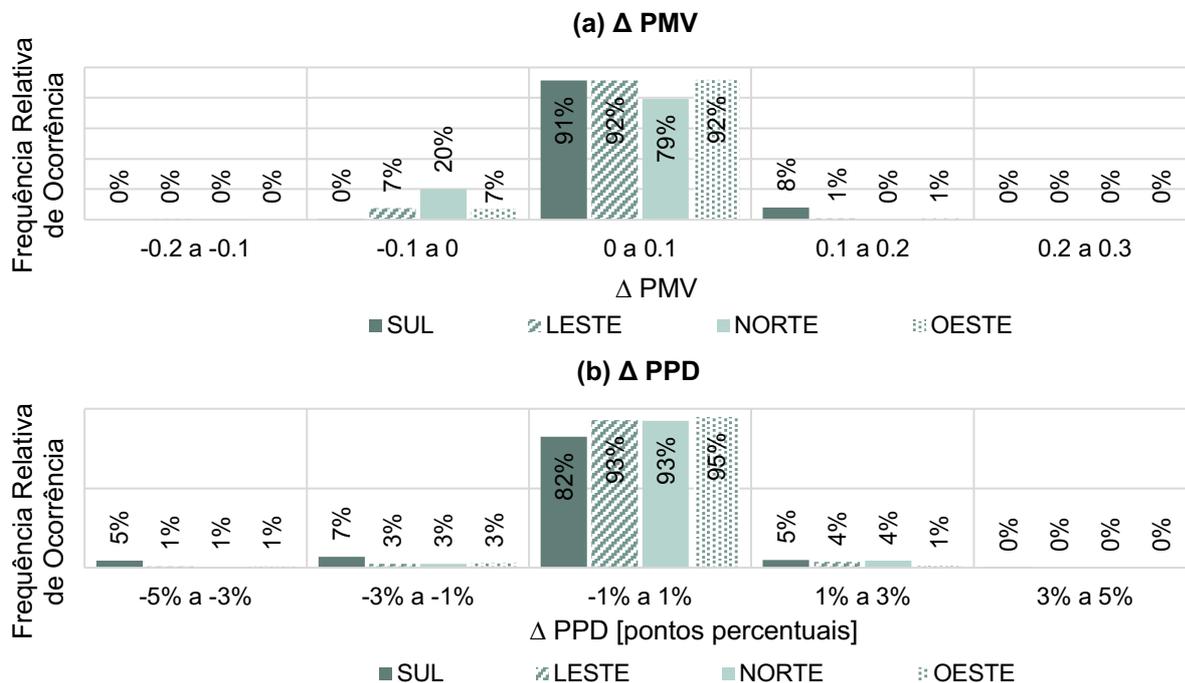
Também foi investigado o impacto dessas variações nos índices de conforto térmico do ambiente. Para isso, analisou-se um ponto próximo à janela e os índices de conforto PMV e PPD, corrigidos pelo efeito da radiação solar. Observou-se que o percentual de horas ocupadas em que os ambientes apresentam condições de conforto térmico é o mesmo tanto nas salas adiabáticas quanto nas salas integradas (Figura 36).

Figura 36 - Disponibilidade de conforto térmico anual (TCA): PMV



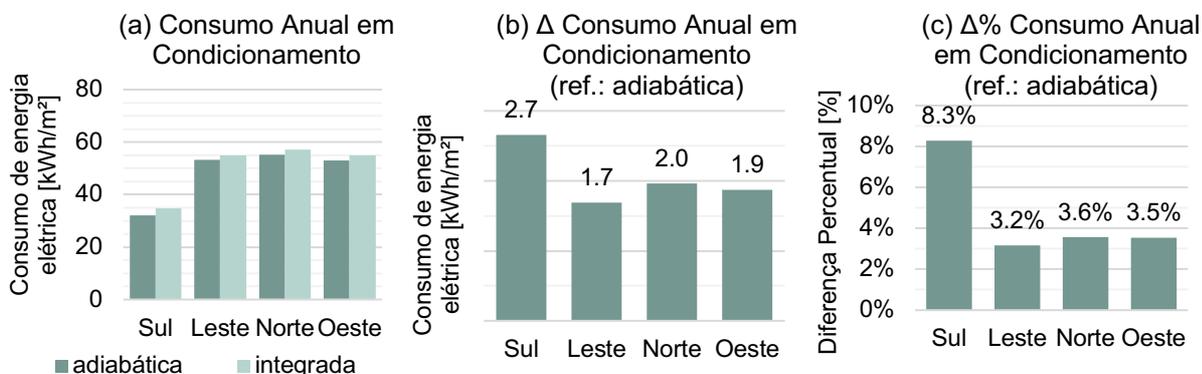
Ao analisar o histograma de frequência de ocorrência da diferença no índice PMV (Figura 37a), constatou-se que entre 91% e 99% das horas ocupadas ao longo do ano a diferença horária entre os ambientes integrado e adiabático não ultrapassa  $\pm 0,1$ . Em relação ao índice PPD, essa diferença indicou que entre 82% e 95% do tempo não há variação horária maior do que  $\pm 1$  ponto percentual na previsão de pessoas insatisfeitas (Figura 37b).

Figura 37 - Histograma de frequência relativa de ocorrência anual da diferença horária no PMV e no PPD nos períodos ocupados a 1,5m da janela



Quanto à estimativa de consumo de energia, a Figura 38 evidencia que o ambiente simulado de forma integrada a um pavimento tende a ter um consumo anual em condicionamento térmico maior do que o ambiente isolado. Nas orientações leste, norte e oeste, o consumo foi cerca de 3,4% maior, considerando o contato com as zonas adjacentes, enquanto na orientação sul essa diferença chega a 8,3% (Figura 38c). Entretanto, o consumo total da sala voltada para o sul é aproximadamente 40% menor do que das demais salas (Figura 38a).

Figura 38 - Resultados de consumo anual em condicionamento térmico

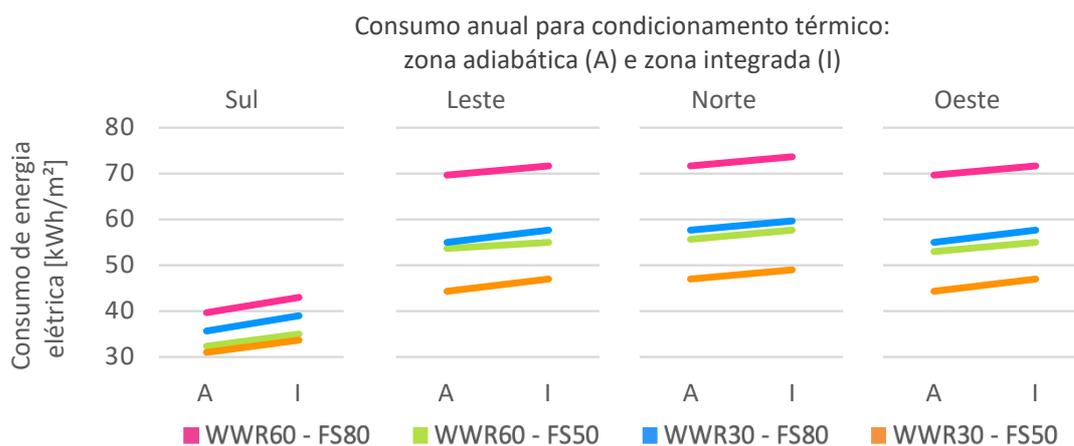


Legenda: (a) Consumo total anual da zona térmica integrada e adiabática para as quatro orientações de fachada; (b) diferença no consumo anual entre zona integrada e adiabática; e (c) diferença percentual no consumo anual

Os valores percentuais na diferença anual de consumo em condicionamento entre as salas integrada e adiabática podem ser considerados significativos, apesar dos valores absolutos terem sido reduzidos. Portanto, é importante avaliar se essa diferença afeta na avaliação paramétrica de desempenho térmico de vidros na fachada. Foram analisados os resultados para quatro configurações de janela e a economia gerada em relação ao modelo de referência WWR60-FS80.

Na Figura 39, são apresentados os valores de consumo total anual em condicionamento térmico de todos os modelos, agrupados por orientação da fachada e conectando os resultados do mesmo modelo, mas com diferentes condições de contorno. Observa-se que as linhas são quase paralelas, o que indica que não há diferença significativa na avaliação de economia de energia para condicionamento entre as salas simuladas como adiabáticas ou integradas ao pavimento.

Figura 39 - Consumo anual em condicionamento térmico



Essa significância foi verificada por meio de teste estatístico com os valores de economia anual de energia elétrica em condicionamento térmico entre os modelos com diferentes vidros. A economia foi calculada em relação à configuração de referência WWR60-FS80 (Tabela 11). O fator testado foi a condição de contorno das paredes internas, sendo adiabáticas ou integradas ao pavimento.

Verificaram-se os pressupostos de normalidade e homogeneidade dos dados e, em seguida, realizou-se um teste ANOVA Fator Único. Com base nesse teste estatístico realizado para esta amostra (Tabela 12), pode-se afirmar que há pouca ou nenhuma evidência contra a igualdade no potencial de economia anual de energia em condicionamento entre ambas as condições de contorno ( $p \geq 0,10$ ). Isso significa que

a escolha entre simular uma sala isolada (com paredes internas adiabáticas) ou integrada a um pavimento não influencia a comparação paramétrica entre as configurações de vidro na verificação do potencial de economia de energia para condicionamento.

Tabela 11 - Economia anual em condicionamento térmico de todos os modelos [kWh/m<sup>2</sup>]

	WWR60 – FS50		WWR30 – FS80		WWR30 – FS50	
	adiabática	integrada	adiabática	integrada	adiabática	integrada
<b>Sul</b>	7,5	8,0	4,1	3,8	9,1	9,3
<b>Leste</b>	16,4	16,4	14,8	14,3	25,5	24,9
<b>Norte</b>	16,4	16,4	14,5	14,2	25,1	24,7
<b>Oeste</b>	16,6	16,6	14,6	14,1	25,4	25,0

Tabela 12 - Teste ANOVA da economia anual em condicionamento térmico

Fator	Teste de Normalidade (Shapiro-Wilk)		Teste de Homogeneidade das Variâncias (Levene)				ANOVA fator único (Welch)			
	W	p	F	df1	df2	p	F	df1	df2	p
Condição de contorno	0,903	0,025	5,45.10 <sup>-4</sup>	1	22	0,982	0,0047	1	10	0,946

### 3.3.1.3 Discussão

O valor absoluto da diferença no consumo anual de energia elétrica para condicionamento térmico estimado entre as salas integrada e adiabática foi baixo. Entretanto, pode ser controverso afirmar que não houve diferença significativa no consumo, visto que a diferença percentual chegou a 8,3% na sala Sul e em média 3,4% nas demais. Poderia ser questionado se esse resultado é influenciado apenas pelo tamanho da sala, mas as incertezas relacionadas à imprecisão dos modelos de simulação geralmente são maiores do que esses percentuais. Por exemplo, a aplicação de método de apoio à calibração de modelos de simulação de desempenho energético de edifícios, desenvolvido por Westphal (2007), estimou uma incerteza de  $\pm 11\%$  no consumo anual de energia elétrica.

Ao analisar o impacto dessa escolha na avaliação paramétrica das áreas transparentes, constatou-se que a decisão entre simular uma sala isolada ou integrada a um pavimento não afeta o potencial de economia anual de energia em condicionamento térmico. Portanto, tal simplificação não comprometeria a avaliação de desempenho da sala em um procedimento de norma ou etiquetagem.

Além disso, verificou-se que as condições térmicas internas não variam significativamente ao simular a sala como isolada ou integrada, especialmente quando comparadas com a grandeza das diferenças encontradas em Sorgato et al. (2014) e Buratti, Palladino e Moretti (2017). Parâmetros que apresentaram maior variação, como a temperatura superficial da parede oposta à fachada, não afetaram de forma expressiva a MRT, a qual é calculada pelo *EnergyPlus* com base na média ponderada das emissividades das superfícies. Além disso, as condições de conforto a 1,5m da janela não foram impactadas pelas condições de contorno das paredes internas.

Quando o estudo se concentra em uma sala ou zona térmica específica, optar por simular um ambiente isolado oferece vantagens, como redução do tempo de modelagem devido à sua geometria simplificada, de simulação pela diminuição nas interações, e de processamento dos dados para análise. Além disso, considera-se as incertezas relacionadas às cargas internas e à rotina de ocupação dos demais ambientes, especialmente ao analisar cenários hipotéticos.

Adicionalmente, compreende-se que o baixo impacto das trocas térmicas com os ambientes adjacentes é favorecido pela baixa transmitância térmica das paredes internas ( $U=0,69 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Caso fossem utilizadas paredes com maior transmitância térmica, os resultados obtidos poderiam ser diferentes. Entretanto, entende-se que o uso de paredes a seco e com isolamento integrado são pertinentes ao contexto atual de racionalização e industrialização na construção.

### **3.3.2 Influência da Massa Interna na Estimativa das Condições Térmicas**

A inclusão da massa térmica interna (móveis e divisórias) na modelagem de zonas térmicas na simulação de desempenho de edifícios é frequentemente negligenciada ou pouco mencionada na literatura científica que aborda BPS. Nesta fase da pesquisa, o objetivo é avaliar numericamente a influência da massa térmica interna na estimativa das condições térmicas e no consumo de energia para o condicionamento térmico de um ambiente. Dentro do recorte geral da pesquisa, o estudo se concentra em ambientes de escritório que possuem um alto percentual de vidro na fachada.

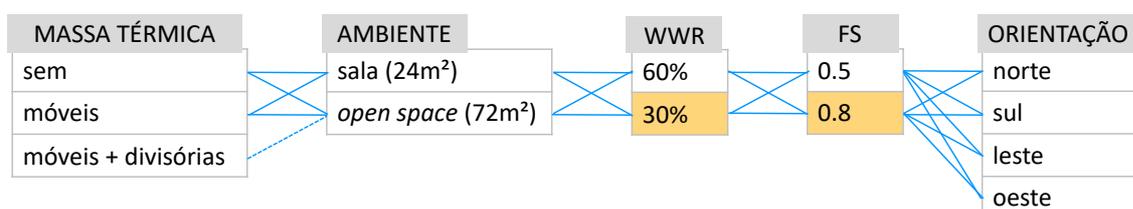
### 3.3.2.1 Método

Neste estudo foram analisados os dois modelos de sala definidos na seção 3.1, sendo a Sala e o *Open Space* (Figura 30). No modelo da sala, com área de 24 m<sup>2</sup>, adicionou-se 10 m<sup>2</sup> de madeira com 25 mm de espessura como massa interna, representando o mobiliário (cerca de 5 m<sup>2</sup> ou uma mesa de 1 m por 2,5 m por pessoa). Para o modelo *Open Space*, de 72 m<sup>2</sup>, definiram-se duas configurações de massa térmica. Na primeira, considerou-se um espaço coletivo de trabalho e se adicionou a mesma proporção de área para mobiliário, totalizando 30 m<sup>2</sup> de madeira com 25 mm de espessura. Na segunda, com mesma área, considerou-se um conjunto de três salas com mesmo perfil de ocupação e cargas internas previstos. Nesse caso, além da massa térmica referente a móveis, adicionou-se massa interna referente a divisórias internas (30 m<sup>2</sup> com composição de material de paredes internas).

Tendo em vista os resultados obtidos na seção anterior (3.3.1), ambos os modelos foram configurados com todas as superfícies internas adiabáticas, exceto o forro entre a sala e o *plenum*, assumindo as mesmas condições térmicas dos ambientes adjacentes. As cargas internas, rotinas de ocupação, sistemas, características das pessoas, configuração do sistema de condicionamento e materiais da envoltória foram definidos também conforme descrito na seção 3.1. Os vidros utilizados neste estudo foram os mesmos descritos na Tabela 10.

Inicialmente, considerou-se que ambas as salas possuem um percentual de abertura da fachada de 60% e vidro com fator solar de 0,50. Em uma segunda etapa, o WWR e o FS do vidro foram alterados, a fim de verificar se a inclusão de massa térmica interna nas simulações afetaria a comparação de desempenho em estudos paramétricos ou a definição das características do vidro. A Figura 40 apresenta um esquema das combinações entre parâmetros e respectivos valores. Assim como em 3.3.1, as análises foram realizadas para o clima temperado úmido de Florianópolis (Cfa) e se utilizou o mesmo arquivo climático do tipo SWERA.

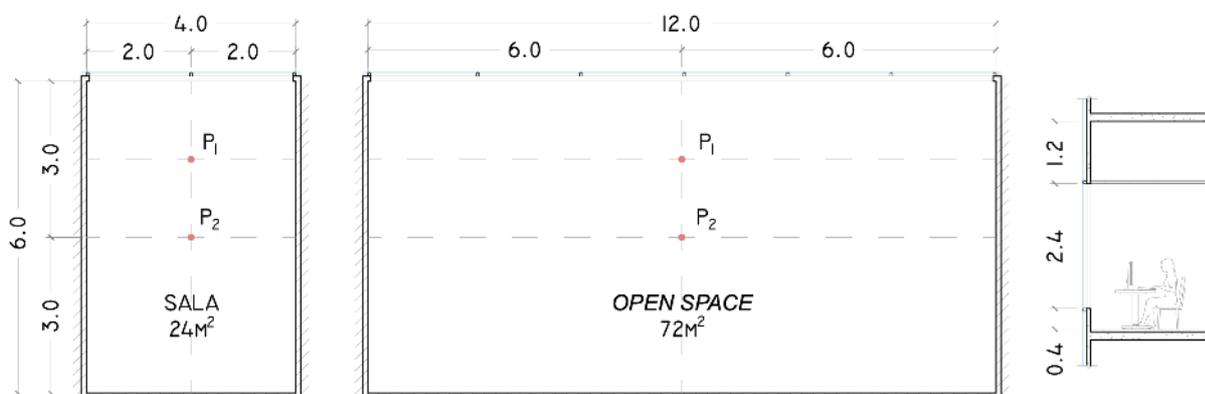
Figura 40 - Esquema de experimento paramétrico



As condições térmicas internas foram avaliadas com base em MRT, temperatura das superfícies internas, índices de conforto térmico e consumo de energia para condicionamento térmico, uma vez que o ambiente é condicionado artificialmente. As análises consideraram apenas o período ocupado.

No que diz respeito ao conforto térmico, a análise considerou dois pontos em cada sala: (a) a 1,5 m da janela e centralizado entre as paredes laterais e (b) no centro do ambiente, conforme indicado pela letra P na Figura 41. Para avaliar o conforto térmico, utilizou-se o modelo PMV-PPD desenvolvido por Fanger (1970), conforme item descrito no capítulo 3.2. Além disso, para a análise anual, utilizou-se a métrica TCA (*thermal comfort availability*) desenvolvida por Atzeri et al. (2016). Os índices de conforto térmico foram corrigidos com base no modelo de ajuste solar *SolarCal* desenvolvido por Arens et al. (2015).

Figura 41 - Planta e corte dos modelos de escritório: pontos analisados (unid.: metros)



Foram realizadas análises comparativas entre a Sala e o *Open Space* considerando a presença e ausência de massa térmica (MT). As diferenças nos resultados horários foram representadas em histogramas de frequência relativa de ocorrência, sendo  $\Delta_{(com\ MT-sem\ MT)}$ .

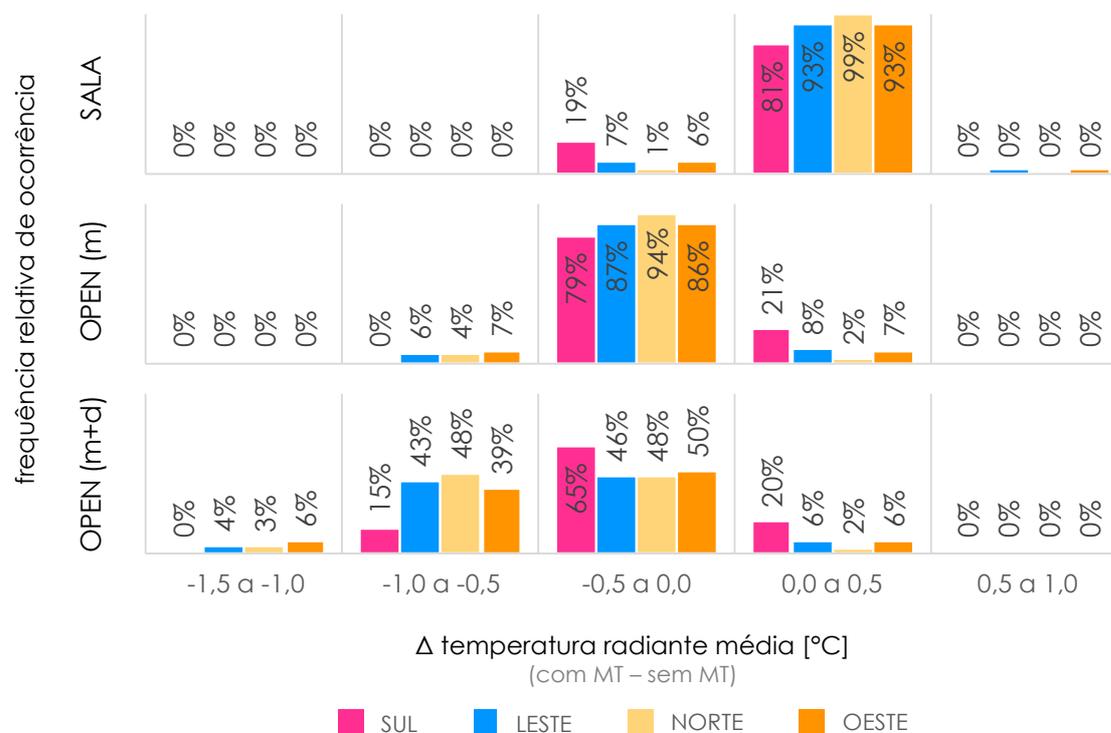
A hipótese de diferença e similaridade ao inserir um objeto de massa térmica interna nas simulações foi verificada por meio do teste estatístico de análise de variância (ANOVA) de fator único. O TCA e o consumo de energia foram definidos como as variáveis dependentes, enquanto a presença ou ausência de massa térmica foi o fator de interesse. Na sala, os dois níveis do fator massa térmica são com e sem massa térmica. No *open space*, este fator foi dividido em três níveis: sem massa térmica, com móveis, com móveis e divisórias. Para a análise do TCA, apenas os

modelos de escritório com WWR 60% e FS 0,5 foram analisados. Na análise do consumo de energia para condicionamento térmico, foram consideradas as demais configurações da área transparente, e a economia de energia foi calculada em relação à configuração de referência WWR 60% e FS 0,8. Todos os testes estatísticos foram conduzidos conforme descrito no método do primeiro estudo desta seção (ver em 3.3.1.1).

### 3.3.2.2 Resultados

Na Figura 42, são apresentados os histogramas de frequência relativa das diferenças horárias na MRT entre ambientes com e sem massa térmica. A figura mostra as análises para a Sala, o *Open Space* com móveis e o *Open Space* com móveis e divisórias. Valores positivos indicam que a MRT foi maior no ambiente com massa térmica, enquanto valores negativos indicam que a MRT foi maior na sala sem inclusão de massa térmica.

Figura 42 - Histograma de frequência relativa de ocorrência de diferença na temperatura radiante média entre ambiente com e sem massa térmica



#### Níveis de massa térmica

(m): 0,42 m<sup>2</sup> de madeira 25mm por unidade de área de piso.

(m+d): 0,42 m<sup>2</sup> de madeira 25mm por unidade de área de piso + 30 m<sup>2</sup> de divisória interna (placas de gesso com lã de vidro - 80 mm).

No caso da Sala, a inclusão de massa térmica resultou em variações na MRT de até  $\pm 0,5$  °C ao longo de todo do período ocupado (Figura 42A). O *Open Space* apresentou perfil semelhante quando incluída apenas massa térmica referente a móveis, sendo a diferença de até  $\pm 0,5$  °C entre 93% e 100% das horas ocupadas (Figura 42B<sub>m</sub>). Entretanto, ao adicionar as divisórias internas, a diferença entre os modelos foi maior (Figura 42B<sub>m+d</sub>). A diferença de até  $\pm 0,5$  °C ainda prevaleceu (entre 50% e 85% das horas), mas houve uma tendência de a MRT no ambiente com massa térmica ser de 0,5 °C a 1,5 °C inferior ao ambiente com móveis e divisórias em 15% a 50% das horas ocupadas.

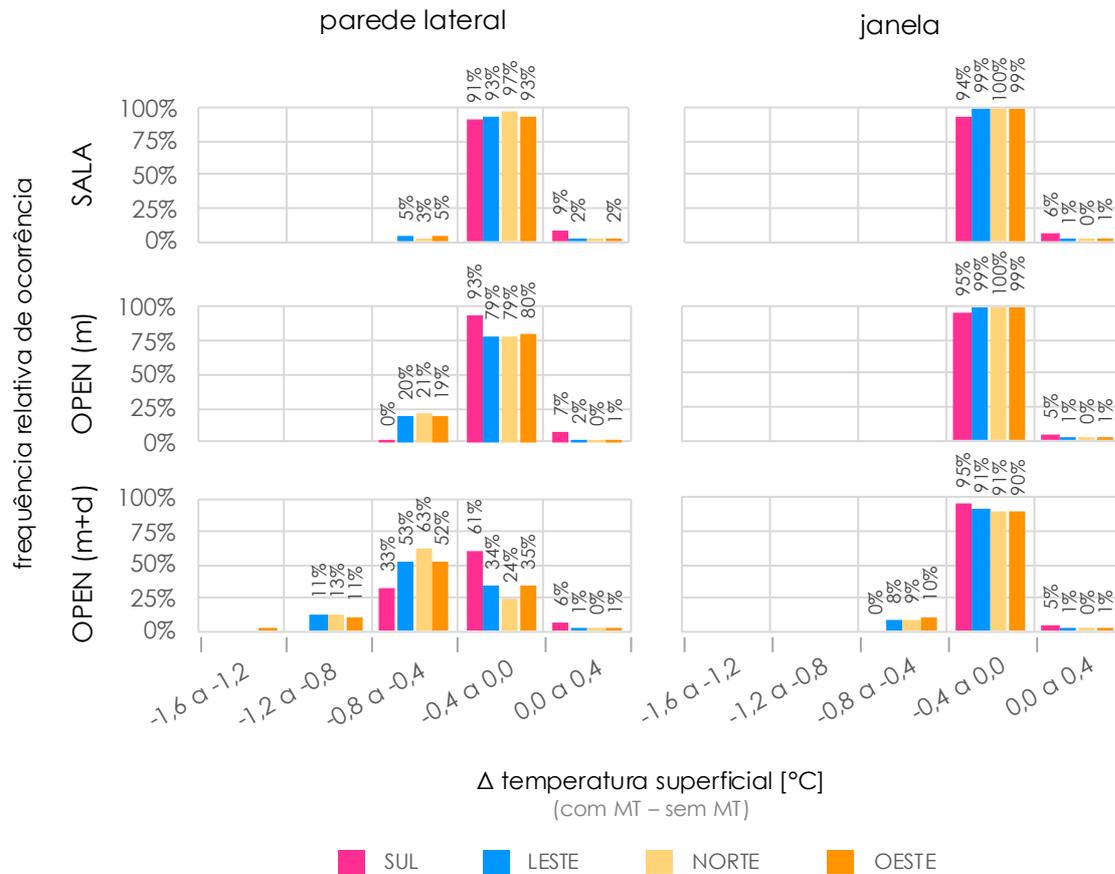
Investigou-se a tendência de redução na MRT nos modelos com inclusão de massa térmica por meio da temperatura das superfícies internas, uma vez que os objetos de massa interna participam das trocas de calor por radiação de onda longa. Para comparar a temperatura das superfícies internas dos ambientes com e sem massa interna, foram analisados histogramas de frequência relativa de ocorrência. A Figura 43 apresenta os resultados obtidos por meio de histogramas de frequência relativa das diferenças de temperatura superficial de uma parede interna lateral e da janela, considerando o período ocupado.

Foi observado um padrão semelhante nas paredes, cobertura e teto. Nessas superfícies, quando apenas a massa térmica referente ao mobiliário é considerada, houve uma redução até 0,4 °C na temperatura em 91% a 100% do período ocupado na sala e em 69% a 95% no *open space*. Ao adicionar a massa interna das divisórias, o impacto é maior, porém a diferença de temperatura não ultrapassa 1,2 °C e, em geral, é maior nos modelos sem massa térmica interna.

Na janela, contudo, foi observada pouca variação entre os modelos. Houve pouco impacto devido à inserção de massa térmica, com redução de até 0,4 °C entre 90% e 100% do período ocupado em todos os modelos. Isso ocorre devido à influência predominante do meio externo (temperatura, ventos e incidência de radiação) na temperatura da janela, em comparação às demais superfícies internas.

É importante ressaltar que, em todos os casos, os modelos com massa interna tendem a apresentar temperatura das superfícies internas mais baixa em comparação com os modelos sem massa interna. Como resultado, a MRT também é menor nos modelos com massa térmica. Entende-se que esse efeito ocorre devido à participação das superfícies de massa interna nas trocas de calor por convecção e radiação, absorvendo calor do ambiente e retardando o ganho de calor na envoltória.

Figura 43 - Histograma de frequência relativa de ocorrência de diferença na temperatura das superfícies internas entre ambiente com e sem massa térmica



Foi analisado se as variações na temperatura das superfícies afetariam as condições de conforto térmico nos ambientes, com base na disponibilidade de conforto térmico anual (Figura 44). Verificou-se que os ambientes com inclusão de massa térmica tendem a resultar em uma maior disponibilidade anual de conforto térmico independente da localização no ambiente. Na Sala, há pouca diferença na disponibilidade anual de conforto térmico, chegando a 2 pontos percentuais (p.p.). No *Open Space*, a diferença foi maior, chegando a 8 p.p. (centro, norte).

Para verificar se essa diferença é estatisticamente significativa, aplicaram-se testes ANOVA para a sala e para o *open space*. Os grupos dos experimentos foram definidos e apresentados na Tabela 13. Os pressupostos de normalidade e homogeneidade foram verificados para ambos os experimentos (Tabela 14). Tanto para a sala quanto para o *open space*, não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas no TCA entre os modelos com e sem massa térmica ( $p > 0,05$ ).

Figura 44 - Disponibilidade de conforto térmico anual (TCA), com base no PMV, (a) na sala e (b) no open space

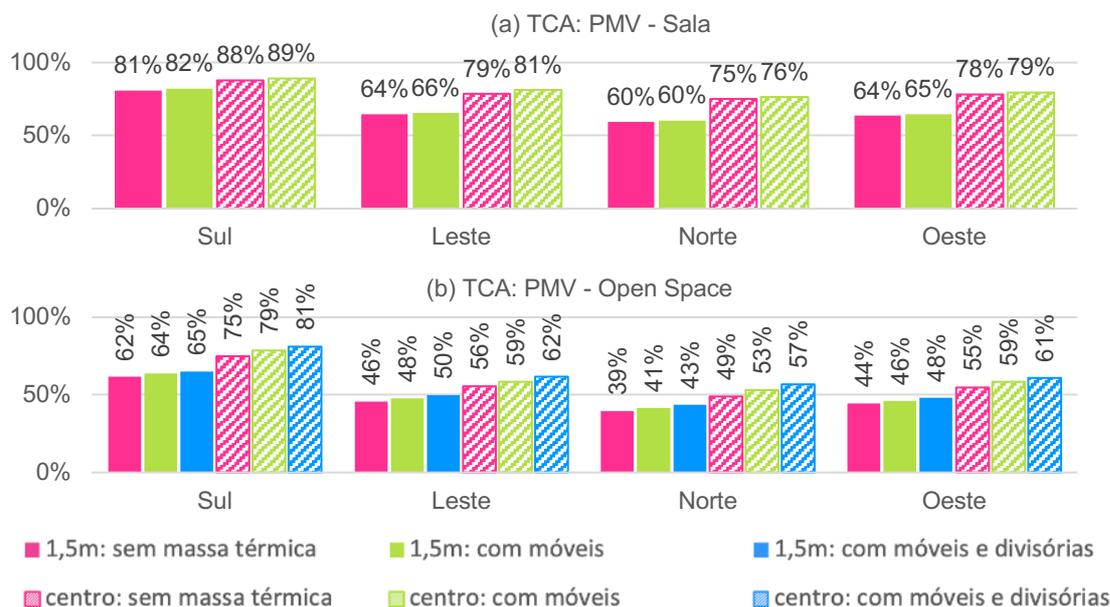


Tabela 13 - Agrupamento do experimento ANOVA fator único da disponibilidade anual de conforto térmico ( $TCA_{PMV}$ ): modelo WWR 60% - FS 0,5

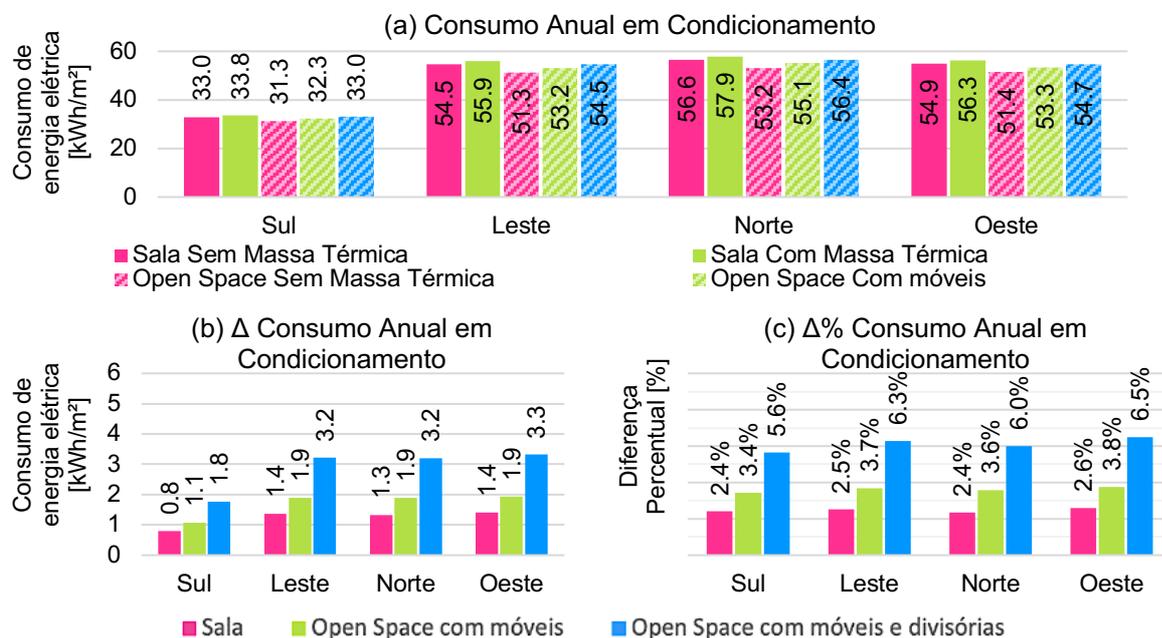
		Sala (experimento 1)		Open Space (experimento 2)		
		sem massa térmica	com massa térmica	sem massa térmica	com móveis	com móveis e divisórias
1,5m	sul	81%	82%	62%	64%	65%
	leste	64%	66%	46%	48%	50%
	norte	60%	60%	39%	41%	43%
	oeste	64%	65%	44%	46%	48%
centro	sul	88%	89%	75%	79%	81%
	leste	79%	81%	56%	59%	62%
	norte	75%	76%	49%	53%	57%
	oeste	78%	79%	55%	59%	61%

Tabela 14 - Resultados testes ANOVA fator único da disponibilidade anual de conforto térmico ( $TCA_{PMV}$ ): modelo WWR 60% - FS 0,5

Experimento	Teste de Normalidade (Shapiro-Wilk)		Teste de Homogeneidade das Variâncias (Levene)				ANOVA fator único (Welch)			
	W	p	F	df1	df2	p	F	df1	df2	p
$TCA_{PMV}$ Sala	0,907	0,105	0,00168	1	14	0,968	0,0512	1	14	0,824
$TCA_{PMV}$ Open Space	0,920	0,057	0,00606	2	21	0,994	0,370	2	14	0,697

O consumo de energia elétrica em condicionamento térmico também foi analisado. Os dados de consumo para os modelos com WWR de 60% e FS de 0,5 são apresentados na Figura 45. O ambiente sem massa térmica foi utilizado como referência para o cálculo das diferenças, representadas por  $\Delta_{(com\ MT-sem\ MT)}$ .

Figura 45 - Consumo anual em condicionamento térmico nos modelos com WWR 60% e FS 0,5 para as quatro orientações de fachada: (a) total anual, (b) diferença entre zona integrada e adiabática e (c) diferença percentual.



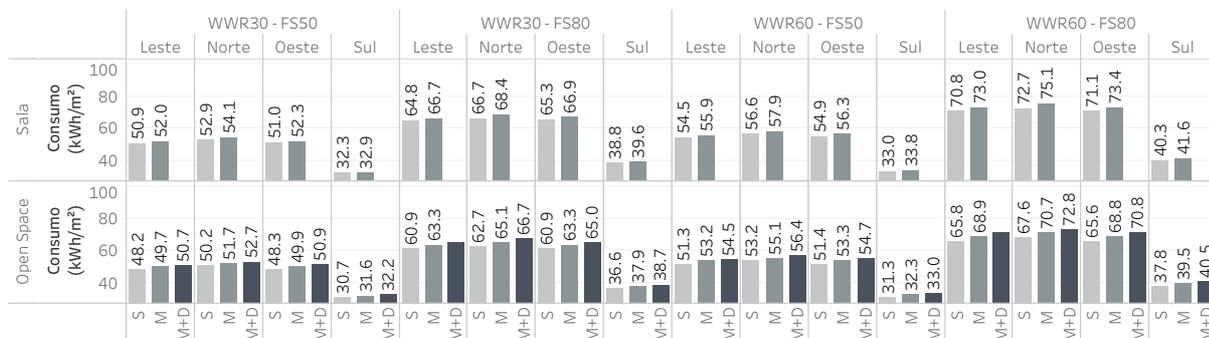
Primeiramente observa-se que, apesar da MRT tender a ser inferior nos modelos com massa térmica, há uma tendência de que os ambientes com massa térmica resultem em maior consumo de energia para o condicionamento térmico. Verifica-se que o consumo anual por unidade de área é similar entre todos os modelos para uma mesma orientação, com uma diferença de até 5 kWh/m<sup>2</sup> por ano (Figura 45a). As diferenças percentuais são semelhantes entre as orientações da fachada, sendo menores na sala do que no *open space*, mesmo quando apenas massa térmica referente aos móveis é considerada (Figura 45c). Nos modelos *open space*, o consumo em condicionamento foi até 6,5% maior ao incluir massa interna referente aos móveis e às divisórias (Figura 45c, oeste).

Até o momento, analisou-se um edifício com características fixas. Desta forma, não é possível determinar se o uso de massa interna nas simulações afeta significativamente a comparação de desempenho em estudos paramétricos ou na definição de materiais ou sistemas. Para investigar essa questão, foram realizadas alterações nas características da fachada.

O consumo anual em condicionamento térmico de todos os modelos é apresentado na Figura 46, com a divisão por tipo de ambiente e orientação solar da fachada externa. Em todas as configurações de janela, foi observada a mesma

tendência dos modelos com WWR de 60% e FS de 0,5, ou seja, os ambientes com massa térmica apresentaram um maior consumo de energia.

Figura 46 - Consumo de energia para condicionamento térmico com diferentes configurações de janela



Ambientes que permitem uma maior admissão de calor solar no ambiente também têm uma maior carga térmica interna. Observa-se que quanto maior a admissão de calor, maior é o impacto percentual da inclusão de massa térmica interna no consumo para condicionamento. Por exemplo, o modelo *open space* com fachada norte e massa interna referente a móveis e divisórias resultou em consumo 5% maior comparado ao mesmo ambiente sem massa térmica na configuração de WWR 30% e FS 0,5. Todavia, essa diferença foi de 7,7% no modelo com WWR 60% e FS 0,5.

No entanto, essa diferença não se reflete no potencial percentual de economia anual no consumo de energia para condicionamento térmico em comparação ao modelo com maior abertura e maior fator solar (Figura 47). Em todas as situações, os modelos com massa térmica apresentaram um maior potencial de economia em comparação aos modelos sem massa interna.

Essa significância foi verificada por meio de dois experimentos estatísticos de análise de variância (ANOVA) de fator único com os valores de percentual de economia anual de energia elétrica para condicionamento. A economia percentual foi calculada tendo a configuração WWR 60% e FS 0,8 como referência. Os dados dos dois experimentos são apresentados na Tabela 15.

A normalidade das amostras dos ambientes Sala e *Open Space* foi verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk. Em ambos os casos, a hipótese de normalidade não pôde ser aceita ( $p < 0,01$ ). Portanto, realizaram-se testes ANOVA fator único não-paramétrico Kruskal-Wallis. A Tabela 16 apresenta os testes de análise de variância

da economia anual de energia para condicionamento térmico dos modelos da Sala e do *Open Space*.

Figura 47 - Potencial percentual de economia anual no consumo de energia para condicionamento térmico. Modelo de referência: WWR60-FS80

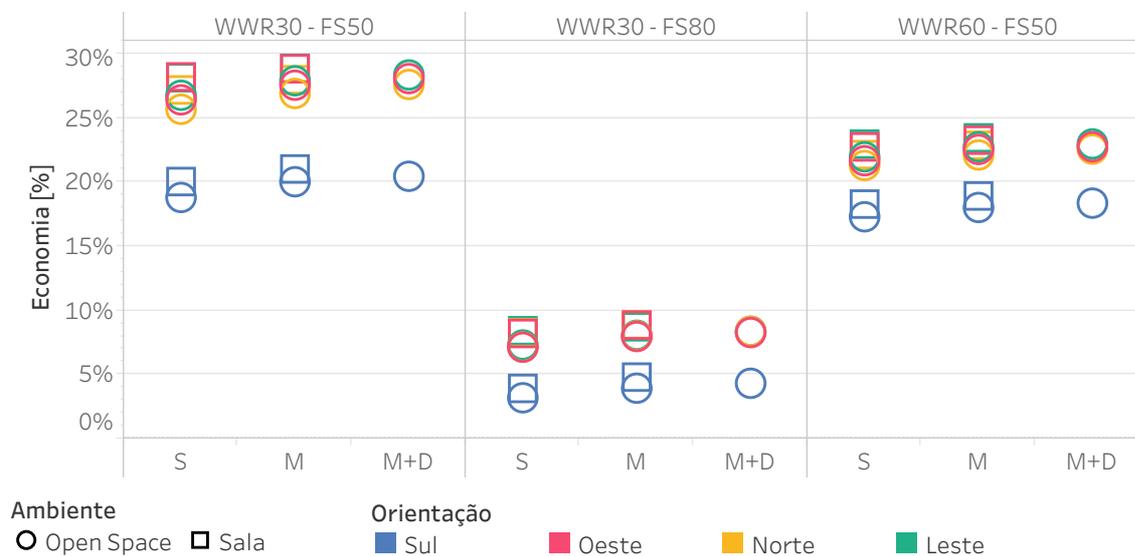


Tabela 15 - Percentual de economia anual em condicionamento térmico. Modelo de referência: WWR 60 – FS 0.8

	Sala						Open Space								
	WWR 60 – FS 0,5		WWR 30 – FS 0,8		WWR 30 – FS 0,5		WWR 60 – FS 0,5			WWR 30 – FS 0,8			WWR 30 – FS 0,5		
Massa térmica	S	M	S	M	S	M	S	M	M+D	S	M	M+D	S	M	M+D
<b>Sul</b>	18,3%	18,9%	3,9%	4,8%	20,0%	21,0%	17,3%	18,0%	18,4%	3,2%	3,9%	4,3%	18,8%	20,0%	20,5%
<b>Leste</b>	23,0%	23,4%	8,4%	8,7%	28,1%	28,9%	22,0%	22,8%	23,0%	7,3%	8,1%	8,4%	26,8%	27,9%	28,4%
<b>Norte</b>	22,1%	22,9%	8,3%	8,9%	27,2%	28,0%	21,3%	22,1%	22,6%	7,2%	8,0%	8,4%	25,7%	26,9%	27,6%
<b>Oeste</b>	22,7%	23,3%	8,2%	8,9%	28,2%	28,8%	21,7%	22,5%	22,7%	7,1%	8,0%	8,3%	26,4%	27,5%	28,1%

S: sem massa térmica

M: com massa térmica referente a móveis

M+D: com massa térmica referente a móveis e divisórias

Tabela 16 - Testes ANOVA fator único não-paramétrico

Experimento	Teste de normalidade (Shapiro-Wilk)		Teste ANOVA fator único não-paramétrico (Kruskal-Wallis)		
	W	p	X <sup>2</sup>	df	p
Sala	0,860	0,003	0,409	1	0,522
Open Space	0,852	<0,001	0,947	2	0,623

O teste estatístico demonstrou que o fator massa térmica não rejeita a hipótese de igualdade entre os grupos, tanto no ambiente Sala como no *Open Space* ( $p > 0,05$ ). Em outras palavras, a inclusão de massa térmica na simulação térmica não

influenciou significativamente na previsão de economia anual de energia para condicionamento térmico.

### 3.3.2.3 *Discussão*

Móveis e divisórias de um edifício ou ambiente participam no seu balanço térmico, mas nem sempre é possível prever suas áreas, sua distribuição no ambiente, especialmente dependendo da etapa de projeto. Simplificações são necessárias para viabilizar os estudos de simulação, mas é importante estar ciente das consequências dessas decisões. Os resultados observados neste estudo mostram que em ambientes maiores, a incorporação de massa interna terá um impacto maior do que em uma sala individual. Isso é especialmente relevante quando o ambiente corresponde a um agrupamento de várias salas em uma única zona térmica, considerando que haveria essas divisórias no edifício real.

A comparação no uso de massa térmica para um mesmo tipo de ambiente não demonstrou diferença estatisticamente significativa. No entanto, os resultados da disponibilidade anual de conforto térmico alertam para uma diferença expressiva entre uma sala isolada ou quando se unem as salas em que se supõe as mesmas condições térmicas. Ou seja, entre o modelo sala e o modelo *open space*.

A simplificação de várias salas com condições térmicas semelhantes em uma única zona térmica pode ser uma abordagem eficiente para a previsão de consumo de energia elétrica. Entretanto, observa-se que a maior aproximação no consumo anual para condicionamento ocorre entre a Sala sem massa térmica e o *Open space* com móveis e divisórias, onde a diferença máxima foi de 0,3 kWh/m<sup>2</sup>. Ao comparar a Sala e o *Open space* ambos sem massa térmica, a diferença chega a 5,5 kWh/m<sup>2</sup> (WWR 60%, FS 0,5, oeste). Logo, ao se juntar as salas em uma única zona, as divisórias devem ser incluídas como massa térmica interna na modelagem quando conhecidas ou previstas.

Além disso, foi observado que, ainda que com a mesma proporção de área de massa térmica interna para mobiliário em relação à área de piso, os índices de conforto térmico e o consumo para condicionamento variam significativamente entre a sala e o *open space*. Tanto a diferença absoluta quanto percentual no consumo para condicionamento tende a ser inferior no ambiente com menor área. Por outro lado, em relação ao conforto térmico, o ambiente com menor área tende a apresentar uma maior disponibilidade anual de conforto térmico.

### 3.3.3 Algoritmo de Convecção nas Superfícies Internas

Conforme abordado na revisão de literatura, a transferência de calor por convecção desempenha um papel crucial na modelagem térmica de edifícios, dada a complexidade das correlações envolvidas. A convecção ocorre quando há troca direta de calor entre as superfícies e o ar do ambiente, e a velocidade dessa troca é indicada pelo coeficiente de convecção. A determinação desse coeficiente depende das condições térmicas do ambiente e inclinação da superfície. Para esse cálculo existem diferentes métodos que foram desenvolvidos de forma experimental, considerando também fatores como a rugosidade da superfície, as condições de escoamento e o tipo de fluido. Muitos estudos compararam os coeficientes calculados com diferentes modelos de convecção, com base em medições *in-loco*. No entanto, poucos estudos exploraram essa questão no contexto da simulação computacional no *EnergyPlus* e sua relação com as condições de conforto térmico.

Nesse contexto, buscou-se verificar se a escolha do algoritmo de convecção nas superfícies internas em simulação de desempenho térmico no *EnergyPlus* impacta significativamente nas condições térmicas em ambientes de escritório. Consideraram-se ambientes artificialmente condicionados e sem ventilação natural.

#### 3.3.3.1 Método

Nesta etapa, o modelo de Sala definido na seção 3.1 (Figura 30) também foi analisado como objeto de estudo. A janela ocupa 60% da fachada externa e variou-se a sua orientação solar. Com base nos resultados obtidos em 3.3.1, todas as superfícies internas foram configuradas como adiabáticas, exceto o forro entre a sala e o *plenum*, assumindo-se as mesmas condições térmicas para os ambientes adjacentes.

Apenas um vidro foi testado, e suas propriedades térmicas podem ser observadas na Tabela 17. Não foram utilizados quaisquer tipos de sombreamento interno ou externo. As cargas internas, rotinas de ocupação e sistemas, características das pessoas, configuração do ar condicionado e materiais da envoltória também foram configurados de acordo com as descrições apresentadas na seção 3.1.

Tabela 17 - Propriedades térmicas do vidro

Denominação	Processo	e	TE	REe	REi	$\epsilon_e$	$\epsilon_i$	U	FS
FS50	laminado	8,00	0,41	0,17	0,13	0,89	0,89	5,56	0,51

e: espessura [mm]

TE: transmissão de energia solar

U: transmitância térmica [ $W/m^2.K$ ]

REe e REi: reflexão de energia externa e interna

$\epsilon_e$  e  $\epsilon_i$ : emissividade externa e interna

Da mesma forma que nos estudos anteriores deste capítulo (seções 3.3.1 e 3.3.2), as análises foram realizadas considerando o clima temperado úmido de Florianópolis (Cfa), e utilizando o mesmo arquivo climático do tipo SWERA.

As simulações de desempenho térmico foram realizadas na versão 9.6.0 do software *EnergyPlus*. Considerou-se o ambiente de uma sala de escritório com sistema de ar condicionado do tipo PTHP, no qual as unidades evaporadoras estão instaladas nas paredes. Neste contexto, três opções de algoritmos de convecção nas superfícies internas foram relevantes para análise: *TARP*, *Simple Natural* e *Adaptive*. O algoritmo *Ceiling Diffuser* não se aplica a esse ambiente, uma vez que é indicado para simulações em que o ar é distribuído pelo teto. Da mesma forma, o algoritmo ASTM1340 não é adequado para esse contexto, pois é específico para simulações em áticos e sótãos.

Para este modelo de sala de escritório, o algoritmo *Adaptive* sempre identificou o regime de fluxo de ar na zona como “*Simple Bouyancy*” (natural). As paredes seguiram as equações do modelo de Fohanno e Polidori (2006), enquanto o piso e cobertura seguiram as equações do modelo de Alamdari e Hammon (1983), dependendo da situação térmica estável ou flutuante. Quanto à janela, foi selecionado o modelo estabelecido pela norma ISO 15.099 (ISO, 2003). O Quadro 9 apresenta as equações utilizadas por cada algoritmo nas simulações realizadas neste estudo.

Os algoritmos de convecção nas superfícies são responsáveis por calcular o coeficiente de convecção em cada superfície e *timestep*, o qual é utilizado para estimar a contribuição da convecção no balanço térmico do ar. Em vista disso, antes de analisar o impacto dessa escolha nas condições térmicas do ambiente, foi averiguada a variação do coeficiente de convecção ( $h_{conv}$ ) calculado por cada algoritmo. Duas superfícies internas foram observadas: a parede externa, que geralmente apresenta maior amplitude térmica ao longo do dia, e uma parede interna lateral, que, apesar de adiabática, recebe radiação solar. Os valores horários do coeficiente ao longo de um ano inteiro foram analisados por meio de histogramas de frequência relativa de ocorrência.

Quadro 9 - Equações aplicadas ao modelo para cada um dos algoritmos selecionados

Superfície	TARP (default)	Adaptive (simple bouyancy)	Simple Natural
Paredes	ASHRAE <i>Hb. Fundamentals</i> (ASHRAE, 2001) $h = 1.31 \Delta T ^{1/3}$ Correlação em função orientação/ inclinação da superfície e do $\Delta T_{(\text{superfície} - \text{ar})}$ .	Fohanno e Polidori (2006) $h = \begin{cases} 1,332 \left( \frac{ \Delta T }{H} \right)^{1/4}, & Ra_H^* \leq 6,3 \cdot 10^9 \\ 1,235 e^{(0,0467H)}  \Delta T ^{0,316}, & Ra_H^* > 6,3 \cdot 10^9 \end{cases}$ Sendo, $Ra_H^* = \frac{g\beta_f q''_c H^4}{k_f \nu_f^2} Pr_f$ Correlação em função da $\Delta T_{(\text{superfície} - \text{ar})}$ , da altura da superfície e do valor de Rayleigh modificado $Ra_H^*$ , que considera a altura da superfície e velocidade e propriedades térmicas do ar.	$h = 3,076 \frac{W}{m^2} \cdot K$
	Piso e Teto	Walton (1983) Para $\Delta T = 0$ OU superfície vertical $h = 1.31 \Delta T ^{1/3}$ Para $\Delta T < 0$ E a superfície está voltada para cima OU $\Delta T > 0$ E a superfície está voltada para baixo $h = \frac{9.482 \Delta T ^{1/3}}{7.238 -  \cos \Sigma }$ Para $\Delta T > 0$ E a superfície está voltada para cima OU $\Delta T < 0$ E a superfície está voltada para baixo $h = \frac{1.810 \Delta T ^{1/3}}{1.382 -  \cos \Sigma }$ Correlação em função orientação/ inclinação da superfície e do $\Delta T_{(\text{superfície} - \text{ar})}$ .	Alamdari e Hammon (1983) estável: $h = 0,6 \left( \frac{ \Delta T }{D_h^2} \right)^{1/5}$ flutuante: $h = \left\{ \left[ 1,4 \left( \frac{ \Delta T }{D_h} \right)^{1/4} \right]^6 + \left[ 1,63 \Delta T ^{1/3} \right]^6 \right\}^{1/6}$ sendo, $D_h = \frac{4a}{P}$ Definido em função da $\Delta T_{(\text{superfície} - \text{ar})}$ e do diâmetro hidráulico da superfície (relaciona área da superfície e perímetro de toda a zona), para situação térmica estável ou flutuante.
Janela	ASHRAE <i>Hb. Fundamentals</i> (ASHRAE, 2001) $h = 1.31 \Delta T ^{1/3}$ Correlação em função orientação/inclinação da superfície e do $\Delta T_{(\text{superfície} - \text{ar})}$ .	ISO Standard 15.099 (ISO, 2003) $h = Nu \left( \frac{\lambda}{H} \right)$ sendo, $Nu = 0,13 Ra_H^{1/3}$ e $Ra_H = \frac{\rho^2 H^3 g c_p  \Delta T }{T_{m,f} \mu \lambda}$	$h = 3,076 \frac{W}{m^2} \cdot K$

Sendo,

$$\Delta T = T_{\text{surf},i} - T_{\text{air}}$$

 $T_{\text{surf},i}$ : temperatura da superfície i [K] $T_{\text{air}}$ : temperatura do ar [K] $T_{m,f}$ : temperatura média do filme [K]

Nu: número de Nusselt

 $Ra_H$ : número de Rayleigh $Ra_H^*$ : número de Rayleigh modificado com base na altura da parede (H) $Pr_f$ : número de Prandtl - avaliado na temperatura de filme (f) $D_h$ : diâmetro hidráulico da superfície horizontalH: altura característica para a superfície (no *EnergyPlus* é a altura do teto da zona) [m]A: área da zona [m<sup>2</sup>]

P: perímetro de toda zona [m]

h: coeficiente de convecção

 $\Sigma$ : ângulo de inclinação da superfície $\rho$ : densidade do ar

g: aceleração da gravidade

 $c_p$ : calor específico do ar $\mu$ : viscosidade dinâmica do ar $\lambda$ : condutividade térmica do ar

Em seguida, investigou-se o impacto da escolha do algoritmo de convecção nas condições térmicas de um ambiente de escritório. Tendo em vista que a sala é artificialmente condicionada durante todo o período ocupado, foram analisadas a carga térmica para condicionamento e as condições de conforto térmico. Essas análises consideraram apenas o período ocupado. A carga térmica anual para condicionamento foi avaliada com base nos resultados de demanda diária total.

O conforto térmico foi avaliado em dois pontos distintos da sala: o primeiro localizado a 1,5 m da janela, centralizado entre as paredes laterais, e o segundo no centro do ambiente, conforme indicados pela letra P na Figura 41 da seção anterior (3.3.2). Foram utilizados os índices PMV e PPD, corrigidos com o modelo de ajuste solar *SolarCal*, conforme estabelecido no capítulo 3.2.

Os índices PMV e PPD foram analisados por meio de histogramas de frequência relativa de ocorrência da diferença absoluta horária, comparando os diferentes algoritmos de convecção nas superfícies internas. A diferença foi em relação ao algoritmo TARP, por exemplo,  $\Delta PMV = PMV_{TARP} - PMV_{Adaptive}$ . Além dos dados horários de PMV, foram analisados os resultados anuais de disponibilidade de conforto térmico usando a métrica TCA (ATZERI et al., 2016).

Os coeficientes de convecção, a carga térmica e o conforto térmico foram analisados ao longo de uma semana de verão e uma semana de inverno, considerando os dados horários em contraponto à temperatura interna na mesma superfície. Essa análise possibilitou uma relação mais detalhada entre os três parâmetros. As semanas selecionadas correspondem aos períodos extremos de verão e inverno identificados no arquivo climático: 19 a 23 de fevereiro e 3 a 7 de setembro, respectivamente.

Devido à similaridade nos resultados para diferentes orientações da fachada, apenas os gráficos referentes ao modelo com fachada Oeste são apresentados para algumas análises. Os gráficos com os resultados para todas as orientações podem ser encontrados no Apêndice D.

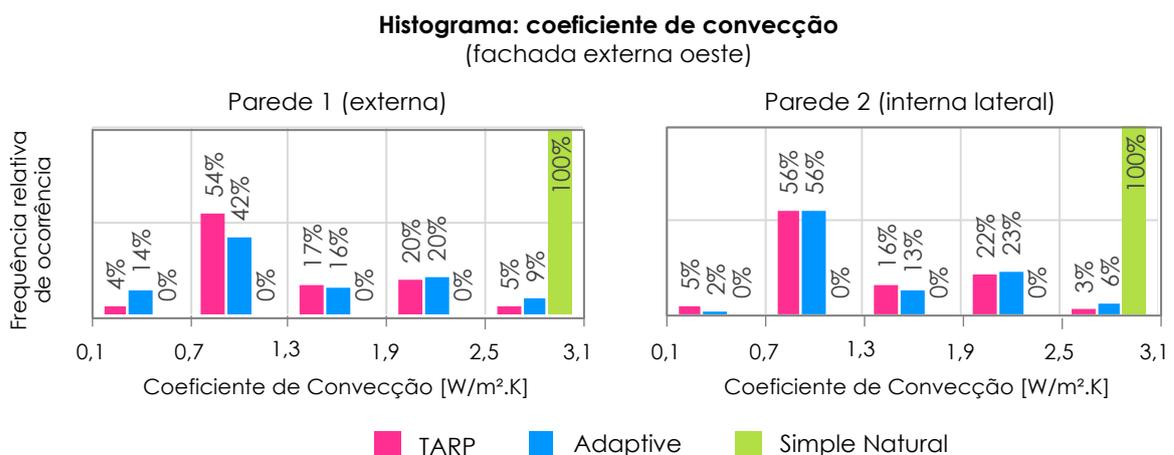
As hipóteses de similaridade e diferença entre os resultados obtidos com os diferentes algoritmos de convecção interna, foram averiguados estatisticamente por meio de análise de variância (ANOVA) com um nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). A escolha do tipo de ANOVA foi baseada na verificação da normalidade dos dados. Quando os dados apresentaram distribuição normal, utilizou-se a ANOVA fator único Fatorial. Caso contrário, foi aplicado o teste ANOVA fator único não-paramétrico de

Kruskal-Wallis. Em todos os experimentos, o algoritmo de convecção é o fator testado em três níveis: (1) TARP, (2) *Adaptive* e (3) *Simple Natural*. As variáveis dependentes foram descritas ao longo da análise de resultados. Todos os testes estatísticos foram conduzidos conforme descrito no método do primeiro estudo desta seção (ver em 3.3.1.1).

### 3.3.3.2 Resultados

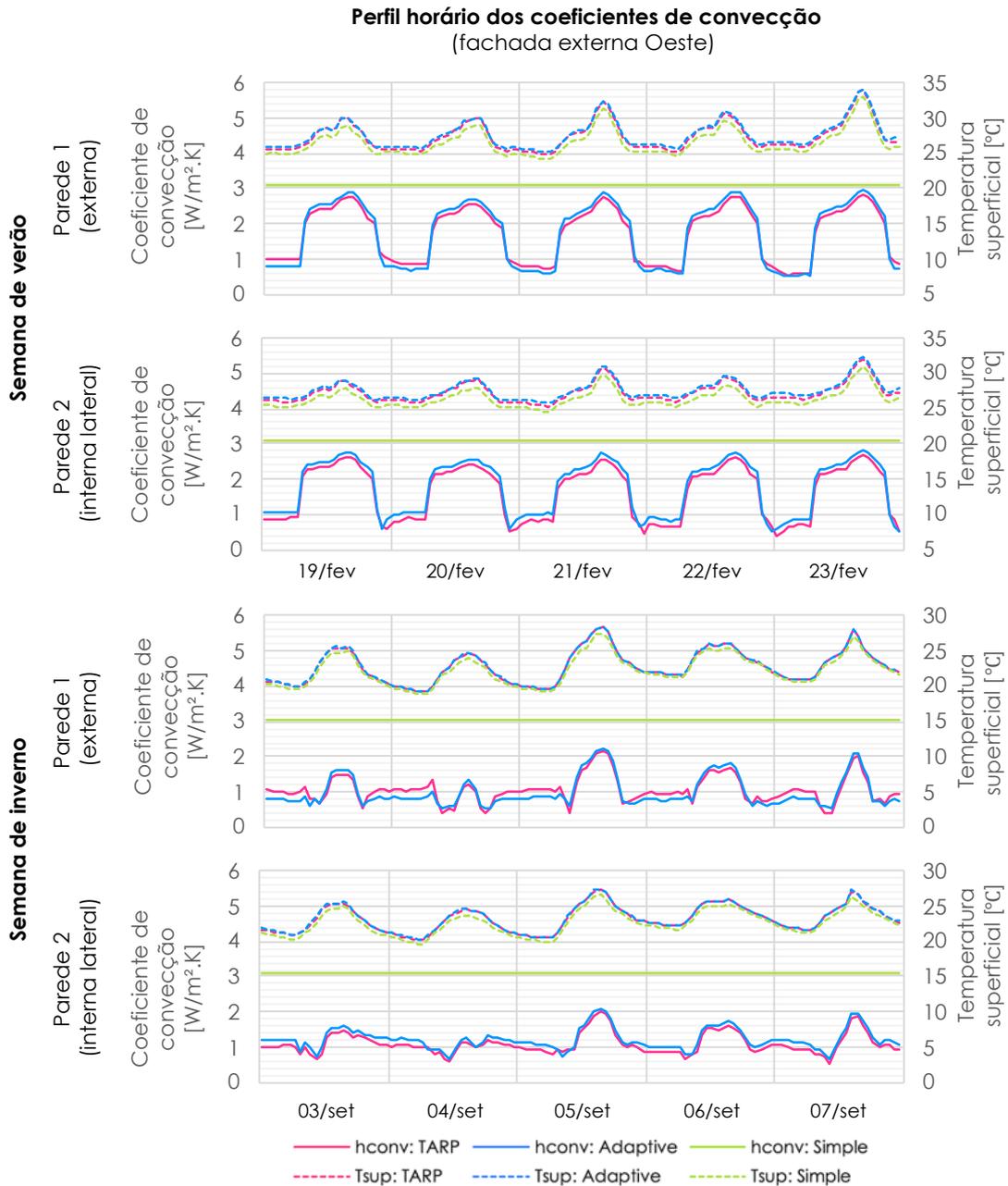
Os histogramas mostram a frequência relativa de ocorrência horária do coeficiente de convecção em duas superfícies internas, calculados por cada algoritmo (Figura 48). Essa análise considerou todas as horas do ano. Observa-se que o valor fixo definido pelo algoritmo *Simple Natural* é sempre superior aos calculados pelos outros algoritmos. Enquanto o *Simple Natural* possui um coeficiente fixo de 3,076 W/m<sup>2</sup>.K para superfícies verticais, tanto o TARP quanto o *Adaptive* calcularam coeficientes entre 0,7 W/m<sup>2</sup>.K e 1,3 W/m<sup>2</sup>.K em aproximadamente metade das horas do ano. Com base na equação que descreve a contribuição da convecção nas superfícies no balanço térmico do ar – equação (26), isso significa que, nesse modelo de sala, a contribuição daquela superfície é cerca de três vezes maior ao utilizar o *Simple Natural* durante metade do ano. Os algoritmos TARP e *Adaptive* demonstraram aparente similaridade nos coeficientes calculados.

Figura 48 - Histograma anual da frequência relativa de ocorrência horária do coeficiente de convecção: modelo Oeste



A vista disto, analisou-se o perfil horário dos coeficientes de convecção para uma semana extrema de verão e uma semana extrema de inverno (Figura 49).

Figura 49 - Perfil horário dos coeficientes de convecção e da temperatura interna das paredes 1 (externa) e 2 (interna lateral): semanas extremas de verão e inverno - Oeste



Em todas as situações, o coeficiente fixo do algoritmo *Simple Natural* é constantemente superior aos coeficientes calculados pelos demais algoritmos, com uma diferença de até 2,70 W/m<sup>2</sup>.K. Os coeficientes calculados com TARP e *Adaptive* seguem um padrão semelhante, com diferenças horárias de até 0,31 W/m<sup>2</sup>.K. Nota-se que esta variação tem um leve impacto na temperatura das superfícies. Com o algoritmo *Simple Natural*, a temperatura nas superfícies foi de 0,2 a 1,5 °C mais baixa em comparação com os outros algoritmos. Entre TARP e *Adaptive*, essa diferença não ultrapassou 0,5 °C no verão e 0,2 °C no inverno.

Os coeficientes e temperaturas superficiais horários foram submetidos a testes estatísticos para verificar a hipótese de diferença ou similaridade entre eles para cada uma dessas semanas. Cada experimento contou com uma amostra de  $N=360$ , sendo 120 em cada nível (correspondentes às horas de cinco dias).

Inicialmente, os coeficientes de convecção foram analisados (Tabela 18). Por meio do teste Shapiro-Wilk, não foi possível assumir a normalidade dos dados ( $p<0,001$ ) em nenhum dos casos. Portanto, realizaram-se testes ANOVA fator único não-paramétrico de Kruskal-Wallis. Para ambas as semanas extremas e ambas as superfícies, demonstra-se forte evidência ( $p<0,001$ ) contra a hipótese de igualdade entre os algoritmos de convecção. Isso indica que a escolha do algoritmo de convecção teve um impacto significativo na estimativa do coeficiente de convecção.

Tabela 18 - Testes ANOVA fator único não-paramétrico da influência do algoritmo no cálculo do **coeficiente de convecção** nas paredes externa e interna nas semanas extremas de verão (19-23/fevereiro) e inverno (03-07/setembro) : modelo Oeste

Superfície	Semana	Teste de normalidade (Shapiro-Wilk)		Teste ANOVA fator único não-paramétrico (Kruskal-Wallis)		
		W	p	$X^2$	df	p
Parede 1 (externa)	Verão	0,920	<0,001	248,55	2	<0,001
	Inverno	0,848	<0,001	253,78	2	<0,001
Parede 2 (interna lateral)	Verão	0,920	<0,001	252,34	2	<0,001
	Inverno	0,867	<0,001	257,14	2	<0,001

Realizou-se uma comparação em pares aplicando o teste de Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (Tabela 19). Nesta análise, as hipóteses de igualdade são verificadas entre pares. Essa análise permite determinar se todos os grupos são diferentes entre si ou se apenas um grupo difere dos demais. Em todos os casos, houve evidência muito forte contra a igualdade entre os algoritmos ( $p<0,01$ ), exceto na parede externa no período de verão, onde foi observada pouca ou nenhuma evidência contra a igualdade entre os coeficientes calculados por TARP e *Adaptive*. Esses resultados estatísticos corroboram as deduções obtidas a partir da análise da frequência de ocorrência dos coeficientes horários ao longo do ano em relação ao *Simple Natural* e aos demais algoritmos.

Em seguida, buscou-se entender se a diferença observada na temperatura superficial das paredes, resultante da variação significativa nos coeficientes calculados, pode ser considerada relevante (Tabela 20). Utilizou-se o teste ANOVA fator único não-paramétrico de Kruskal-Wallis, uma vez que a normalidade dos dados

não pôde ser assumida em nenhum dos casos ( $p < 0,001$ ). Da mesma forma que nos coeficientes de convecção, observou-se evidência muito forte contra a hipótese de igualdade entre as temperaturas superficiais calculadas pelos diferentes algoritmos de convecção, com exceção da parede externa na semana de inverno.

Tabela 19 - Teste de comparação em pares da influência do algoritmo de convecção no cálculo do **coeficiente de convecção** nas paredes externa e interna nas semanas extremas de verão (19-23/fevereiro) e inverno (03-07/setembro) : modelo Oeste

		Parede 1 (externa)				Parede 2 (interna lateral)			
		Verão		Inverno		Verão		Inverno	
		W	p	W	p	W	p	W	p
TARP	- Adaptive	0,14	0,994	-4,75	0,002	4,05	0,012	6,09	<0,001
TARP	- Simple	20,24	<0,001	20,24	<0,001	20,24	<0,001	20,24	<0,001
Adaptive	- Simple	20,24	<0,001	20,24	<0,001	20,24	<0,001	20,24	<0,001

Tabela 20 - Testes ANOVA fator único não-paramétrico da influência do algoritmo no cálculo da **temperatura superficial** nas paredes externa e interna nas semanas extremas de verão (19-23/fevereiro) e inverno (03-07/setembro) : modelo Oeste

Superfície	Semana	Teste de normalidade (Shapiro-Wilk)		Teste ANOVA fator único não-paramétrico (Kruskal-Wallis)		
		W	p	X <sup>2</sup>	df	p
Parede 1 (externa)	Verão	0,889	<0,001	30,08	2	<0,001
	Inverno	0,960	<0,001	3,31	2	0,191
Parede 2 (interna lateral)	Verão	0,891	<0,001	64,50	2	<0,001
	Inverno	0,966	<0,001	8,07	2	0,018

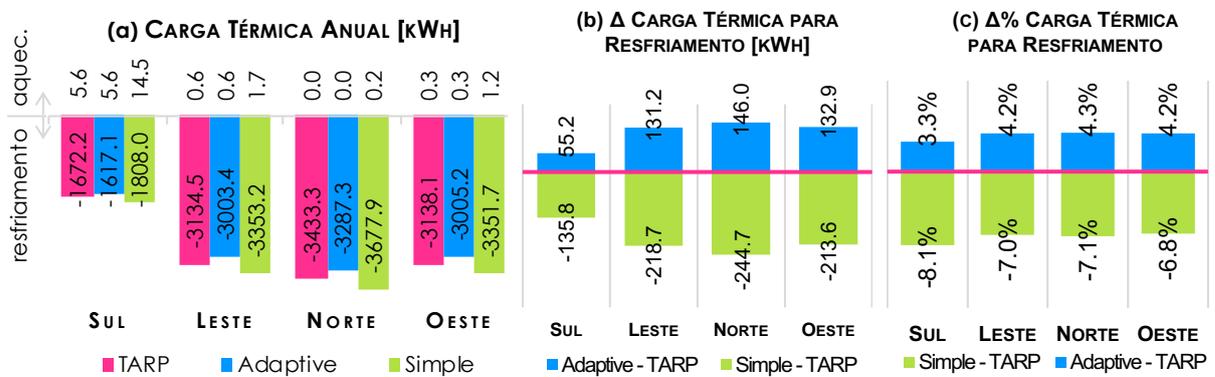
Foi realizado o teste de comparação em pares (Dwass-Steel-Critchlow-Fligner) para as duas semanas (Tabela 21). Novamente, foi encontrada evidência muito forte contra a igualdade do *Simple Natural* tanto com o TARP quanto com o *Adaptive*. No geral, verificou-se pouca ou nenhuma evidência contra a hipótese de igualdade nas temperaturas superficiais entre TARP e *Adaptive*. Exceto pela Parede 2, onde foi encontrada forte evidência contra a igualdade das temperaturas entre esses dois algoritmos.

Tabela 21 - Teste de comparação em pares da influência do algoritmo de convecção no cálculo da **temperatura superficial** nas paredes externa e interna nas semanas extremas de verão (19-23/fevereiro) e inverno (03-07/setembro) : modelo Oeste

		Parede 1 (externa)				Parede 2 (interna lateral)			
		Verão		Inverno		Verão		Inverno	
		W	p	W	p	W	p	W	p
TARP	- Adaptive	2,56	0,116	0,34	0,970	3,41	0,042	0,44	0,949
TARP	- Simple	-5,51	<0,001	-2,07	0,309	-8,33	<0,001	-3,28	0,054
Adaptive	- Simple	-7,31	<0,001	-2,35	0,219	-10,61	<0,001	-3,64	0,027

Tendo em vista a variação significativa do coeficiente de convecção calculado para um mesmo ambiente dependendo do algoritmo selecionado, é importante analisar o impacto desta variação nas condições térmicas do ambiente. Inicialmente, a demanda anual de carga térmica foi analisada (Figura 50), com foco na carga térmica para resfriamento, pois essa demanda é predominante em relação à carga térmica para aquecimento.

Figura 50 - Demanda anual de carga térmica: (a) total, sendo positivo para aquecimento e negativo para resfriamento; (b) diferença absolutas e (c) diferença percentual para resfriamento em relação ao TARP.



Observou-se que o modelo com orientação da fachada Sul apresentou menor carga térmica para resfriamento e maior carga para aquecimento em comparação com as demais orientações. Como resultado, essa orientação também apresentou diferenças absoluta e percentual em relação ao TARP divergindo das outras orientações.

A carga térmica para resfriamento estimada foi sempre menor ao usar o algoritmo *Adaptive* e maior ao usar o *Simple Natural* (Figura 50a), sendo que a diferença máxima entre estes algoritmos foi de 391 kWh/ano para um mesmo modelo (orientação Norte). A diferença percentual na demanda de carga térmica entre o TARP e o *Simple Natural* variou entre 6,8% (Oeste) e 8,1% (Sul), e entre 3,3% (Sul) e 4,3% (Norte) em comparação com o *Adaptive* (Figura 50c). Em valores absolutos, a diferença em relação ao TARP chega a 244,7 kWh por ano (Figura 50b – *Simple Natural*, Norte), ou aproximadamente 10,2 kWh/m<sup>2</sup> por ano (considerando a área da sala de 24 m<sup>2</sup>).

Procurou-se avaliar se as diferenças observadas podem ser consideradas significativas, especialmente ao longo do ano. Para tanto, foi realizado um teste ANOVA fator único para verificar a hipótese de diferença e similaridade na demanda diária de carga térmica ao longo do ano. Foi realizado um experimento por orientação solar, e tamanho da amostra total de cada experimento foi de  $N=783$ . Para cada nível (algoritmo de convecção) foram considerados 261 valores, correspondente aos dias do ano em que há ocupação.

A normalidade dos dados foi testada e constatou-se que a distribuição dos dados não era normal em nenhuma das orientações ( $p < 0,01$ ). Portanto, foi realizado o teste ANOVA fator único não-paramétrico de Kruskal-Wallis (Tabela 22). Demonstrou-se pouca ou nenhuma evidência contra a hipótese de igualdade entre os algoritmos de convecção ( $p \geq 0,10$ ) no ambiente com fachada Sul. Isso indica que a escolha do algoritmo não influenciou significativamente a demanda diária de carga térmica. Nos ambientes com fachada Leste e Oeste, houve evidência sugestiva contra a hipótese de igualdade entre os algoritmos de convecção ( $0,01 \leq p < 0,10$ ), enquanto no ambiente Norte, houve evidência muito forte contra essa hipótese ( $p < 0,01$ ).

Ao comparar os pares de algoritmos (Tabela 23), observou-se evidência apenas contra a igualdade entre os algoritmos *Adaptive* e *Simple Natural*, sendo essa evidência muito forte para a orientação Norte e sugestiva para as orientações Leste e Oeste. Além disso, verificou-se evidência sugestiva contra a igualdade na carga térmica entre os algoritmos TARP e *Simple Natural* na orientação Norte.

Tabela 22 - Teste ANOVA fator único não-paramétrico da influência do algoritmo de convecção na carga térmica diária no período de um ano

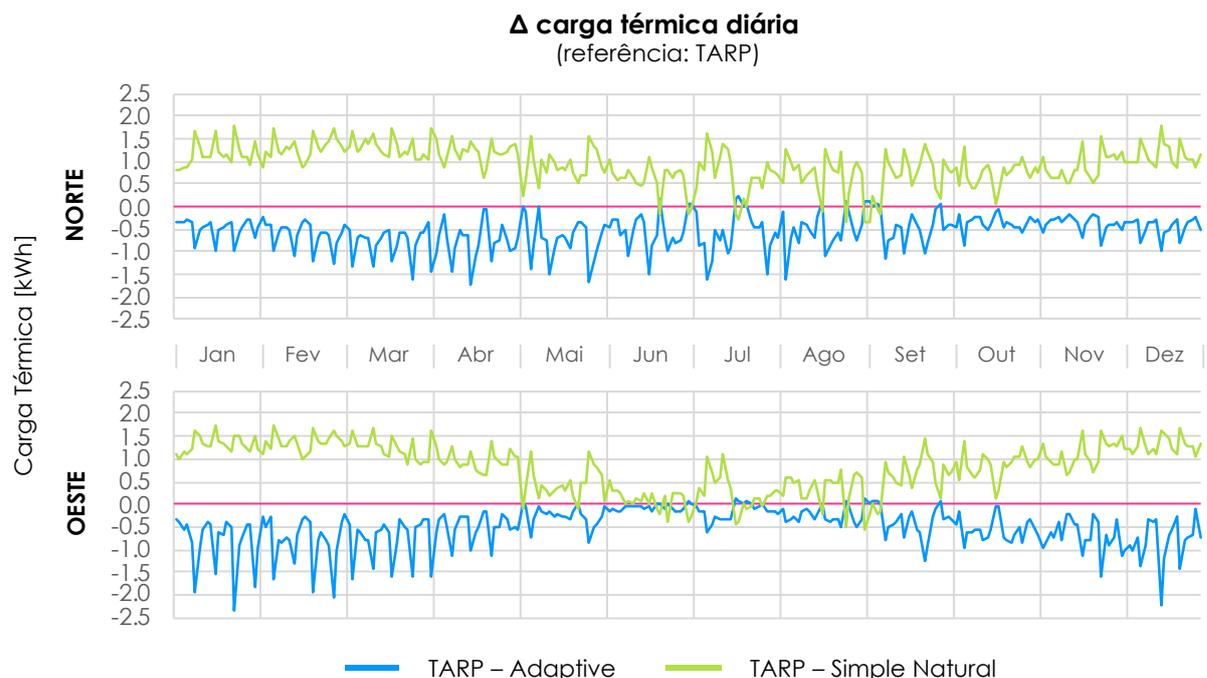
Experimento	Teste de normalidade (Shapiro-Wilk)		Teste ANOVA fator único não-paramétrico (Kruskal-Wallis)		
	W	p	X <sup>2</sup>	df	p
Sul	0,952	<0,001	2,52	2	0,284
Leste	0,970	<0,001	4,83	2	0,090
Norte	0,995	0,01	13,80	2	0,001
Oeste	0,987	<0,001	5,52	2	0,063

Tabela 23 - Teste de comparação em pares (Dwass-Steel-Critchlow-Fligner) da influência do algoritmo de convecção na carga térmica diária no período de um ano

		Sul		Leste		Norte		Oeste	
		W	p	W	p	W	p	W	p
TARP	- Adaptive	0,76	0,853	1,25	0,648	1,94	0,355	1,32	0,619
TARP	- Simple	-1,53	0,527	-1,93	0,362	-3,26	0,055	-2,10	0,299
Adaptive	- Simple	-2,16	0,280	-3,03	0,081	-5,18	<0,001	-3,23	0,058

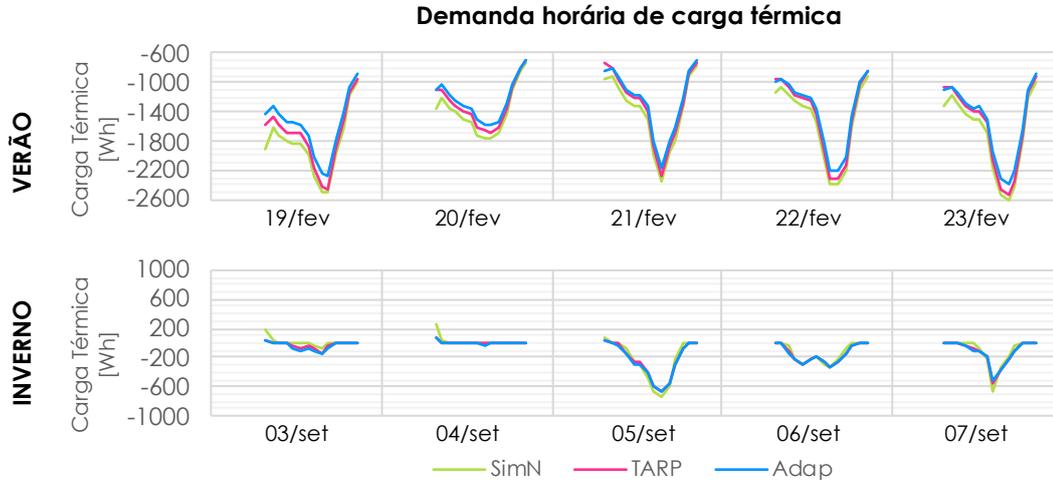
Entende-se que a diferença no resultado do teste ANOVA entre as orientações de fachada ocorreu devido à variação na distribuição ao longo do ano. Ao analisar o perfil anual de carga térmica, observa-se que o modelo com fachada Norte tende a apresentar uma demanda de carga térmica mais uniformemente distribuída ao longo do ano (Figura 51). Nas demais orientações há uma redução significativa durante o período de inverno, principalmente na fachada Sul. Constatou-se também que quanto menor a carga térmica, menor é a diferença entre os algoritmos. Dessa forma, enquanto a diferença entre os algoritmos é significativamente menor nas semanas de inverno na fachada Sul, essa diferença se mantém ao longo de todo o período na fachada Norte.

Figura 51 - Perfil anual da diferença na carga térmica diária entre os algoritmos de convecção (dias ocupados): modelos Norte e Oeste



Buscou-se compreender como o uso de diferentes algoritmos de convecção impacta na carga térmica em escala horária, analisando as semanas de verão e inverno. Para essa análise, foi selecionado o modelo com fachada Oeste. Os perfis de carga térmica, comparando os três algoritmos de convecção são apresentados na Figura 52.

Figura 52 - Perfil semanal de carga térmica horária: semanas extremas de verão (19-23/fevereiro) e inverno (03-07/setembro): modelo Oeste



No período de inverno, foi observada uma variação significativamente reduzida entre os algoritmos. A diferença mais relevante ocorre no momento em que o sistema de condicionamento de ar inicia a operação e a carga térmica acumulada durante a noite é dissipada. Já no verão, nota-se uma tendência de maior demanda de carga térmica para resfriamento no modelo com *Simple Natural* em comparação com os demais algoritmos. A diferença máxima entre os algoritmos foi de 445 Wh, registrado às 8h de 19 de fevereiro, entre o *Simple Natural* e o *Adaptive*.

Para testar a hipótese de igualdade na carga térmica horária em relação ao algoritmo de convecção, realizaram-se dois testes estatísticos de análise de variância, sendo um para cada semana e considerando apenas o período ocupado. A distribuição dos dados não pôde ser assumida como normal ( $p < 0,001$ ). Portanto, foram realizados testes ANOVA não-paramétrico de Kruskal-Wallis (Tabela 24).

Tabela 24 - Testes ANOVA fator único não-paramétrico da influência do algoritmo no cálculo horário da carga térmica nas semanas extremas de verão (19-23/fevereiro) e inverno (03-07/setembro): modelo Oeste

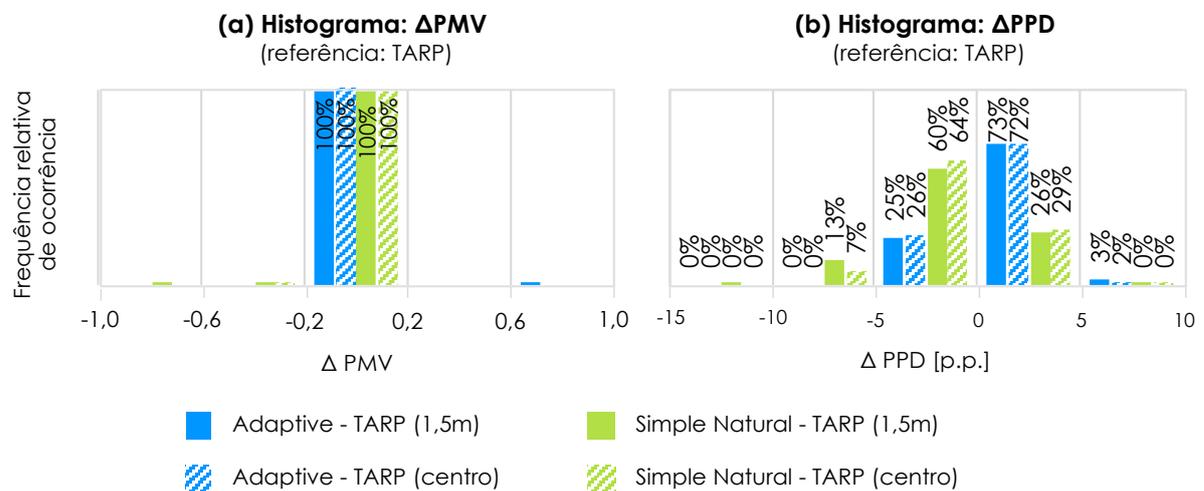
Experimento	Semana	Teste de normalidade (Shapiro-Wilk)		Teste ANOVA fator único não-paramétrico (Kruskal-Wallis)		
		W	p	X <sup>2</sup>	df	p
Carga térmica	Verão	0,957	<0,001	4,92	2	0,085
	Inverno	0,769	<0,001	3,33	2	0,189

Na semana de inverno, não houve evidências significativas contra a hipótese de igualdade entre os algoritmos de convecção ( $p > 0,10$ ). Por outro lado, na semana de verão, verificou-se evidência sugestiva contra essa hipótese. Ou seja, a escolha

do algoritmo de convecção não teve um impacto significativo na demanda horária de carga térmica durante o inverno, mas influenciou levemente no período de verão, corroborando com a análise visual das Figura 51 e Figura 52.

A frequência relativa de ocorrência da diferença horária nos índices de conforto térmico (PMV e PPD) ao comparar o uso de diferentes algoritmos de convecção nas superfícies internas é exemplificada na Figura 53 pelo modelo com fachada Oeste. Valores negativos indicam que os modelos em que o TARP foi utilizado apresentaram maior PMV ou PPD.

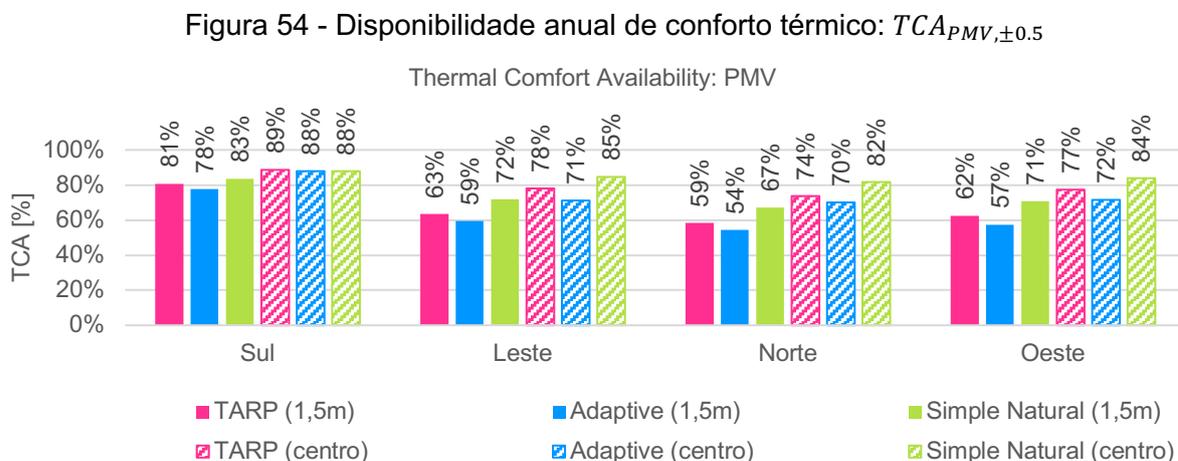
Figura 53 - Histograma de frequência relativa de ocorrência da diferença nos índices horários de conforto térmico: (a) PMV e (b) PPD: modelo Oeste



Independentemente da posição no ambiente, os modelos configurados com o algoritmo *Adaptive* ou *Simple Natural* apresentaram diferenças horárias de até 0,2 na escala PMV em comparação aos modelos configurados com TARP em 99% a 100% do período ocupado. Ao analisar os histogramas do PPD, observa-se uma tendência de que o uso do *Adaptive* resulte em um maior desconforto em relação ao TARP em 74% a 76% do tempo (entre 0 e 10 p.p. de diferença). Por outro lado, os modelos configurados com *Simple Natural* tendem a apresentar um menor desconforto em relação ao TARP em 71% a 73% do tempo.

A disponibilidade anual de conforto térmico também foi avaliada. A Figura 54 apresenta a disponibilidade de conforto térmico anual com base no índice PMV. Nos modelos com fachada Sul, observa-se pouca diferença entre os algoritmos de convecção. A maior diferença ocorre no ponto a 1,5 m da janela, entre o *Adaptive* e o *Simple Natural*, com uma diferença de 5 p.p. Nas demais orientações, os modelos

com *Adaptive* tendem a resultar na menor disponibilidade de conforto anual, enquanto os modelos com o *Simple Natural* apresentam os maiores percentuais.

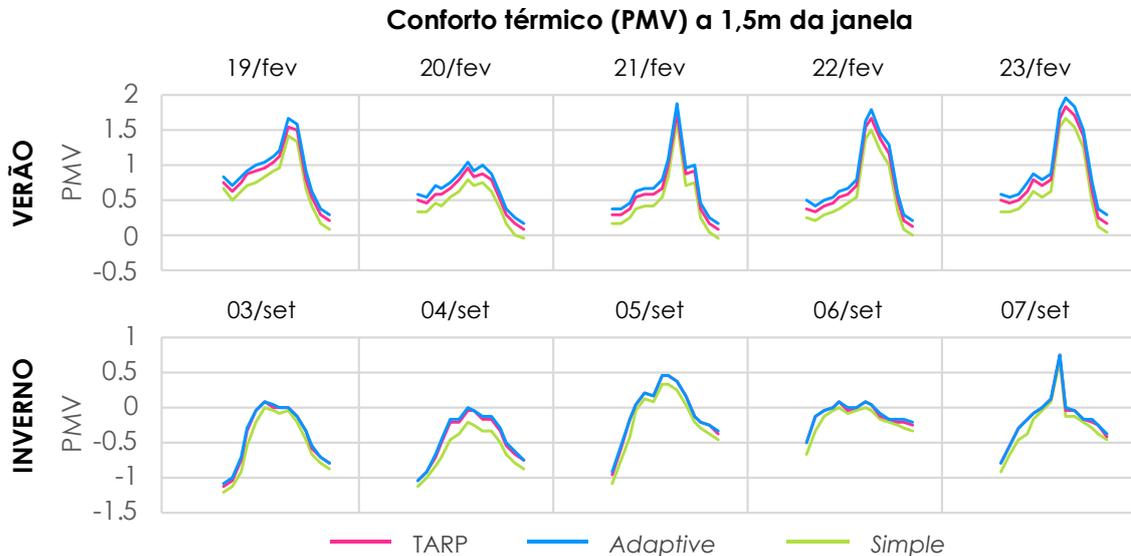


Embora o histograma tenha mostrado diferenças reduzidas no PMV horário entre os algoritmos de convecção, os modelos simulados com o *Simple Natural* resultaram em até 14% a mais do tempo em conforto em comparação com os simulados com o *Adaptive* (Leste, centro e Oeste, a 1,5m da janela). Na prática, uma diferença de 14% a menos de disponibilidade anual de conforto térmico equivale a um mês e meio de ocupação do edifício em desconforto. Quando se utiliza simulação de edifícios para regulamentações de energia e eficiência, essa diferença se torna relevante. Neste caso, a escolha pelo algoritmo de convecção pode alterar significativamente a avaliação do conforto térmico.

Considerando a discrepância entre o histograma horário e a disponibilidade anual de conforto térmico, procurou-se entender o que ocorre na escala horária. Foram realizadas análises nas mesmas semanas de verão e inverno. Também nessa análise, o modelo com fachada Oeste e o ponto a 1,5 m da janela foram selecionados para representar a análise. Os perfis diários de conforto, comparando os três algoritmos de convecção, são apresentados na Figura 55.

Neste ponto no ambiente, o modelo com o algoritmo *Simple Natural* tende a proporcionar uma condição mais resfriada do que os demais algoritmos em ambas as semanas, com as maiores divergências entre *Simple Natural* e *Adaptive*. A diferença horária é consistente com os histogramas apresentados na Figura 53, com uma diferença máxima de 0,3 na escala PMV durante esses períodos. Entre o TARP e o *Adaptive*, essa diferença é inferior a 0,1 na maioria das horas.

Figura 55 - Índice PMV de conforto térmico a 1,5 m da janela: perfis das semanas extremas de verão (19-23/fevereiro) e inverno (03-07/setembro): modelo Oeste



O indicador TCA, que avalia a disponibilidade de conforto térmico, se baseia em limites fixos de conforto e sua conformidade a cada hora do período analisado. Uma diferença de 0,1 no PMV é suficiente para alterar a classificação de conforto naquele horário. Na Figura 55, pode-se observar que em diversos momentos os perfis de conforto transpassam ou ficam próximos dos limites de conforto definidos neste estudo (PMV entre 0,5 e -0,5).

Os valores de PMV para a semana de verão foram transcritos na Tabela 25. As células sombreadas destacam os horários em que pelo menos um algoritmo resultou em um PMV até 0,5, enquanto outro algoritmo está acima desse limite, indicando discrepância na qualificação do conforto térmico entre os algoritmos. Nas células sombreadas em verde, o modelo está em condições de conforto, enquanto nas células sombreadas em vermelho, há desconforto.

Verifica-se que aproximadamente 27% das horas ocupadas na semana apresentaram discrepância na condição de conforto, ainda que com uma diferença numérica reduzida. Extrapolando essa diferença para o restante do ano, é possível compreender por que a diferença na disponibilidade anual de conforto térmico chegou a 14%, mesmo com uma diferença horária reduzida entre os algoritmos.

Tabela 25 - Índices PMV horário (semana de verão, modelo Oeste, ponto a 1,5 m da janela). Destaque para os horários em que a condição de conforto varia entre algoritmos de convecção

	19/fev.			20/fev.			21/fev.			22/fev.			23/fev.		
	T	A	S	T	A	S	T	A	S	T	A	S	T	A	S
08:00	0.8	0.8	0.7	0.5	0.6	0.4	0.3	0.4	0.2	0.4	0.5	0.3	0.5	0.6	0.4
09:00	0.6	0.7	0.5	0.5	0.6	0.3	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.2	0.5	0.5	0.3
10:00	0.8	0.8	0.6	0.6	0.7	0.5	0.4	0.5	0.2	0.4	0.5	0.3	0.5	0.6	0.4
11:00	0.9	0.9	0.7	0.6	0.7	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.5	0.3	0.6	0.7	0.5
12:00	0.9	1.0	0.8	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.4	0.5	0.6	0.4	0.8	0.9	0.6
13:00	1.0	1.0	0.8	0.8	0.9	0.6	0.6	0.7	0.4	0.6	0.7	0.4	0.7	0.8	0.6
14:00	1.0	1.1	0.9	0.9	1.0	0.8	0.7	0.8	0.5	0.7	0.8	0.5	0.8	0.9	0.6
15:00	1.1	1.2	1.0	0.8	0.9	0.7	1.0	1.1	0.8	1.5	1.6	1.4	1.7	1.8	1.5
16:00	1.6	1.7	1.4	0.9	1.0	0.7	1.8	1.9	1.6	1.7	1.8	1.5	1.8	2.0	1.7
17:00	1.5	1.6	1.3	0.8	0.9	0.6	0.9	1.0	0.7	1.4	1.5	1.2	1.7	1.8	1.5
18:00	0.8	0.9	0.7	0.5	0.6	0.4	0.9	1.0	0.8	1.2	1.3	1.0	1.4	1.5	1.2
19:00	0.5	0.6	0.4	0.3	0.4	0.2	0.4	0.5	0.2	0.5	0.6	0.4	0.6	0.7	0.5
20:00	0.3	0.4	0.2	0.2	0.2	0.0	0.2	0.2	0.0	0.2	0.3	0.1	0.3	0.4	0.1
21:00	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2	0.0	0.1	0.2	-0.1	0.1	0.2	0.0	0.2	0.3	0.0

T: TARP

A: Adaptive

S: Simple Natural

Dentro dos limites de conforto

Fora dos limites de conforto

A fim de testar a hipótese de igualdade estatística no conforto térmico entre os algoritmos de convecção, realizaram-se testes ANOVA para as duas semanas analisadas. A distribuição dos dados não pôde ser assumida como normal ( $p < 0,001$ ), portanto, foram executados testes ANOVA fator único não-paramétrico de Kruskal-Wallis (Tabela 26). Os resultados mostraram forte evidência contra a hipótese de igualdade entre os algoritmos de convecção na semana de verão ( $p < 0,01$ ) e evidência sugestiva na semana de inverno ( $0,05 \leq p < 0,10$ ). Isso indica que a escolha de pelo menos um dos algoritmos de convecção resultou em diferenças significativas no conforto térmico durante o período de verão em relação aos outros algoritmos.

Tabela 26 - Testes ANOVA fator único não-paramétrico da influência do algoritmo no cálculo horário do índice PMV nas semanas extremas de verão (19-23/fevereiro) e inverno (03-07/setembro): modelo Oeste

Experimento	Semana	Teste de normalidade (Shapiro-Wilk)		Teste ANOVA fator único não-paramétrico (Kruskal-Wallis)		
		W	p	X <sup>2</sup>	df	p
Conforto térmico (ponto: 1,5m)	Verão	0,917	<0,001	12,53	2	0,002
	Inverno	0,971	<0,001	4,82	2	0,090

Ao realizar comparações em pares para a semana de verão (Tabela 27), verificou-se forte evidência contra a hipótese de igualdade no conforto térmico horário

entre os algoritmos *Adaptive* e *Simple Natural* ( $p < 0,01$ ), além de evidência sugestiva contra a igualdade entre os algoritmos TARP e *Simple Natural*. Portanto, pode-se afirmar que o uso do algoritmo de convecção *Simple Natural* resultou em diferenças estatisticamente significativas em relação aos demais algoritmos durante a semana de verão, no que diz respeito ao conforto térmico horário calculado.

Tabela 27 - Teste de comparação em pares (Dwass-Steel-Critchlow-Fligner) da influência do algoritmo de convecção no conforto térmico horário no período de uma semana de verão (19-23/fevereiro): modelo Oeste

		W	p
TARP	- <i>Adaptive</i>	1,15	0,697
TARP	- <i>Simple</i>	-3,08	0,075
<i>Adaptive</i>	- <i>Simple</i>	-4,87	0,002

### 3.3.3.3 Discussão

O coeficiente de convecção fixo definido pelo algoritmo *Simple Natural* é constantemente superior aos demais algoritmos e, conseqüentemente, estima uma demanda de carga térmica maior do que os demais algoritmos. Como demonstrado pela equação que descreve a contribuição da convecção nas superfícies no balanço térmico do ar, um coeficiente de convecção mais elevado resulta em maior transferência de calor entre superfícies internas e ar da zona térmica. Considerando as superfícies em contato com o meio externo, que tende a ser aquecida durante o dia pela radiação solar, o aumento da convecção transporta mais calor para o ar da zona, acarretando em maior demanda de resfriamento para o sistema de condicionamento.

Por outro lado, com o coeficiente de convecção mais elevado, a velocidade na perda de calor sensível no corpo humano para o ar zona térmica também é aumentado. Dessa forma, o uso do algoritmo *Simple Natural* estima uma condição de conforto térmico mais resfriado do que os demais algoritmos ainda que gere maior carga térmica para resfriamento. No contexto de um clima temperado com demanda predominante de resfriamento, essa tendência resultou em maior disponibilidade de conforto térmico ao longo do ano.

Apesar da reduzida demanda de carga térmica para aquecimento, notou-se que os modelos TARP e *Adaptive* resultaram em demanda semelhante, ao passo que com o algoritmo *Simple Natural* apresentou uma demanda em média quatro vezes maior. Em períodos com demanda para resfriamento, observa-se tendência oposta.

O aumento na convecção com o *Simple Natural* amplia a transferência de calor do ar para as superfícies, principalmente do vidro, aumentando a demanda.

Apesar de as diferenças no PMV horário entre os algoritmos de convecção serem reduzidas, com uma diferença máxima de 0,3 entre *Adaptive* e *Simple Natural*, observou-se uma diferença de até 14 pontos percentuais na disponibilidade anual de conforto entre esses dois algoritmos. Essa divergência ocorre em horários em que o índice de conforto térmico está próximo aos limites estabelecidos. Portanto, mesmo com divergências reduzidas na escala horária, a escolha do algoritmo de convecção das superfícies internas pode ter um impacto significativo na previsão das condições de conforto em um determinado local e momento. Conseqüentemente, a disponibilidade anual de conforto térmico de um ambiente pode divergir significativamente dependendo do algoritmo escolhido.

Quanto à abordagem adaptativa, entende-se que ela poderia mais efetiva em uma situação de condicionamento híbrido, com alternância entre condicionamento mecânico e ventilação natural. Entretanto, ambientes com essas características estão fora do escopo desta pesquisa, de forma que mais estudos seriam necessários para averiguar a abordagem adaptativa nestes espaços.

No caso do escritório estudado, que é condicionado artificialmente durante todo o período de ocupação, sem velocidade relevante do ar, o algoritmo adaptativo do *EnergyPlus* selecionou sempre o mesmo modelo de cálculo para uma mesma superfície. No entanto, é importante ressaltar que o modelo escolhido foi diferente do utilizado no TARP para o cálculo do coeficiente de convecção.

## 4 APRESENTAÇÃO DO *FRAMEWORK*

Neste capítulo, é apresentado o *framework* desenvolvido com base nos resultados e discussões do capítulo anterior. Este *framework* visa auxiliar no processo de avaliação preditiva das condições de conforto térmico em ambientes de trabalho climatizados com fachadas envidraçadas por meio de simulação termodinâmica.

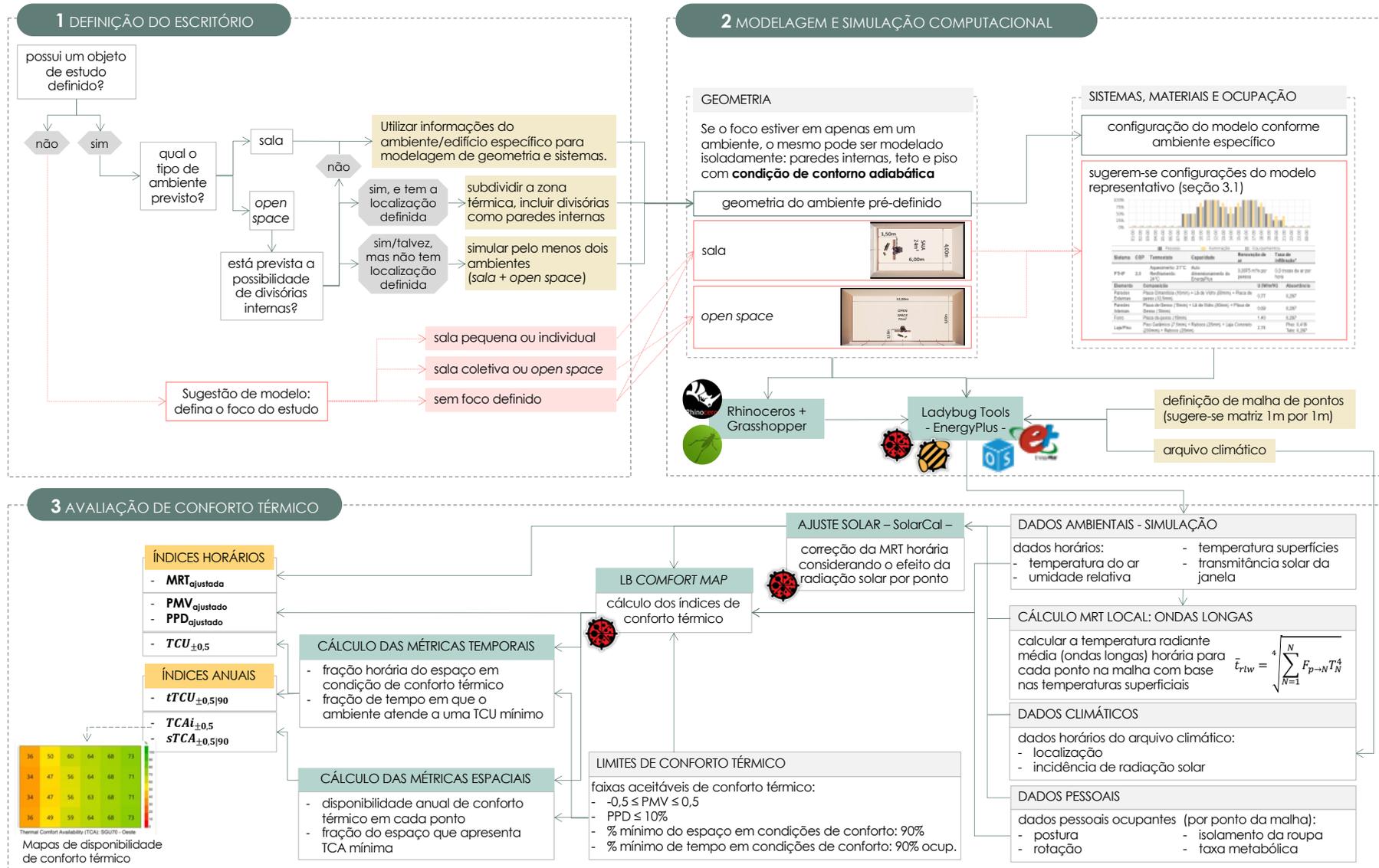
Conforme abordado no capítulo 3, o processo de avaliação preditiva do conforto térmico por meio de simulação pode ser dividido em três etapas principais. A primeira consiste na definição do objeto de estudo, seguida pela modelagem e simulação computacional das condições térmicas do ambiente. Por fim, é realizado o cálculo dos índices e a avaliação de conforto térmico. O *framework* proposto tem o objetivo de auxiliar nessas três etapas, conforme ilustrado na Figura 56 e explicado a seguir. Embora tenha sido desenvolvido com foco em ambientes de escritório, ele pode ser aplicado a qualquer ambiente climatizado com influência de janelas em que sejam realizadas atividades sedentárias.

### 4.1 DEFINIÇÃO DO ESCRITÓRIO OU OBJETO DE ESTUDO

Caso a avaliação vá ser realizada para um objeto de estudo específico, como um ambiente existente ou um edifício em fase de projeto, é necessário realizar a modelagem incluindo as informações conhecidas sobre o ambiente. No caso de um *open space*, é importante verificar se está prevista a construção de divisórias internas, pois, conforme verificado na seção 3.3.2, a divisão interna do ambiente irá influenciar nas condições de conforto térmico neste tipo de ambiente. Se as divisórias já foram definidas, elas devem ser incluídas no modelo como paredes internas, conforme previsto no projeto. Caso contrário, sugere-se simular pelo menos dois ambientes: um ambiente aberto e uma possível sala individual.

Se o foco for avaliação paramétrica de conforto térmico em ambientes de escritório condicionados no Brasil e não haja um objeto pré-definido, sugerem-se três opções, dependendo do foco do estudo. Essas opções são uma sala individual, um espaço coletivo (*open space*) ou ambos, conforme especificações da seção 3.1.

Figura 56 - Framework para avaliação de conforto térmico por simulação computacional em ambientes sob influência do vidro



□ sugestões para estudo paramétrico de conforto térmico em ambientes de escritório condicionados no Brasil, quando não há objeto de estudo pré-definido.

## 4.2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A revisão da literatura e o desenvolvimento da tese enfatizaram a importância de avaliar o conforto térmico de forma espacial. Em ambientes com amplas áreas envidraçadas, essa abordagem espacial é essencial devido à transparência do vidro e à alta transmitância térmica do sistema, o que invalida a suposição de homogeneidade térmica do ambiente.

O *software EnergyPlus* é amplamente validado para cálculos de transferência de calor em edificações e seus sistemas. Portanto, os estudos de modelagem computacional para estimar o conforto térmico na seção 3.3 foram realizados diretamente no *EnergyPlus*. Entretanto, esse *software* não permite a inclusão de modelos de ajuste solar nem a estimativa de conforto em vários pontos do ambiente. Foram necessárias várias etapas de processamento dos dados obtidos nas simulações para analisar o conforto térmico, conforme ilustrado na Figura 76, no Apêndice C.

O *plugin Ladybug Tools* para *Grasshopper/Rhinoceros* oferece um conjunto de ferramentas que utiliza o *EnergyPlus* como mecanismo para os cálculos de transferência de calor no contexto de análises térmicas de ambientes internos, por meio do *OpenStudio*. O *Ladybug Tools* permite a modelagem e processamento de dados para gerar mapas com a distribuição das condições térmicas do ambiente em planta. Além disso, possui um componente que aplica o *SolarCal*, calculando os índices de conforto térmico com base na temperatura radiante média ajustada devido à exposição do ocupante à radiação solar. Essa integração torna o fluxo de simulações paramétricas e a análise das condições de conforto térmico mais eficientes, além de reduzir o tempo de modelagem, simulação e pós-processamento de dados. Isto posto, o *framework* proposto considera as etapas de modelagem e simulação e de avaliação de conforto térmico realizadas por meio do *Ladybug Tools*.

O ambiente escolhido é modelado no *Rhinoceros/Grasshopper* e no *Ladybug Tools*, seguindo definições da etapa 1 do *framework*. Quando o foco do estudo é um ambiente, o mesmo pode ser modelado isoladamente, com as paredes internas, piso e teto configurados como adiabáticos. Concluiu-se, com base no estudo da seção 3.3.1, que, nesse contexto não há diferença significativa na avaliação de conforto térmico ao simular o ambiente isolado ou o pavimento inteiro. Essa simplificação reduz o tempo de modelagem e simulação.

Caso as informações relacionadas a sistemas, materiais e ocupação não sejam conhecidas ou pré-definidas, sugere-se utilizar as definições propostas na seção 3.1 para ambientes climatizados com atividades sedentárias, como escritórios. Nesta etapa, também é necessário modelar uma malha de pontos. O *Ladybug* possui um algoritmo integrado que utiliza os sensores do *Radiance* em uma grade de pontos, permitindo visualizar os resultados em forma de mapa do ambiente.

Além disso, sugere-se utilizar o algoritmo de convecção TARP nas superfícies internas para ambientes totalmente condicionados e com velocidade do ar desprezível. Para ambientes com condicionamento híbrido ou ventilados naturalmente, outro algoritmo pode se mostrar mais adequado. Entretanto, estudos relacionados a ambientes com estas características precisariam ser realizados. Estudo de Batista, Lamberts e Güths (2011) para uma residência naturalmente ventilada, por exemplo, apresentou o menor desvio em relação aos dados de temperatura das superfícies e do ar medidos in loco com o algoritmo *Simple Natural*.

A simulação térmica é então executada pelo *OpenStudio/EnergyPlus*, gerando dados horários das condições térmicas do ambiente, como temperatura do ar, umidade relativa, temperatura das superfícies e transmitância solar da janela.

#### 4.3 AVALIAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO

Na etapa de avaliação de conforto térmico, os resultados de temperatura das superfícies internas são utilizados para calcular a temperatura radiante média local, levando em consideração as trocas radiantes por ondas longas. A MRT local de ondas longas, a transmitância solar horária da janela, o posicionamento dos ocupantes e dados de radiação solar são utilizadas para corrigir a MRT horária considerando o efeito da radiação solar em cada ponto da malha. Em seguida, os índices de conforto térmico são calculados.

Conforme descrito na seção 2.4.1, existem duas opções para calcular e visualizar espacialmente as condições de conforto térmico no *Ladybug Tools*. O componente “*HB PMV Comfort Map*” gera o índice TCP diretamente. O TCP, calculado com base no PMV e nos limites de conforto térmico determinados pela ASHRAE 55 (2020), é conceitualmente equivalente à métrica TCA com os limites definidos na seção 3.2. Por outro lado, com o “*LB Comfort Map*” é necessário criar uma programação no *Grasshopper* para extrair apenas os resultados das horas ocupadas.

Ainda assim, optou-se pelo uso do componente “*LB Comfort Map*”, pois ele oferece maior controle sobre o modelo de simulação executado no *EnergyPlus*, incluindo informações sobre o ajuste solar aplicado e os parâmetros de conforto considerados. Além disso, o “*LB Comfort Map*” permite acessar os dados de saída horários da simulação, o que não é possível com o “*HB PMV Comfort Map*”.

Os índices de conforto térmico horários ajustados, o PMV e o PPD, são calculados por meio do “*LB Comfort Map*”. Esses cálculos levam em consideração a MRT ajustada, os dados ambientais da simulação e as informações pessoais dos ocupantes. No entanto, uma limitação do “*LB Comfort Map*” é que ele gera os índices para todas as horas do ano, sem distinção entre horários com e sem ocupação. Entretanto, é possível fazer uma programação no próprio modelo para calcular os resultados considerando apenas os períodos de ocupação.

A partir do PMV horário, calcula-se o índice horário de usabilidade do ambiente  $TCU_{\pm 0,5}$ , que é a fração do espaço que apresenta condição de conforto (PMV entre -0,5 e 0,5) em um dado momento. Em seguida, obtém-se o  $tTCU_{\pm 0,5|90}$ , que representa a fração das horas ocupadas durante o ano em que pelo menos 90% do espaço apresenta condição de conforto, ou seja, em que  $TCU \geq 90\%$ . Além disso, com base no PMV horário, calcula-se a disponibilidade de conforto térmico em cada ponto do ambiente ( $TCAi_{\pm 0,5}$ ) ao longo do ano (horas ocupadas) e, em seguida, obtém-se o índice anual  $sTCA_{\pm 0,5}$ , que representa a fração do espaço em que pelo menos 90% do período ocupado apresenta um PMV entre -0,5 e 0,5. Esses índices permitem uma avaliação abrangente das condições de conforto térmico.

O *software* também permite gerar mapas da disponibilidade de conforto térmico (TCA), que mostram a distribuição espacial das condições térmicas. Esses mapas podem ser criados usando índices horários para a análise em momentos específicos ou as médias anuais. No entanto, considera-se que a média anual não é representativa o suficiente, portanto, o TCA é mais adequado na análise anual da distribuição das condições de conforto no espaço.

## 5 APLICAÇÃO DO *FRAMEWORK*

Com base no *framework* apresentado, este capítulo tem como objetivo aplicar a estrutura proposta de modelagem computacional e avaliação de conforto térmico por meio da simulação termodinâmica de desempenho de edifícios.

### 5.1 DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

Como mencionado na introdução, pesquisas anteriores foram conduzidas para compreender o impacto do uso de vidros insulados (IGU) no desempenho termoenergético de edifícios de escritórios com sistema de condicionamento mecânico em diferentes climas brasileiros (PINTO, 2017; PINTO; WESTPHAL, 2016, 2017, 2019a, 2019b, 2021). Nos locais com clima tropical, observou-se desempenho similar entre vidros insulados e não insulados, com uma tendência de melhor desempenho para o sistema IGU. No entanto, nas cidades de clima temperado, o uso de IGU resultou em um desempenho inferior em relação aos vidros não insulados. Concluiu-se que o investimento adicional em vidros insulados não é justificado em termos de desempenho térmico ou economia de energia em edifícios de escritórios. No entanto, tais pesquisas avaliaram o consumo de energia para climatização, mas o potencial de melhoria no conforto térmico interno proporcionado pelos vidros insulados não foi explorado.

Diante disso, o *framework* proposto foi aplicado a um estudo de caso que visa avaliar o potencial de melhoria no conforto térmico ao utilizar vidro insulado duplo em salas de escritórios com amplas áreas de vidro em clima temperado úmido do sul do Brasil.

Para o estudo de caso, foi selecionada a sala de escritório representativa definida na seção 3.1 (Figura 30). As cargas internas, rotinas de ocupação e operação de sistemas, características das pessoas, configuração do sistema de condicionamento de ar e materiais da envoltória também foram definidos de acordo com as descrições apresentadas na seção 3.1. Foi adotado um WWR de 50%.

Com base nos resultados obtidos na seção 3.3 e as considerações expostas no capítulo 4, as seguintes configurações foram aplicadas: todas as superfícies internas foram consideradas adiabáticas, exceto o forro entre sala e *plenum*; não foram inseridas massas térmicas internas, uma vez que o modelo Sala foi selecionado

em vez do *Open Space*; e foi utilizado o algoritmo de convecção TARP nas superfícies internas.

As análises foram realizadas para o clima de Florianópolis, classificado como Cfa de acordo com a escala Köppen-Geiger. Esse clima é caracterizado como temperado, com estações bem definidas, sempre úmido e com verões quentes (KOTTEK et al., 2006). Para as simulações computacionais, foi utilizado o arquivo climático SWERA denominado "BRA\_Florianopolis.838990\_SWERA.epw", disponibilizado no banco de arquivos climáticos do *EnergyPlus* (DOE, 2017).

As etapas de modelagem da sala, simulações e cálculo dos índices de conforto térmico foram executadas no *Ladybug Tools*, versão 1.5.0, em conformidade com as diretrizes apresentadas no *framework* proposto.

Para avaliar o impacto da redução na transmitância térmica nas condições de conforto térmico ao utilizar um sistema de vidro insulado, foram comparados modelos com vidros laminados e vidros insulados duplos com mesmo fator solar final. Três tipos de vidros reais foram selecionados, com fatores solares de aproximadamente 0,3, 0,5 e 0,7. A transmissão de energia solar ( $\tau_e$ ) desses vidros foi ajustada de forma que o fator solar resultante da composição insulada fosse o mesmo do vidro laminado de referência. Essa variação nos fatores solares permitiu analisar isoladamente o impacto da entrada de radiação solar e do isolamento das janelas nas condições de conforto térmico, especialmente próximo às janelas.

O *software WINDOW 7.8* foi utilizado para calcular o fator solar e a transmitância térmica das composições insuladas. Para determinar a  $\tau_e$  do vidro base modificado, foi modelado um sistema de vidro duplo composto pelo vidro base, uma câmara de ar de 12,7 mm e um vidro incolor na parte interna. A  $\tau_e$  foi gradualmente alterada e as propriedades do sistema foram recalculadas até que o fator solar fosse o mesmo do vidro base. Vale ressaltar que, ao aumentar a  $\tau_e$  e manter a mesma reflexão de energia solar, ocorre uma redução na absorção de energia solar pelo vidro.

As propriedades térmicas e ópticas de cada um dos vidros inseridos no modelo de simulação são apresentadas na Tabela 28. A transmitância térmica e a transmissão de energia solar das composições finais dos vidros utilizados em cada modelo são relatadas na Tabela 29. Contudo, esses valores são fornecidos apenas como referência e consideram a radiação solar na direção normal à superfície do vidro. Os vidros são inseridos individualmente no modelo computacional no *Ladybug*, e o

*EnergyPlus* ajusta as propriedades de transmissão e reflexão com base na inclinação solar a cada *timestep* de cálculo.

Tabela 28 - Propriedades térmicas e ópticas dos vidros individuais

ID	Esp. (mm)	$\tau_e$	$\rho_e$	$\rho_i$	TL	RL e	RL i	$\epsilon_e$	$\epsilon_i$	Cond.	U (W/m <sup>2</sup> .K)	FS
<b>Vidros laminados*</b>												
SGU 30	8	0,113	0,158	0,201	0,187	0,254	0,207	0,891	0,891	1	5,56	0,306
SGU 50	8	0,356	0,167	0,092	0,379	0,165	0,120	0,846	0,840	1	5,56	0,479
SGU 70	6	0,627	0,096	0,129	0,661	0,127	0,141	0,840	0,821	1	5,60	0,698
<b>Vidro interno da composição insulada*</b>												
Clear 6mm	6	0,78	0,07	0,07	0,88	0,88	0,08	0,08	0,84	0,84	5,60	0,82
<b>Vidros modificados para inserir na composição insulada</b>												
SGU 30 modificado	8	0,225	0,158	0,201	0,299	0,254	0,207	0,891	0,891	1	5,56	0,388
SGU 50 modificado	8	0,480	0,167	0,092	0,503	0,165	0,120	0,846	0,840	1	5,56	0,571
SGU 70 modificado	6	0,770	0,096	0,129	0,804	0,127	0,141	0,840	0,821	1	5,60	0,804

\*propriedades térmicas e ópticas de vidros reais obtidos na biblioteca do *software* WINDOW 7.8 (LBNL, 2022).

Tabela 29 - Resumo das propriedades térmicas das composições finais

ID	Espessura (mm)	U (W/m <sup>2</sup> .K)	Fator Solar
SGU 30	8	5,560	0,306
SGU 50	8	5,600	0,479
SGU 70	6	5,600	0,698
IGU 30	26,7 (8 + 12,7 + 6)	2,708	0,306
IGU 50	26,7 (8 + 12,7 + 6)	2,680	0,480
IGU 70	24,7 (6 + 12,7 + 6)	2,665	0,697

SGU: *Simple Glass Unit* (uma camada de vidro)

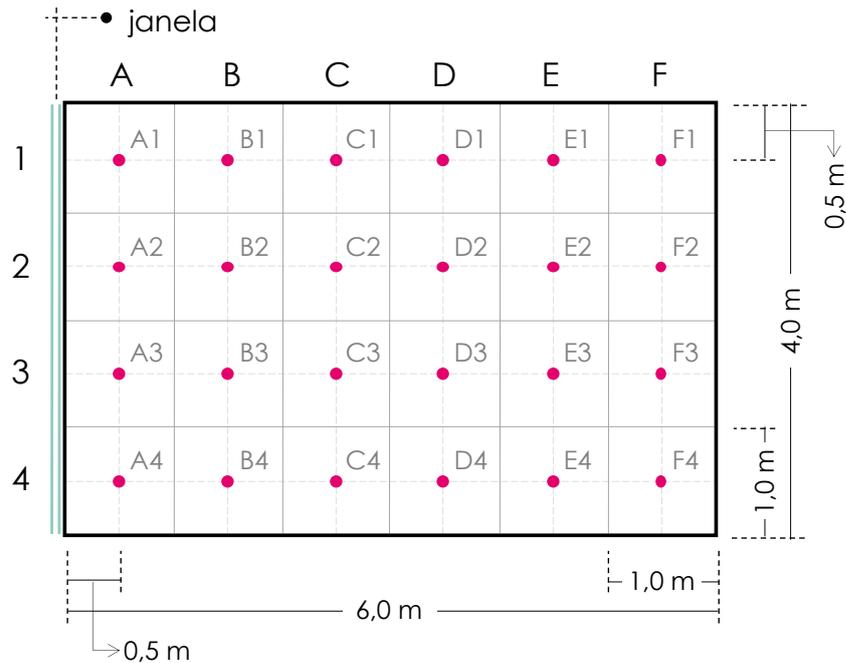
IGU: *Insulated Glass Unit* (múltiplas camadas de vidro intercaladas com câmara de gás)

A avaliação de conforto térmico foi realizada com base nas diretrizes descritas na seção 3.2, utilizando o índice PMV corrigido pelo modelo de ajuste solar *SolarCal*. Primeiramente, foi analisado na escala anual utilizando as métricas espaço-temporais. Foram analisadas a disponibilidade anual de conforto térmico em cada ponto (TCA), a disponibilidade espacial de conforto térmico do ambiente (sTCA) e a usabilidade anual do ambiente em relação ao conforto térmico (tTCU). Os limites de conforto descritos na Tabela 9 foram adotados. Para a avaliação espacial, uma malha de pontos foi inserida no modelo no *Ladybug Tools*. O ambiente foi dividido em 24 pontos, espaçados a cada 1,0 m, conforme ilustrado na Figura 57.

Dados horários de temperatura na superfície interna do vidro e PMV no ponto A2 (à 0,5 m da janela) foram analisados em forma de gráfico de dispersão em relação à temperatura do ar externo e à incidência de radiação solar na face externa da janela.

Essas análises permitiram comparar não apenas a dispersão entre os sistemas SGU e IGU, mas também entre vidros com diferentes fatores solares. Dessa forma, foi possível observar separadamente o impacto da admissão de radiação solar e do isolamento térmico do vidro nas condições de conforto térmico interno.

Figura 57 - Divisão da sala em uma malha para análise espacial de conforto térmico



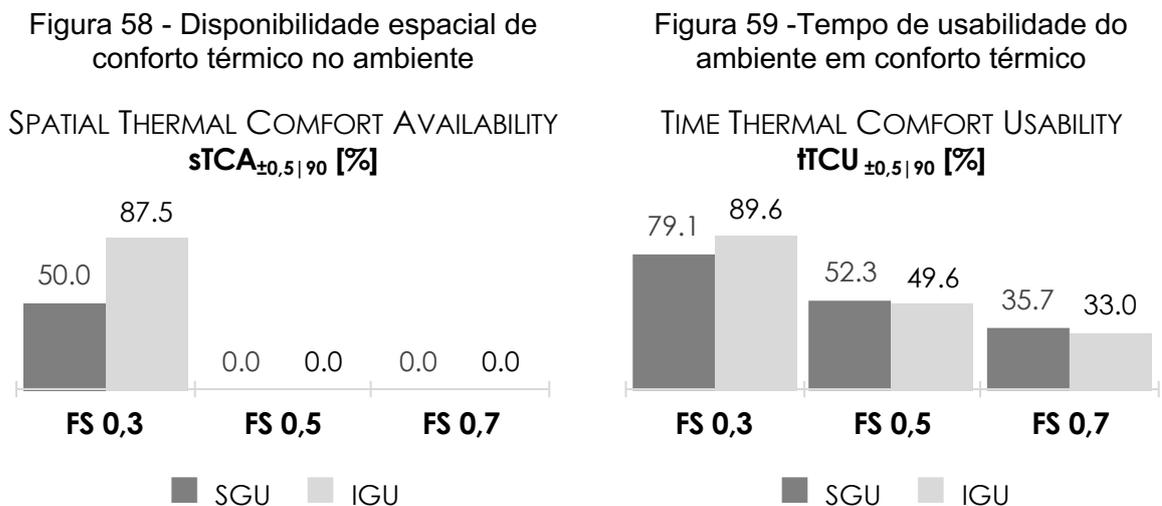
Para a análise dos perfis horários da temperatura na superfície do vidro e da condição de conforto térmico (PMV) no ponto A2, foram selecionados dois períodos de ocupação contínua de cinco dias cada. A escolha desses dias foi baseada no gráfico de dados horários ao longo do ano, considerando os três fatores solares. Priorizaram-se períodos com picos de desconforto térmico por calor e por frio, nos quais houvesse uma maior variação entre os sistemas SGU e IGU. Como período de verão, foi analisada a semana de 22 a 26 de janeiro, e como período de inverno, a semana de 18 a 22 de junho.

## 5.2 RESULTADOS

Inicialmente, realizaram-se análises dos índices anuais de conforto do ambiente, o sTCA e o tTCU. Estes índices caracterizam a disponibilidade espacial e usabilidade em conforto térmico do ambiente, considerando todo o espaço e as horas

ocupadas no período de um ano. A Figura 58 mostra que, com o fator solar mais baixo (0,3), 87,5% do espaço atingiu condições de conforto ( $-0,5 < PMV < 0,5$ ) em pelo menos 90% do período ocupado na sua versão insulada. Já com nos modelos com FS 0,5 e 0,7, não foi observada disponibilidade espacial de conforto térmico (sTCA) durante todo o período. Isso indica que, nessas configurações de janela, nenhum ponto do ambiente atingiu o tempo mínimo (90% do período ocupado) em condições de conforto.

A Figura 59 mostra que pelo menos 90% do espaço apresentou condições de conforto em 89,6% do período ocupado no modelo com vidro IGU30, enquanto esse percentual foi de 33% com o vidro IGU70. Ou seja, estima-se que, com essa configuração de vidro, apenas 33% do período ocupado apresentou condições de conforto térmico em uma fração mínima do ambiente. Nota-se que o vidro insulado proporcionou melhores condições de conforto no ambiente com o FS 0,3 (mais 37,5% do espaço e 10,5% do tempo), enquanto essa relação se inverte com os FS 0,5 e 0,7.



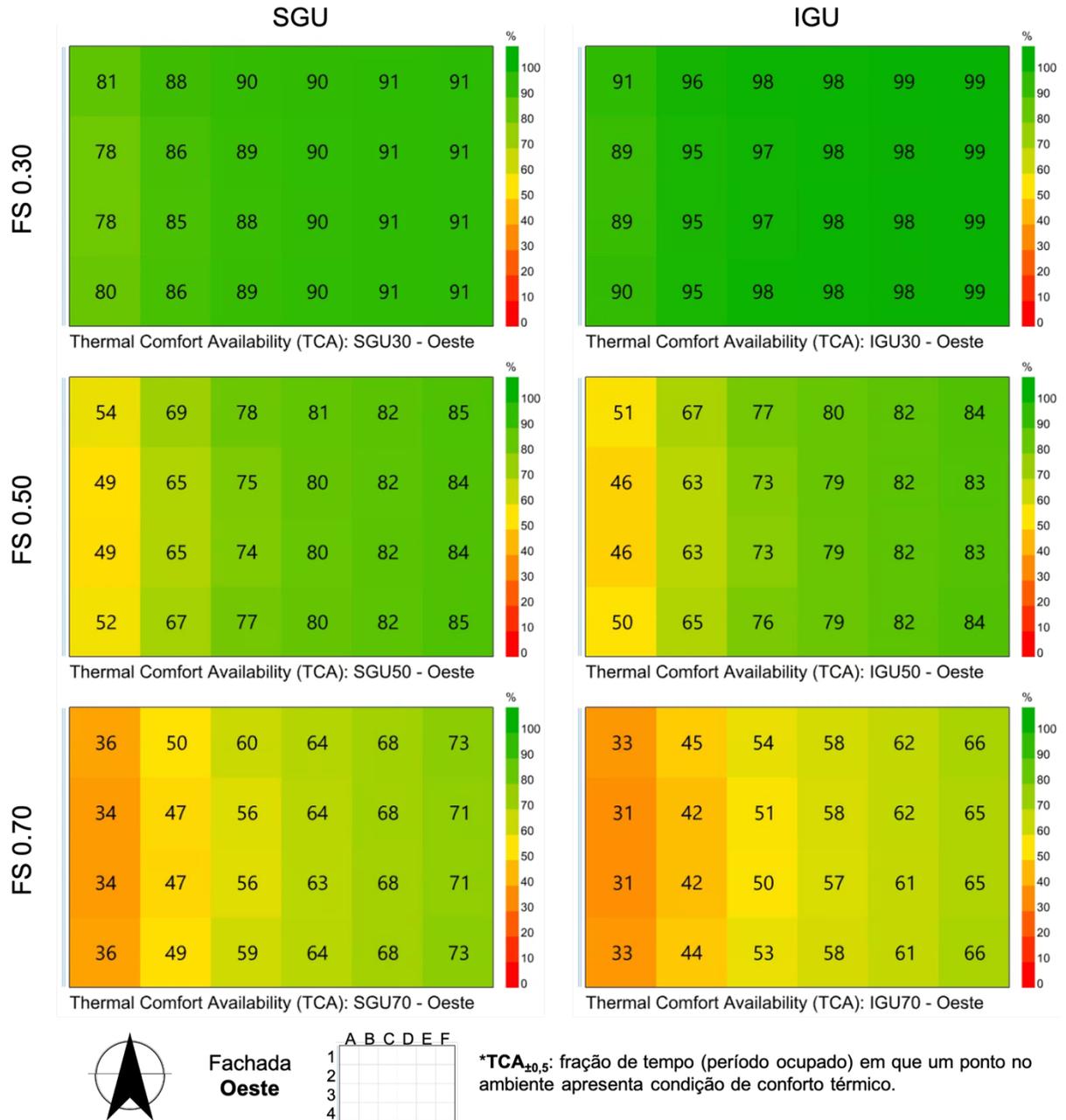
\*sTCA $_{\pm 0,5|90}$ : fração do espaço que apresenta condição de conforto térmico ( $-0,5 < PMV < 0,5$ ) por pelo menos 90% do período ocupado.

\*tTCU $_{\pm 0,5|90}$ : fração de tempo em que pelo menos 90% do espaço apresenta condição de conforto térmico ( $-0,5 < PMV < 0,5$ )

Os mapas de disponibilidade de conforto térmico (Figura 60) demonstram a disponibilidade de conforto térmico em cada ponto do ambiente, considerando as horas ocupadas em um período de um ano. Observa-se que não foi possível alcançar 100% do tempo ocupado em conforto em nenhum dos pontos no ambiente, em nenhuma situação analisada. Além disso, na área mais próxima à janela (0,5 m de distância), não foi possível atingir o mínimo de 90% do período em conforto,

independentemente do fator solar ou da transmitância térmica do vidro. O desconforto ocorre majoritariamente por calor.

Figura 60 - Mapas de disponibilidade de conforto térmico ( $TCA_{\pm 0,5}$ )

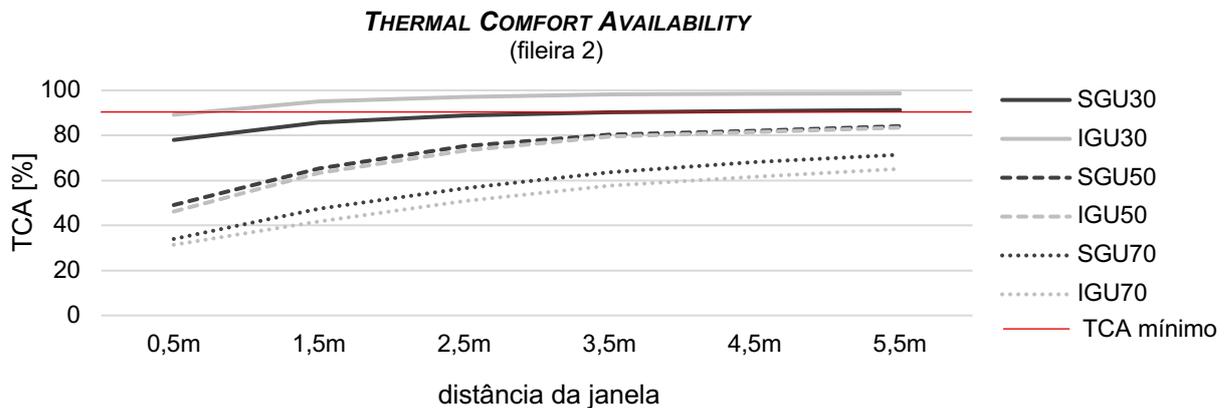


Demonstrou-se que vidros com FS reduzido tendem a promover maior homogeneidade térmica do ambiente. No modelo IGU30, a diferença entre os pontos com maior e menor TCA foi de 10 p.p., enquanto no modelo SGU70, essa diferença foi de 39 p.p. Entre vidros IGU e SGU com o mesmo fator solar, houve pouca variação na homogeneidade. Com FS 0,5, por exemplo, a diferença entre o TCA máximo e

mínimo foi de 35,9 p.p. no SGU e 38 p.p. no IGU. Entende-se, portanto, que a redução da admissão de radiação solar será mais efetiva na promoção de um ambiente com maior homogeneidade térmica.

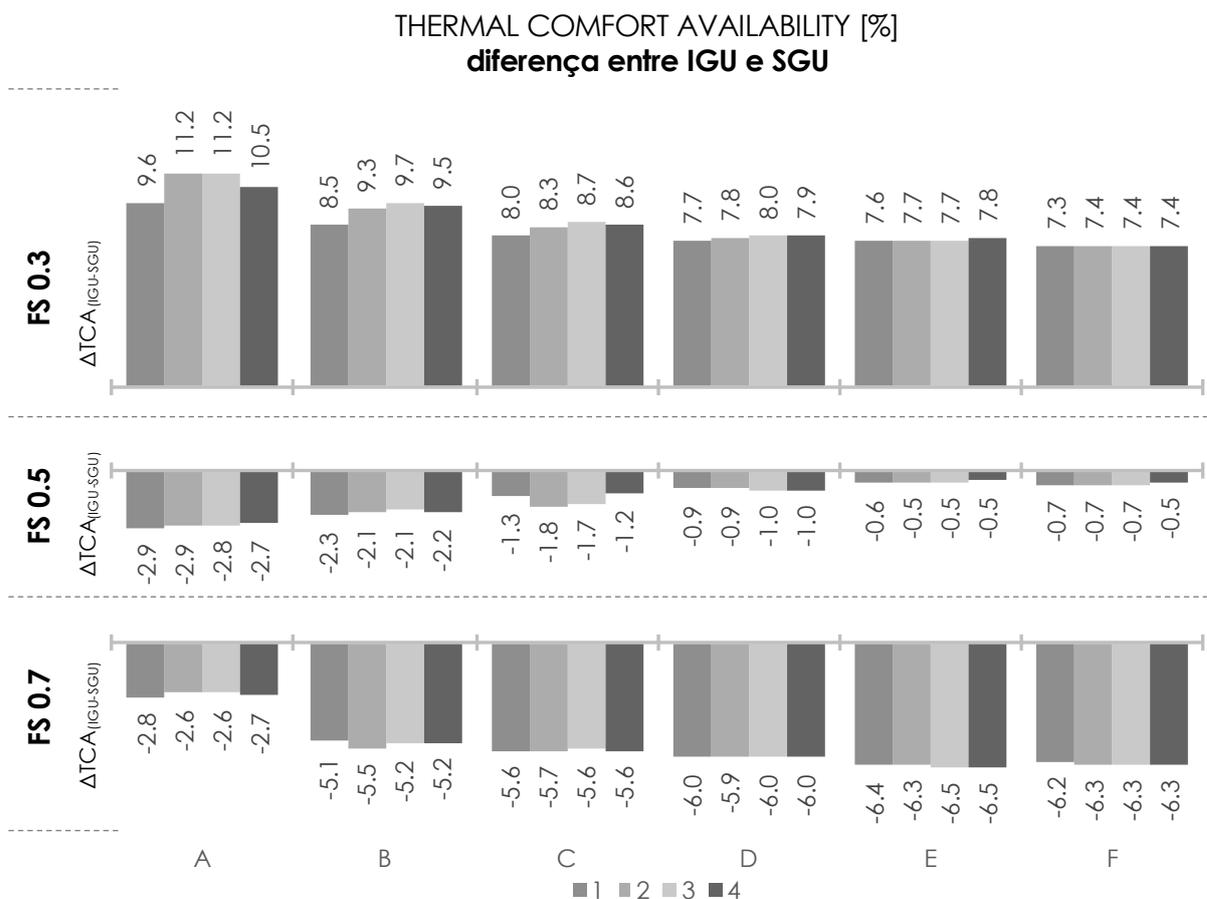
A redução do fator solar melhora significativamente as condições de conforto térmico do ambiente. No ponto mais próximo à janela, o ambiente com IGU30 apresentou um TCA 58 p.p. maior do que o ambiente com IGU70. Essa melhoria é observada em todos os pontos do ambiente, sendo que a diferença mínima foi de 19 p.p. (SGU30 e SGU70, ponto mais distante da janela). Além disso, em todos os modelos, a disponibilidade de conforto térmico aumenta com a distância em relação à janela, como exemplificado pela fileira 2 na Figura 61.

Figura 61 - Disponibilidade de conforto térmico em relação à distância da janela (fileira 2)



O uso do vidro insulado resultou em melhorias nas condições de conforto térmico apenas para o vidro com FS 0,3. Mesmo no fundo da sala, houve um aumento na disponibilidade de conforto de 91% para 99%. Previu-se um maior número de horas em conforto com o uso do vidro insulado em todos os pontos do ambiente no modelo com este fator solar. As diferenças mais significativas ocorreram na linha mais próxima à janela, onde se calculou uma diferença de até 11,2% a mais de horas do ano em conforto com modelo com IGU (Figura 62). Essa diferença representa aproximadamente 400 horas adicionais de conforto nesse ponto, o que equivale a cerca de 29 dias de trabalho. De forma oposta, com FS 0,5 e 0,7, as salas com vidro laminado apresentaram uma maior disponibilidade de conforto em todos os pontos. Com FS 0,5, a diferença chegou a 2,9 p.p. na região mais próxima à janela (Figura 62). Com o FS 0,7, as diferenças maiores ocorreram no fundo da sala (até 6,5 p.p.).

Figura 62 - Diferença no TCA entre IGU e SGU



Essa inversão que ocorre com o aumento do fator solar pode ser atribuída ao efeito estufa causado pelos vidros com alta transmissão solar. Vidros com FS elevado permitem a admissão de uma maior fração da radiação solar incidente na janela, resultando em aquecimento das superfícies internas e emissão de calor em forma de ondas longas, além da influência da radiação direta no ocupante. Por outro lado, quando o vidro admite uma fração menor da radiação solar incidente (FS 0,3), não há sobreaquecimento das superfícies internas e o componente de trocas radiantes tem menor influência no cálculo de conforto térmico. Neste cenário, o sistema de ar condicionado se torna mais eficiente na manutenção do conforto térmico, e o isolamento do IGU em relação às trocas de calor por condução contribui para isolar ainda mais o ambiente do clima externo.

Os resultados horários da temperatura superficial do vidro e das condições de conforto térmico (PMV) foram analisados por meio de gráficos de dispersão considerando a temperatura do ar externo e a intensidade de radiação solar que incide na janela. A análise foi restrita apenas às horas ocupadas.

Observou-se que a temperatura da superfície interna do vidro tende a apresentar menor flutuação quando é utilizado o IGU, tanto em relação à temperatura externa quanto à intensidade de radiação na janela, ao comparar vidros com o mesmo FS (Figura 63). Além disso, nota-se que o uso de um sistema insulado (IGU) reduz a influência do fator solar na flutuação da temperatura do vidro (Figura 64). Vidros com baixo fator solar tendem a alcançar temperaturas internas mais elevadas devido à sua alta absorção solar, mas os picos de temperatura podem ser reduzidos ao utilizar sistema de vidro duplo.

Figura 63 - Gráficos de dispersão da temperatura superficial interna do vidro em relação à temperatura externa e à radiação solar incidente no vidro: comparação entre IGU e SGU por fator solar.

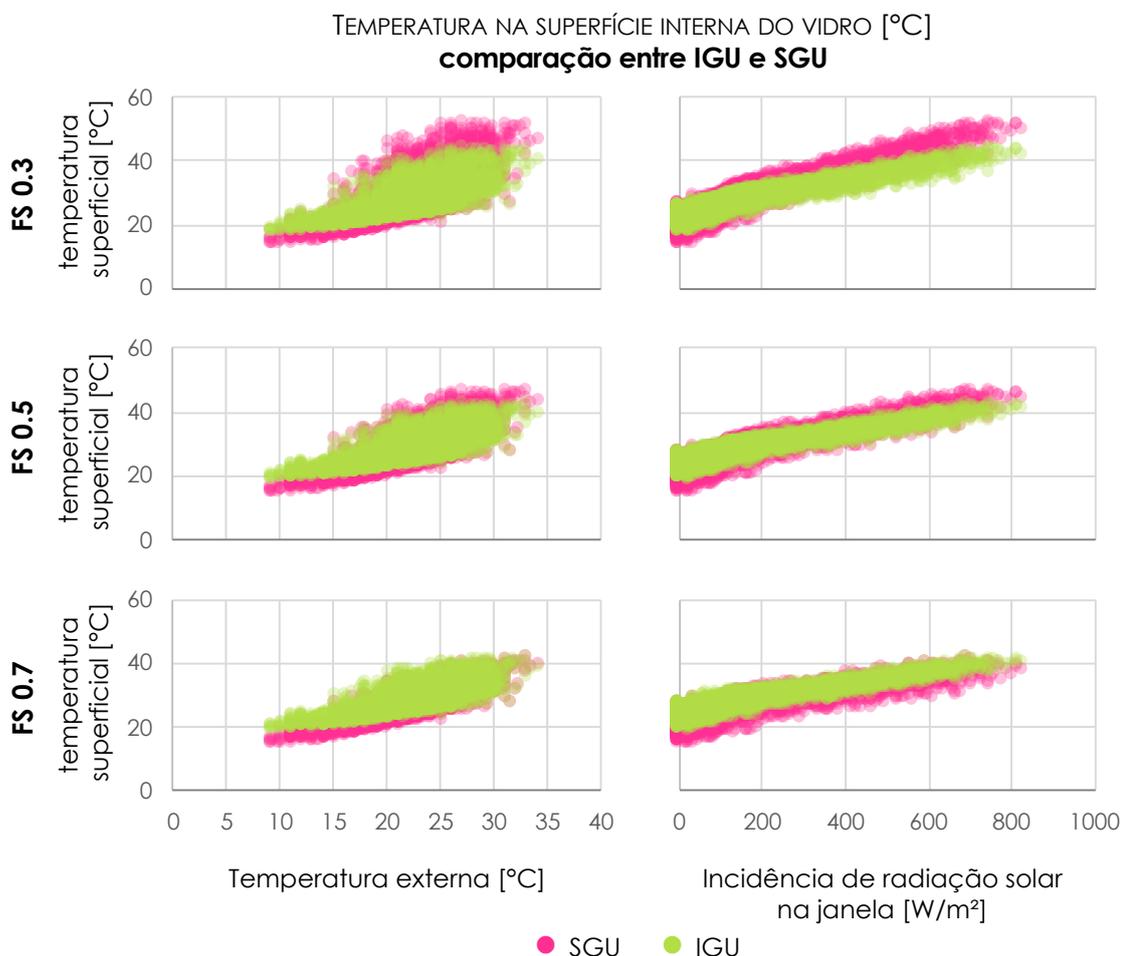
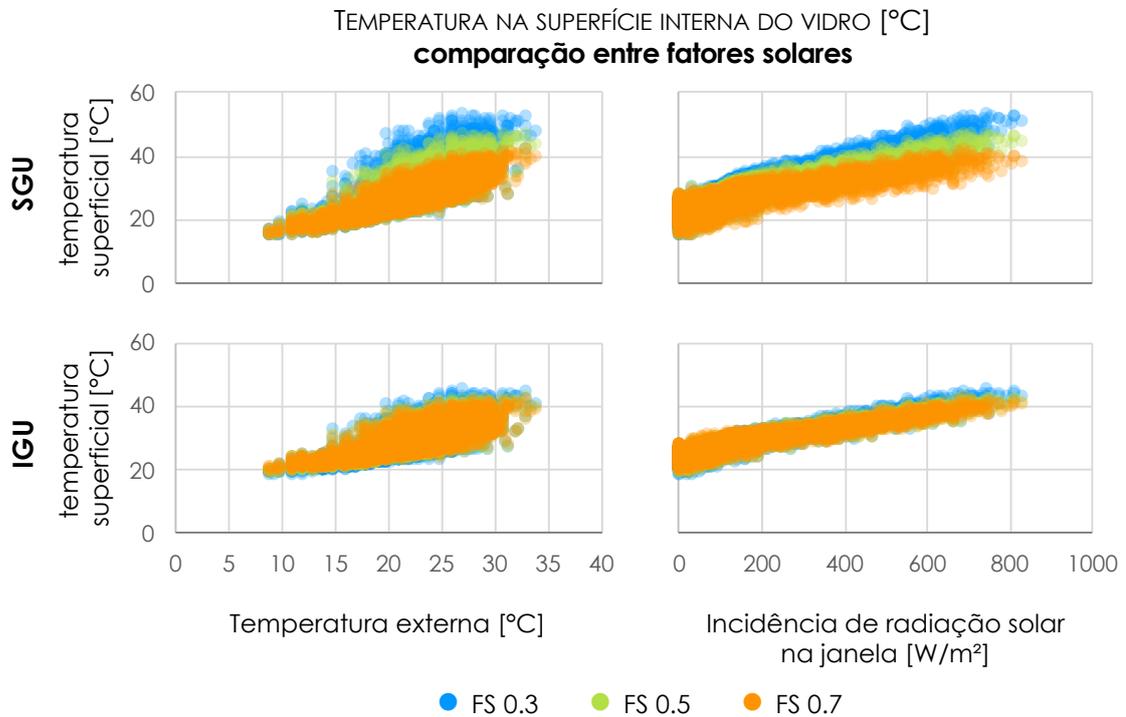


Figura 64 - Gráficos de dispersão da temperatura superficial interna do vidro em relação à temperatura externa e à radiação solar incidente no vidro: comparação entre fatores solares por sistema.



Os resultados horários do PMV foram analisados para um ponto próximo à janela (Figura 65 e Figura 66). No entanto, é importante mencionar que o algoritmo de cálculo do PMV no *Ladybug Tools* permite resultados maiores que 3,0, mesmo que conceitualmente a escala do PMV seja de -3,0 a 3,0. Desse modo, os resultados foram tratados para que todo PMV maior do que 3,0 fosse plotado como 3,0.

As relações observadas na temperatura superficial do vidro se refletem também na previsão de conforto térmico quando se compara o uso do vidro insulado com o vidro simples (Figura 65). Nota-se que, para todos os valores de FS, os ambientes com SGU tendem a apresentar valores negativos de PMV mais distantes da neutralidade (indicando sensação de frio) quando a temperatura do ar externo está abaixo de 20 °C. Esse padrão de comportamento também é verificado quando há baixa incidência de radiação solar, pois o SGU favorece a dissipação do calor por condução através do vidro. Em relação à sensação de calor (PMV acima de 1,0), apenas nos modelos com FS de 0,30 foi observada uma redução nos registros de altos valores de PMV para o vidro insulado em relação ao simples.

Figura 65 - Gráficos de dispersão do PMV em relação à temperatura externa e à radiação solar incidente no vidro: comparação entre IGU e SGU por fator solar

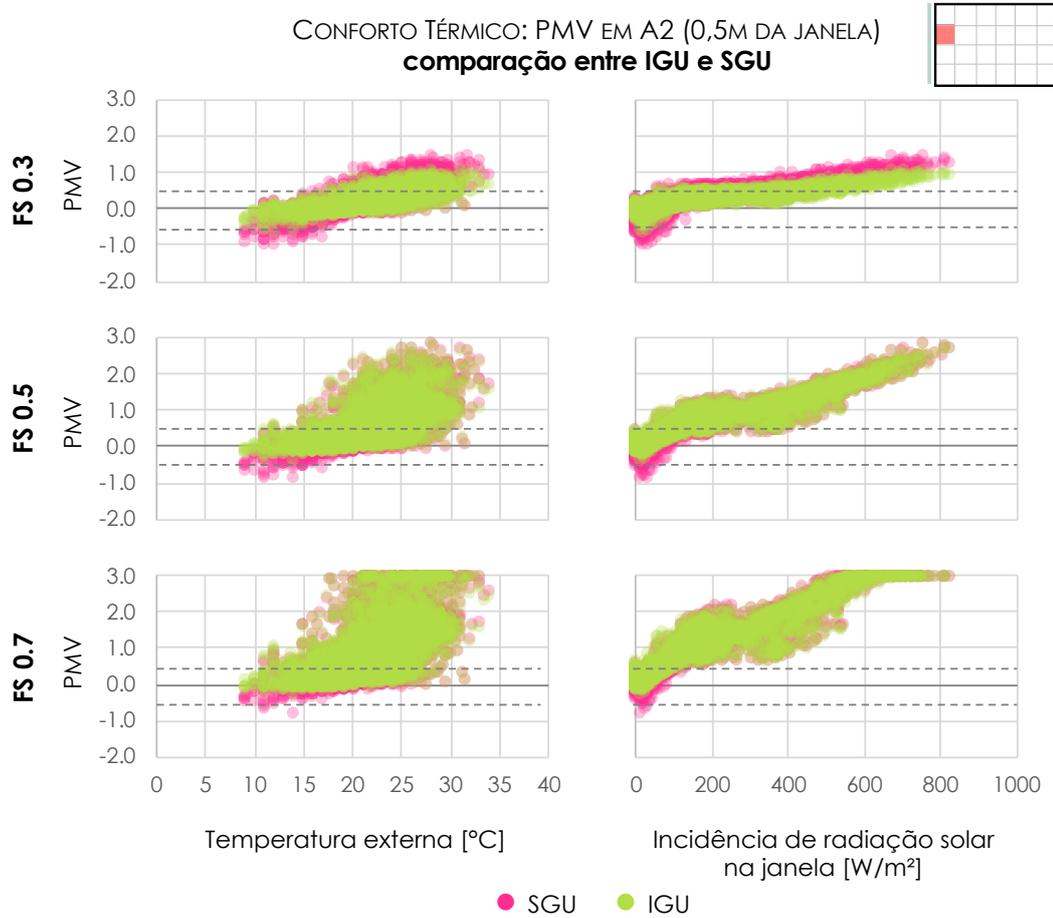
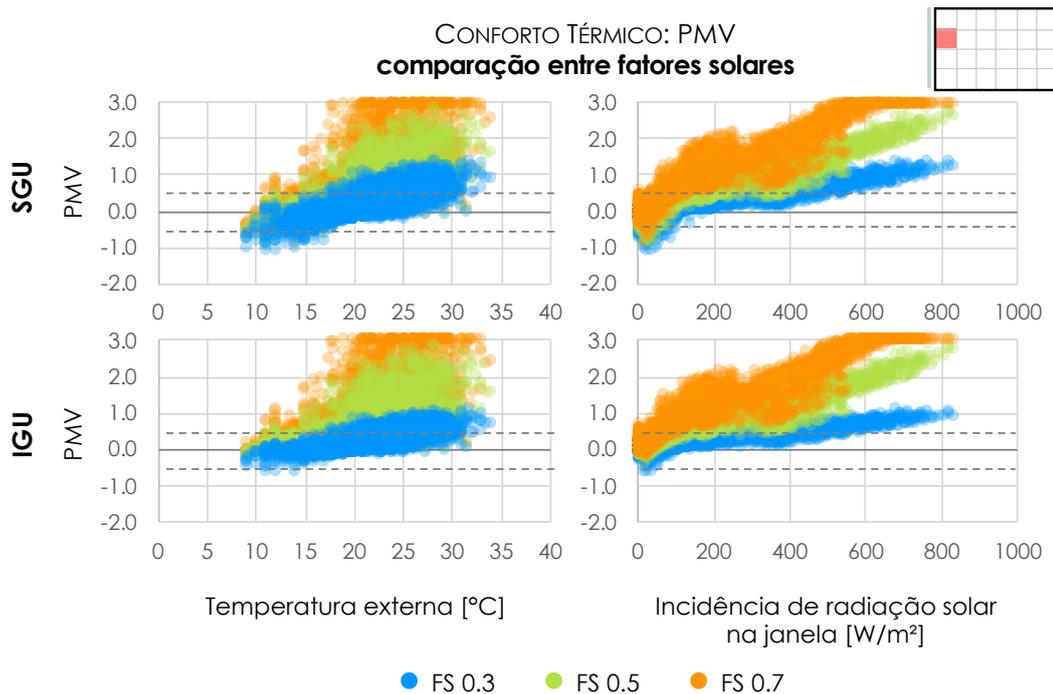


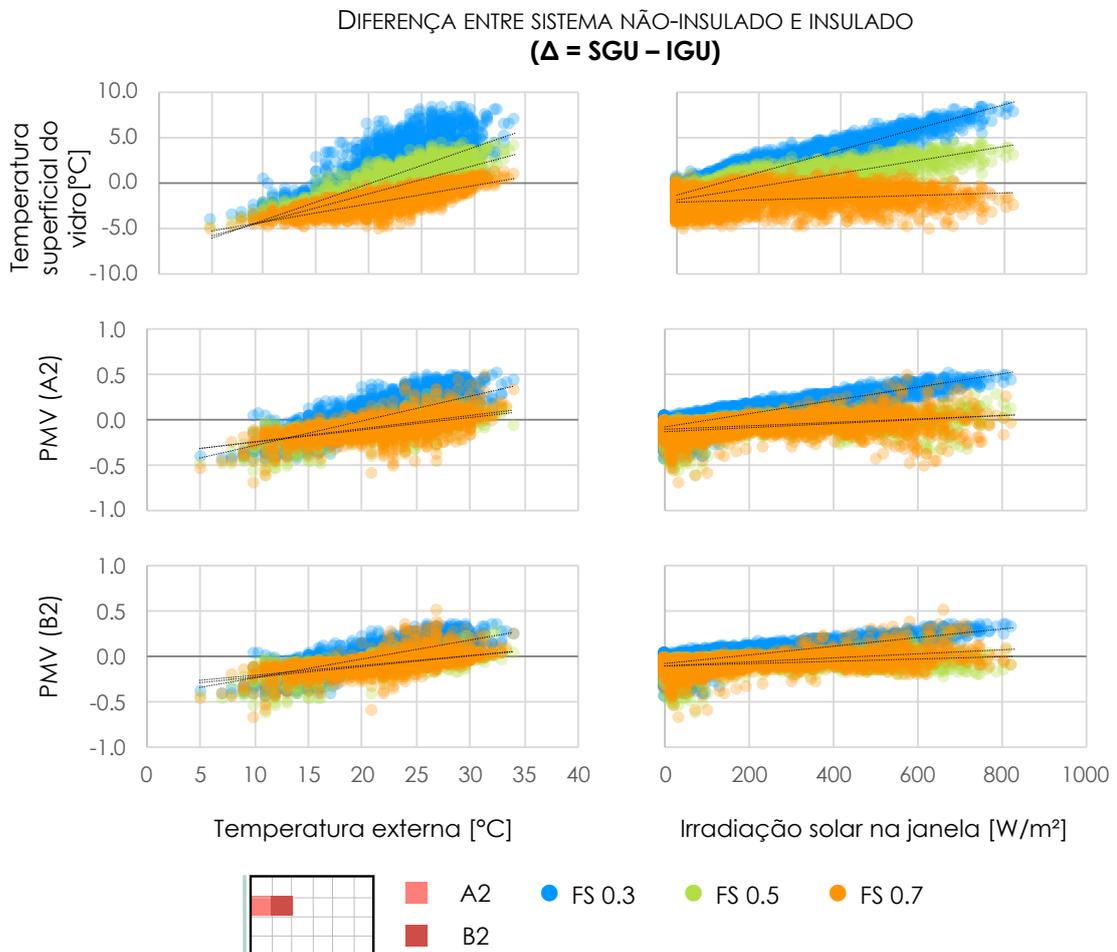
Figura 66 - Gráficos de dispersão do PMV em relação à temperatura externa e à radiação solar incidente no vidro: comparação entre fatores solares por sistema



Contudo, independente do sistema (IGU ou SGU), o fator solar é o aspecto de maior impacto na melhoria das condições de conforto (Figura 66). Embora os vidros com menor FS tenham apresentado temperaturas de vidro mais elevadas, os modelos com FS 0,7 apresentaram um nível de desconforto por calor significativamente mais acentuado. Em muitos momentos, foi observado um PMV igual ou superior a 3,0 - limite de aplicabilidade do modelo de Fanger.

Analisou-se também a dispersão da diferença horária nos valores de temperatura superficial do vidro e PMV em dois pontos do ambiente, comparando os modelos com vidro insulado e vidro simples (Figura 67). Valores positivos indicam que o vidro simples resultou em temperatura ou PMV mais altos, enquanto valores negativos indicam temperatura e PMV mais altos para os modelos com vidro insulado.

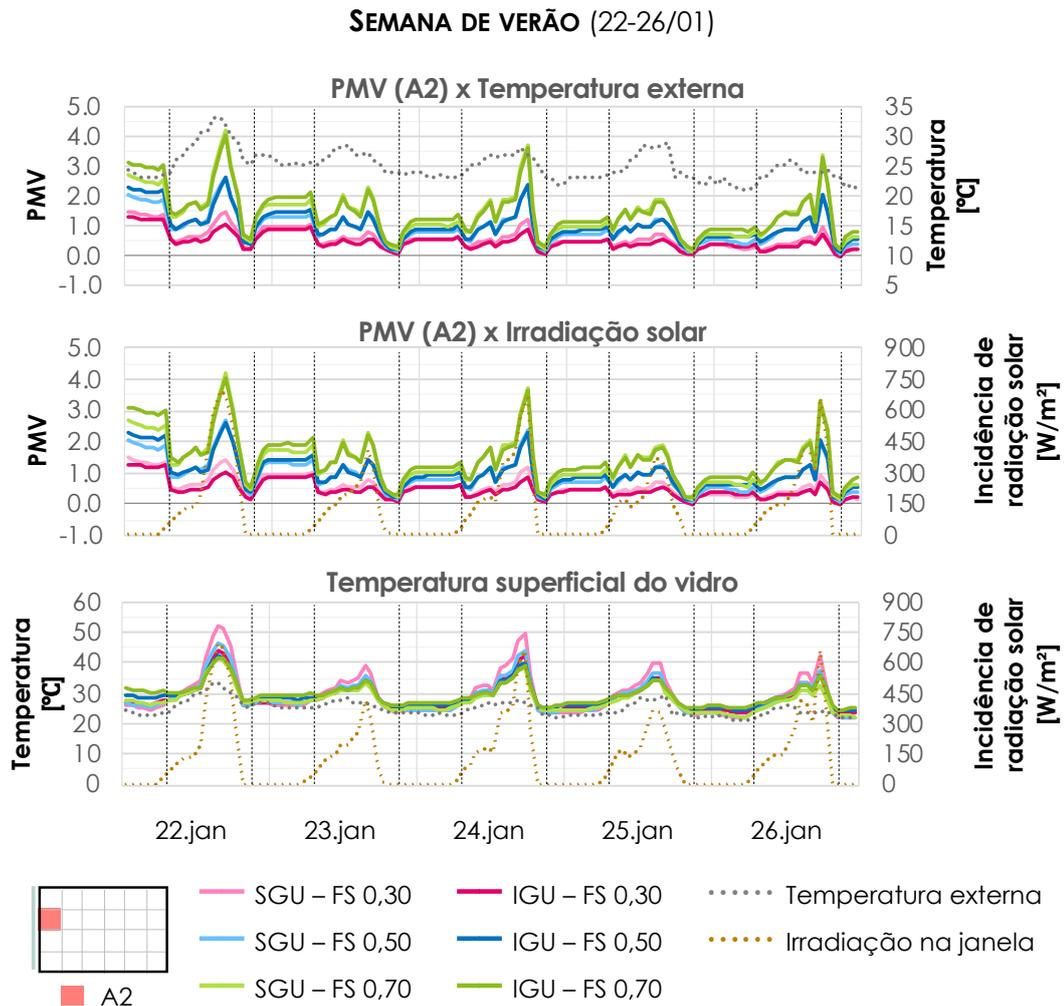
Figura 67 - Gráficos de dispersão do delta entre modelos com SGU e IGU PMV em relação à temperatura externa e à radiação solar incidente no vidro: PMV e temperatura interna do vidro



Entre os modelos com FS 0,3, o PMV e a temperatura do vidro tendem a ser mais elevados com o IGU em temperaturas externas de até aproximadamente 20°C. Já nos modelos com FS 0,5 e 0,7, esse limiar se desloca para temperaturas externas em torno de 25 °C e 30 °C. No caso da radiação, o limiar observado é aproximadamente 100 W/m<sup>2</sup> nos modelos com FS 0,3, 200 W/m<sup>2</sup> nos modelos com FS 0,5 no ponto mais próximo à janela e 700 W/m<sup>2</sup> no ponto a 1,5 m da janela. Nos modelos com FS 0,7, a temperatura superficial do vidro tende a ser sempre maior com o IGU, independentemente da intensidade de radiação solar na fachada.

A partir desses resultados, procurou-se explorar o comportamento térmico dos modelos em escala horária, observando os perfis de temperatura interna do vidro e PMV em um ponto próximo à janela ao longo de duas semanas de ocupação (Figura 68 e Figura 69).

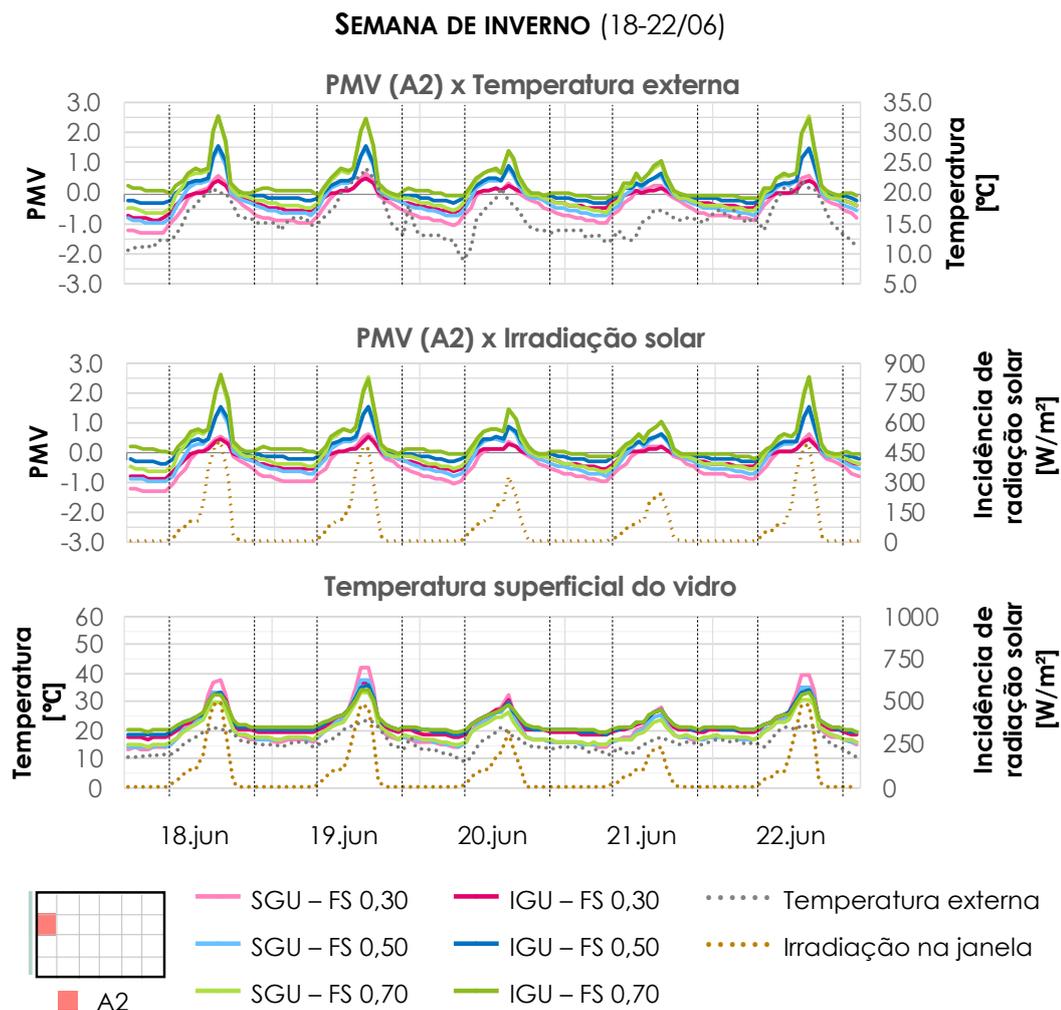
Figura 68 - Perfil horário da temperatura na superfície interna do vidro e das condições de conforto térmico a 0,5 m da janela: semana de verão



Nos modelos com FS 0,5 e 0,7, tanto o sistema SGU quanto o IGU apresentaram condições de conforto térmico semelhantes durante o período ocupado na semana de verão (Figura 68). A diferença entre SGU e IGU no PMV ficou entre  $\pm 0,1$  com o FS 0,5 e entre -0,2 e 0,1 com o FS 0,7, mostrando que a transmitância térmica do vidro tem pouca influência quando a transmissão solar é elevada.

Nos modelos com FS 0,3, o ambiente com SGU tende a apresentar uma temperatura superficial mais alta e, conseqüentemente, um PMV mais elevado. Essa diferença é mais evidente durante períodos de maior incidência de radiação solar, que coincide com o período de ocupação. Nesse caso, o uso do IGU reduziu o pico de calor em até 0,4 na escala PMV.

Figura 69 - Perfil horário da temperatura na superfície interna do vidro e das condições de conforto térmico a 0,5 m da janela: semana de inverno



Durante a semana de junho, na qual a temperatura externa tende a permanecer abaixo de 20 °C, os ambientes com SGU apresentam uma condição térmica mais resfriada, principalmente nas primeiras horas do dia, para as três opções de FS simuladas (Figura 69). Nesse período, o uso do SGU resulta em um PMV até 0,6 menor. Devido ao fato de o sistema não-insulado permitir uma dissipação de calor mais intensa durante a noite, o ambiente tende a estar mais resfriado no início do período de ocupação, o que pode resultar em condições de desconforto nas primeiras horas do dia. Na amostra analisada, observou-se um maior número de horas de desconforto por frio com o SGU30. No final do dia, quando não há mais incidência de radiação solar na janela, os modelos com sistema SGU também apresentam uma condição mais resfriada em comparação com os modelos com IGU.

No entanto, ao longo do dia, com o aumento da temperatura externa e da intensidade de radiação na janela, os modelos apresentam uma tendência semelhante à semana de verão, com uma diferença máxima de 0,1 no PMV entre IGU e SGU. Nesse período, ocorreu desconforto por calor nos modelos com FS de 0,50 e 0,70. Com o FS 0,30, houve no máximo uma hora por dia em desconforto por calor. Além disso, devido ao modelo de avaliação de conforto térmico utilizado, a intensidade de radiação solar incidente na janela tem maior influência na condição de conforto prevista do que a temperatura do ar externo.

### 5.3 DISCUSSÃO

O sistema IGU reduz os picos de temperatura na superfície interna do vidro e, por consequência, a intensidade de radiação de onda longa recebida pelo ocupante durante esses momentos. No entanto, a dissipação do calor absorvido durante esses picos de radiação é mais lenta com o uso do IGU, o que dificulta a perda de calor quando não há mais incidência de radiação solar e a temperatura externa diminui. Em contraste, o vidro simples (SGU) tende a reduzir mais rapidamente sua temperatura nessas situações, diminuindo a transmissão de radiação de ondas longas e a condição de calor.

Devido a sua alta transmitância térmica, os modelos SGU são mais vulneráveis às variações no ambiente externo. Em consequência, os ambientes internos com SGU tendem a perder mais calor quando a temperatura externa permanece inferior a 20°C. Esta condição pode gerar desconforto por frio nas primeiras horas do dia e quando não há incidência de radiação solar.

Percebe-se que a combinação entre a maior resistência térmica do sistema insulado, se comparado ao SGU, e um fator solar alto tem o efeito de reter o calor gerado pela elevada admissão de radiação solar, aumentando assim a carga térmica interna. Em consequência, as superfícies internas se mantêm mais aquecidas, o que, juntamente com a maior intensidade de radiação que incide sobre os ocupantes, gera uma condição térmica de calor mais intenso.

Destaca-se a importância da análise das condições de conforto térmico de forma espacial, mesmo em ambientes com sistema de condicionamento térmico artificial. Essa abordagem de avaliação se torna ainda mais necessária em ambientes com ocupação diurna, que coincide com a incidência de radiação solar e a temperatura do ar mais elevada, além de climas com alta intensidade de radiação solar, tanto quente quanto frio.

A falta de homogeneidade nas condições térmicas observadas também alerta para a necessidade de um desenvolvimento mais cuidadoso dos ambientes internos e do *layout* dos postos de trabalho. A concepção de um projeto de interiores coerente com a avaliação espacial de conforto térmico contribui ainda mais para o bem-estar dos ocupantes e, conseqüentemente, melhora o desempenho e a produtividade em ambientes de trabalho. No estudo de caso, onde a zona perimetral apresentou desconforto recorrente, este espaço poderia ser planejado como uma área de

circulação ou com usos que não sejam de permanência prolongada, como um pequeno espaço de estar.

Ademais, é perceptível, tanto visualmente quanto numericamente, a problemática das fachadas altamente envidraçadas que são reproduzidas como um modelo internacional na arquitetura corporativa, independentemente do clima. Embora seja possível reduzir os picos e o percentual de horas em desconforto térmico, a adoção de vidros eficientes pode não ser suficiente para garantir condições mínimas de conforto em áreas próximas às fachadas. Portanto, é necessário especificar vidros com menor fator solar, reduzir a área envidraçada, ou implementar mecanismos eficientes de sombreamento.

Os resultados do estudo de caso demonstraram, portanto, que controlar a admissão de radiação solar é mais efetivo para melhorar o conforto térmico do que reduzir a transmitância térmica em escritórios condicionados com alto percentual de vidro na fachada. Embora um sistema insulado reduza os picos de temperatura na superfície interna do vidro, ele não será capaz de reduzir o desconforto causado por calor. No entanto, a solução otimizada seria a combinação entre uma baixa transmissão de energia solar e o sistema insulado.

Além disso, os resultados também evidenciaram a necessidade de analisar o conforto térmico de forma espacial. Considerar o ambiente como termicamente homogêneo pode induzir a graves erros na estimativa das condições de conforto térmico em um ambiente com ocupação diurna, especialmente em climas temperados com alta incidência de radiação solar.

## 6 CONCLUSÕES

Esta pesquisa abordou a avaliação preditiva do conforto térmico de edifícios com fachadas envidraçadas, por meio de simulação computacional. Especificamente, o estudo concentrou-se em ambientes de escritórios climatizados, nos quais os ocupantes frequentemente permanecem próximos às janelas por longos períodos.

A revisão de literatura revelou uma lacuna na abordagem preditiva do conforto térmico, especialmente em ambientes envidraçados, por meio de simulação computacional termodinâmica. Geralmente, a mesma modelagem utilizada para a análise de desempenho térmico e energético é aplicada à avaliação de conforto. Entretanto, a avaliação do conforto térmico envolve aspectos adicionais dos fenômenos de transferência de calor, como a distribuição espacial e as trocas radiantes entre o ocupante e o ambiente circundante.

Destacou-se a importância de considerar métricas espaciais e temporais ao avaliar o conforto térmico, visto que ambientes com alto percentual de vidro na fachada tendem a apresentar condições térmicas não-uniformes e flutuações térmicas mais acentuadas. Além disso, os modelos tradicionais de conforto térmico não são adequados para avaliar esse contexto de ambientes, pois não consideram o impacto na radiação solar sobre os ocupantes. Ainda assim, as pesquisas que investigam a influência de parâmetros relacionados às áreas envidraçadas nos índices de conforto térmico geralmente utilizam métodos simplificados, considerando o ambiente termicamente homogêneo.

Portanto, o objetivo geral desta pesquisa foi desenvolver um *framework* para a avaliação preditiva de conforto térmico em ambientes com fachadas envidraçadas, por meio de simulação computacional. Para tanto, primeiramente foram realizadas investigações nas três etapas principais do processo de avaliação preditiva antes da análise dos resultados: definição do objeto de estudo, escolha dos modelos e métricas de conforto térmico e modelagem e simulação computacional.

Estudos paramétricos sobre o desempenho de sistemas construtivos em edifícios de escritórios costumam utilizar modelos genéricos de edificação ou ambiente. Entretanto, o desempenho térmico está diretamente ligado à interação entre a física da construção e o clima local, o que demanda a adoção de um modelo que reflita as características representativas da região em questão. A revisão de literatura específica demonstrou uma carência de estudos que investigaram as características

dos edifícios de escritórios no Brasil com o propósito de estabelecer um modelo de referência ou estoque local. Dentro desse recorte, foram identificados apenas oito estudos.

Essas pesquisas foram conduzidas apenas em alguns centros urbanos de maior porte, como Belo Horizonte, Brasília, São Paulo e Florianópolis. Além disso, cada estudo apresenta diferentes recortes em relação à tipologia, número de pavimentos, data de construção ou certificação. Portanto, a representatividade dessas amostras em âmbito nacional é inconclusiva, impossibilitando afirmar qual desses modelos é mais representativo da realidade geral de edifícios de escritório no Brasil. Para obter uma compreensão abrangente, seria necessário realizar mais estudos semelhantes, abrangendo diferentes regiões do país.

No entanto, essa revisão esclareceu várias preferências e características predominantes entre as diversas amostras analisadas. Esse conjunto de características permitiu a definição de um modelo representativo a ser utilizado em simulações de conforto e desempenho térmico em escritórios, com base nas informações atualmente disponíveis.

A etapa de avaliação preditiva de conforto térmico por simulação computacional termodinâmica investigou como determinados algoritmos do modelo de simulação no *software EnergyPlus* afetam as trocas de calor na zona térmica e os índices de conforto térmico correspondentes. Durante a pesquisa, foram identificadas lacunas sobretudo relacionadas à estimativa das condições de conforto térmico. Abordaram-se três pontos críticos: (1) a adoção de condições de contorno adiabáticas para a simplificação de zonas térmicas; (2) a incorporação de objetos como massa térmica interna; e (3) a escolha do algoritmo de convecção nas superfícies internas.

A inclusão de objetos de massa interna nos modelos de simulação não gera impacto significativo na estimativa das condições térmicas para um mesmo ambiente, tanto em relação à disponibilidade de conforto térmico quanto ao consumo de energia para condicionamento. Entretanto, a simples inclusão da massa térmica em uma zona térmica, representando um agrupamento de zonas com as mesmas condições térmicas, não resulta em condições de conforto térmico equivalentes a cada uma das zonas individualmente. Embora não haja um impacto significativo no consumo ponderado pela área de piso, resulta em uma diferença relevante na disponibilidade de conforto térmico estimada entre uma sala individual ou uma zona térmica que representa várias salas.

Por outro lado, simplificar a modelagem de uma sala isolada, considerando as condições de contorno das superfícies internas como adiabáticas, não afeta significativamente na estimativa das condições térmicas do ambiente e de conforto térmico. Por outro lado, a previsão de consumo de energia para condicionamento apresenta diferença percentual entre as configurações de sala isolada ou integrada ao pavimento.

Concluiu-se também que a escolha do algoritmo de convecção nas superfícies internas pode ter um impacto significativo, principalmente na previsão das condições de conforto térmico, mesmo em ambientes termicamente controlados e clima temperado. Enquanto os modelos com TARP e *Adaptive* estimaram condições de conforto térmico equivalentes, o algoritmo *Simple Natural* parece subestimar as condições de desconforto térmico. Para o estabelecimento preciso de qual é o algoritmo mais adequado para a simulação de um modelo de sala de escritório em clima temperado, seriam necessários mais estudos correlacionando os resultados de simulação com medições em campo. Entretanto, as análises alertam que a escolha do algoritmo de convecção nas superfícies internas pode impactar de forma significativa, principalmente, na previsão de condições de conforto térmico, mesmo em clima temperado e ambientes termicamente controlados.

Demonstrou-se que a modelagem computacional para a avaliação de conforto térmico não será necessariamente a mesma utilizada para a avaliação de desempenho termoenergético. Por exemplo, o agrupamento de salas em uma única zona térmica, amplamente utilizado e satisfatório para a previsão de consumo de energia, não se mostrou adequado para a avaliação do conforto térmico. Simplificações comumente empregadas na modelagem energética podem afetar na avaliação correta das condições de conforto térmico. As trocas radiantes são uma componente significativa no balanço térmico do corpo humano, e a relação espacial com as superfícies do ambiente é determinante para estimar o conforto térmico. Os resultados indicaram que as dimensões da sala têm influência nas condições de conforto, mesmo considerando um ponto com igual distância da fachada em ambos os ambientes. É possível utilizar um mesmo modelo para estimar tanto o conforto térmico quanto o desempenho termoenergético, desde que as especificidades de modelagem para ambos sejam abordadas.

Compreende-se que as definições de modelagem abordadas neste capítulo não são as únicas configurações e incertezas na modelagem térmica no *EnergyPlus*

que poderiam influenciar na estimativa das condições térmicas de ambientes de escritório. Outros parâmetros, como a densidade de cargas internas e os cronogramas ocupação e operação do edifício, também podem afetar esses cálculos. Entretanto, essas especificações são considerações de projeto e irão variar conforme características do estudo de caso. Além disso, concentrou-se em variáveis que poderiam ter suas incertezas ampliadas devido à presença de fachadas com alto percentual de vidro.

As investigações realizadas permitiram estabelecer diretrizes para cada etapa do processo de avaliação preditiva de conforto térmico, as quais foram apresentadas em um *framework* elaborado a fim de oferecer uma avaliação mais adequada nessa tipologia de edificação. O mesmo foi aplicado a um estudo de caso a fim de demonstrar sua utilização e potencialidades.

Esse *framework* foi especificamente desenvolvido para a avaliação de ambientes de escritório com amplas áreas envidraçadas na fachada, uma vez que esses apresentam desafios significativos. Nessa tipologia, a ocupação dos ambientes coincide com a exposição à radiação solar, permanência de muitas horas e frequentemente não sendo possível a realocação no espaço.

Contudo, entende-se que esse *framework* pode ser aplicado de forma eficaz na avaliação preditiva de conforto térmico de qualquer ambiente de permanência climatizado, com os ocupantes exercendo atividades sedentárias e que esteja sob a influência de áreas envidraçadas. Isso inclui salas de aula, salas de espera e espaços residenciais com área destinada a *home office*, entre outros. Mesmo em ambientes com menos de 50% da fachada em vidro, o *framework* auxilia na avaliação da uniformidade térmica do espaço, como é o caso de janelas que vão do piso ao teto, por exemplo.

## 6.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

As principais limitações desta pesquisa estão relacionadas à ausência de dados de ambientes reais ocupados para correlacionar com os resultados das simulações computacionais. Na definição do modelo de ajuste solar, não foi possível estabelecer uma relação direta entre os índices de conforto térmico ajustados e dados de medição ou percepção térmica das pessoas em um ambiente real. Logo, não foi possível concluir qual modelo tem maior correlação com a realidade.

Na comparação entre os algoritmos de convecção nas superfícies internas, entende-se que são necessários estudos que correlacionassem os resultados obtidos com os diferentes algoritmos por meio de simulação com medições em campo para determinar com precisão qual algoritmo é o mais adequado para a simulação de uma sala de escritório em clima temperado.

No estudo da simulação de ambientes representativos, os resultados foram obtidos apenas para uma sala individual, a qual foi modelada com base nas características definidas na seção 3.1. Também não foram considerados os efeitos das condições de contorno adiabáticas em ambientes com pelo menos duas fachadas voltadas para orientações distintas.

Além disso, todos os estudos realizados no desenvolvimento do *framework* proposto basearam-se em análises realizadas para um único clima. As simulações foram realizadas considerando o clima temperado úmido da cidade litorânea de Florianópolis.

No entanto, esses estudos alertam que a escolha dos modelos de conforto térmico e as configurações de modelagem computacional podem afetar a estimativa de conforto térmico de maneira diferente do que a modelagem para desempenho energético. Além disso, ampliam as discussões sobre o uso da simulação computacional na avaliação do conforto térmico de ambientes internos, especialmente quando há amplas áreas envidraçadas.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Além das sugestões apresentadas nas conclusões de cada capítulo, algumas recomendações adicionais são propostas:

- a) Realizar estudos que abordem outras incertezas da modelagem computacional e analisar seu impacto na estimativa de conforto térmico em ambientes internos.
- b) Aplicar o *framework* proposto em uma análise abrangente de sensibilidade na correlação entre os parâmetros de projeto de áreas de vidro e o conforto térmico de ocupantes de escritórios. Poderia ser verificada a sensibilidade em relação ao clima, à distância do ocupante em relação à janela, às propriedades térmicas do sistema de vidro, às características

construtivas da janela e outros fatores que poderiam ter impacto no conforto térmico.

c) Investigar possível melhoria no conforto térmico utilizando outras tecnologias em fechamentos de vidro, tais como vidros *Low-e*, vidros eletrocromáticos, películas de controle solar e vidros insulados com diferentes fluídos.

d) Pesquisar a adaptabilidade do usuário frente ao desconforto térmico por calor próximo a fachadas envidraçadas. Por exemplo, verificar melhora na condição de conforto ao alterar a vestimenta.

e) Expandir o *framework* para incluir uma avaliação conjunta do conforto térmico e lumínico, considerando ambos os aspectos simultaneamente.

### 6.3 PUBLICAÇÕES

Até o momento, os estudos realizados ao longo desta pesquisa deram origem à um artigo publicado em periódico e quatro artigos em eventos, os quais são listados a seguir.

PINTO, M. M.; WESTPHAL, F. S. **Avaliação de conforto término em estações de trabalho localizadas próximo a fachadas envidraçadas: modelos de ajuste solar.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 22, n. 4, p. 155-177, out./dez. 2022. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000400634>

PINTO, M. M.; WESTPHAL, F. S. *Internal Convection Algorithm Impact on Thermal Comfort Assessment in Office Rooms through Computer Simulation on Energyplus.* In: Congresso Latino-Americano de Simulação de Edifícios (IBPSA LATAM), 7., 2023, Florianópolis. **Anais eletrônicos** [...], Florianópolis, SC: Imaginar o Brasil Editora, 2023, p. 183-188. Disponível em: <http://www.ibpsa.org.br/ibpsalatam2023>

PINTO, M. M.; F. S. WESTPHAL. Condições de contorno externo de paredes internas: simular uma zona térmica adiabática ou integrada ao pavimento? In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC), 19., 2022, Canela. **Anais eletrônicos** [...], Canela: ANTAC, 2022, p. 1–15. Disponível em: <https://doi.org/10.46421/entac.v19i>

PINTO, M. M.; WESTPHAL, F. S. Avaliação de Conforto Térmico em Estações de Trabalho Localizadas Próximo a Fachadas Envidraçadas: Modelos de Ajuste Solar. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC), 16, e Encontro

Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído (ELACAC), 12, 2021, Palmas, TO. **Anais** [...], Palmas, ANTAC: p.668 – 677.

PINTO, M. M.; WESTPHAL, F. S. Avaliação de Conforto Térmico Relacionado ao Uso de Vidro Insulado em Escritórios com Fachada Envidraçada em Florianópolis (SC). In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC), 15, e Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído (ELACAC), 11, 2019, João Pessoa. **Anais** [...], Porto Alegre: ANTAC, 2019, p.1061 – 1070.

## REFERÊNCIAS

ABDULLAH, H. K.; ALIBABA, H. Z. *Towards Nearly Zero-Energy Buildings: the Potential of Photovoltaic-Integrated Shading Devices To Achieve Autonomous Solar Electricity and Acceptable Thermal Comfort in Naturally-Ventilated Office Spaces*. **16th International Conference on Clean Energy**, n. May, p. 1–11, 2018.

ABDULLAH, H. K.; ALIBABA, H. Z. *A Performance-Based Window Design and Evaluation Model for Naturally Ventilated Offices*. **Buildings**, v. 12, n. 8, p. 1141, 1 ago. 2022.

ABNT. **ABNT NBR 16401-2 Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários Parte 2: Parâmetros de conforto térmico**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

ABNT. **ABNT NBR 16023 Vidros revestidos para controle solar-Requisitos, classificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011.

ABNT. **PR/NBR 16401-2 Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.

ALAMDARI, F.; HAMMOND, G. P. *Improved data correlations for buoyancy-driven convection in rooms*. **Building Services Engineering Research & Technology**, v. 4, n. 3, 1983.

ALDOMONTE, S. et al. *Ten questions concerning well-being in the built environment*. **Building and Environment**, v. 180, p. 106949, 2020.

ALVES, T. et al. *A methodology for estimating office building energy use baselines by means of land use legislation and reference buildings*. **Energy and Buildings**, v. 143, p. 100–113, 15 maio 2017.

ALVES, T. P. **Energy savings potential of the high-rise office building stock. A case study of Belo Horizonte, Brazil: a case study of Belo Horizonte, Brazil**. Belo Horizonte: [s.n.].

ANA CAROLINA DE OLIVEIRA VELOSO. **Avaliação do consumo de energia elétrica de edificações de escritório e sua correlação com as decisões de projeto**. Belo Horizonte: [s.n.].

ARENS, E. et al. *Modeling the comfort effects of short-wave solar radiation indoors*. **Building and Environment**, v. 88, p. 3–9, jun. 2015.

ARENS, E.; GONZALEZ, R.; BERGLUND, L. **Thermal Comfort Under an Extended Range of Environmental Conditions**. *ASHRAE Transactions*. Anais...1986.

ASHRAE. **ASHRAE Handbook Fundamentals**. Atlanta. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers Inc., 2001.

ASHRAE. **ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2007: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers Inc., 2007.

ASHRAE. **ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers Inc., 2017a.

ASHRAE. **ASHRAE Handbook Fundamentals**. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers Inc., 2017b.

ASHRAE. **ASHRAE Handbook Fundamentals: Chapter 9 - Thermal Comfort**. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers Inc., 2017c.

ASHRAE. **ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal environmental conditions for human occupancy**. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers Inc., 2020.

ASTM. **ASTM C1340-04: Standard Practice for Estimation of Heat Gain or Loss Through Ceilings Under Attics Containing Radiant Barriers by Use of a Computer Program**. ASTM International, 2015. Disponível em: <<https://www.astm.org/standards/c1340>>. Acesso em: 28 nov. 2022

ATHIENITIS, A. K.; HAGHIGHAT, F. **Study of the effects of solar radiation on the indoor environment**. *ASHRAE Transactions*. Anais...1992.

ATZERI, A. M. et al. *Comfort metrics for an integrated evaluation of buildings performance*. **Energy and Buildings**, v. 127, p. 411–424, 1 set. 2016.

ATZERI, A. M. et al. *Comfort and energy performance analysis of different glazing systems coupled with three shading control strategies*. **Science and Technology for the Built Environment**, v. 24, n. 5, p. 545–558, 28 maio 2018.

BARAGONA, R.; BATTAGLIA, F.; POLI, I. **Evolutionary Statistical Procedures**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

BARBOSA, S.; ALBERTO, K. C. *Effect of the double skin façade material on the thermal performance of the educational building in tropical climate*. **Architectural Science Review**, v. 62, n. 3, p. 206–215, 2019.

BARNA, E.; BÁNHIDI, L. *Combined effect of two local discomfort parameters studied with a thermal manikin and human subjects*. **Energy and Buildings**, v. 51, p. 234–241, 2012.

BASURTO, C.; KÄMPF, J. H.; SCARTEZZINI, J.-L. L. *Multi-criteria analysis for the integrated performance assessment of complex fenestration systems*. **Building Research & Information**, v. 45, n. 8, p. 926–942, 2017.

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 de Doutorado—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

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. 4, n. 11, p. 79–97, 2011.

BAVARESCO, M. V.; GHISI, E. Influência da interação dos usuários com elementos internos de sombreamento no consumo energético de edificações comerciais. Anais XIV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e X Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...Balneário Camboriú, SC: Marketing Aumentado**, 2017.

BAYRAKTAR, N. T.; OK, V. *Numerical evaluation of the effects of different types of shading devices on interior occupant thermal comfort using wind tunnel experimental data*. **Building Simulation**, v. 12, n. 4, p. 683–696, 22 ago. 2019.

BEAUSOLEIL-MORRISON, I. **The adaptive coupling of heat and air flow modeling within dynamic whole-building simulations**. *Doctoral thesis—Glasgow, UK: University of Strathclyde*, maio 2000.

BEAUSOLEIL-MORRISON, I. *The adaptive simulation of convective heat transfer at internal building surfaces*. **Building and Environment**, v. 37, n. 8–9, p. 791–806, ago. 2002.

BEAUSOLEIL-MORRISON, I. **Fundamentals of building performance simulation**. 1. ed. New York: Routledge, 2021. v. 1

BECHERINI, F. et al. *Characterization and thermal performance evaluation of infrared reflective coatings compatible with historic buildings*. **Building and Environment**, v. 134, 2018.

BESSEN, P.; WESTPHAL, F. **Uso de vidro duplo e vidro laminado no Brasil: Avaliação do desempenho energético e conforto térmico por meio de simulação computacional**. XIV ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais...Juiz de Fora: out. 2012**.

BESSOUDO, M. et al. *Indoor thermal environmental conditions near glazed facades with shading devices - Part I: Experiments and building thermal model*. **Building and Environment**, v. 45, n. 11, p. 2506–2516, 2010.

BRUGNERA, R. R. **Potencial de economia de energia em edifícios de escritórios com estratégias de ventilação híbrida**. Universidade de São Paulo, , 2014.

BRUGNERA, R. R. **Análise integrada de desempenho energético, impacto ambiental e custo: estudo de soluções de fachada para edifícios de escritórios no Brasil**. Tese (Doutorado)—São Carlos: Universidade de São Paulo, 10 set. 2018.

BRUGNERA, R. R. et al. Escritórios de planta livre: o impacto de diferentes soluções de fachada na eficiência energética. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 3, p. 295–315, set. 2019.

BUENO, B. et al. Fener. *A Radiance-based modelling approach to assess the thermal and daylighting performance of complex fenestration systems in office spaces*. **Energy and Buildings**, v. 94, 2015.

BURATTI, C.; MORETTI, E.; BELLONI, E. *The influence of glazing systems on energy performance of non-residential buildings. Proceedings of the 25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization and Simulation of Energy Conversion Systems and Processes, ECOS 2012*. **Anais...2012**. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84896534481&partnerID=40&md5=6de0be17fa026b9db9d33527f85dc458>>

BURATTI, C.; PALLADINO, D.; MORETTI, E. *Prediction of Indoor Conditions and Thermal Comfort Using CFD Simulations: A Case Study Based on Experimental Data*. **Energy Procedia**. **Anais...2017**.

CANNISTRARO, G.; CANNISTRARO, M.; RESTIVO, R. *The local media radiant temperature for the calculation of comfort in areas characterized by Radiant surfaces*. **International Journal of Heat and Technology**, v. 33, n. 1, p. 115–122, 2015.

CANNISTRARO, M.; TRANCOSI, M. *Enhancement of indoor comfort in the presence of large glazed radiant surfaces by a local heat pump system based on Peltier cells*. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 14, n. January, p. 100388, dez. 2019.

CAPPELLETTI, F. et al. *Passive performance of glazed components in heating and cooling of an open-space office under controlled indoor thermal comfort*. **Building and Environment**, v. 72, p. 131–144, fev. 2014.

CAPPELLETTI, F.; GASPARELLA, A.; PERNIGOTTO, G. *Energy performance and long-term evaluation of internal thermal comfort of an office building with different kinds of glazing systems and window sizes. International High Performance Buildings Conference*. **Anais...Purdue**: jul. 2012.

CARLO, J. C. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envoltório de Edificações Não-residenciais**. Florianópolis: [s.n.].

CHINAZZO, G. et al. *Energy Performance And Occupancy-Based Analysis Of Visual And Thermal Comfort For Transmittance Level And Layout Variations Of Semi-Transparent Photovoltaics*. **Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA**, v. 16, n. September, p. 4385–4392, 2020.

ÇILDIR, A. S.; KÖKTÜRK, G.; TOKUÇ, A. *Design approaches for retrofiting offices to reach nearly zero energy: A case study in the Mediterranean climate. Energy for Sustainable Development*, v. 58, p. 167–181, out. 2020.

CLARKE, J. A. *Internal convective heat transfer coefficients: a sensitivity study*. Glasgow, UK: [s.n.].

COSTA, J.; OLIVEIRA, N.; AMORIM, C. *Morphological characteristics and energy consumption of office buildings in the central area of Brasilia. Proceedings of 33rd PLEA International Conference: Design to Thrive*, PLEA 2017.

DE DEAR, R. J.; BRAGER, G. S. *Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. ASHRAE Transactions*, v. 104, n. Pt 1A, p. 145–167, 1998.

DERVISHI, S.; MAHDAVI, A. *Computing diffuse fraction of global horizontal solar radiation: A model comparison. Solar Energy*, v. 86, n. 6, jun. 2012.

DOE. *Weather Data*. Disponível em: <<https://energyplus.net/weather>>. Acesso em: 22 jan. 2017.

DOE. *EnergyPlus Version 8.9.0 Documentation Engineering Reference. U.S. Department of Energy (DOE)*, 2020.

DOE. *EnergyPlus Version 22.1.0 Documentation Engineering Reference. U.S. Department of Energy (DOE)*, 2022a.

DOE. *EnergyPlus Version 22.1.0 Documentation Input Output Reference. U.S. Department of Energy (DOE)*, 29 mar. 2022b.

DUSSAULT, J.-M.; GOSSELIN, L. *Office buildings with electrochromic windows: A sensitivity analysis of design parameters on energy performance, and thermal and visual comfort. Energy and Buildings*, v. 153, p. 50–62, 15 out. 2017.

DZELZITIS, E. et al. *Selection of Key Parameters for Energy Management of Building Heating Systems. Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE). Anais...IEEE*, 25 set. 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9967820/>>. Acesso em: 20 maio. 2023

ELARGA, H.; ZARRELLA, A.; DE CARLI, M. *Dynamic energy evaluation and glazing layers optimization of façade building with innovative integration of PV modules. Energy and Buildings*, v. 111, p. 468–478, 1 jan. 2016.

EN. **EN 15251 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics**. 2007.

EN. **EN 16798-1 Energy performance of buildings — Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings**

**addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics — Module M1-6.** 2019a.

EN. CEN/TR 16798-2 **Energy performance of buildings — Part 2: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics — Module M1-6 — Technical.** BSI, , 2019b.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort: Analysis and applications in environmental engineerings.** Michigan: Mcgraw-hill, 1970.

FANGER, P. O.; TOFTUM, J. *Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates.* **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 533–536, 2002.

FERNANDEZ, J. C. et al. *Modelling and Mapping Thermal Comfort Conditions with Solar Radiation: Comparison of Steady-State and Dynamic Indexes.* **Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA**, v. 16, p. 2499–2506, 2020.

FIALA, D.; LOMAS, K. J.; STOHRER, M. *A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: The passive system.* **Journal of Applied Physiology**, 1999.

FIALA, D.; LOMAS, K. J.; STOHRER, M. *Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions.* **International Journal of Biometeorology**, v. 45, n. 3, p. 143–159, 2001.

FIALA, D.; LOMAS, K. J.; STOHRER, M. *First Principles Modeling of Thermal Sensation Responses in Steady-State and Transient Conditions.* **ASHRAE Winter Meetings CD, Technical and Symposium Papers**, v. 2003, p. 183–190, 2003.

FISHER, D. E.; PEDERSEN, C. O. *Convective heat transfer in building energy and thermal load calculations.* **ASHRAE Transactions**, v. 103, n. pt 2, 1997.

FOHANNO, S.; POLIDORI, G. *Modelling of natural convective heat transfer at an internal surface.* **Energy and Buildings**, v. 38, n. 5, 2006.

GAGGE, A. P.; FOBELETS, A. P.; BERGLUND, L. G. **Standard predictive index of human response to the thermal environment.** *ASHRAE Transactions. Anais...*1986.

GAGGE, A. P.; STOLWIJK, J. A. J.; NISHI, Y. *An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response.* **ASHRAE Transactions**, 1971.

GANJI KHEYBARI, A. et al. *Controlling Switchable Electrochromic Glazing for Energy Savings, Visual Comfort and Thermal Comfort: A Model Predictive Control.* **CivilEng**, v. 2, n. 4, p. 1019–1053, 7 dez. 2021.

GASPARELLA, A. et al. *Analysis and modelling of window and glazing systems energy performance for a well insulated residential building.* **Energy and Buildings**, v. 43, n. 4, p. 1030–1037, 1 abr. 2011.

GASPARELLA, A. et al. *Long-term evaluation of internal thermal comfort with different kinds of glazing systems and window sizes: from energetic considerations to users' comfort.* **ASHRAE Transactions**, v. 118, n. 2, p. 106, 2012.

GONZÁLEZ, V. G.; BANDERA, C. F. *A building energy models calibration methodology based on inverse modelling approach.* **Building Simulation**, v. 15, n. 11, p. 1883–1898, 13 nov. 2022.

GORDON, R. G. *The responses of human thermoregulatory system in the cold.* [s.l.] University of California - Santa Barbara, 1974.

GUPTA, R.; JAIN, K.; RAJASEKAR, E. *Impact of internal loads and operational strategies on comfort and energy consumption: An application in the composite climate of India. Proceedings of 9th Windsor Conference: Making Comfort Relevant.* **Anais...Windsor**: 2016.

HAWILA, A. A.-W. et al. *An analysis of the impact of PMV-based thermal comfort control during heating period: A case study of highly glazed room.* **Journal of Building Engineering**, v. 20, p. 353–366, nov. 2018.

HAWILA, A. A.-W. W. et al. *Combined use of dynamic building simulation and metamodeling to optimize glass facades for thermal comfort.* **Building and Environment**, v. 157, n. January, p. 47–63, jun. 2019.

HEE, W. et al. *Ventilation, thermal and luminous autonomy metrics for an integrated design process.* **Building and Environment**, v. 145, n. August, p. 153–165, nov. 2018.

HIEN, W. N. et al. *Effects of double glazed facade on energy consumption, thermal comfort and condensation for a typical office building in Singapore.* **Energy and Buildings**, v. 37, n. 6, p. 563–572, jun. 2005.

HODDER, S. G.; PARSONS, K. *The effects of solar radiation on thermal comfort.* **International Journal of Biometeorology**, v. 51, n. 3, p. 233–250, 2007.

HOFFMANN, S.; JEDEK, C.; ARENS, E. *Assessing thermal comfort near glass facades with new tools.* **BEST 3 Building Enclosure Science and Technology Conference**, 2012.

HONG, T.; LEE, S. H. *Integrating physics-based models with sensor data: An inverse modeling approach.* **Building and Environment**, v. 154, p. 23–31, 1 maio 2019.

HUANG, L.; KANG, J. *Thermal comfort in winter incorporating solar radiation effects at high altitudes and performance of improved passive solar design—Case of Lhasa.* **Building Simulation**, v. 14, n. 6, p. 1633–1650, 8 dez. 2021.

HUANG, L.; ZHAI, Z. (JOHN). *Critical review and quantitative evaluation of indoor thermal comfort indices and models incorporating solar radiation effects*. **Energy and Buildings**, v. 224, p. 110204, 2020.

HUANG, Y.; NIU, J.; CHUNG, T. *Comprehensive analysis on thermal and daylighting performance of glazing and shading designs on office building envelope in cooling-dominant climates*. **Applied Energy**, v. 134, p. 215–228, dez. 2014.

HUIZENGA, C. et al. **Window performance for human thermal comfort**. Center for the Build Environment, CBE. Berkeley: 2006.

HUIZENGA, C.; HUI, Z.; ARENS, E. *A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments*. **Building and Environment**, v. 36, n. 6, p. 691–699, 2001.

HUMPHREYS, M.; NICOL, F. *Understanding the adaptive approach to thermal comfort*. **ASHRAE Transactions**, v. 104, p. 991–1004, 1 jan. 1998.

HWANG, R.-L.; CHEN, W.-A. *Identifying relative importance of solar design determinants on office building façade for cooling loads and thermal comfort in hot-humid climates*. **Building and Environment**, v. 226, p. 109684, dez. 2022.

HWANG, R.-L.; SHIH, W.-M.; HUANG, K.-T. *Performance-rating-based approach to formulate a new envelope index for commercial buildings in perspective of energy efficiency and thermal comfort*. **Applied Energy**, v. 264, p. 114725, abr. 2020.

HWEIJ, W. A. et al. *Evaporatively-cooled window driven by solar chimney to improve energy efficiency and thermal comfort in dry desert climate*. **Energy and Buildings**, v. 139, p. 755–761, 15 mar. 2017.

ISO. **ISO 7726 Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities**. International Organization for Standardization, 1998.

ISO. **ISO 15099:2003. Thermal performance of windows, doors, and shading devices – Detailed calculations**. International Organization for Standardization, 2003.

ISO. **ISO 7730 Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**. International Organization for Standardization, 2005.

ISO. **ISO 17772-1 Energy Performance of Buildings – Indoor Environmental Quality – Part 1: Indoor Environmental Input Parameters for the Design and Assessment of Energy Performance of Buildings**. International Organization for Standardization, 2017.

ISO. **ISO/TR 17772-2 Energy performance of buildings - Overall energy performance assessment procedures - Part 2: Guideline for using indoor**

**environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings.** International Organization for Standardization, 2018.

ISO. **ISO 8996 Ergonomics of the thermal environment – Determination of metabolic rate.** International Organization for Standardization, 2021

JACOVIDES, C. P. et al. *Comparative study of various correlations in estimating hourly diffuse fraction of global solar radiation.* **Renewable Energy**, v. 31, n. 15, dez. 2006.

JAKUBIEC, J. A. et al. *Dynamic Building Environment Dashboard: Spatial Simulation Data Visualization in Sustainable Design.* **Technology Architecture and Design**, v. 1, n. 1, p. 27–40, 2017.

KNERA, D.; HEIM, D. *Thermal comfort in highly glazed buildings determined for weather years on account of solar radiation.* **Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association**, p. 2602–2609, 2013.

KO, W. H. et al. *Ventilation, thermal and luminous autonomy metrics for an integrated design process.* **Building and Environment**, v. 145, p. 153–165, 1 nov. 2018.

KO, W. H. et al. *The impact of a view from a window on thermal comfort, emotion, and cognitive performance.* **Building and Environment**, v. 175, n. February, p. 106779, 2020.

KOTTEK, M. et al. *World map of the Köppen-Geiger climate classification updated.* **Meteorologische Zeitschrift**, 2006.

KRANING, K.; GONZALEZ, R. *A Mechanistic Computer Simulation of Human Physiological Effects of Clothing, Aerobic.* **Computer**, v. 22, n. 415, p. 331–342, 1997.

KURU, A. et al. *Performance prediction of biomimetic adaptive building skins: Integrating multifunctionality through a novel simulation framework.* **Solar Energy**, v. 224, p. 253–270, ago. 2021.

LA GENNUSA, M. et al. *The calculation of the mean radiant temperature of a subject exposed to the solar radiation - A generalised algorithm.* **Building and Environment**, v. 40, n. 3, p. 367–375, 2005.

LA GENNUSA, M. et al. *A model for managing and evaluating solar radiation for indoor thermal comfort.* **Solar Energy**, v. 81, n. 5, p. 594–606, 2007.

LADYBUG TOOLS LLC. **Ladybug Tools.** Disponível em: <<https://www.ladybug.tools/>>. Acesso em: 19 maio. 2022.

LAMBERTS, R. et al. **Towards a Brazilian Standard on Thermal Comfort Research Report.** 2013

LBNL, L. B. N. L. **WINDOW.** Berkley LBNL, 2016. Disponível em: <<https://windows.lbl.gov/software/window>>

LBNL, L. B. N. L. **WINDOW**. Berkley LBNL, 2022. Disponível em: <<https://windows.lbl.gov/software/window>>. Acesso em: 9 out. 2022

LEE, J. W. et al. *Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements*. **Renewable Energy**, v. 50, p. 522–531, 1 fev. 2013.

LEE, S. H.; HONG, T. *Validation of an inverse model of zone air heat balance*. **Building and Environment**, v. 161, 15 ago. 2019.

LEVITT, B. et al. *Thermal autonomy as metric and design process*. **CaGBC National Conference and Expo: Pushing the Boundary–Net Positive Buildings**, p. 47–58, 2013.

LI, W. et al. *A new method for calculating the thermal effects of irregular internal mass in buildings under demand response*. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 761–772, 15 out. 2016.

LIMA, T. B. S. **Qualidade ambiental e arquitetônica em edifícios de escritórios : diretrizes para projetos em Brasília**. Brasília: [s.n.].

LIPCZYNSKA, A.; SCHIAVON, S.; GRAHAM, L. T. *Thermal comfort and self-reported productivity in an office with ceiling fans in the tropics*. **Building and Environment**, v. 135, n. January, p. 202–212, 2018.

MACKEY, C. **Pan Climatic Humans: Shaping Thermal Habits in an Unconditioned Society**. [s.l.] Massachusetts Institute of Technology, 2015.

MARINO, C. et al. *The effect of the short wave radiation and its reflected components on the mean radiant temperature: modelling and preliminary experimental results*. **Journal of Building Engineering**, v. 9, n. November 2016, p. 42–51, 2017.

MARINO, C. et al. *A generalized model of human body radiative heat exchanges for optimal design of indoor thermal comfort conditions*. **Solar Energy**, v. 176, n. October, p. 556–571, 2018a.

MARINO, C. et al. *The spatial evaluation of the radiative human body heat exchanges: An effective contribution for limiting energy consumption and achieving better indoor conditions in buildings*. **Journal of Building Engineering**, v. 16, n. December 2017, p. 118–128, 2018b.

MARINO, C.; NUCARA, A.; PIETRAFESA, M. *Mapping of the indoor comfort conditions considering the effect of solar radiation*. **Solar Energy**, v. 113, p. 63–77, 2015.

MARINO, C.; NUCARA, A.; PIETRAFESA, M. *Thermal comfort in indoor environment: Effect of the solar radiation on the radiant temperature asymmetry*. **Solar Energy**, v. 144, p. 295–309, 2017.

MELO, A. P. et al. *A novel surrogate model to support building energy labelling system: A new approach to assess cooling energy demand in commercial buildings.* **Energy and Buildings**, v. 131, 2016.

MOSCHETTI, R. et al. *Assessing Responsive Building Envelope Designs through Robustness-Based Multi-Criteria Decision Making in Zero-Emission Buildings.* **Energies**, v. 15, n. 4, p. 1314, 11 fev. 2022.

NAJJAR, M. K. et al. *A regression-based framework to examine thermal loads of buildings.* **Journal of Cleaner Production**, v. 292, p. 126021, 2021.

NASROLLAHZADEH, N. *Comprehensive building envelope optimization: Improving energy, daylight, and thermal comfort performance of the dwelling unit.* **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 103418, dez. 2021.

NIEMELÄ, R. et al. *The effect of air temperature on labour productivity in call centres - A case study.* **Energy and Buildings**, v. 34, n. 8, p. 759–764, 2002.

NILSSON, H. O. *Thermal comfort evaluation with virtual manikin methods.* **Building and Environment**, v. 42, n. 12, p. 4000–4005, 2007.

OCHOA, C. et al. *Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort.* **Applied Energy**, v. 95, p. 238–245, 2012.

PAGEL, É. C. et al. *Ventilação natural e desempenho térmico sob diferentes configurações de aberturas em uma sala de aula.* **Ambiente Construído**, v. 22, n. 3, p. 133–157, set. 2022.

PAPACHRISTOU, C. et al. *Investigating the energy flexibility of Dutch office buildings on single building level and building cluster level.* **Journal of Building Engineering**, v. 40, 2021.

PEETERS, L.; BEAUSOLEIL-MORRISON, I.; NOVOSELAC, A. *Internal convective heat transfer modeling: Critical review and discussion of experimentally derived correlations.* **Energy and Buildings**, v. 43, n. 9, p. 2227–2239, set. 2011.

PEREIRA, D. C. L. **Iluminação natural em edifícios de escritórios: metodologia para avaliação do desempenho luminoso.** Tese (Doutorado)—São Paulo: Universidade de São Paulo, 17 abr. 2017.

PERNIGOTTO, G.; GASPARELLA, A. *Extensive comparative analysis of building energy simulation codes: Heating and cooling energy needs and peak loads calculation in TRNSYS and EnergyPlus for southern Europe climates.* **HVAC and Research**, v. 19, n. 5, 2013.

PINTO, M. M. *Desempenho energético de edifícios de escritórios com vidros insulados em climas brasileiros.* 2017.

PINTO, M. M.; WESTPHAL, F. S. Viabilidade do uso de vidros insulados para o clima brasileiro. XVI Entac - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais...**São Paulo: ANTAC, 2016.

PINTO, M. M.; WESTPHAL, F. S. Desempenho térmico do uso de vidros insulados em escritórios condicionados artificialmente: Curitiba (PR) e Boa Vista (RR). XIV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e X Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...**Balneário Camboriú: Marketing Aumentado, 2017.

PINTO, M. M.; WESTPHAL, F. S. Vidro Insulado Em Escritórios Com Fachada Envidraçada Em Florianópolis (SC). XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, **Anais...**n. 1, p. 1061–1070, João Pessoa. 2019a.

PINTO, M. M.; WESTPHAL, F. S. **Energy Performance of Offices Buildings in Brazil using Insulated Glass Units**. *Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA*. **Anais...**Rome: International Building Performance Simulation Association, 2019b.

PINTO, M. M.; WESTPHAL, F. S. **Heat balance analysis of an office building with fully glazed façade in tropical and temperate climates in Brazil**. *Proceedings of Building Simulation 2021: 17th Conference of IBPSA*. **Anais...**Bruges: IBPSA, 1 set. 2021.

POMPONI, F.; BARBOSA, S.; PIROOZFAR, P. A. E. E. *On the Intrinsic Flexibility of the Double Skin Façade: A Comparative Thermal Comfort Investigation in Tropical and Temperate Climates*. **Energy Procedia**, v. 111, n. September 2016, p. 530–539, 2017.

RABANI, M.; BAYERA MADESSA, H.; NORD, N. *Achieving zero-energy building performance with thermal and visual comfort enhancement through optimization of fenestration, envelope, shading device, and energy supply system*. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 44, p. 101020, abr. 2021.

RAFTERY, P. et al. *Effects of furniture and contents on peak cooling load*. **Energy and Buildings**, v. 85, p. 445–457, 2014.

RAKHA, T. **Towards Comfortable and Walkable Cities: Spatially Resolved Outdoor Thermal Comfort Analysis Linked to Travel Survey-based Human Activity Schedules**. [s.l.] Massachusetts Institute of Technology, 2015.

RAMÍREZ-BALAS, C. et al. *Thermal 3D CFD Simulation with Active Transparent Façade in Buildings*. **Energies**, v. 11, n. 9, p. 2265, 28 ago. 2018.

SADEGHIFAM, A. N. et al. *Combined use of design of experiment and dynamic building simulation in assessment of energy efficiency in tropical residential buildings*. **Energy and Buildings**, v. 86, p. 525–533, 2015.

SANTANA, M. V. **Influência de parâmetros construtivos no consumo de energia de edifícios de escritório localizados em Florianópolis–SC**. Florianópolis: [s.n.].

SCHEIDT, F. S. DA S.; WESTPHAL, F. S. Edifícios de escritórios representativos para estudos de desempenho energético na cidade de Florianópolis. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 14, p. e023012, 29 maio 2023.

SHEN, Y. et al. *Regional applicability of thermochromic windows based on dynamic radiation spectrum*. **Renewable Energy**, v. 196, p. 15–27, ago. 2022.

SILVA, A. S.; GHISI, E. *Uncertainty analysis of the computer model in building performance simulation*. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 258–269, 2014.

SORGATO, M. J. et al. Análise do procedimento de simulação da NBR 15575 para avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, 2014.

STEGOU-SAGIA, A. et al. *The impact of glazing on energy consumption and comfort*. **Energy Conversion and Management**, v. 48, n. 11, p. 2844–2852, nov. 2007.

STOLWIJK, J. A. *A mathematical model of physiological temperature regulation in man*. NASA Contractor Report CR-1855. **NASA Contractor Report**, v. CR-1855, n. August, p. 77, 1971.

STOLWIJK, J. A.; HARDY, J. D. *Partitional calorimetric studies of responses of man to thermal transients*. **Journal of applied physiology**, 1966.

TALAEI, M. et al. *Thermal and energy performance of a user-responsive microalgae bioreactive façade for climate adaptability*. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 52, p. 101894, ago. 2022.

TANABE, S. et al. *Evaluating thermal environments by using a thermal manikin with controlled skin surface temperature*. ASHRAE Transactions. **Anais...1994**.

TANABE, S. et al. *Numerical Simulation Model of Thermal Regulation of Man with 16 Body Parts of Evaluating Thermal Environment (Part 1 Heat Transfer at Skin Surface and comparison with SET\* and Stolwijk Model)*. *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting*. **Anais...Japão: 1995**.

TANABE, S. I. et al. *Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD)*. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 637–646, 2002.

TANABE, S.; NAKANO, J.; KOBAYASHI, K. *Development of 65-node thermoregulation-model for evaluation of thermal environment*. **Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ)**, 2001.

TARTARINI, F. et al. *CBE Thermal Comfort Tool: Online tool for thermal comfort calculations and visualizations*. **SoftwareX**, v. 12, p. 100563, 2020.

TELI, D.; JAMES, P. A. B.; JENTSCH, M. F. *Investigating the principal adaptive comfort relationships for young children*. **Building Research and Information**, v. 43, n. 3, 2015.

THE JAMOVI PROJECT. **jamovi**. , 2021. Disponível em: <<https://www.jamovi.org>>. Acesso em: 8 jun. 2022

THORSSON, S. et al. *Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting*. **International Journal of Climatology**, v. 27, p. 1983–1993, 2007.

TRAPANO, P. DI; BASTOS, L. Forma e qualidade ambiental: uma discussão sobre o uso do vidro em obras da arquitetura contemporânea. **XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, n. 1, p. 10, 2010.

TZEMPELIKOS, A. et al. *Indoor thermal environmental conditions near glazed facades with shading devices – Part II: Thermal comfort simulation and impact of glazing and shading properties*. **Building and Environment**, v. 45, n. 11, p. 2517–2525, nov. 2010.

TZEMPELIKOS, A.; ATHIENITIS, A. K.; NAZOS, A. **Integrated design of perimeter zones with glass facades**. *ASHRAE Transactions*. **Anais...**2010.

ULPIANI, G. et al. *Overheating phenomena induced by fully-glazed facades: Investigation of a sick building in Italy and assessment of the benefits achieved via model predictive control of the AC system*. **Solar Energy**, v. 157, p. 830–852, nov. 2017.

ULPIANI, G. *Overheating phenomena induced by fully-glazed facades: Investigation of a sick building in Italy and assessment of the benefits achieved via fuzzy control of the AC system*. **Solar Energy**, v. 158, n. September, p. 572–594, dez. 2017.

VIANA, S. et al. **The thermal and energy performance of the glazed studio apartments under the current and future climate scenarios in São Paulo**. *CATE 2022 Comfort At The Extremes: Resilient comfort: covid, climate change and ventilation*. **Anais...**Edinburg: 2022. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/363841427>>

WALTON, G. N. **Thermal Analysis Research Program Reference Manual**. **NBSSIR 83-2655**. Washinton, DC: [s.n.].

WANG, X. et al. *Investigating the effect of indoor thermal environment on occupants' mental workload and task performance using electroencephalogram*. **Building and Environment**, v. 158, n. May, p. 120–132, 2019.

WERNER, J.; WEBB, P. *A six-cylinder model of human thermoregulation for general use on personal computers*. **The Annals of physiological anthropology = Seiri Jinruigaku Kenkyūkai kaishi**, 1993.

WESTPHAL, F. S. **Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais.** [s.l.] Universidade Federal De Santa Catarina (UFSC), 2007.

WISSLER, E. H. *A mathematical model of the human thermal system.* **The Bulletin of Mathematical Biophysics**, v. 26, n. 2, p. 147–166, 1964.

WRAY, W. O. *A simple procedure for assessing thermal comfort in passive solar heated buildings.* **Solar Energy**, v. 25, n. 4, p. 327–333, 1980.

WU, W.; BENNER, J.; LUO, Z. *Developing analytical model for nighttime cooling of internal thermal mass.* **Applied Thermal Engineering**, v. 220, p. 119798, 5 fev. 2023.

YANG, S. et al. *Numerical simulation study of BIPV/T double-skin facade for various climate zones in Australia: Effects on indoor thermal comfort.* **Building Simulation**, v. 12, n. 1, p. 51–67, 27 fev. 2019.

YAZDI BAHRI, S. et al. *A literature review on thermal comfort performance of parametric façades.* **Energy Reports**, v. 8, p. 120–128, dez. 2022.

YEGANEH, A. J. et al. *Correlation of ambient air temperature and cognitive performance: A systematic review and meta-analysis.* **Building and Environment**, v. 143, n. July, p. 701–716, 2018.

ZHANG, F.; DE DEAR, R.; HANCOCK, P. *Effects of moderate thermal environments on cognitive performance: A multidisciplinary review.* **Applied Energy**, v. 236, n. December 2018, p. 760–777, 2019.

ZHANG, H. et al. *Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part III: Whole-body sensation and comfort.* **Building and Environment**, v. 45, n. 2, p. 399–410, 2010a.

ZHANG, H. et al. *Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part II: Local comfort of individual body parts.* **Building and Environment**, v. 45, n. 2, p. 389–398, fev. 2010b.

ZHANG, H. et al. *Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts.* **Building and Environment**, v. 45, n. 2, p. 380–388, fev. 2010c.

ZHANG, H. et al. *The CPMV index for evaluating indoor thermal comfort in buildings with solar radiation.* **Building and Environment**, v. 134, n. February, p. 1–9, 15 abr. 2018.

ZHANG, H. et al. *The CPMV\* for assessing indoor thermal comfort and thermal acceptability under global solar radiation in transparent envelope buildings.* **Energy and Buildings**, v. 225, p. 110306, 2020a.

ZHANG, S. et al. *A simulation framework for predicting occupant thermal sensation in perimeter zones of buildings considering direct solar radiation and ankle draft.* **Building and Environment**, v. 183, p. 107096, out. 2020b.

ZHAO, J.; DU, Y. *Multi-objective optimization design for windows and shading configuration considering energy consumption and thermal comfort: A case study for office building in different climatic regions of China.* **Solar Energy**, v. 206, p. 997–1017, ago. 2020.

ZHEN, J. et al. *A Field Study on the Indoor Thermal Environment of the Airport Terminal in Tibet Plateau in Winter.* **Journal of Engineering**, v. 2017, p. 1–13, 2017.

ZOMORODIAN, Z. S.; TAHSILDOOST, M. *Assessment of window performance in classrooms by long term spatial comfort metrics.* **Energy and Buildings**, v. 134, p. 80–93, 2017.

ZYGMUNT, M.; GAWIN, D. *Analysis of energy efficiency and thermal comfort for an office building complex located in Poland – a case study.* **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 415, n. 1, p. 012023, 1 nov. 2018.

## APÊNDICE A – Modelos de conforto térmico multissegmento

Este apêndice apresenta de forma mais detalhada os modelos de conforto térmico multissegmento de IESD-Fiala e de Berkeley, citados no item 2.3.3.4.

### A1 MODELO DE CONFORTO TÉRMICO IESD-FIALA

O modelo termo regulatório de Fiala, Lomas e Stohrer (1999, 2001) teve como ponto de partida o modelo de Gordon (1974). Foca nos aspectos passivos do sistema, ou seja, a modelagem do corpo humano e a troca de calor entre o corpo e o ambiente ao redor. Este modelo é apropriado para a análise da resposta ao ambiente térmico não só em temperatura e atividades moderadas, mas também em situações de estresse térmico ou exposições complexas, como condições de assimetria. O modelo é dividido em 14 segmentos mais o sistema circulatório, sendo que cada segmento do tecido é dividido em nós. A quantidade de nós em cada segmento é arbitrária. Um dos avanços significativos deste modelo também foi o desenvolvimento de um modelo de vestimenta com propriedades de isolamento não uniforme, o qual atribui diferentes fatores de isolamento para cada segmento ou setor do corpo.

A irradiação do corpo por fontes de alta temperatura, como o sol, também foi considerada, conforme descrito na equação (27), e incluída no cálculo do fluxo de calor que passa pela superfície da pele do segmento do corpo – equação (28).

$$q_{sR} = \alpha_{sf} \cdot F_{(sf-sr)} \cdot I \quad (27)$$

$$q_{sk} = q_{conv} + q_R - q_{sR} + q_{se} \quad (28)$$

Onde,  $q_{sR}$  é a densidade de fluxo de calor por radiação de onda curta absorvida pela superfície do segmento do corpo ( $W/m^2$ );  $\alpha_{sf}$  é o coeficiente de absorção da superfície do segmento do corpo;  $F_{(sf-sr)}$  é o fator de forma entre o segmento do corpo e o entorno; e  $I$  irradiação de onda curta ( $W/m^2$ ).  $q_{sk}$ ,  $q_{conv}$ ,  $q_R$  e  $q_{se}$  são as densidades de fluxo de calor através da pele, por convecção, por radiação de ondas longas ( $W/m^2$ ) e por evaporação, respectivamente ( $W/m^2$ ).

Com base no modelo termo regulatório aprimorado, os autores desenvolveram um modelo de predição de sensação térmica para usuários sedentários em condições térmicas estacionárias ou transientes. O índice de sensação térmica dinâmica (DTS – *Dynamic Thermal Sensation*) foi proposto, tendo como indicador a escala sétima da ASHRAE. Apesar de calculada com base em um modelo fisiológico e termo regulatório do corpo humano, a DTS ainda é um indicador da sensação térmica geral do indivíduo. O índice é definido pela equação (29).

$$DTS = 3 \times \tanh \left[ a \cdot \Delta T_{sk,m} + F_2 + \left( 0,11 \cdot \frac{dT_{sk,m}^{(-)}}{dt} + 1,91 e^{-0,681t} \cdot \frac{dT_{sk,m}^{(+)}}{dt_{max}} \right) \cdot \frac{1}{1 + F_2} \right] \quad (29)$$

Sendo,

$$\Delta T_{sk,m} = T_{sk,m} - T_{sk,m,0} \quad (30)$$

$$\begin{cases} a = 0,30K^{-1}(0,54^{\circ}F) & \rightarrow \Delta T_{sk,m} < 0 \\ a = 1,08K^{-1}(1,94^{\circ}F) & \rightarrow \Delta T_{sk,m} > 0 \end{cases} \quad (31)$$

$$dT_{sk,m}/dt^{(-)} = 0 \quad \rightarrow \quad dT_{sk,m}/dt > 0 \quad (32)$$

$$F_2 = 7,94 \times \exp \left( \frac{-0,902}{\Delta T_{hy} + 0,4} + \frac{7,612}{\Delta T_{sk,m} - 4} \right) \quad (33)$$

$$\Delta T_{hy} = T_{hy} - T_{hy,0} \quad (34)$$

Onde,  $a$  é a constante de controle de velocidade com que a temperatura média responde às mudanças no clima entre 0 e 1, sendo maior quando mais lenta é a resposta;  $\Delta T_{sk,m}$  é o sinal de erro da temperatura média da pele (K);  $F_2$  é o coeficiente de regressão (efeito do exercício físico e variação da temperatura central do corpo);  $T_{sk,m}$  é a temperatura média da pele (K);  $T_{sk,m,0}$  é a temperatura média inicial da pele (K);  $t$  é o tempo transcorrido desde a ocorrência de  $\frac{dT_{sk,m}}{dt_{max}}$  (s);  $T_{hy}$  é a temperatura no núcleo da cabeça (K);  $\Delta T_{hy}$  é o sinal de erro da temperatura no núcleo da cabeça (K).

## A2 MODELO FISIOLÓGICO DO CORPO HUMANO E MODELO DE CONFORTO TÉRMICO MULTISSEGMENTO DE BERKELEY

Huizenga, Hui e Arens (2001) desenvolveram um modelo de predição da resposta fisiológica do corpo humano a um ambiente térmico transiente e não uniforme, tendo como ponto de partida o modelo termo regulatório de Stolwijk (1971) e o modelo 65MN de Tanabe et al. (1994). Entre os principais avanços desse modelo em relação aos anteriores estão: permitir um número ilimitado de segmentos do corpo; aperfeiçoamento do modelo de fluxo sanguíneo; um nó referente a roupa; modelagem da transferência de calor por condução entre o corpo e superfícies em contato; aprimoramento dos coeficientes de transferência de calor por radiação e convecção; transferência de calor por radiação usando fatores de forma e um modelo de fluxo por radiação que permite considerar, por exemplo, a radiação solar que incide no corpo.

Cada segmento é modelado como quatro camadas corporais e a camada de roupa. As informações ambientais e pessoais podem ser inseridas em um número ilimitado de cenários sequenciais. Cada cenário é chamado pelos autores de fase. Todas essas informações de entrada, exceto duração e taxa metabólica, são especificadas para cada segmento do corpo.

A partir deste modelo fisiológico, Zhang et al. (2010a, 2010b, 2010c) desenvolveram um modelo de predição de sensação e conforto térmico localizados nos diferentes segmentos do corpo humano, bem como a resposta térmica do corpo inteiro. Foi elaborado com base em resultados da literatura e de medições de teste em indivíduos em câmaras climáticas e passageiros de automóveis. O modelo de conforto divide o corpo humano em 19 segmentos. É aplicável a pessoas em atividades sedentárias para uma variedade de ambientes: uniformes e não uniformes, estacionários ou transientes.

### Sensação Térmica Local e Global

A primeira publicação apresenta um modelo de predição da Sensação Térmica Local de partes individuais do corpo humano (ZHANG et al., 2010c). A sensação local é uma função da temperatura local e geral (corpo inteiro) da pele e da taxa de variação da temperatura local da pele e da temperatura central do corpo ao longo do tempo – equação (35).

$$Local\ Sensation = f\left(T_{sk,i}, \frac{dT_{sk,i}}{dt}, \bar{T}_{sk}, \frac{dT_{cr}}{dt}\right) \quad (35)$$

Sendo,  $T_{sk,i}$  a temperatura da pele no segmento  $i$  (K);  $\bar{T}_{sk}$  a temperatura média da pele (K);  $T_{cr}$  a temperatura de core (K);  $t$  o tempo/período de avaliação (s).

A sensação térmica local é proposta como uma função logarítmica da temperatura local da pele, representada pela diferença entre a temperatura local da pele e sua temperatura alvo. Inclui também a influência da sensação geral do corpo na sensação térmica local. Este índice é composto pelo componente de sensação térmica estática mais o componente dinâmico, podendo ser descrita conforme equação (36).

$$S_i = 4 \left( \frac{2}{1 + e^{-C1(T_{sk,i} - T_{sk,i,set}) - K1[(T_{sk,i} - T_{sk,i,set}) - (\bar{T}_{sk} - \bar{T}_{sk,set})]}} - 1 \right) + C2_i \frac{dT_{sk,i}}{dt} + C3_i \frac{dT_{cr}}{dt} \quad (36)$$

Sendo,  $S_i$  a sensação térmica local no segmento  $i$ ;  $T_{sk,i,set}$  o *setpoint* da temperatura da pele no segmento  $i$ , isto é, quando a sensação térmica local é neutra (K); e  $\bar{T}_{sk,set}$  o *setpoint* da temperatura média da pele, isto é, quando a sensação térmica é neutra (K); e  $K_1$  o fator do efeito da temperatura geral do corpo na sensação térmica local. Os coeficientes de regressão  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  variam conforme parte do corpo, sendo  $C_1$  para condições em estado estacionário, e  $C_2$  e  $C_3$  para condições transientes. Estes coeficientes são tabelados e apresentados nas tabelas 1 e 2 de Zhang et al. (2010b).

O método de definição da sensação térmica global dependerá da presença condição de assimetria térmica (ZHANG et al., 2010a). O modelo “*no-opposite-sensation*” (sem sensações opostas) aplica-se quando: (1) as sensações são uniformes; (2) a sensação local é de calor quando a sensação do corpo todo também é de calor; (3) a sensação local é de frio quando a sensação do corpo todo também é de frio; e (4) há ligeira sensação de frio/calor local e o restante das partes do corpo está com sensação calor/frio.

Quando o nível de sensação térmica for de frio/quente a extremamente frio/quente ( $|S_{i,3max/min}| \geq 2$ ), a sensação térmica global será definida pelas equações (37) ou (38). Quando o nível de sensação térmica for de levemente frio/quente ( $|S_{i,3max/min}| < 2$ ), a sensação térmica global será definida pelas equações (39) ou (40).

$$\text{Se quente: } S_o = 0,5S_{i,max} + 0,5S_{i,3max} \quad (37)$$

$$\text{Se frio: } S_o = 0,38S_{i,min} + 0,62S_{i,3min} \quad (38)$$

$$\text{Se levemente quente: } S_{i,max} > 2 - \left(\frac{2}{n^{total}-2}\right) \times (i - 2) \rightarrow S_o = \frac{\sum S_{i,max}}{n^+} \quad (39)$$

$$\text{Se levemente frio: } S_{i,min} > -2 + \left(\frac{2}{n^{total}-2}\right) \times (i - 2) \rightarrow S_{global} = \frac{\sum S_{i,min}}{n^-} \quad (40)$$

Onde,  $S_{i,max/min}$  são a sensação térmica local da parte do corpo com o maior ou menor nível;  $S_{i,3max/min}$  são a sensação térmica local da parte do corpo com o terceiro maior ou menor nível;  $S_o$  é a sensação térmica global do corpo;  $n^{total}$  é o total de partes do corpo;  $n^+$  e  $n^-$  são os números de partes do corpo com sensação térmica positiva e negativa, respectivamente.

Caso a sensação local seja de calor/frio significativo e o restante do corpo está com a sensação oposta, deverá ser utilizado o modelo “*opposite-sensation*” (sensações opostas – assimetria). Este modelo divide a sensação térmica das partes do corpo em dois grupos, sendo um representado pelos segmentos com  $S_{local} \geq 0$  (neutro a calor) e outro pelos segmentos com  $S_{local} < 0$  (frio). O grupo que representa a sensação térmica predominante, ou seja, a que abrange a maior parte das partes

do corpo, é chamado pelos autores de “*bigger-group*”. A sensação térmica geral deste grupo é calculada de acordo com o modelo “*no-opposite-sensation*”. Caso o número de partes do corpo seja idêntico em ambos grupos, o conjunto com sensação térmica local positiva será o “*bigger-group*”.

O grupo menor será o que representa a “força oposta”. A força individual de cada uma das partes do corpo neste grupo deverá ser calculada, conforme equação (41). A sensação térmica global é obtida adicionando as forças individuais combinadas – equação (42) – à sensação térmica do grande grupo, conforme equação (43).

$$S_{o,modifier} = a(\Delta S_i - c) + b \quad (41)$$

$$combined\ force = maxS_{o,modifier} + 0,10 \cdot secondmaxS_{o,modifier} \quad (42)$$

$$S_o = S_{o,bigger-group} + [combined\ force] \quad (43)$$

Onde,  $\Delta S_i$  é a diferença da sensação local do início ao fim da aplicação de resfriamento/aquecimento local na parte do corpo  $i$ ;  $S_{o,modifier}$  é a força individual, ou seja, o efeito da mudança da sensação local na sensação global;  $a$  é um coeficiente que quantifica a habilidade de cada parte do corpo em influenciar a sensação global;  $b$  e  $c$  são coeficientes de regressão linear.

Entretanto, quando o menor grupo for da sensação de frio: se uma ou mais partes do corpo nesta condição é uma parte dominante (peito, costas ou pélvis), a sensação global ( $S_{overall}$ ) será igual a sensação local da parte do corpo com maior valor absoluto (mais fria).

### Conforto térmico local e global

O nível de conforto térmico local é definido em função da sensação térmica local e geral (ZHANG et al., 2010b). O modelo matemático foi desenvolvido de forma a reproduzir os principais efeitos sobre as respostas de conforto térmico humano ao ambiente térmico observados nos testes realizados. O índice de conforto local (LC – *Local Comfort*) é um modelo de função linear adaptado por função logarítmica – equação (44).

$$LC = \left[ \frac{-4 - (C_6 + C_{71}|S_0^-| + C_{72}|S_0^+|)}{[(-4 + C_{31}|S_0^-| + C_{32}|S_0^+| + C_8)]^n} \frac{-4 - (C_6 + C_{71}|S_0^-| + C_{72}|S_0^+|)}{[(4 + C_{31}|S_0^-| + C_{32}|S_0^+| + C_8)]^n} + \frac{-4 - (C_6 + C_{71}|S_0^-| + C_{72}|S_0^+|)}{[(4 + C_{31}|S_0^-| + C_{32}|S_0^+| + C_8)]^n} \right] \times \quad (44)$$

$$[(S_1 + C_{31}|S_0^-| + C_{32}|S_0^+| + C_8)^n] + (C_6 + C_{71}|S_0^-| + C_{72}|S_0^+|)$$

Onde,  $S_o$  é sensação térmica global do corpo;  $n$  representa a forma da curva, definindo o modelo de curvatura que melhor se adequa a parte do corpo: linear ( $n=1$ ), exponencial ( $n=1,5$ ) e quadrática ( $n=2$ ).  $C$  são coeficientes de regressão, sendo que  $C3$  ( $C31$  e  $C32$ ) determina o deslocamento do conforto máximo, considerando o efeito da assimetria ( $C31$  para a direção aquecida quando a sensação geral ficar mais fria e o  $C32$  para a direção fria quando a sensação geral é quente).  $C6$  representa o valor máximo de conforto local.  $C7$  ( $C71$  e  $C72$ ) correspondem ao aumento do conforto máximo, sendo que um valor positivo indica uma preferência fria e um valor negativo indica uma preferência quente.  $C8$  corresponde ao deslocamento da sensação local a uma sensação geral de neutralidade.

O conforto térmico global é apresentado em Zhang Hui et al. (2010b). Em situações onde o sujeito tem o controle sobre o ambiente térmico e/ou se as condições térmicas do ambiente são transientes, o conforto global é calculado pela média dos dois votos mínimos e do voto máximo de conforto. Caso nenhum destes critérios seja atendido, o conforto térmico global do corpo será definido pela média dos dois menores votos de conforto local. Entretanto, se as duas mãos ou os dois pés estiverem entre as duas partes do corpo em maior desconforto, a mão ou pé com o segundo menor nível de conforto deverá ser desconsiderado. Neste caso, ao invés de utilizar o segundo menor voto nos cálculos do conforto global, deve se utilizado o terceiro menor voto.

## APÊNDICE B – Descrição dos Modelos de Ajuste Solar

Neste apêndice são descritos em maior detalhe os quatro modelos de ajuste solar de índices de conforto térmico apresentados na seção 2.3.6.

### B1 SOLAR-ADJUSTED MEAN RADIANT TEMPERATURE (SA-MRT)

O modelo desenvolvido por La Gennusa et al. (2005, 2007) ajusta a temperatura radiante média considerando a radiação incidente no sujeito à medida que adiciona um módulo de radiação solar direta e difusa no fluxo de calor por radiação. Permite que se realize uma avaliação espacial, visto que utiliza os fatores de forma para definir a quantidade de radiação incidente no ocupante. O ajuste considera todos os fatores geométricos, incluindo as dimensões, fatores de forma entre o sujeito e superfícies circundantes (opacas e transparentes), bem como altitude solar e azimute. Indica-se este ajuste para ambientes internos termicamente moderados, como escritórios, e pode ser utilizado tanto na correção dos índices PMV e PPD, quanto na temperatura operativa no modelo adaptativo.

Em La Gennusa et al. (2007), os autores apresentam uma espécie de passo a passo para determinar a temperatura radiante média do objeto irradiado ( $T_{r,irr}$ ). O índice  $T_{r,irr}$  é definido como a soma quadrática da temperatura radiante médias do sujeito não irradiado, e dos acréscimos na temperatura radiante média devido à radiação solar direta e difusa, respectivamente – equação (45).

$$\bar{T}_{r,irr}^4 = \bar{T}_{r,ur}^4 + \Delta\bar{T}_{r,1}^4 + \Delta\bar{T}_{r,2}^4 \quad (45)$$

Onde,

$$\bar{T}_{r,ur}^4 = \sum_{N=1}^N F_{p \rightarrow N} T_N^4 \quad (46)$$

$$\Delta\bar{T}_{r,1}^4 = C_{dn} C_S^{in} \frac{\alpha_{irr,dif}}{\varepsilon\sigma} \sum_{J=1}^M I_{dif,J} \quad (47)$$

$$\Delta\bar{T}_{r,2}^4 = C_{dn} \frac{\alpha_{irr,dif}}{\varepsilon\sigma} f_p I_{dir,J} \quad (48)$$

Substituindo na equação (45), obtém-se:

$$\bar{T}_{r,irr} = \sqrt[4]{\sum_{N=1}^N F_{p \rightarrow N} T_N^4 + \frac{C_{dn}}{\varepsilon\sigma} \left( \alpha_{irr,dif} \sum_{J=1}^M F_{p \rightarrow J} I_{dif,J} + C_S^{in} \alpha_{irr,dif} f_p I_{dir,J} \right)} \quad (49)$$

Sendo,  $\bar{T}_{r,irr}$  a temperatura radiante média do objeto irradiado (K);  $T_N$  a temperatura absoluta da  $i^{\circ}$  superfície isotérmica (K);  $F_{p \rightarrow N}$  o fator de forma entre pessoa e superfície N;  $F_{p \rightarrow J}$  o fator de forma entre pessoa e superfície transparente J;  $I_{dif,J}$  a intensidade da radiação solar difusa que atravessa a superfície transparente J ( $W/m^2$ );  $I_{dir,J}$  a intensidade de radiação solar direta que entra através da superfície transparente J atinge a pessoa ( $W/m^2$ );  $\alpha_{irr,dif}$  e  $\alpha_{irr,dir}$  as absorptâncias a radiação solar difusa e direta, respectivamente;  $f_p$  o fator de forma projetado do sujeito na direção do feixe solar;  $C_{dn}$  o coeficiente dia-noite (1 se dia, 0 se noite); e  $C_S^{in}$  o coeficiente de proteção do ambiente interno (1 se a radiação solar atinge o sujeito, 0 para outros casos).

O método também inclui um ajuste na temperatura radiante no plano para a previsão de desconforto localizado devido à assimetria no campo radiante considerando a exposição do indivíduo à radiação solar, conforme equações (50) e (51). Uma vez que a temperatura radiante plana nas duas direções opostas foi determinada, a assimetria radiante pode ser calculada com a relação (52).

$$T_{pr1,irr}^4 = \sum_{N=1}^{N+} F_{p \rightarrow N} T_N^4 + \frac{C_{dn}}{\varepsilon\sigma} (\alpha_{irr,dif} \sum_{J=1}^{M+} F_{p \rightarrow J} I_{dif,J} + C_S^{in} \alpha_{irr,dir} f_p I_{dir,J}) \quad (50)$$

$$T_{pr2,irr}^4 = \sum_{N=1}^{N-} F_{p \rightarrow N} T_N^4 + \frac{C_{dn}}{\varepsilon\sigma} (\alpha_{irr,dif} \sum_{J=1}^{M-} F_{p \rightarrow J} I_{dif,J} + C_S^{in} \alpha_{irr,dir} f_p I_{dir,J}) \quad (51)$$

$$\Delta T_{pr}^4 = T_{pr1,irr}^4 - T_{pr2,irr}^4 \quad (52)$$

Sendo, N+ e M+ o número de superfícies opacas e de vidro, respectivamente, vistas pela superfície do plano que recebe radiação solar direta; N- e M- são o número das superfícies opacas e transparentes vistas pela outra superfície do plano.

## B2 MODIFIED SOLAR-ADJUSTED MEAN RADIANT TEMPERATURE (MSA-MRT)

O modelo desenvolvido por Marino *et al.* e publicado em uma série de publicações (MARINO et al., 2017, 2018b; MARINO; NUCARA; PIETRAFESA, 2017) se assemelha ao modelo de La Gennusa et al. (2005, 2007). Entretanto, além de considerar a radiação de onda longa proveniente das superfícies circundantes e o fluxo de radiação solar direta e difusa que atravessa as janelas, também considera o fluxo de radiação solar oriundo de reflexões internas nas superfícies do ambiente. Este modelo é indicado para ambientes internos e pode ser aplicado como ajuste dos índices PMV e PPD e também na temperatura operativa no modelo adaptativo.

A equação (53) apresenta o cálculo para a temperatura radiante média ajustada ( $\bar{T}_r$ ).

$$\bar{T}_r = \sqrt[4]{\sum_{N=1}^N F_{p \rightarrow N} T_N^4 + \frac{\alpha_{sw}}{\varepsilon_p \sigma} [\sum_{J=1}^N F_{p \rightarrow J} I_{dif,J} + f_p I_{dir} + 0,5 \rho_{floor} I_{dir,h} + \sum_{N=1}^N \rho_N (\sum_{J=N}^N F_{N-J} I_{dif,J}) F_{p \rightarrow N}]} \quad (53)$$

Sendo,  $\bar{T}_r$  a temperatura radiante média (K);  $T_N$  a temperatura na superfície N (K);  $F_{p \rightarrow N}$  o fator de forma entre a pessoa e a superfície N;  $F_{p \rightarrow J}$  o fator de forma entre a pessoa e a superfície transparente J;  $F_{N \rightarrow J}$  o fator de forma entre a superfície transparente J e a superfície N;  $I_{dif,J}$  a intensidade da radiação solar difusa que atravessa a superfície transparente J ( $W/m^2$ );  $I_{dir,J}$  a intensidade de radiação solar direta que entra através da superfície transparente J e atinge a pessoa ( $W/m^2$ );  $I_{dir,h}$  a intensidade de radiação solar direta no plano horizontal interno ( $W/m^2$ );  $\rho_{floor}$  o coeficiente de reflexão do piso;  $\rho_N$  o coeficiente de reflexão da superfície N;  $\alpha_{sw}$  a absorvância do corpo a radiação de ondas curtas;  $\varepsilon_p$  a emissividade do corpo a ondas longas;  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann ( $W.m^2.K^{-4}$ ); e  $f_p$  o fator de área projetada.

O método também inclui um ajuste na temperatura radiante no plano para a previsão de desconforto localizado devido à assimetria no campo radiante acrescentando efeito da radiação solar (MARINO et al., 2018a), conforme equação (54).

$$T_{pr} = \sqrt[4]{\frac{\alpha_{LW}}{\varepsilon_{AT}} \sum_{N=1}^N F_{AT \rightarrow N} T_N^4 + \frac{\alpha_{sw}}{\varepsilon_{AT} \sigma} (\sum_{J=1}^M F_{AT \rightarrow J} I_{dif,J} + I_{dir \perp})} \quad (54)$$

Sendo,  $T_{pr}$  a temperatura radiante do plano (K);  $F_{AT \rightarrow N}$  o fator de forma entre o plano e a superfície N;  $F_{AT \rightarrow J}$  o fator de forma entre o plano e a janela J;  $I_{dir \perp}$  a radiação solar direta perpendicular a superfície da área de teste ( $W/m^2$ ); e  $\varepsilon_{AT}$  a emissividade da área de teste.

### B3 SOLARCAL

O *SolarCal* (ARENS et al., 2015), modelo para ajuste da MRT devido ao impacto da radiação solar no ocupante, é o método requerido na ASHRAE 55 (ASHRAE, 2020). É um modelo simplificado com a intenção de rápida estimativa da radiação solar e usa o campo radiante efetivo (ERF) para mensurar o fluxo de energia radiante no corpo. Como os modelos anteriores, pode ser aplicado como ajuste tanto no modelo de conforto térmico PMV-PPD quanto no modelo Adaptativo. Ele foi elaborado com base em um modelo desenvolvido por Arens, Gonzalez e Berglund (1986) para ambientes externos.

Neste modelo, a temperatura média radiante ( $\bar{t}_r$ ) é definida como a soma entre a temperatura radiante média por ondas longas ( $\bar{t}_{rlw}$ ) e a temperatura radiante média por ondas curtas ( $\bar{t}_{rsw}$ ), conforme equação (55). O componente da radiação de ondas longas no ponto é definido com base nos fatores de forma e temperaturas nas

superfícies ao redor do indivíduo – equação (56), como recomendado pela ISO 7726 (ISO, 1998). O componente de radiação de ondas curtas na temperatura média radiante é definido com base no ganho solar no corpo humano por meio do campo radiante solar ( $ERF_{solar}$ ), conforme equação (57).

$$\bar{t}_r = \bar{t}_{rlw} + \bar{t}_{rsw} \quad (55)$$

$$\bar{t}_{rlw} = \sqrt[4]{\sum_{N=1}^N F_{p \rightarrow N} T_N^4} \quad (56)$$

$$ERF_{solar} = \left( 0,5 \cdot f_{eff} \cdot f_{svv} (I_{diff} + I_{TH} \rho_{floor}) + \frac{A_p f_{bes} I_{dir}}{A_D} \right) \cdot T_{sol} \left( \frac{\alpha_{SW}}{\alpha_{LW}} \right) \quad (57)$$

Sendo,  $T_N$  a temperatura absoluta da superfície  $i$  ( $^{\circ}C$ );  $F_{p \rightarrow N}$  o fator de forma entre pessoa e superfície  $N$ ;  $I_{diff}$  a intensidade de radiação solar difusa ( $W/m^2$ );  $I_{TH}$  a intensidade de radiação solar horizontal total ( $W/m^2$ );  $I_{dir}$  a intensidade de radiação solar direta ( $W/m^2$ );  $f_{svv}$  a fração visível da abóboda celeste;  $f_p$  o fator de área projetada;  $f_{bes}$  a fração da superfície do corpo exposta ao sol;  $f_{eff}$  a fração da superfície do corpo exposta à radiação (0,696 para pessoas sentadas e 0,725 para pessoas em pé);  $\rho_{floor}$  a refletância do piso;  $A_p$  a área projetada de uma pessoa exposta à luz solar direta;  $A_D$  área de pele de uma pessoa (Du Bois =  $1,82m^2$ );  $T_{sol}$  a transmitância solar combinada do sistema de janela e elemento de sombreamento;  $\alpha_{SW}$  a absorvância do corpo a radiação de ondas curtas pelo corpo (indica-se 0,67 para pele clara e roupas de cor mediana); e  $\alpha_{LW}$  a absorvância do corpo a radiação de ondas longas (indica-se: 0,95).

O ERF no corpo humano, devido às trocas por radiação de onda longa, é estabelecido conforme equação (58). Baseado na lei de Kirchohoff, assume-se que o calor solar absorvido é igual a quantidade de radiação de onda longa adicional emitida pelo corpo, conforme descrito na equação (59).

$$ERF = f_{eff} \cdot h_r (\bar{t}_r - t_a) \quad (58)$$

$$ERF = ERF_{LW} + ERF_{solar} \quad (59)$$

Sendo,  $t_a$  a temperatura interna do ar ( $^{\circ}C$ );  $\bar{t}_r$  a temperatura radiante média total ( $^{\circ}C$ ); e  $h_r$  o coeficiente de transferência de calor por radiação ( $W/m^2.K$ ).

Isolando-se  $\bar{t}_r$  na equação (58), obtém-se a equação (60). Substituindo-se o  $ERF$  pela equação (59), obtém-se a equação (61). Substituindo-se o  $ERF_{LW}$  pela equação (58) em que a  $\bar{t}_r = \bar{t}_{rlw}$ , obtém-se a equação (62) e, simplificando-a, a equação (63). Relacionando-a com a equação (55), define-se a  $\bar{t}_{rsw}$  na equação (64).

$$\bar{t}_r = \frac{ERF}{f_{eff} \cdot h_r} + t_a \quad (60)$$

$$\bar{t}_r = \frac{ERF_{solar} + ERF_{LW}}{f_{eff} \cdot h_r} + t_a \quad (61)$$

$$\bar{t}_r = \frac{ERF_{solar} + [f_{eff} \cdot h_r (\bar{t}_{rlw} - t_a)]}{f_{eff} \cdot h_r} + t_a \quad (62)$$

$$\bar{t}_r = \frac{ERF_{solar}}{f_{eff} \cdot h_r} + \bar{t}_{rlw} \quad (63)$$

$$\bar{t}_{rsw} = \frac{ERF_{solar}}{f_{eff} \cdot h_r} \quad (64)$$

O fator de área projetada ( $f_p$ ) é definido em função do ângulo horizontal solar em relação à frente da pessoa (SHARP) e da altitude solar. O valor de  $f_p$  pode ser encontrado por meio de interpolação bi linear utilizando os valores da Tabela 30. O SHARP é o ângulo horizontal entre a direção normal à frente do ocupante referência e a direção solar, conforme definido na equação (65). Este ângulo varia de 0 a 180°, com rotação em ambos os sentidos. A área projetada de uma pessoa exposta à luz solar direta ( $A_p$ ) é definida pela equação (66).

$$\begin{cases} \text{se } |\theta_1 - \theta_2| > 180 \rightarrow SHARP = 360 - |\theta_1 - \theta_2| \\ \text{se } |\theta_1 - \theta_2| < 180 \rightarrow SHARP = |\theta_1 - \theta_2| \end{cases} \quad (65)$$

$$A_p = f_{eff} f_p A_D \quad (66)$$

Sendo,  $\theta_1$  o azimute solar (°);  $\theta_2$  o azimute do corpo humano (°); e  $A_D$  a área de pele de uma pessoa ( $DuBois = 1,82m^2$ ).

Tabela 30 - Valores tabulados de fator de área projetada

		ALTITUDE						
		$f_p$	0	15	30	45	60	75
SHARP	0	0,29	0,324	0,305	0,303	0,262	0,224	0,177
	15	0,292	0,328	0,294	0,288	0,268	0,227	0,177
	30	0,288	0,332	0,298	0,29	0,264	0,222	0,177
	45	0,274	0,326	0,294	0,289	0,252	0,214	0,177
	60	0,254	0,308	0,28	0,276	0,241	0,202	0,177
	75	0,23	0,282	0,262	0,26	0,233	0,193	0,177
	90	0,216	0,26	0,248	0,244	0,22	0,186	0,177
	105	0,234	0,258	0,236	0,227	0,208	0,18	0,177
	120	0,262	0,26	0,224	0,208	0,196	0,176	0,177
	135	0,28	0,26	0,21	0,192	0,184	0,17	0,177
	150	0,298	0,256	0,194	0,174	0,168	0,168	0,177
	165	0,306	0,25	0,18	0,156	0,156	0,166	0,177
	180	0,3	0,24	0,168	0,152	0,152	0,164	0,177

Fonte: (ASHRAE, 2020)

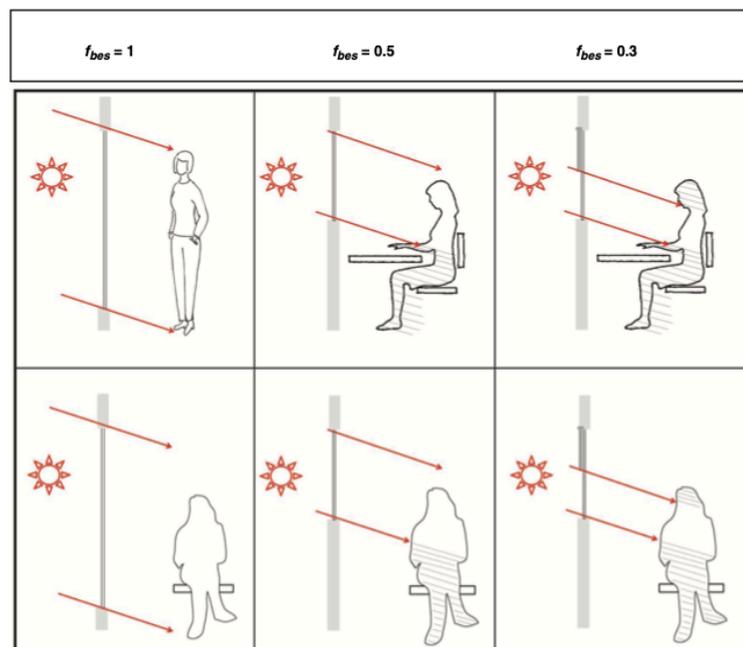
A fração da abóboda celeste vista pelo ocupante ( $f_{svv}$ ) é definida em (67).

$$f_{svv} = \frac{\tan^{-1}(h/2d) \cdot \tan^{-1}(l/2d)}{90 \times 180} \quad (67)$$

onde,  $h$  (altura) e  $l$  (largura) se referem às dimensões da janela, e  $d$  é a distância entre o ocupante e a janela. Quando o fator for calculado para múltiplas janelas, define-se o fator de cada uma e soma-se os valores.

A fração do corpo exposta a luz solar ( $f_{bes}$ ) é a fração do fator de área projetada  $f_p$  do corpo que não é sombreada pela esquadria, ou por qualquer tipo de sombreamento, variando de 0 a 1. Os autores apresentam a Figura 70, que apresenta simplificações para definição do  $f_{bes}$ .

Figura 70 - Fração do corpo exposta ao sol ( $f_{bes}$ ).



Fonte: Arens et al. (2015).

O estudo não traz nenhum método de ajuste da assimetria na temperatura radiante. Entretanto, a ASHRAE 55 (2017), a qual utiliza este estudo na definição do efeito da radiação solar no conforto térmico do ocupante, recomenda um ajuste também na assimetria na temperatura radiante. O cálculo inclui a contribuição da temperatura radiante média de ondas curtas quando há incidência de radiação solar no ocupante por meio da substituição da temperatura radiante do plano ( $t_{pr}$ ) na direção em que há exposição à radiação solar por  $t_{pr,sol}$  - equação (68) - e então no cálculo da assimetria na temperatura radiante - equação (69).

$$t_{pr,sol} = \bar{t}_{rsw} \cdot 2 + t_{pr,1} \quad (68)$$

$$\Delta t_{pr} = t_{pr,sol} - t_{pr,2} \quad (69)$$

sendo,  $\Delta t_{pr}$  a assimetria na temperatura radiante ( $^{\circ}\text{C}$ );  $t_{pr,sol}$  a temperatura radiante no plano acrescentando o efeito da radiação solar ( $^{\circ}\text{C}$ );  $t_{pr,1}$ : temperatura radiante no plano com incidência de radiação solar direta ( $^{\circ}\text{C}$ ); e  $t_{pr,2}$  a temperatura radiante no plano oposto a incidência da radiação solar direta ( $^{\circ}\text{C}$ ).

#### B4 CORRECTED PREDICTED MEAN VOTE (CPMV)

O modelo desenvolvido por Zhang et al. (2018) engloba a influência da radiação solar direta no conforto térmico de pessoas em ambientes internos aplicando uma correção no cálculo do índice PMV. O mesmo é indicado para ambientes internos com exposição à radiação solar. A correção do índice PMV (CPMV) é dada pela equação (70) e do PPD pela equação (71).

$$\begin{aligned} CPMV = & [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,0275] \\ & \cdot \{(M - W) - 3,05 \cdot [5,733 - 0,007 \cdot (M - W) - P_a] - 0,42 \\ & \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,73 \cdot 10^{-2} \cdot M \cdot (5,867 - P_a) - 0,0014 \\ & \cdot M \cdot (34 - t_a) - (R_l - R_{dir}) - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\} \end{aligned} \quad (70)$$

$$CPPD = 100 - 95 \cdot e^{[-(0,03353 \cdot CPMV^4 + 0,2179 \cdot CPMV^2)]} \quad (71)$$

Sendo,  $R_l$  a carga térmica por radiação de onda longa – equação (72) - e  $R_{dir}$  a carga térmica por radiação solar - equação (73).

$$R_l = \{\varepsilon f_{cl} f_{eff} \sigma [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4]\} \quad (72)$$

$$R_{dir} = \alpha_{sw} f_{cl} f_{eff} f_p I_{dir} \quad (73)$$

Sendo,  $M$  a taxa metabólica ( $\text{W}/\text{m}^2$ );  $W$  a potência mecânica efetiva ( $\text{W}/\text{m}^2$ );  $t_a$  a temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\bar{t}_r$  a temperatura média radiante ( $^{\circ}\text{C}$ );  $t_{cl}$  a temperatura superficial vestimenta ( $^{\circ}\text{C}$ );  $P_a$  a pressão parcial de vapor d'água (Pa);  $h_c$  o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ );  $\alpha_{sw}$  a absorvância a radiação de ondas curtas;  $f_{cl}$  o fator de área de superfície coberta pela vestimenta;  $f_{eff}$  a fração da superfície do corpo exposta à radiação (0,696 para pessoas sentadas e 0,725 pessoas em pé);  $f_p$  o fator de área projetada; e  $I_{dir}$  a radiação solar direta que incide na pessoa ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

O fator de área de superfície coberta pela vestimenta ( $f_{cl}$ ) é definido pela equação (74).

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 I_{cl} & \text{para } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}} \\ 1,05 + 0,645 I_{cl} & \text{para } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}} \end{cases} \quad (74)$$

Onde,  $I_{cl}$  é o isolamento da vestimenta ( $m^2.K/W$ ).

O estudo não apresenta uma forma de ajuste no cálculo da assimetria na temperatura radiante. Também não é possível utilizar a recomendação da ASHRAE 55 (ASHRAE, 2020) para o cálculo ajustado da temperatura radiante no plano, pois o CPMV não corrige a temperatura radiante média, mas sim o PMV. Uma outra limitação deste método é o fato de ele não considerar o efeito da radiação difusa no conforto térmico de ocupantes.

Posteriormente, em experimento de campo que coletou 916 respostas térmicas em edifícios com fachada envidraçada (ZHANG et al., 2020a), os autores concluíram que o CPMV apresenta desvio significativo dos votos de sensação térmica coletados quando em condições de alta radiação solar difusa. Propuseram, então, o índice CPMV\*, o qual inclui um componente referente à radiação solar difusa – equação (75) – ao cálculo do CPMV. O CPMV\* é descrito na equação (76).

$$R_{dif} = \alpha_{sw} f_{cl} f_{eff} \sum_{j=1}^{N_d} (F_{p \rightarrow j} I_{dif,j}) \quad (75)$$

$$\begin{aligned} CPMV^* = & [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,0275] \\ & \cdot \{(M - W) - 3,05 \cdot [5,733 - 0,007 \cdot (M - W) - P_a] - 0,42 \\ & \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,73 \cdot 10^{-2} \cdot M \cdot (5,867 - P_a) - 0,0014 \cdot M \\ & \cdot (34 - t_a) - (R_l - R_{dir} - R_{dif}) - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\} \end{aligned} \quad (76)$$

Sendo,  $F_{p \rightarrow j}$  o fator de forma entre a pessoa e a superfície transparente j e  $I_{dif,j}$  a intensidade de radiação solar difusa que atravessa a superfície transparente j ( $W/m^2$ ).

O índice PPD também foi ajustado em acordo com os resultados obtidos no experimento. Concluiu-se que, devido à variabilidade na aceitação da radiação solar, não seria consistente apenas substituir o PMV pelo CPMV\* no cálculo do PPD. Os autores sugeriram, portanto, o percentual inaceitável (PPUA), descrito na equação (77).

$$PPUA = 100 - 88 \exp[-0,00015(CPMV^* + 0,34)^4 - 0,08768(CPMV^* + 0,34)^2] \quad (77)$$

## APÊNDICE C – Definição do modelo de ajuste solar

A revisão de literatura apontou a necessidade de corrigir os índices tradicionais de conforto térmico para melhor considerar os efeitos da radiação solar direta e difusa incidente na percepção térmica dos ocupantes. Essa necessidade é ainda mais evidente ao avaliar o conforto térmico em ambientes internos com amplas áreas envidraçadas. Nos últimos anos, vários modelos de ajuste solar têm sido desenvolvidos, mas apresentam diferenças significativas entre seus métodos de cálculo.

Para uma avaliação completa do conforto térmico em ambientes sob a influência da radiação solar, realizou-se um estudo comparativo entre os modelos de ajuste solar. Estudaram-se os modelos de ajuste solar abordados na seção 2.3.6, para um ambiente de escritório com diferentes tipos de vidro. Esse estudo é descrito a seguir neste apêndice, detalhando os procedimentos metodológicos, resultados e discussões.

### C1 MÉTODO

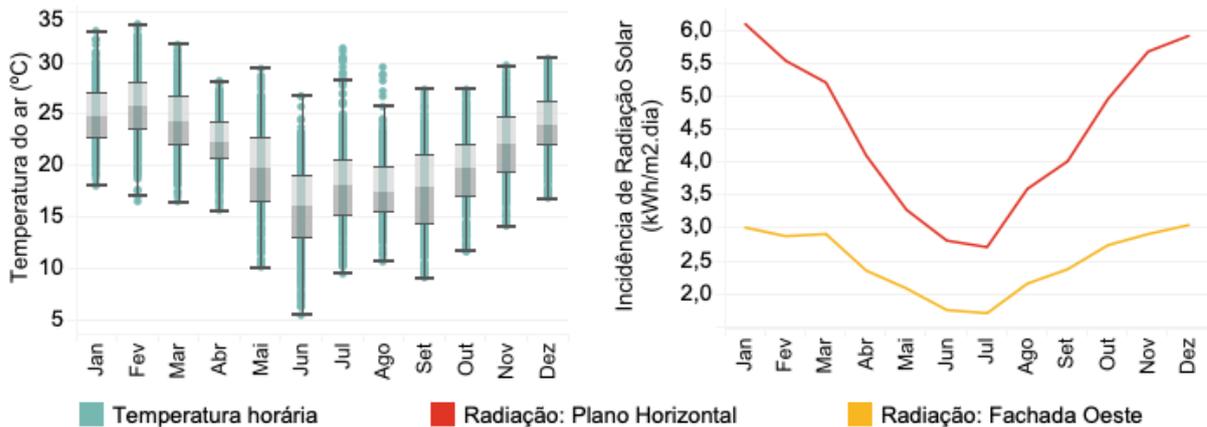
#### C1.1 CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA

O estudo foi realizado para o clima de Florianópolis, cidade litorânea localizada na latitude 27°S. O local possui clima classificado como Cfa de acordo com Köppen-Geiger, o qual é caracterizado por ser temperado, com estações bem definidas, úmido e com verões quentes (KOTTEK et al., 2006). A Figura 71 mostra os dados estatísticos mensais de temperatura do ar e a média diária de incidência de radiação solar nos planos horizontal e vertical oeste. Estes dados foram obtidos a partir do arquivo climático “BRA\_Florianopolis.838990\_SWERA.epw”, disponível no banco de arquivos climáticos do *EnergyPlus* (DOE, 2017). Esse arquivo foi utilizado nas simulações computacionais deste estudo.

Analisando a Figura 72, é possível observar que os meses com maior média de incidência de radiação solar diária na fachada oeste, a mais crítica, são de dezembro a março. Dentre esses meses, foi selecionado o dia útil de verão com maior incidência de radiação solar: 6 de dezembro (Figura 72). Nesse dia, a incidência horária máxima de radiação solar é de 830 W/m<sup>2</sup>, com um total diário de 4,7 kWh/m<sup>2</sup>.

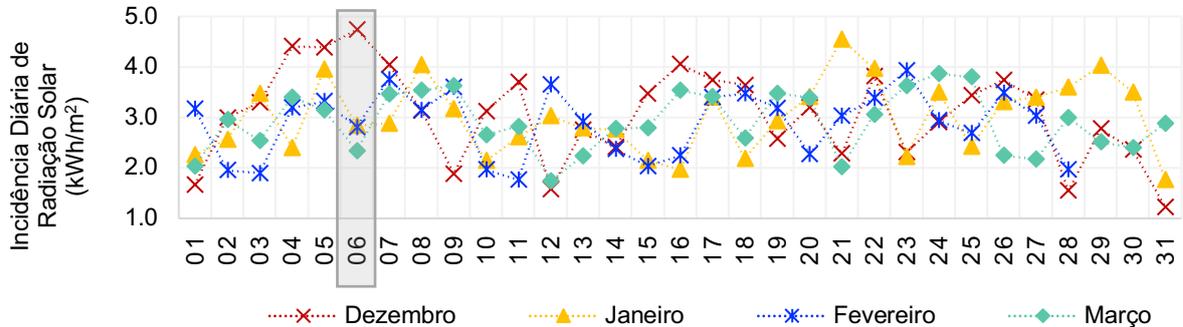
A Figura 73a apresenta a variação horária da temperatura externa e da radiação solar incidente na fachada oeste ao longo desse dia, onde a incidência solar direta ocorre das 13h às 19h e a temperatura externa varia em 7,5 °C.

Figura 71 - Temperatura do ar e incidência de radiação solar em Florianópolis.



Fonte: arquivo climático "BRA\_Florianopolis.838990\_SWERA.epw" (DOE, 2017).

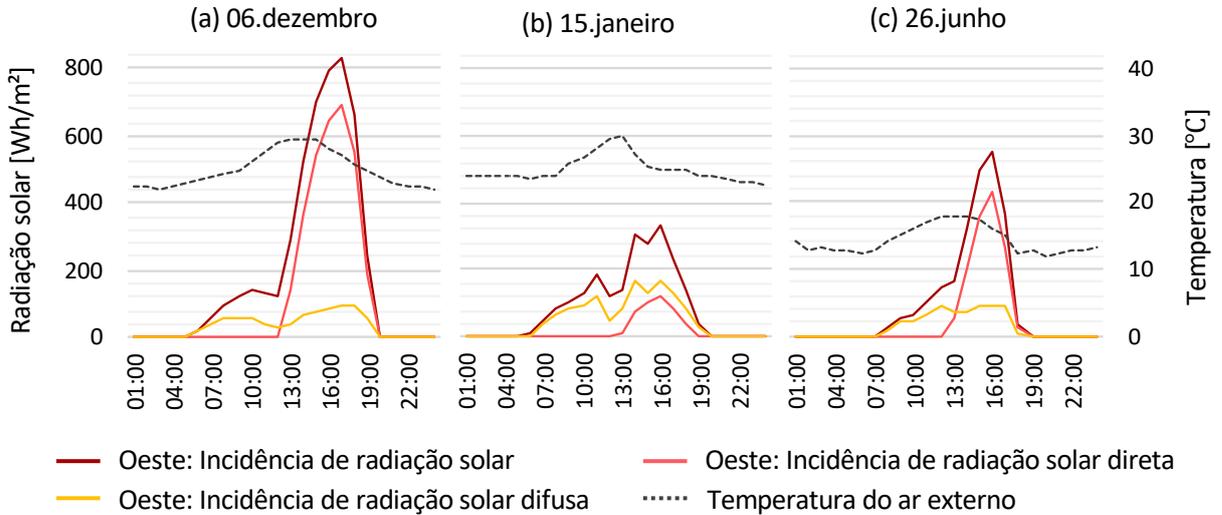
Figura 72 - Incidência diária de radiação solar na fachada oeste em Florianópolis: dezembro a março



Fonte: dados do arquivo climático "BRA\_Florianopolis.838990\_SWERA.epw" (DOE, 2017)

Posteriormente, foram observados os resultados de mais dois dias. O primeiro é um dia de verão (15 de janeiro), com temperaturas externas semelhantes em 6 de dezembro, porém com baixa incidência de radiação solar. O segundo é um dia de inverno (26 de junho), com temperatura externa mais baixa que no dia 6 de dezembro, mas com alta incidência de radiação solar para esse período. As informações sobre a temperatura do ar exterior e a incidência da radiação solar na fachada Oeste ao longo desses dois dias podem ser encontradas na Figura 73b e na Figura 73c, respectivamente.

Figura 73 - Temperatura do ar externo e incidência de radiação solar na fachada oeste em Florianópolis ao longo dos dias (a) 06 de dezembro, (b) 15 de janeiro e (c) 26 de junho

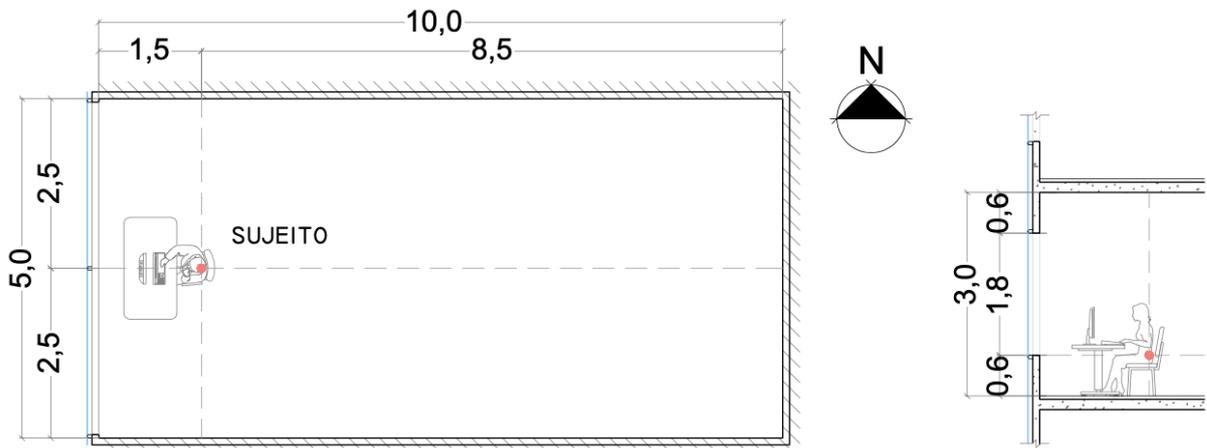


Fonte: dados do arquivo climático “BRA\_Florianopolis.838990\_SWERA.epw” (DOE, 2017)

### C1.2 DEFINIÇÃO DO MODELO

Para este estudo, modelou-se uma sala de escritórios de tamanho médio, com uma proporção de 1 para 2 entre a largura da fachada e a profundidade do ambiente (Figura 74). A sala possui 5 m de fachada por 10 m de profundidade, com pé-direito de 3 m. A única parede externa da sala está orientada para o oeste, com um WWR de 60%. As paredes internas, teto e piso foram definidos como superfícies adiabáticas, assumindo que os espaços e pisos adjacentes possuem as mesmas condições térmicas. O estudo considerou um pavimento intermediário, com o piso a 30 m de altura.

Figura 74 - Planta e corte da sala de escritório com a localização do indivíduo no ambiente. Unidade: metros.

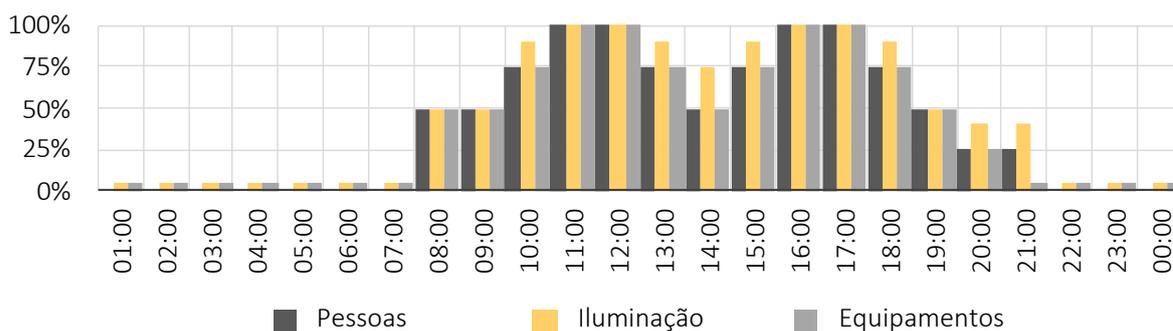


Conforme indicado pela revisão de literatura, a proximidade com as janelas pode ter um impacto significativo no conforto térmico dos ocupantes. Por esse motivo, as análises consideraram um ocupante posicionado a uma distância de 1,5 m da janela. O sujeito foi posicionado de frente para a janela, considerando a situação crítica de desconforto.

As cargas internas foram definidas de acordo com as recomendações da norma brasileira para projeto de ar condicionado (ABNT, 2008). Foi adotado um perfil de escritório de alta carga interna, considerando 7,7 m<sup>2</sup> por pessoa, densidade de potência de equipamentos de 21,5 W/m<sup>2</sup> e densidade de potência de iluminação de 16,0 W/m<sup>2</sup>. A taxa metabólica de cada ocupante foi determinada conforme a norma ISO 7730 (ISO, 2005) para atividade sedentária de escritório, sendo 126 W/pessoa. Um valor de isolamento de vestimenta de 0,94 clo foi assumido para todos os ocupantes.

As rotinas de uso dos sistemas da edificação foram configuradas de acordo com a Figura 75. Não há ocupação nos fins de semana, e o sistema de iluminação artificial é acionado estaticamente, sem considerar a disponibilidade de luz natural. Considerou-se um ambiente condicionado artificialmente por um sistema do tipo PTHP (*Packaged Terminal Heat Pump*), acionado das 7h às 21h em dias úteis e desligado nos fins de semana. As temperaturas de 21 °C para aquecimento e 24 °C para resfriamento foram definidas de acordo com a ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2007). A capacidade do sistema é dimensionada pelo *EnergyPlus* com base nas condições térmicas, e um coeficiente de desempenho (COP) de 3,0 W/W foi adotado. A taxa de renovação do ar foi estabelecida em 0,0075 m<sup>3</sup>/s por pessoa, e taxa de infiltração em 0,3 trocas de ar por hora. Nenhuma ventilação natural foi modelada, pois as janelas foram consideradas seladas.

Figura 75 - Rotinas de ocupação e sistemas de segunda-feira a sexta-feira



A Tabela 31 apresenta os valores de transmitância térmica e absorptância solar dos fechamentos opacos da envoltória. Nenhum tipo de sombreamento interno ou externo foi utilizado, a fim de maximizar a influência da radiação e a variação entre os modelos de ajuste solar.

Tabela 31 - Propriedades térmicas dos elementos opacos da envoltória

Composição	Transmitância térmica (W/m <sup>2</sup> .K)	Absortância solar	Capacidade térmica (kJ/m <sup>2</sup> .K)
Paredes externas Placa de gesso (12.5mm) + lâ de vidro (50mm) + placa de cimento (10mm)	0.77	interna: 0.297 externa: 0.297	24.31
Paredes internas Placa de gesso (15mm) + lâ de vidro (50mm) + Placa de gesso (15mm)	0.69	0.297	25.55
Teto/piso Argamassa (25mm) + Laje de concreto (200mm) + argamassa (25mm) + piso cerâmico (7.5mm)	2.74	teto: $\alpha=0.297$ piso: $\alpha=0.418$	551.04

Estabeleceu-se um modelo de edificação totalmente revestido por vidro, onde a parede externa é revestida com o mesmo vidro externo utilizado nas janelas. Esta configuração foi incluída nos modelos de simulação no *EnergyPlus* como um material de isolamento transparente, utilizando um objeto “*SurfaceControl: MovableInsulation*”. Esse objeto fornece isolamento à perda de calor sem reduzir drasticamente a transmitância de energia solar.

Seis configurações de vidro foram testadas, incluindo três vidros laminados (SGU - *single glass unit*) com diferentes níveis de fator solar e três vidros insulados duplos (IGU – *insulated glass unit*), compostos por um vidro laminado base, uma camada de ar de 12,7 mm e um vidro monolítico transparente. Essas configurações permitem observar a sensibilidade dos modelos de ajuste solar em relação à parcela de radiação que atravessa diretamente o vidro e à transmitância térmica por condução de calor. As propriedades dessas seis composições são descritas na Tabela 32, e o nome de cada composição é uma combinação do sistema de janela (SGU ou IGU) e do valor arredondado do fator solar do vidro base.

As propriedades dos vidros base foram obtidas em catálogos de fabricantes de vidro disponíveis no mercado brasileiro. A transmitância térmica e o fator solar foram estimados no *software WINDOW 7.7* (LBNL, 2016)(LBNL, 2016), juntamente com outras propriedades térmicas e ópticas dos sistemas insulados. Contudo, é

importante ressaltar que esses valores são apresentados apenas como referência e consideram a radiação solar na direção normal à superfície do vidro. Os vidros são inseridos individualmente no *EnergyPlus*, e o *software* realiza os cálculos, levando em conta o também a inclinação solar.

Tabela 32 - Propriedades e térmicas dos vidros

	SGU30	SGU50	SGU80	IGU30	IGU50	IGU80
Espessura [mm]	8,00	8,00	6,00	26,7	26,7	24,7
$\tau_e$	0,11	0,41	0,78	0,09	0,32	0,60
$\rho_e$	0,16	0,17	0,07	0,16	0,18	0,11
$\rho_i$	0,20	0,13	0,07	0,19	0,15	0,11
$\epsilon_e$	0,89	0,89	0,84	0,89	0,89	0,84
$\epsilon_i$	0,89	0,89	0,84	0,84	0,84	0,84
$\alpha_e$	0,73	0,42	0,15	0,75	0,50	0,29
$\lambda$ [W/m.K]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Processo	Laminado	Laminado	Monolítico	Insulado duplo	Insulado duplo	Insulado duplo
U [W/m <sup>2</sup> .K]	5,56	5,56	5,60	2,71	2,71	2,68
Fator Solar	0,28	0,51	0,82	0,22	0,43	0,71

e: espessura [mm]

$\tau_e$ : transmissão de energia solar

$\rho_e$  e  $\rho_i$ : reflexão de energia externa e interna

$\epsilon_e$  e  $\epsilon_i$ : emissividade externa e interna

$\alpha_e$ : absorção de energia externa

U: transmitância térmica [W/m<sup>2</sup>.K]

### C1.3 SIMULAÇÃO TÉRMICA E AVALIAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO

Os modelos de ajuste solar apresentados no item 2.3.6 da revisão de literatura foram comparados em relação ao comportamento térmico da sala utilizando diferentes vidros. Os modelos de ajuste solar analisados incluem:

- c) *Mean Radiant Temperature Solar-Adjust (SA-MRT)*, proposto por La Gennusa et al. (2007);
- d) *Mean Radiant Temperature Solar-Adjust Modified (MSA-MRT)*, proposto por Marino et al. (2017);
- e) *SolarCal*, proposto por Arens et al. (2015);
- f) *Corrected Predicted Mean Vote (CPMV)*, proposto por Zhang et al. (2018) e sua versão corrigida em Zhang et al. (2020a), o CPMV\*.

Os ajustes foram calculados tanto pelo CPMV quanto pelo CPMV\* para verificar o impacto da radiação solar difusa. Além dos resultados obtidos com os modelos de ajuste solar, os índices de conforto térmico calculados pelo *EnergyPlus*

também foram apresentados, pois esse método é recorrente na previsão da avaliação do conforto térmico por meio de simulação computacional. O cálculo do índice de conforto realizado no *EnergyPlus* leva em consideração a média da MRT do ambiente estimada pelo *software* com base na emissividade ponderada das superfícies da zona, conforme descrito na equação (24) na seção 2.4.1 da revisão de literatura.

Os modelos de correção do impacto da radiação solar no conforto térmico requerem dados de entrada relacionados ao ambiente externo e às condições térmicas do ambiente interno. Os dados do ambiente foram obtidos através de simulações térmicas no *EnergyPlus* v.8.9.

O Quadro 10 e o Quadro 11 apresentam os dados de entrada extraídos das simulações que foram posteriormente utilizados nos cálculos de ajuste solar para a correção nos índices de conforto térmico e da análise de assimetria na temperatura radiante. As variáveis ambientais externas, extraídas do arquivo climático (diretamente ou por meio do *EnergyPlus*) são grifadas em amarelo. Em verde, destacam-se as variáveis calculadas pelo *EnergyPlus*, mas que ainda são variáveis externas. Os dados de saída do ambiente interno, calculados pelo *EnergyPlus*, são indicados em azul. Essa distinção foi feita para identificar onde há maior interferência dos cálculos realizados no *software*. O nome do objeto de saída requerido para obter esses dados no *EnergyPlus* é fornecido abaixo de cada variável.

Os dados de comportamento térmico da sala de escritório foram, então, utilizados para calcular a MRT, o PMV, o PPD e a assimetria na temperatura radiante corrigidos quanto ao efeito da radiação solar. Esses dados foram inseridos em planilhas eletrônicas para o cálculo dos índices ajustados, exceto o PMV e o PPD, que foram estimados na *CBE Thermal Comfort Tool* desenvolvida pelo *Center for the Building Environment*, da *Berkeley University of California* (TARTARINI et al., 2020). Utilizou-se a opção *Upload*, pois permite inserir uma grande quantidade de dados, incluindo a temperatura radiante média corrigida, o que não é possível na inserção individual de dados. Os valores estimados foram posteriormente reinseridos nas planilhas eletrônicas. O fluxo de trabalho foi ilustrado na Figura 76.

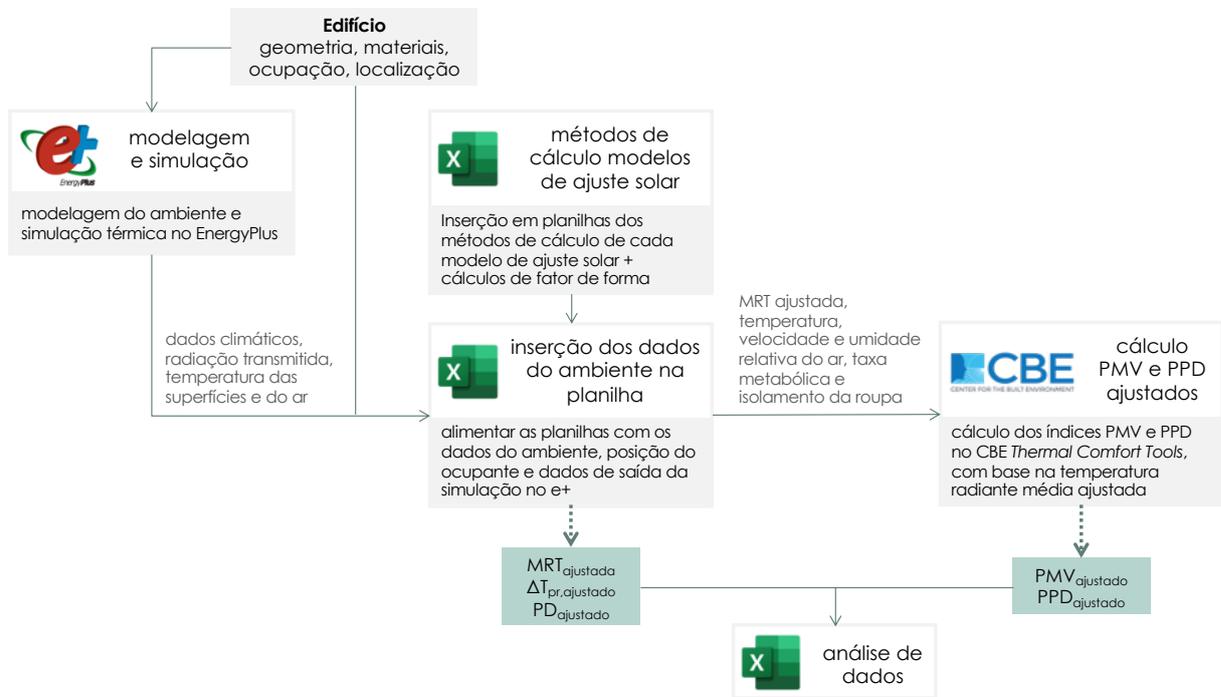
Quadro 10 - Dados de entrada extraídos dos resultados dos modelos simulados no *EnergyPlus* para análise de Conforto Térmico

	SA-MRT	MSA-MRT	CPMV / CPMV*	SolarCal
Temperatura Radiante Média e Conforto Térmico	Radiação Horizontal Global (fonte: arquivo climático)	Radiação Horizontal Global (fonte: arquivo climático)	Radiação Horizontal Global (fonte: arquivo climático)	Radiação Horizontal Global (fonte: arquivo climático)
	Radiação solar difusa (fonte: arquivo climático)	Ângulo de azimute solar (Solar Azimuth Angle)	Ângulo de azimute solar (Solar Azimuth Angle)	Radiação solar difusa (fonte: arquivo climático)
	Radiação solar direta na direção normal ao feixe (fonte: arquivo climático)	Ângulo de altitude solar (Solar Altitude Angle)	Ângulo de altitude solar (Solar Altitude Angle)	Radiação solar direta na direção normal ao feixe (fonte: arquivo climático)
	Ângulo de azimute solar (Solar Azimuth Angle)	Taxa de radiação solar direta transmitida através da superfície da janela (Surface Window Transmitted Beam Solar Radiation Rate)	Taxa de radiação solar direta transmitida através da superfície da janela (Surface Window Transmitted Beam Solar Radiation Rate)	Ângulo de azimute solar (Solar Azimuth Angle)
	Ângulo de altitude solar (Solar Altitude Angle)			Ângulo de altitude solar (Solar Altitude Angle)
	Radiação solar difusa que incide na superfície da face externa da janela (Surface Outside Face Incident Sky Diffuse Solar Radiation)	Taxa de radiação solar difusa transmitida através da superfície da janela (Surface Window Transmitted Diffuse Solar Radiation Rate)	Taxa de radiação solar direta transmitida através da superfície da janela (Surface Window Transmitted Diffuse Solar Radiation Rate)	Transmitância solar da janela (Surface Window System Solar Transmittance)
	Temperaturas superficiais (Surface Inside Face Temperature)	Taxa de ganho de calor por radiação solar direta que incide na superfície do piso (Surface Inside Face Beam Solar Radiation Heat Gain Rate)	Temperaturas superficiais (Surface Inside Face Temperature)	Temperaturas superficiais (Surface Inside Face Temperature)
	Transmitância solar da janela – sistema (Surface Window System Solar Transmittance)	Temperaturas superficiais (Surface Inside Face Temperature)		

Quadro 11 - Dados de entrada extraídos dos resultados dos modelos simulados no *EnergyPlus* para análise de Assimetria na Temperatura Radiante

	SA-MRT	MSA-MRT	SolarCal
Assimetria na Temperatura Radiante	Temperaturas superficiais <i>(Surface Inside Face Temperature)</i>	Temperaturas superficiais <i>(Surface Inside Face Temperature)</i>	Radiação Horizontal Global <i>(fonte: arquivo climático)</i>
		Taxa de radiação solar direta transmitida através da superfície da janela <i>(Surface Window Transmitted Beam Solar Radiation Rate)</i>	Radiação solar difusa <i>(fonte: arquivo climático)</i>
		Radiação solar difusa que incide na superfície da face externa da janela <i>(Surface Outside Face Incident Sky Diffuse Solar Radiation)</i>	Radiação solar direta na direção normal ao feixe <i>(fonte: arquivo climático)</i>
			Ângulo de altitude solar <i>(Solar Altitude Angle)</i>
			Radiação solar direta que incide na superfície da face externa da janela <i>(Surface Outside Face Incident Beam Solar Radiation)</i>
			Transmitância solar da janela <i>(Surface Window System Solar Transmittance)</i>
			Temperaturas superficiais <i>(Surface Inside Face Temperature)</i>

Figura 76 - Fluxograma de trabalho para a estimativa dos índices de conforto térmico corrigidos pelos modelos de ajuste solar

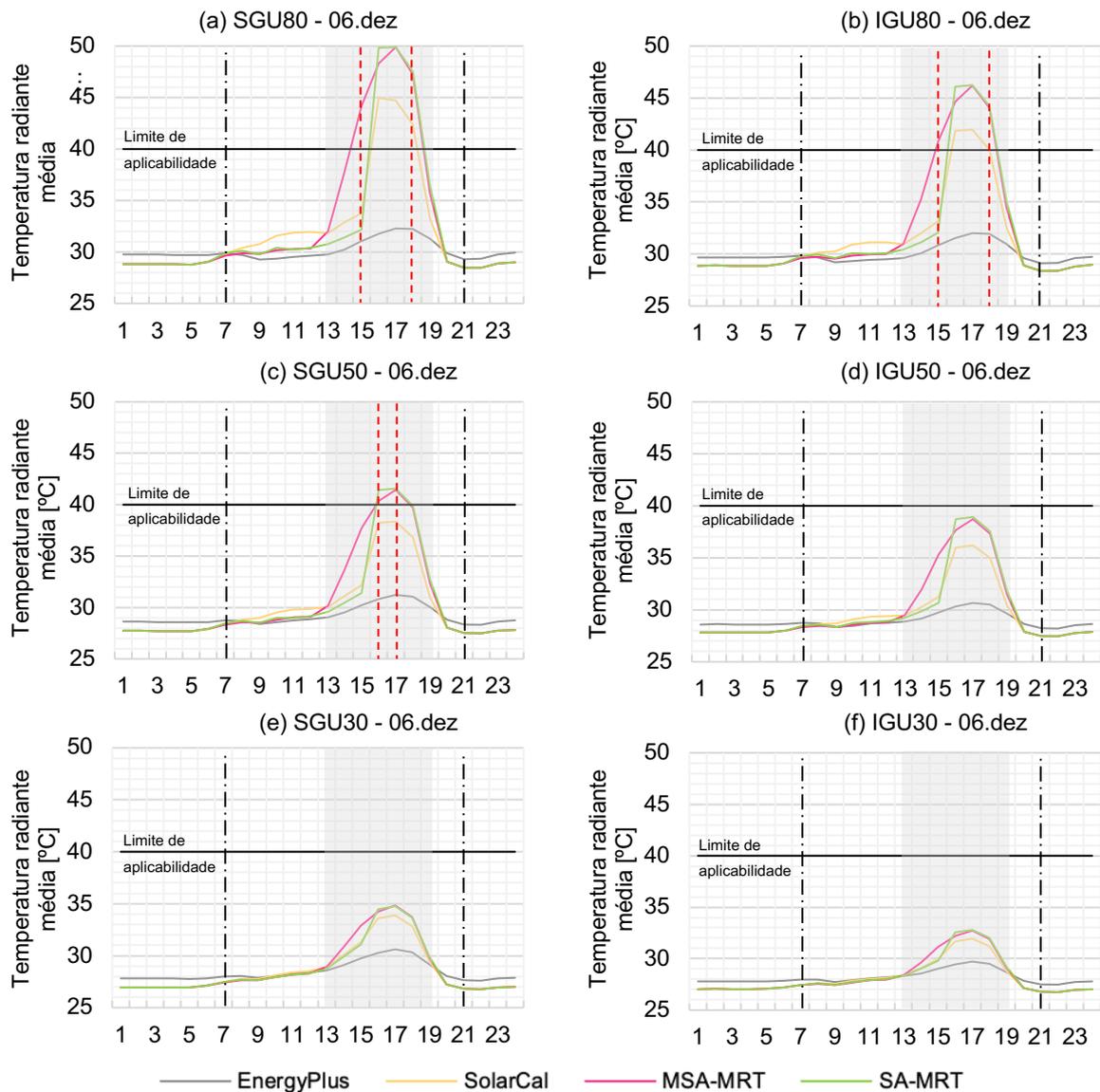


## C2 RESULTADOS

### C2.1 TEMPERATURA RADIANTE MÉDIA

A Figura 77 ilustra a variação da MRT ao longo do dia, aplicando os diferentes modelos de ajuste solar por tipo de vidro testado. As linhas verticais tracejadas escuras delimitam o período de ocupação do escritório, enquanto a área cinza indica o período em que a radiação solar atinge a janela. Os resultados dos modelos CPMV e CPMV\* não são apresentados nesta análise, pois suas correções são aplicadas diretamente no índice PMV.

Figura 77 - Temperatura radiante média em 06 de dezembro



Conforme esperado, o modelo de edificação com vidro incolor foi mais sensível aos modelos de ajuste solar, devido à sua alta transmissão de energia solar e transmitância térmica, permitindo a entrada de uma maior fração de radiação solar pela janela. A transmissão de energia solar através vidro transparente (SGU80) é mais de oito vezes maior do que a composição insulada com o vidro de menor te (IGU30).

Os modelos MSA-MRT e SA-MRT mostraram maior sensibilidade à variação na intensidade de radiação solar direta. No pico de exposição à radiação solar (SGU80 às 17h), a MRT calculado com esses modelos foi 17,6 °C mais alta do que a calculado pelo *EnergyPlus*. O modelo *SolarCal* também apresentou sensibilidade significativa, sendo até 13,2 °C maior em relação ao *EnergyPlus*. Entre os escritórios com IGU, o contraste em relação ao *EnergyPlus* foi considerável, mas menor. A maior diferença foi de 14,6 °C ao aplicar o modelo MSA-MRT no escritório com IGU80.

No período entre 16h e 18h, a MRT permaneceu acima do limite de aplicabilidade do modelo de conforto térmico PMV-PPD para todos os modelos de ajuste solar com os vidros SGU80 e IGU80. No entanto, a MRT ultrapassa esse limite uma hora antes com o modelo MSA-MRT. O limite também é atingido no escritório com SGU50, entre 16h e 17h, ao aplicar os modelos SA-MRT e MSA-MRT. Os períodos em que essas condições ocorrem estão indicados pelas linhas tracejadas vermelhas nos gráficos (a), (b) e (c) na Figura 77.

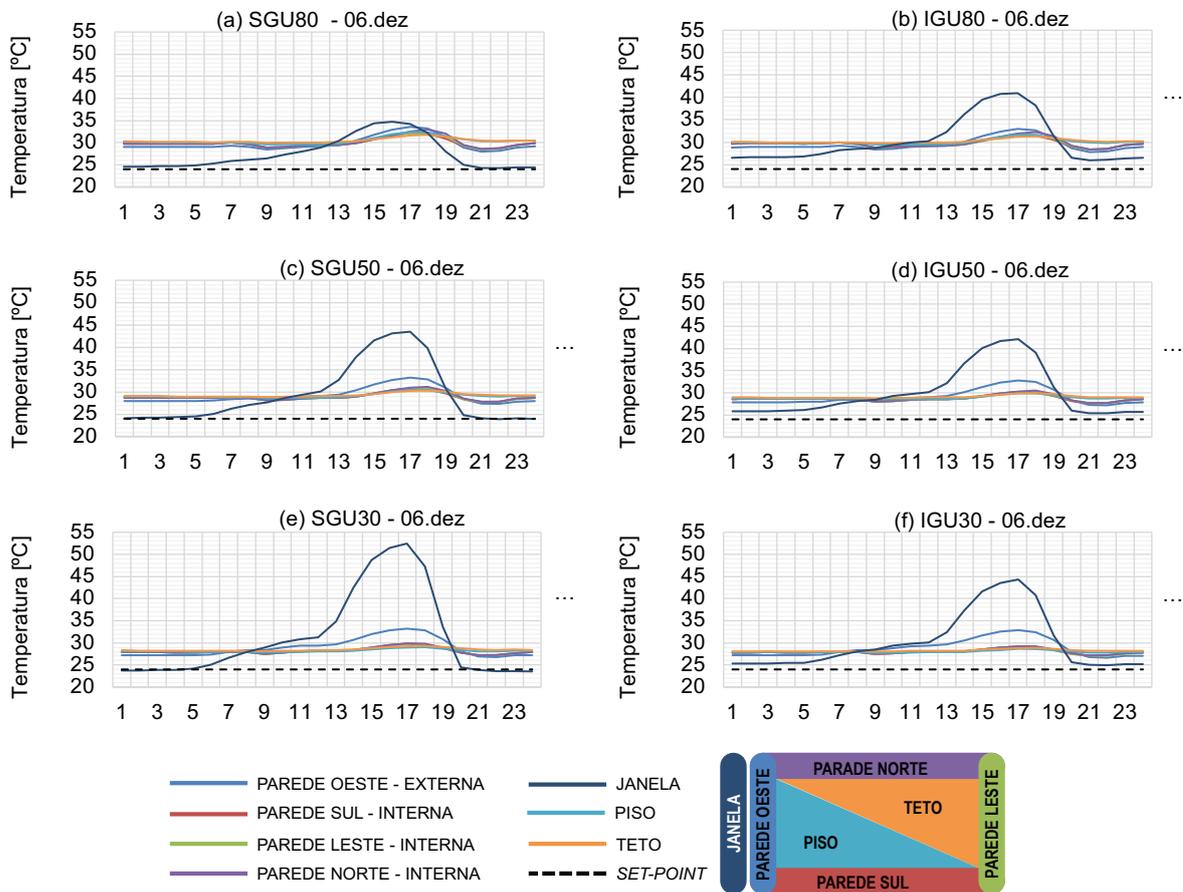
O *SolarCal* apresentou a maior sensibilidade à radiação solar difusa e tende a estimar uma MRT mais alta durante o período em que não há incidência direta de radiação solar na fachada oeste (das 6h às 12h). Os modelos de ajuste solar tendem a estimar MRT semelhantes às calculadas pelo *EnergyPlus* quando vidros de baixo FS são utilizados.

Quando o sujeito está exposto à radiação solar, o *SolarCal* e o SA-MTR tendem a manter curvas de MRT semelhantes, mas o *SolarCal* apresenta um pico de temperatura entre 1 °C e 5 °C mais baixo (IGU30 e SGU80). Essa semelhança ocorre porque ambos os modelos utilizam dados de radiação solar externa em seus cálculos.

Por outro lado, o MSA-MRT considera diretamente a radiação que atinge o sujeito e não inclui procedimentos de cálculo para a radiação solar direta no plano horizontal, a radiação solar direta que atinge o sujeito e a radiação difusa que entra no ambiente pela janela. Por esse motivo, os dados de saída do *EnergyPlus* referentes à radiação solar transmitida pela janela foram considerados nos cálculos do MSA-MRT.

Foi investigado se a redução da MRT no vidro insulado é devido à diminuição da transmitância térmica ou à redução do fator solar. Para esse propósito, a temperatura interna do vidro foi analisada (Figura 78). Observou-se uma tendência oposta entre a MRT e a temperatura superficial do vidro. Aumentar o isolamento da janela não resulta necessariamente em uma temperatura mais baixa na superfície interna do vidro. Nos modelos de escritório com vidro de FS 80, o pico de temperatura na face interna do vidro foi 6 °C mais alto com o sistema IGU. Por outro lado, nos modelos com menor o FS, o pico de temperatura foi 8 °C mais baixo com o IGU.

Figura 78 - Temperatura das superfícies internas em 06 de dezembro



Os resultados também mostram que, quanto maior o FS, maior é a MRT, mas menor é o pico de temperatura na superfície interna do vidro. No escritório com vidro SGU80, a MRT atingiu 49,9 °C com os modelos de ajuste SA-MRT e MSA-MRT, enquanto o *EnergyPlus* estimou a MRT em 32,3 °C, quando a temperatura do vidro era 34,3 °C (17h). No mesmo horário, no escritório com SGU30, a MRT estimada pelo SA-MRT e MSA-MRT foi de 34,8 °C, enquanto calculada em 30,6 °C pelo *EnergyPlus*,

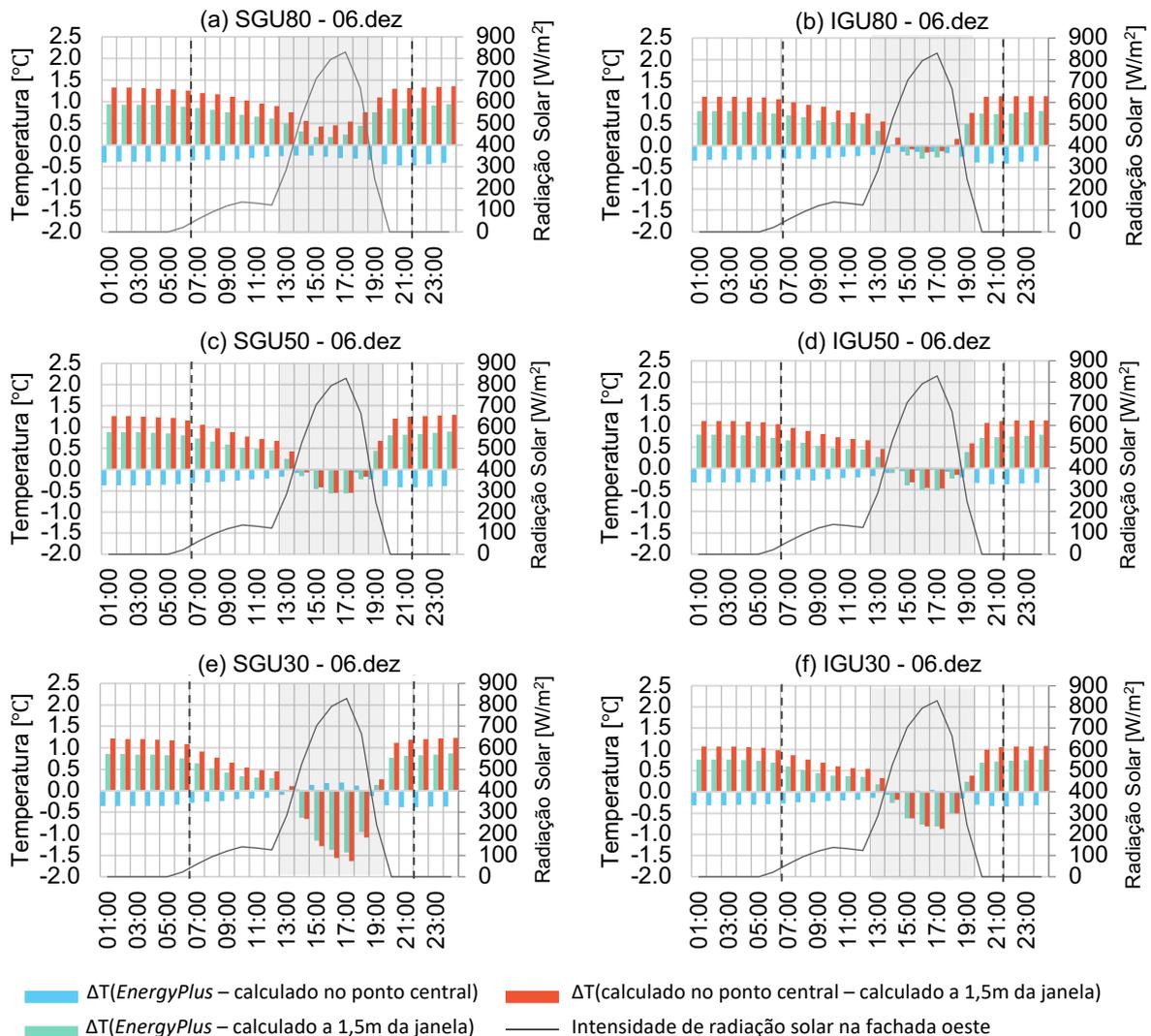
quando a temperatura do vidro da face interna foi de 52,4 °C. Os modelos com IGU apresentam uma tendência oposta.

A Figura 77 evidencia uma clara redução na MRT ao comparar os vidros SGU e IGU. No entanto, essa tendência não se repete na temperatura superficial interna do vidro. Nas salas com vidro IGU, a temperatura do vidro tende a ser mais alta. Considerando o vidro base com maior FS (SGU80 e IGU80), a temperatura superficial do vidro é até 6 °C mais alta no sistema IGU. Por outro lado, nos modelos com vidro base de menor FS (SGU30 e IGU30), o sistema IGU tende a apresentar uma temperatura superficial interna até 8 °C menor. A temperatura da superfície interna tende a ser similar em ambos os sistemas de vidro (SGU e IGU) quando o vidro possui um FS de 0,5. A diferença na temperatura da superfície interna do vidro é explicada pela absorvância de energia solar ( $\alpha_e$ ) e pela transmitância térmica dos vidros (Tabela 32). Nessa amostra, os vidros com maior FS possuem a menor  $\alpha_e$ , enquanto os vidros com menor FS apresentam uma  $\alpha_e$  elevada. Conseqüentemente, eles tendem a absorver mais radiação solar e reter o calor ganho por condução, resultando em temperaturas mais altas na superfície interna do vidro. Como as paredes internas, o piso e o teto foram definidos como superfícies adiabáticas, a sala não perde calor por essas superfícies e suas temperaturas tendem a ser ligeiramente superiores à temperatura do ar interno durante todo o período.

Esses resultados indicam que, ao optar por um vidro com FS 0,80, a melhor escolha seria o SGU, pois permite uma dissipação mais eficiente da carga interna por condução de calor. No entanto, o ocupante pode experimentar desconforto local devido à incidência direta de radiação solar quando próximo à janela. Aumentar a transmitância térmica da janela não é eficaz para melhorar as condições de conforto térmico no ambiente sem reduzir a transmissão solar, especialmente em climas com alta incidência solar.

Todos os modelos de ajuste solar apresentaram os mesmos valores de MRT em períodos sem incidência de radiação solar difusa ou direta, uma vez que todos eles utilizam o mesmo cálculo de MRT de ondas longas (ISO, 1998). No entanto, eles estimaram valores de MRT inferiores aos calculados pelo *EnergyPlus*. A Figura 79 ilustra a diferença entre a MRT de ondas longas calculada no ponto central da sala e no ponto da pessoa (1,5 m da janela), comparando ambos com os resultados do *EnergyPlus*.

Figura 79 - Diferença no cálculo da MRT de onda-longa entre (1) *EnergyPlus* e calculado no ponto central na sala; (2) *EnergyPlus* e calculado no ponto a 1,5m da janela; e (3) calculado no ponto central na sala e no ponto a 1,5m da janela



O cálculo da MRT no ponto central da sala difere da estimativa feita pelo *EnergyPlus*. O *EnergyPlus* calcula a MRT de forma simplificada, em vez de aplicar o cálculo de ondas longas considerando as temperaturas das superfícies internas e os fatores de forma entre a pessoa e as superfícies. O *software* define a MRT como uma média ponderada da emissividade de cada superfície da sala pelas suas áreas.

Além disso, durante períodos sem incidência de radiação solar direta na janela, a maioria dos modelos de escritório apresentou uma MRT menor próximo à janela em comparação com o centro da sala. Isso se deve à temperatura mais baixa do vidro e à perda de calor pela janela. No entanto, como era esperado essa tendência se inverte quando a radiação solar direta atinge a fachada oeste, exceto nos vidros transparentes (SGU80 e IGU80). No modelo SGU80, a MRT perto da janela

permanece mais baixa do que no centro da sala. Já no caso do IGU80, a MRT no ponto a 1,5 m da janela é ligeiramente maior que no ponto central (até 0,3 °C), mas somente entre 14h e 17h.

A MRT é calculada com base na temperatura da superfície e no fator de forma, que representa a influência de cada superfície na troca radiante de ondas longas com o corpo. A Tabela 33 apresenta uma comparação entre os modelos SGU80 e SGU30 às 17h.

Tabela 33 - Relação fator de forma e temperatura das superfícies internas

Vidro	Superfície	Fator de Forma		Temperatura Superficial [°C]
		1,5 m da janela	centro da sala	
SGU80	Janela:	0,115	0,028	34,29
	Demais superfícies:	0,878 <sup>1</sup>	0,976 <sup>1</sup>	32,41 <sup>2</sup>
SGU30	Janela:	0,115	0,028	52,44
	Demais superfícies:	0,878 <sup>1</sup>	0,976 <sup>1</sup>	30,16 <sup>2</sup>

1: soma dos fatores de forma de todas as superfícies internas opacas;

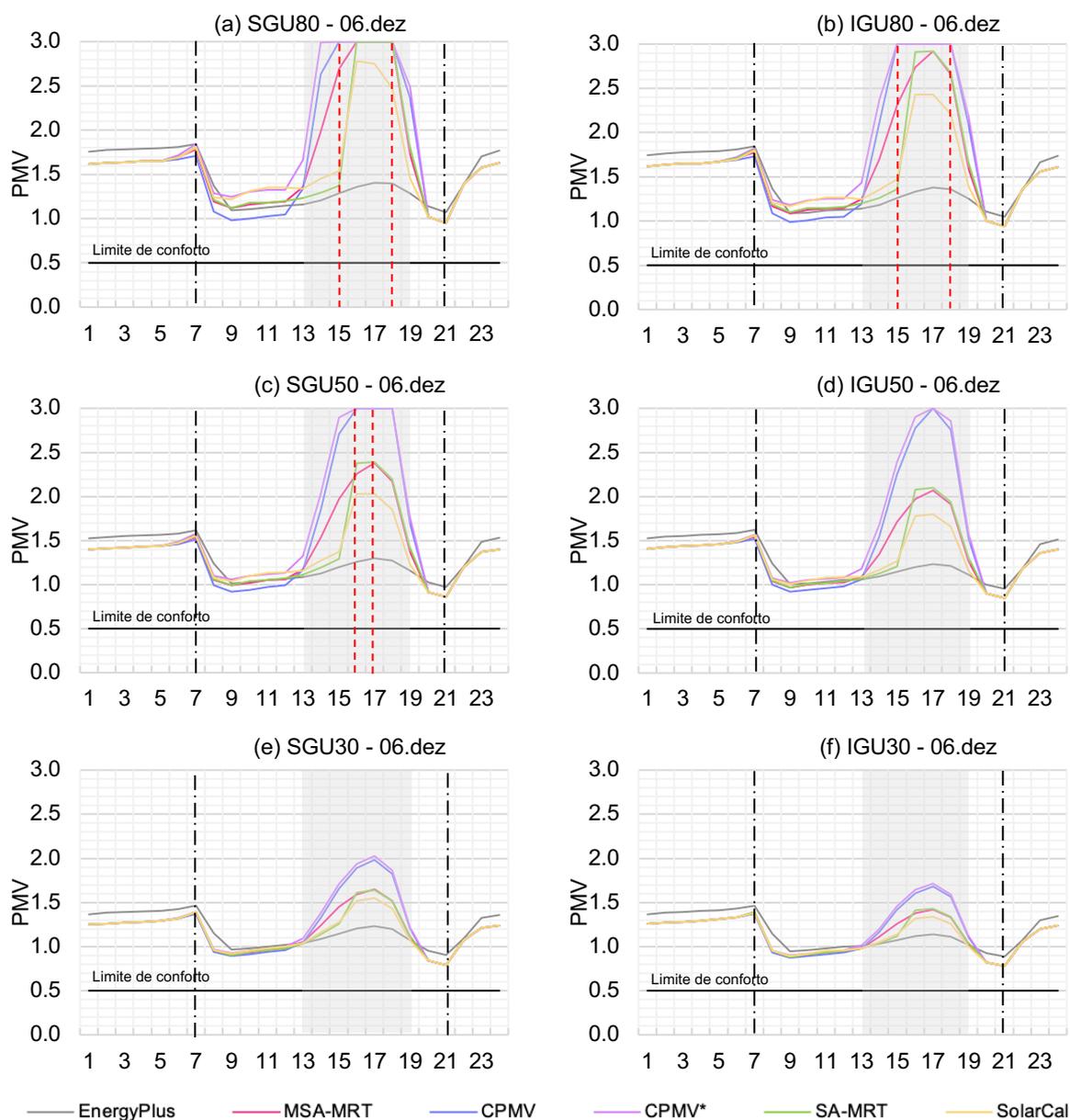
2: temperatura médias das superfícies internas opacas.

A temperatura da face interna da janela no SGU80 é 1,9 °C mais alta do que a temperatura média das outras superfícies, enquanto essa diferença é de 22,3 °C no modelo SGU30. Além disso, mesmo no ponto a 1,5 m da janela, a influência da temperatura da janela é significativamente menor do que nas superfícies opacas internas. Quando a temperatura da superfície da janela se aproxima das demais temperaturas e o fator de forma é consideravelmente menor do que a soma das temperaturas das superfícies internas opacas, a MRT de onda longa tende a ser maior no centro da sala. No momento em que a temperatura da superfície da janela é significativamente mais alta do que a temperatura das superfícies opacas, a MRT próxima à janela tende a ser maior.

## C2.2 VOTO MÉDIO PREDITO (PMV) E PERCENTUAL PREVISTO DE INSATISFEITOS (PPD)

A Figura 80 apresenta os resultados do PMV por vidro testado. A linha preta horizontal representa o limite de conforto térmico aceitável definido pelas normas ASHRAE 55 (2020), NBR 16401-2 (2008), categoria B da ISO 7730 (2005) e categoria II da ISO 17772-1 (2017) e EN 16798-1 (2019a).

Figura 80 - PMV por vidro testado em 06 de dezembro



Em todos os cenários analisados, foi observado desconforto térmico devido ao calor durante todo o período ocupado, mesmo no centro da sala, sem nenhum ajuste considerado. O desconforto é mais acentuado quando os modelos de ajuste solar são aplicados para um ponto a 1,5 m da janela. Além disso, a situação crítica é intensificada quando o ocupante está de frente para a janela, uma vez que todos os modelos consideram a direção do rosto do indivíduo.

O valor de PMV 3,0, que é o limite do modelo de Fanger, indica uma possível condição de estresse térmico em que o sistema fisiológico e a capacidade cognitiva

são afetados pelo calor excessivo. Na sala com SGU80, apenas os resultados do modelo *SolarCal* não atingiram esse limite. Ao aplicar os modelos CPMV e CPMV\*, o PMV atinge 3,0 na maioria das salas (SGU80, IGU80, SGU50 e IGU50), especialmente no horário de pico de incidência de radiação solar. O modelo CPMV apresentou menor sensibilidade à radiação solar do que sua correção (CPMV\*), pois não considera a porção difusa da radiação solar. No entanto, a diferença máxima entre ambos foi de 0,4 (SGU80 às 14h), mas essa divergência tende a zero à medida que o FS diminui.

As linhas tracejadas vermelhas nos gráficos (a) a (c) da Figura 80 mostram o mesmo período em que a MRT foi superior a 40 °C. Mesmo estando além do limite de aplicabilidade do PMV-PPD, o PMV máximo pode não atingir 3,0 ao aplicar modelos *SolarCal*, MSA-MRT e SA-MRT. Isso ocorre devido à operação contínua do sistema de ar condicionado durante todo o período ocupado, o que resulta em baixa umidade relativa do ar e variação na velocidade do ar.

Os modelos CPMV e CPMV\* se mostraram mais sensíveis à incidência de radiação solar direta no vidro, superando o SA-MRT em até 0,9 na escala PMV e o *EnergyPlus* em até 1,8 (IGU50 às 17h). Isso ocorre devido ao ajuste realizado ao adicionar um novo componente no cálculo do fluxo de calor no PMV, não se limitando à MRT. Por outro lado, quando apenas a radiação solar difusa entra na sala, os modelos de ajuste solar e o *EnergyPlus* tendem a apresentar resultados semelhantes para o PMV. Nessa situação, a diferença mais significativa observada entre os modelos foi de 0,3 entre CPMV e *SolarCal* (SGU80 às 12h).

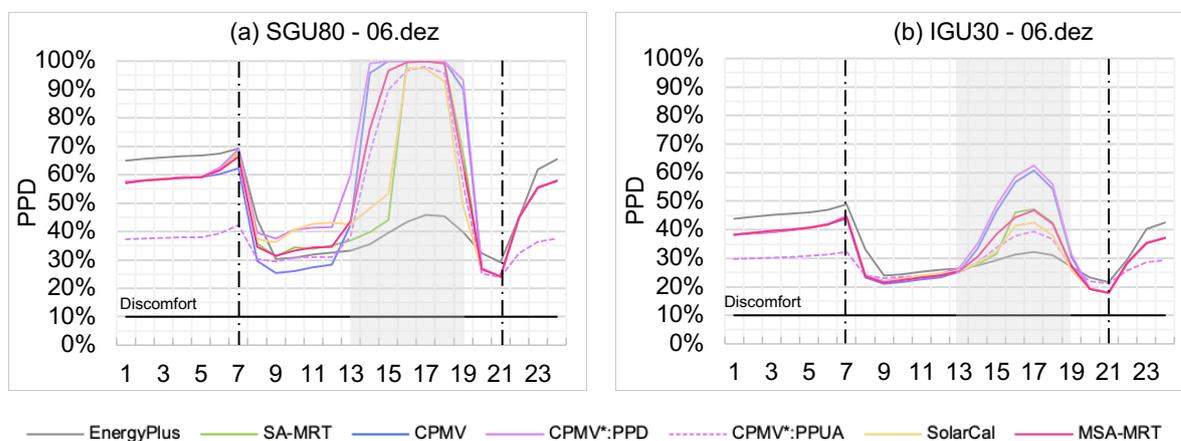
Os modelos SA-MRT e MSA-MRT apresentaram uma variação de até 1,6 na escala PMV em relação ao estimado pelo *EnergyPlus* (SGU80 – 16h às 18h). Ao aplicar o *SolarCal*, a diferença máxima foi de 1,4. O PMV calculado pelos modelos de ajuste solar tende a ser menor do que o relatado pelo *EnergyPlus* antes das 8h e após as 20h.

Assim como nos resultados da MRT, quanto menor o fator solar do vidro, menor é o impacto da escolha do modelo de ajuste solar. A diferença horária máxima de PMV entre SA-MRT, MSA-MRT e *SolarCal* foi inferior a 0,5 em 80% a 100% do período de ocupação (SGU80 e IGU80). Por outro lado, se os resultados de CPMV e CPMV\* forem incluídos, a diferença horária máxima entre os modelos de ajuste solar foi de 1,7 na escala PMV, sendo superior a 0,5 em 40% do período de ocupação com o FS médio (SGU50 e IGU50).

A redução na transmitância térmica (vidros insulados) também mostrou uma diminuição no impacto da escolha do modelo de ajuste solar, embora não tenha sido tão significativa quanto o impacto do fator solar, como observado na análise da MRT. Ao comparar os sistemas SGU e IGU com o mesmo vidro base e modelo de ajuste solar, a maior divergência foi de 0,6 na escala PMV (SGU80, CPMV, às 14h).

Os resultados do PPD seguiram o mesmo padrão do PMV, pois o PPD é uma função do PMV, exceto para o CPMV\*-PPUA (Figura 81). Foram apresentados dois percentuais de insatisfação para o modelo CPMV\*. O CPMV\*-PPD é calculado substituindo o PMV pelo CPMV\* na equação original do PPD. Já o CPMV\*-PPUA é o percentual inaceitável, definido por meio de uma correlação baseada nos resultados de levantamentos e medições obtidos no experimento realizado por Zhang et al. (2020). Embora o CPMV\* tenha apresentado os maiores índices de PMV, o percentual de insatisfeitos é drasticamente reduzido pelo índice PPAU. Às 14h, a diferença entre CPMV\*-PPD e CPMV\*-PPUA chegou a 36 pontos percentuais com o SGU80 e 23 p.p. com o IGU30 às 17h.

Figura 81 - PPD em 06 de dezembro



Zhang et al. (2020) argumentam que os resultados de seu estudo de campo indicam uma ampla variabilidade na tolerância à radiação solar e que as pessoas tendem a lidar melhor com a presença de radiação solar do que com altas temperaturas do ar. No entanto, é importante ressaltar que o índice PPAU foi desenvolvido a partir de votos térmicos coletados apenas em uma cidade específica da China, Tianjin. É compreensível que fatores culturais e de adaptação a esse clima específico possam ter influenciado nesses resultados. Portanto, seria necessário

expandir esse estudo para que fosse justificável utilizar esse índice na previsão de conforto térmico para outros climas.

### C2.3 ASSIMETRIA NA TEMPERATURA RADIANTE

Complementarmente à análise das condições de conforto térmico, também é fundamental considerar o potencial de desconforto localizado devido à assimetria na temperatura radiante ao avaliar os efeitos do vidro. Dos modelos de ajuste solar testados, apenas o CPMV e o CPMV\* não propõem correção quanto à contribuição da radiação de ondas curtas na temperatura radiante plana.

A Figura 82 apresenta os resultados da assimetria radiante por tipo de vidro, enquanto a Figura 83 mostra o percentual de desconforto localizado (PD) decorrente da assimetria na temperatura radiante devido a paredes quentes. Linhas horizontais pretas indicam o limite de assimetria na temperatura radiante.

Figura 82 - Assimetria na Temperatura Radiante em 06 de dezembro

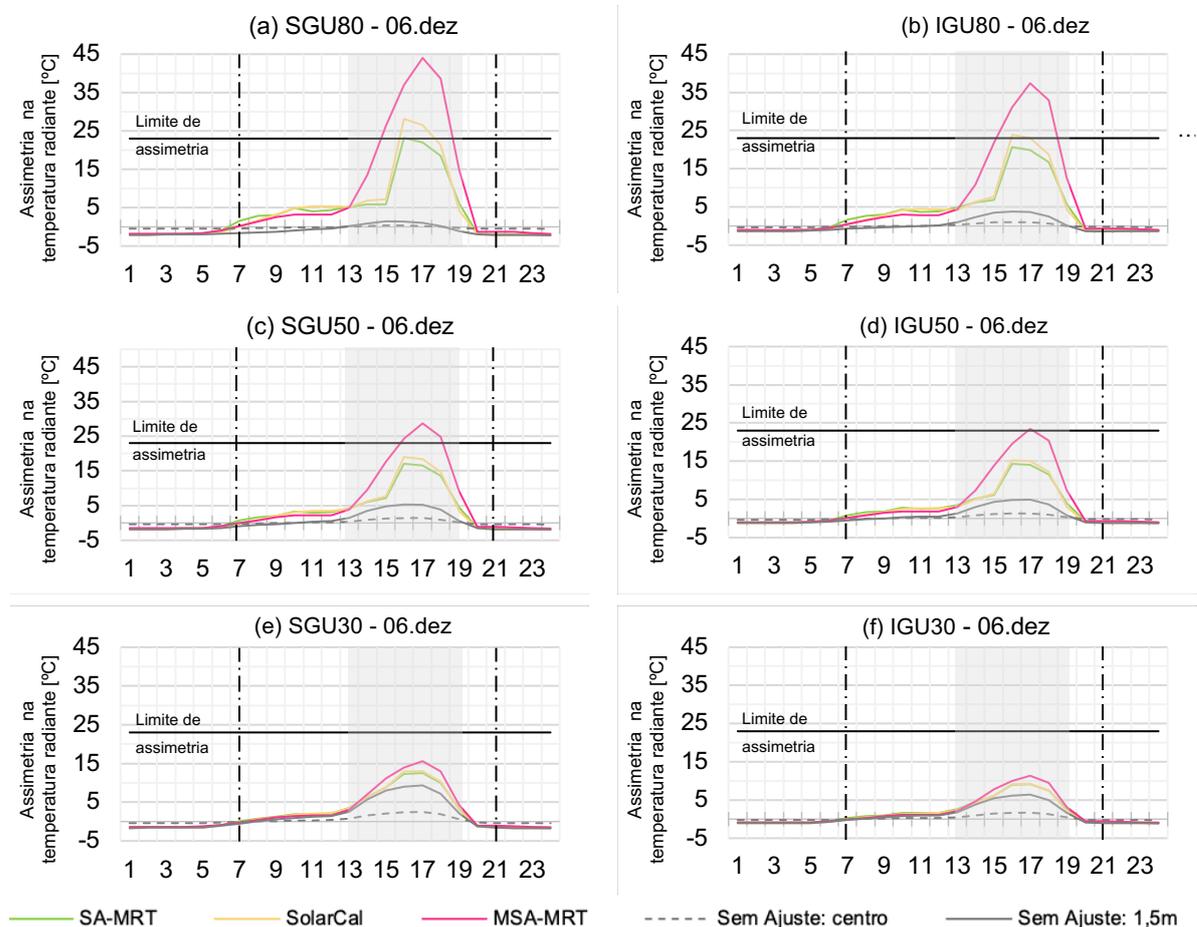
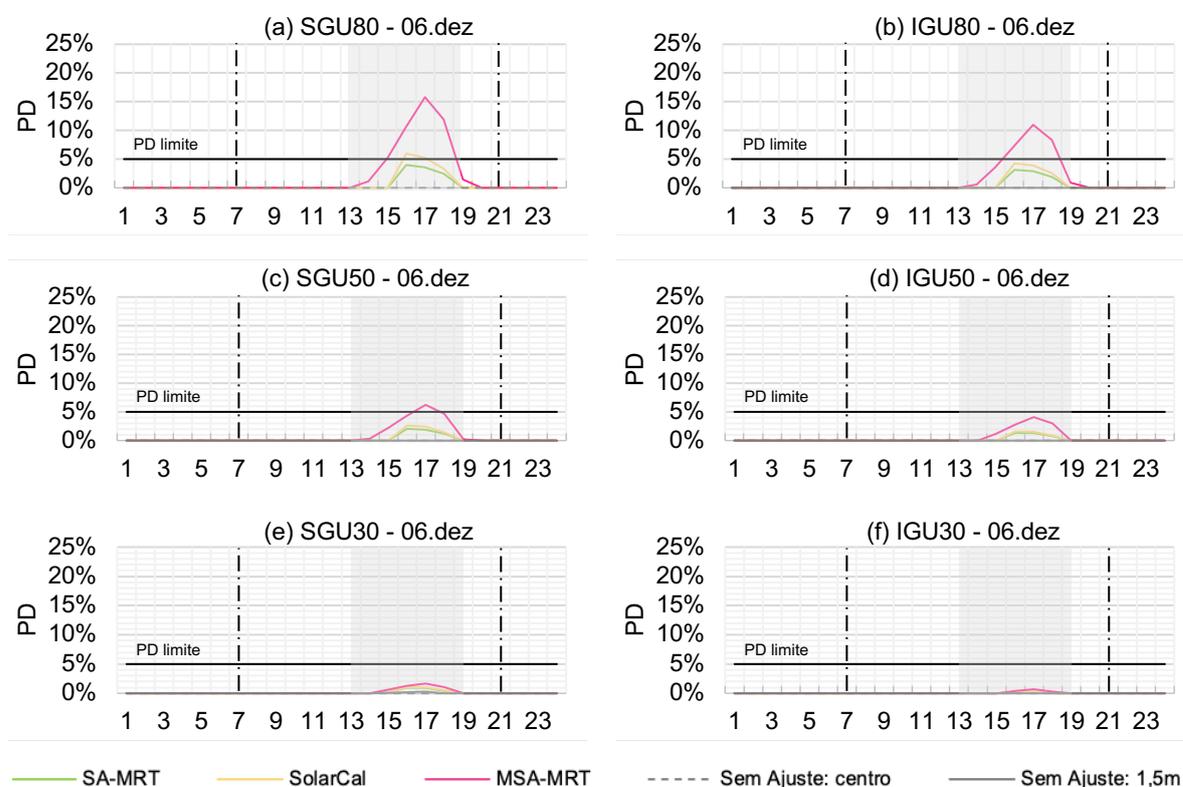


Figura 83 - Percentual de desconforto localizado por assimetria na temperatura radiante devido a paredes quentes por vidro testado em 06 de dezembro



Em ambas as figuras, os resultados da assimetria sem nenhum ajuste solar podem ser observados na posição a 1,5 m da janela (linha cinza contínua) e no centro da sala (linha cinza tracejada).

Em contraponto aos resultados de PMV, PPD e MRT, o modelo MSA-MRT mostra maior sensibilidade à exposição à radiação solar e ao tipo de vidro na estimativa da assimetria na temperatura radiante. O *SolarCal* apresentou a segunda maior sensibilidade. No entanto, a diferença máxima na assimetria radiante calculada pelo MSA-MRT chega a 19 °C a mais do que com o *SolarCal* (SGU80, às 15h), e a diferença máxima de PD foi de 11 p.p. (SGU80, às 17h).

Inicialmente, causa estranheza que um ambiente, mesmo sendo condicionado, fique completamente fora da zona de conforto térmico durante o período ocupado, mas não apresente desconforto devido à assimetria de temperatura radiante com a maioria dos modelos de ajuste solar. Apenas nas salas com os vidros SGU80, IGU80 e SGU50, o limite de desconforto por assimetria foi excedido, sendo os dois primeiros casos com os modelos de ajuste *SolarCal* e MSA-MRT, e o último

somente com o MSA-MRT. Além disso, nesse dia, o sol está posicionado quase exatamente em frente ao usuário que também está de frente para a janela no período da tarde.

Contudo, conforme observado na Figura 78, a temperatura das superfícies internas opacas permaneceu constantemente acima de 25,5 °C ao longo de todo o dia, o que pode estar relacionado à configuração adiabática das paredes internas, teto e piso. Esses valores indicam que as superfícies não entraram em balanço térmico com a temperatura do ar interno (24 °C) em nenhum momento durante a ocupação da sala. Portanto, a diferença da temperatura radiante entre os planos é reduzida.

Quando nenhum ajuste solar é considerado, os resultados de assimetria radiante para uma pessoa a 1,5 m da janela estão coerentes com a temperatura superficial do vidro (Figura 78), sendo maior no escritório com vidro seletivo. No entanto, quando os modelos de ajuste solar são aplicados, a assimetria tende a aumentar à medida que a incidência de radiação solar aumenta. Nesse caso, a assimetria radiante foi significativamente maior nos escritórios com vidros SGU80 e IGU80, que possuem maior transmissão solar e admitem mais radiação solar direta. Neste contexto, a transmissão de energia solar através do vidro tem um impacto maior na ocorrência da assimetria na temperatura radiante do que a absorção de energia solar e a temperatura das superfícies circundantes. Essa situação ocorre devido ao peso dado a parcela de radiação solar direta e difusa na ponderação da assimetria da temperatura radiante nos modelos de ajuste solar.

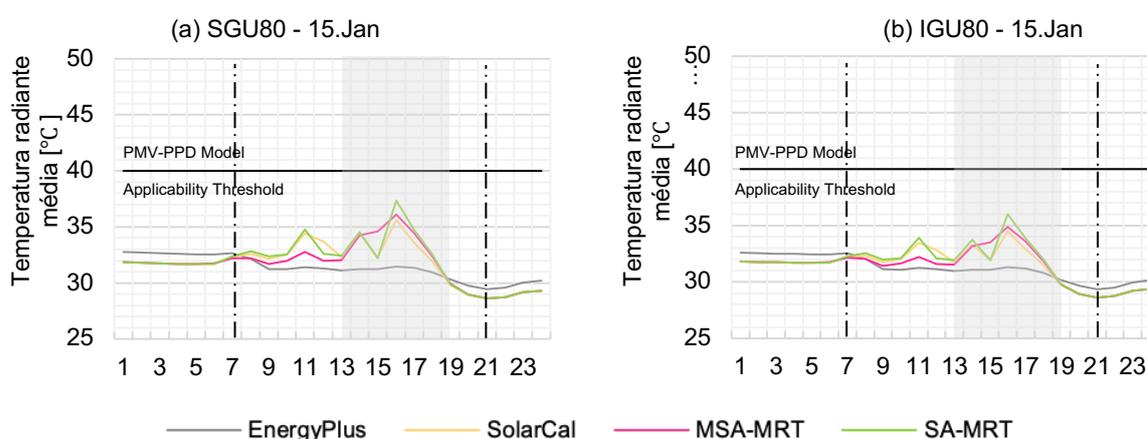
#### C2.4 DIA DE VERÃO COM BAIXA INCIDÊNCIA DE RADIAÇÃO SOLAR E DIA DE INVERNO COM ELEVADA INCIDÊNCIA DE RADIAÇÃO SOLAR

Foram realizadas análises adicionais de mais dois dias, nos quais foram observadas diferentes relações entre a temperatura externa e a incidência de radiação solar. No dia 15 de janeiro, a temperatura ao longo do dia é semelhante à do dia 6 de dezembro, porém com menor incidência de radiação solar na fachada oeste (até 460 W/m<sup>2</sup> por hora). Já no dia 26 de junho, a temperatura se mantém mais baixa em comparação ao dia 6 de dezembro, mas com alta incidência de radiação solar para o período de inverno.

No dia 15 de janeiro, a radiação solar difusa foi a componente mais significativa da radiação solar na fachada oeste. Os resultados nesse dia reforçam a

sensibilidade do modelo *SolarCal* à radiação solar difusa, enquanto o modelo MSA-MRT apresentou um impacto menor. Isso pode ser observado na Figura 84. Contudo, o modelo SA-MRT mostrou uma sensibilidade maior à radiação difusa em comparação ao 6 de dezembro. Essas correlações são evidentes quando ao comparar esses resultados de MRT com a curva de radiação solar difusa desse dia, conforme ilustrado na Figura 73b.

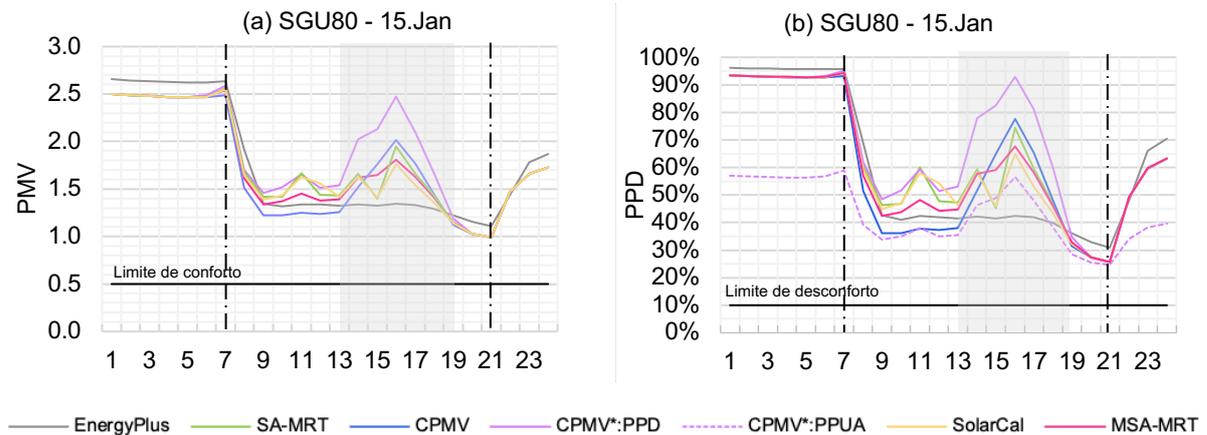
Figura 84 - Temperatura radiante média em 15 de fevereiro



Devido às altas temperaturas externas, o ambiente já se encontra em condição de desconforto térmico no início do período de ocupação, independentemente do tipo de vidro utilizado (PMV entre 2,0 e 2,6), como exemplificado na Figura 85 para a sala com vidro SGU80. Esse desconforto persiste ao longo de todo o período ocupado. No entanto, devido à menor incidência de radiação solar direta, o pico de desconforto com a maioria dos modelos de ajuste solar (SA-MRT, MSA-MRT e *SolarCal*) é até 0,4 (ou 31 p.p. em PPD) maior em comparação aos resultados do *EnergyPlus* (SGU80, 16h). Isso representa uma redução de quatro vezes em relação ao dia 6 de dezembro.

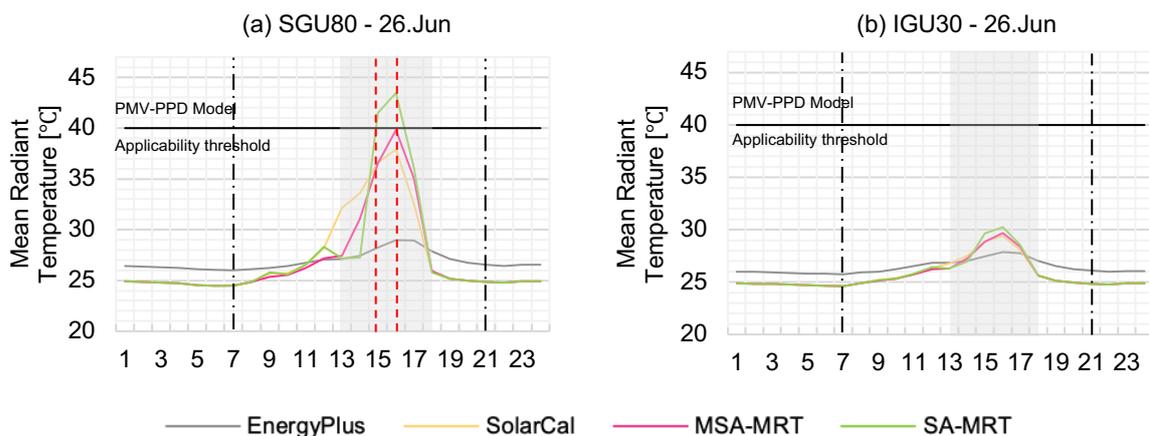
Da mesma forma, no dia 6 de dezembro, os modelos CPMV e CPMV\* apresentaram resultados de PMV e PPD superiores aos do *EnergyPlus*, com diferenças de até 0,7 (ou 36 p.p.) e 1,2 (ou 51 p.p.), respectivamente. No entanto, no dia 15 de janeiro, houve diferença significativa entre o CPMV e o CPMV\*. No horário de pico, o PMV foi 0,5 maior com o CPMV\* em comparação ao CPMV, e a diferença no PPD foi de 15 p.p. A baixa incidência de radiação solar na fachada oeste nesse dia e a predominância de radiação difusa explicam ambas as situações.

Figura 85 - (a) PMV e (b) PPD em 15 de janeiro: SGU80



Enquanto a temperatura externa se manteve entre 23 °C e 30 °C durante o período ocupado em 6 de dezembro, no dia de inverno (26 de junho), essa faixa foi de 12 °C e 18 °C (Figura 73c). Apesar da diferença de pico de temperatura de 12 °C, o pico da MRT calculado pelo *EnergyPlus* foi no máximo 3 °C mais baixo no dia de inverno. Aplicando os modelos de ajuste solar, a maior diferença ocorreu no escritório com vidro SGU80 (10 °C, MSA-MRT – Figura 86a), enquanto a menor diferença ocorreu com o IGU30 (2,5 °C, *SolarCal* – Figura 86b). Além das temperaturas mais baixas, a MRT alcançou 44,5 °C (SGU80, SA-MRT, 16h) devido à alta incidência de radiação solar nas janelas.

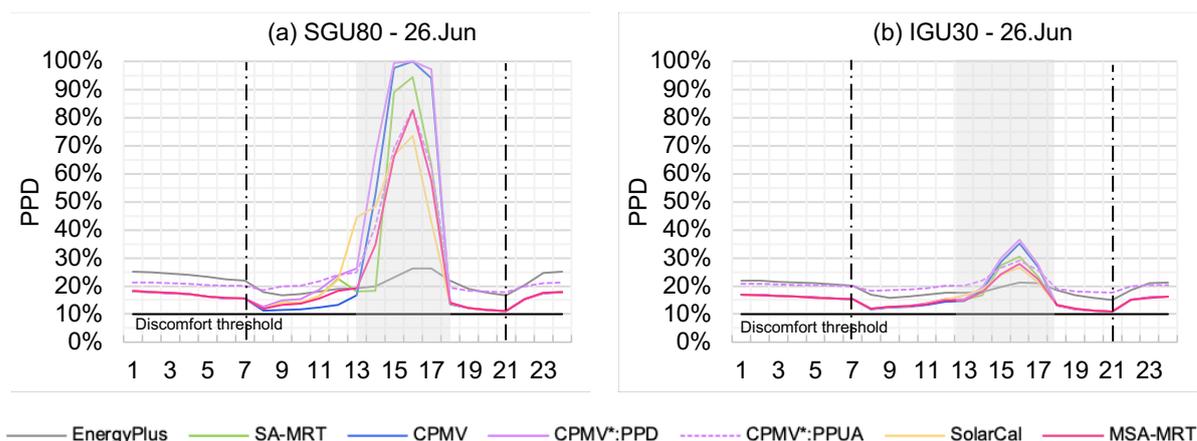
Figura 86 - Temperatura radiante média em 26 de junho



Embora a temperatura externa estivesse sempre abaixo do *setpoint* de aquecimento, a sala apresentou condição de desconforto térmico por calor durante todo o período ocupado, independentemente das propriedades térmicas do vidro,

como exemplificado na Figura 87. Devido ao calor, o PPD atingiu 100% com a aplicação do CPMV e do CPMV\*, o que representa um aumento de quase 75 p.p. em relação ao PPD calculado pelo *EnergyPlus* (SGU80, 16h). O *SolarCal* apresentou a menor diferença em relação aos resultados do *EnergyPlus*, mas ainda foi aproximadamente 45 p.p. mais alto.

Figura 87 - PPD em 26 de junho



Os resultados da assimetria na temperatura radiante em 15 de janeiro e 26 de junho não apresentaram diferenças significativas em relação aos padrões encontrados em 6 de dezembro ou descritos anteriormente.

### C3 DISCUSSÃO

No período de incidência de radiação solar direta na fachada oeste (das 13h às 19h), notou-se um aumento acentuado da MRT com os três modelos de ajuste solar. No entanto, a curva de ascensão difere entre os modelos. O modelo MSA-MRT começa a subir às 14h, enquanto os modelos SA-MRT e *SolarCal* iniciam apenas às 16h. O mesmo padrão é observado no PMV, onde os resultados do CPMV e CPMV\* começaram a aumentar às 13h e às 14h, respectivamente. Essa defasagem é atribuída a coeficientes aplicados no SA-MRT e no *SolarCal*, que determinam se a radiação solar que entra pela janela atinge a pessoa em um determinado ponto da sala.

O procedimento de cálculo do SA-MRT utiliza trigonometria e ângulos solares para determinar se o indivíduo está na área de incidência direta da radiação solar.

Isso resulta no coeficiente de sombreamento interno do edifício ( $C_S^{in}$ ), que é 1 quando o feixe de radiação solar atinge o sujeito e 0 caso contrário. Esse coeficiente é incluído no cálculo da componente do efeito da radiação solar na MRT. Essa abordagem oferece uma vantagem significativa em relação aos outros modelos, pois permite determinar com precisão se a radiação solar atinge o ocupante de um determinado local e momento. Além disso, facilita o cálculo horário em períodos prolongados, como mensal, sazonal ou anual.

O modelo *SolarCal* também utiliza um coeficiente para determinar se o feixe de radiação solar atinge o ocupante: a fração do corpo exposta à luz solar ( $f_{bes}$ ). Esse coeficiente é definido como a fração da área projetada do corpo ( $f_p$ ) não sombreada pelo ambiente interno. O coeficiente  $f_{bes}$  é 1 quando o sujeito está completamente exposto e 0 quando sombreado. No entanto, esse valor pode ser estimado de maneira simplificada, não havendo um procedimento de cálculo específico para isso. Ao contrário do  $C_S^{in}$ , o  $f_{bes}$  não é um fator binário, admitindo que o feixe de radiação solar atinge apenas uma fração da área corporal voltada em direção à janela.

Devido ao modelo MSA-MRT incluir o fluxo de radiação solar refletido pelas superfícies opacas internas e pelo piso, esperava-se que esse modelo apresentasse valores de MRT mais altos em relação ao modelo SA-MRT. No entanto, os valores de MRT obtidos com o MSA-MRT tendem a ser semelhantes aos do SA-MRT, exceto no período entre 14h e 16h, quando a MRT foi 12 °C mais alta com o MSA-MRT. Essa diferença pode ser atribuída ao fato de o MSA-MRT não considerar o coeficiente de sombreamento/exposição corporal.

A influência reduzida das reflexões no chão pode estar associada à altitude solar. De acordo com a Lei do Cosseno de Lambert, a fração da energia radiante do feixe normal recebida em uma superfície horizontal diminui à medida que a altitude solar diminui. O pico de irradiância solar ocorreu às 17h na fachada oeste, quando a altitude solar foi de 28,2°. Como resultado, aproximadamente 50% dessa radiação é recebida pelo piso. Portanto, o aumento devido à componente do fluxo de radiação solar proveniente da reflexão da radiação de ondas curtas no modelo MSA-MRT é menos significativo na análise de uma fachada envidraçada Oeste. No entanto, esperava-se que a MRT ainda apresente valores mais altos com o modelo MSA-MRT em comparação com o SA-MRT.

Sugere-se que essa ocorrência possa ser atribuída à forma de cálculo do SA-MRT. Nesse modelo, a fração da radiação solar direta e difusa que entra pela janela é estimada com base na radiação global horizontal, dados climáticos e geometria solar, resultando em incertezas consideráveis, principalmente em relação aos coeficientes envolvidos. Em contraste, o MSA-MRT não possui um procedimento específico para calcular a intensidade de radiação e, portanto, foram utilizados os dados de saída do *EnergyPlus* referentes à radiação solar transmitida pela janela. Como resultado, o cálculo do SA-MRT estima valores mais altos para o feixe de radiação solar que atravessa a superfície envidraçada.

Diversos autores (DERVISHI; MAHDAVI, 2012; HUANG; ZHAI, 2020; JACOVIDES et al., 2006) indicaram que os modelos de cálculo da fração difusa da irradiação solar, principalmente derivados da irradiação global horizontal, tendem a apresentar maiores erros em condições de baixa altitude solar. Portanto, os resultados obtidos pelos modelos de ajuste solar também carregam esses erros. Embora o pico de incidência de radiação tenha ocorrido em uma altitude solar de  $28,2^\circ$  neste estudo, entende-se que os resultados ainda são significativos, uma vez que estudos anteriores sugerem que esses modelos levam a uma porcentagem de erro mais significativa quando a altitude solar é inferior a  $20^\circ$  (DERVISHI; MAHDAVI, 2012; HUANG; ZHAI, 2020).

Os valores elevados de MRT estimados pelo SA-MRT contradizem os resultados encontrados por Huang e Zhai (2020) em sua comparação de nove modelos de ajuste solar para uma sala de escritório em Lhasa, no Tibete. Entre os modelos de correção da MRT, o SA-MRT apresentou a menor convergência com as medições *in loco* e tendeu a subestimar a MRT. Essa discrepância provavelmente está relacionada ao clima local (Köppen-Geiger Dwc), caracterizado como um clima nevado com inverno seco e verão frio. Além disso, também pode ser atribuída às limitações desse estudo mencionadas anteriormente na revisão de literatura (item 2.3.6.5).

Da mesma forma, o estudo realizado por Huang e Zhai (2020) indicou que os resultados do PMV ao aplicar o modelo CPMV diferem significativamente das medições e subestimam o impacto da radiação solar. No entanto, os resultados do presente estudo indicam o contrário. Embora o modelo CPMV não leve em consideração os efeitos da radiação difusa, os valores ajustados de PMV e PPD utilizando esse modelo foram significativamente maiores em comparação com os

outros modelos. Isso sugere que o modelo desenvolvido por Zhang et al. (2018, 2020) pode superestimar o efeito da radiação solar na percepção térmica e conforto dos ocupantes em climas temperados, como o de Florianópolis. Vale ressaltar que o estudo realizado por Huang e Zhai (2020) testou os modelos apenas no contexto climático de Tianjin, na China, que é caracterizado por verões quentes e úmidos e invernos frios e secos, o que pode impactar na validação do modelo.

Além do tipo de clima, outra possível razão para os resultados significativamente maiores de PMV ao aplicar o CPMV e CPMV\* pode estar relacionada ao peso atribuído aos componentes de radiação solar direta e difusa no método de cálculo do CPMV\*. Em vez de modificar a parcela de troca de calor por radiação na equação PMV, o autor adicionou duas componentes além dos seis parâmetros ambientais e pessoais que compõe a equação original. Na equação do PMV, o componente de perda de calor sensível à radiação é expresso pelo coeficiente de transferência de calor por radiação e a diferença entre a temperatura média da superfície externa do corpo vestido e a temperatura radiante média por ondas longas. Os componentes direto e difuso do ganho de calor da radiação solar propostos por Zhang et al. (2018, 2020), por sua vez, não recebem nenhuma ponderação. Consequentemente, a influência da transferência de calor radiante no balanço de calor do corpo é significativamente aumentada.

A relação entre os resultados da MRT, temperatura superficial da janela e propriedades de transmissão do vidro revelou um impacto significativo do controle de admissão de radiação solar no conforto térmico previsto dos ocupantes em postos de trabalho localizados próximo às janelas, principalmente em condições de temperatura do ar externo entre 20 °C e 30 °C e alta incidência de radiação solar. Esse padrão é maximizado quando um modelo de ajuste solar é aplicado ao índice de conforto. No entanto, também ocorre na previsão de conforto calculada pelo *EnergyPlus*, embora de maneira mais sutil. Além disso, os resultados da assimetria da temperatura radiante indicam que, ao aplicar um modelo de ajuste solar, o FS tende a ter um impacto mais significativo na previsão do desconforto térmico dos ocupantes.

Em todos os cenários analisados, os modelos de ajuste solar demonstraram resultados semelhantes ao *EnergyPlus* quando vidros de menor FS foram utilizados, ou seja, vidros com menor capacidade de transmissão da radiação solar. Isso resultou em uma maior proximidade entre os resultados dos modelos de ajuste solar e os calculados pelo *EnergyPlus*, que considera apenas a radiação de ondas longas.

De maneira geral, os três dias analisados apresentaram padrões semelhantes e corroboraram a análise para o dia de verão com maior incidência de radiação solar. Ao comparar os resultados desses três dias, é evidente o impacto significativo nos índices de conforto térmico dos ocupantes ao corrigir o efeito da radiação solar. Mesmo em dias de inverno, um ambiente tende a apresentar um aumento nas condições de desconforto devido ao calor quando há alta incidência de radiação solar.

#### **C4 CONCLUSÕES**

Os resultados dos índices corrigidos pelos diferentes modelos de ajuste solar foram comparados. Notou-se que os resultados de PMV obtidos com os modelos CMPV/CPMV\* foram significativamente mais altos em comparação com os demais modelos. O modelo MSA-MRT apresentou resultados de PMV e MRT semelhantes ao SA-MRT, embora leve em consideração as reflexões da radiação de ondas curtas nas superfícies internas opacas. No entanto, o MSA-MRT mostrou uma assimetria mais elevada na temperatura radiante, diferindo significativamente dos outros modelos. Esses fatos indicam inconsistências relevantes em ambos os modelos.

Os modelos SA-MRT e *SolarCal* apresentaram resultados aparentemente mais coerentes, com os valores ajustados pelo *SolarCal* sendo menores. Embora o modelo SA-MRT seja mais detalhado em termos geometria solar e espacial, o procedimento de cálculo da radiação solar que entra pela janela pode conter imprecisões relevantes. Por outro lado, o modelo *SolarCal* é mais simples de implementar, sendo que ambos os modelos produziram resultados semelhantes.

É importante destacar que este estudo não estabelece uma relação direta entre os índices de conforto térmico ajustados e dados de medição ou percepção térmica das pessoas em um ambiente real. Logo, não é possível concluir qual modelo tem maior correlação com a realidade. Além disso, ainda não existe um *benchmark* para a comparação entre os resultados de cada modelo. No entanto, ainda faltam discussões sobre a aplicação dos diferentes modelos de ajuste solar e as consequências da escolha entre eles. Portanto, este estudo contribui para ampliar essa discussão e indicar numericamente as limitações e vantagens de cada modelo de ajuste solar no contexto de um clima temperado na América do Sul.

## APÊNDICE D – Resultados dos algoritmos de convecção nas superfícies internas

Neste apêndice são apresentados os gráficos dos resultados expandidos do item 3.3.3, Algoritmos de convecção nas superfícies internas, para todas orientações do modelo.

Figura 88 - Histograma anual da frequência relativa de ocorrência horária do coeficiente de convecção [W/m<sup>2</sup>.K]

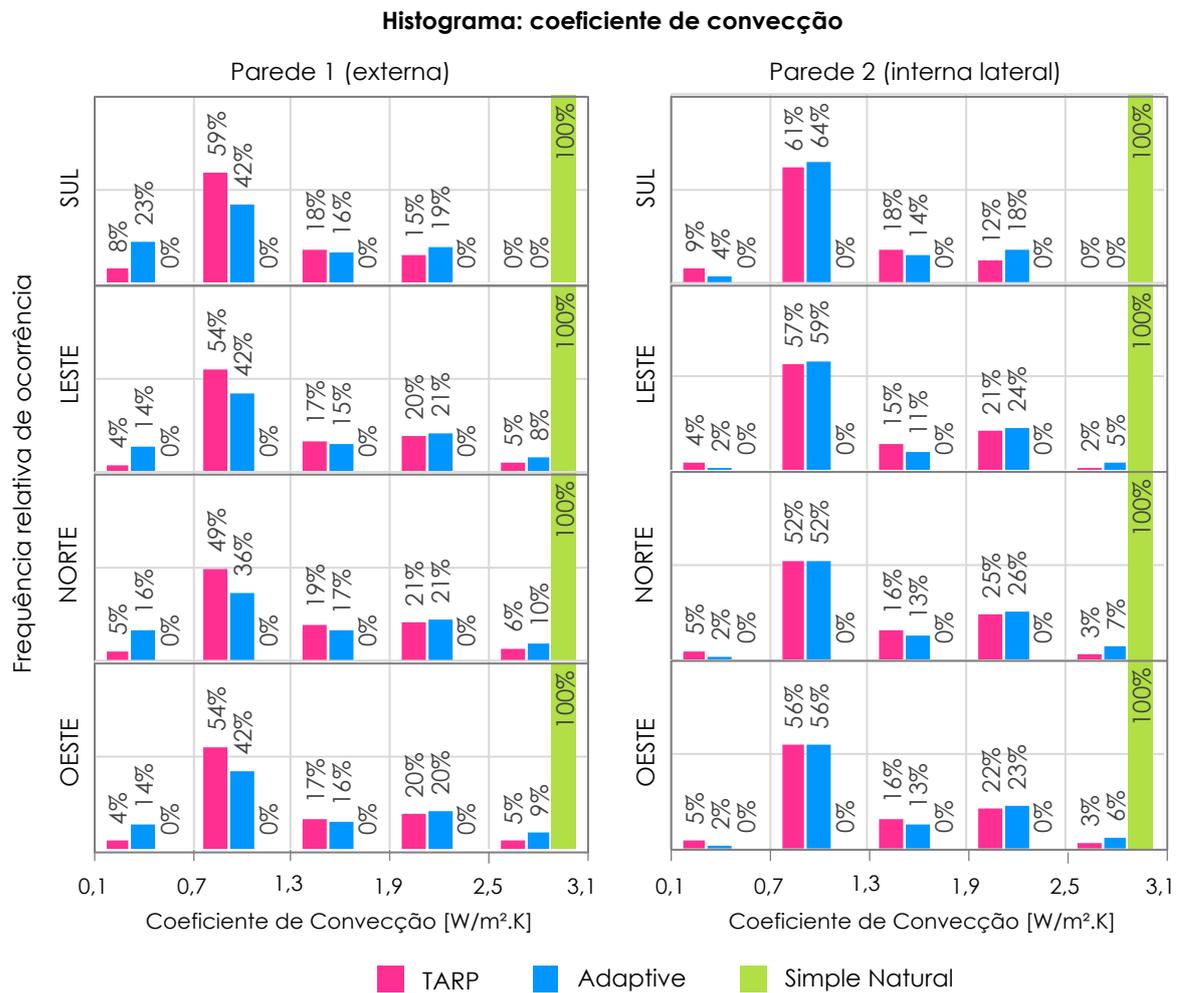


Figura 89 - Perfil horário dos coeficientes de convecção e da temperatura interna das paredes 1 (externa) e 2 (interna lateral) para as semanas extremas de verão e inverno: modelo Sul

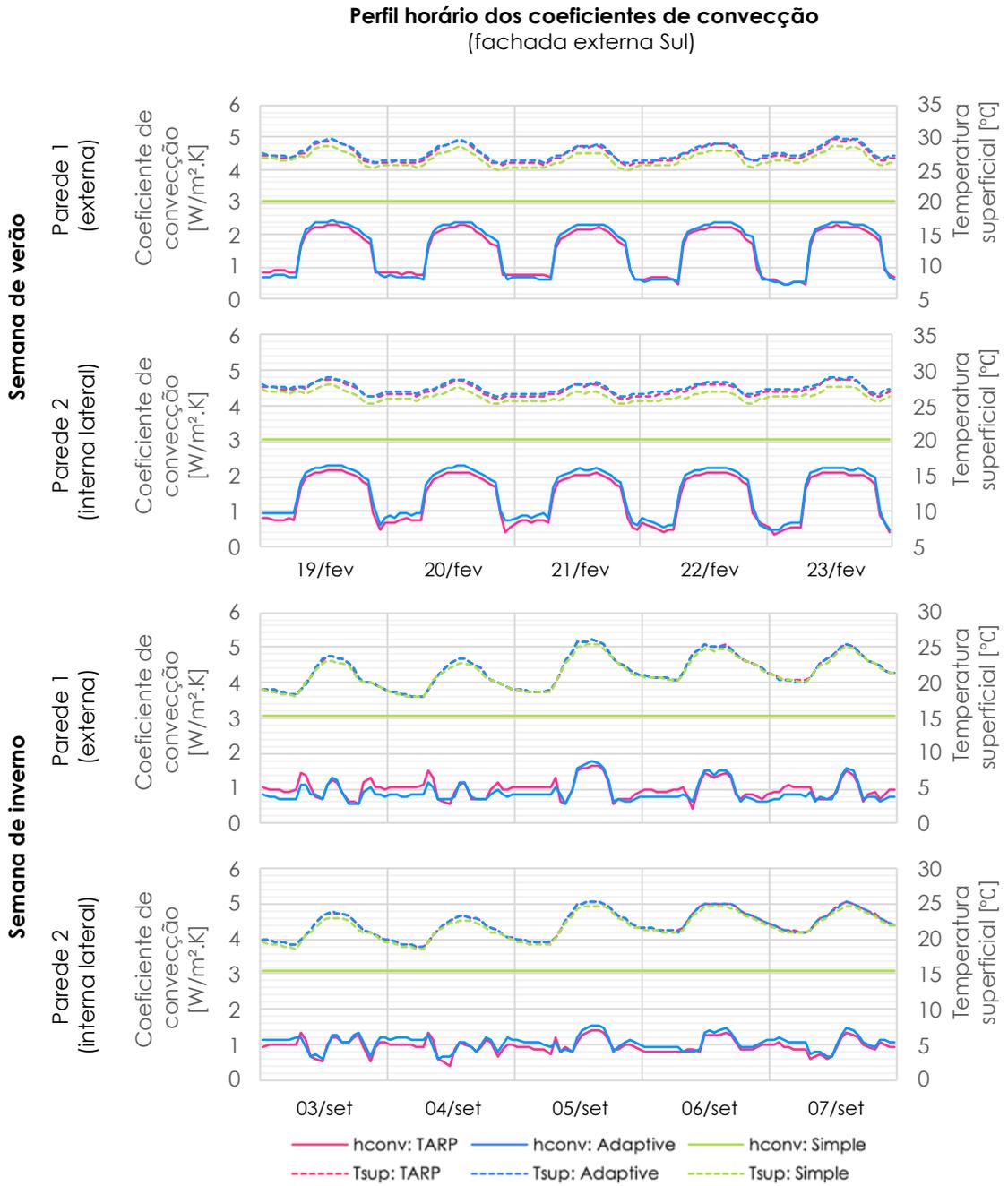


Figura 90 - Perfil horário dos coeficientes de convecção e da temperatura interna das paredes 1 (externa) e 2 (interna lateral) para as semanas extremas de verão e inverno: modelo Leste

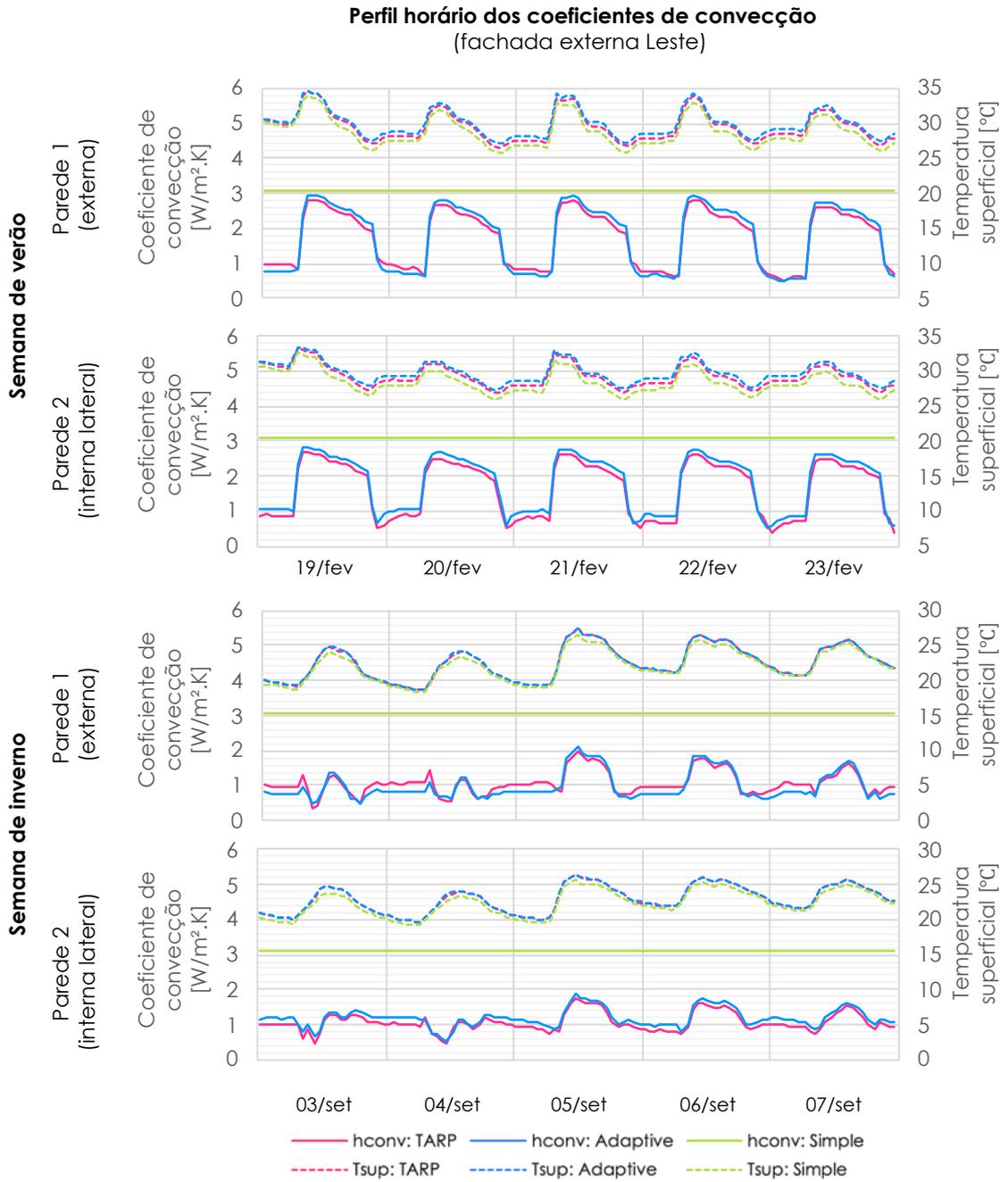


Figura 91 - Perfil horário dos coeficientes de convecção e da temperatura interna das paredes 1 (externa) e 2 (interna lateral) para as semanas extremas de verão e inverno: modelo Norte

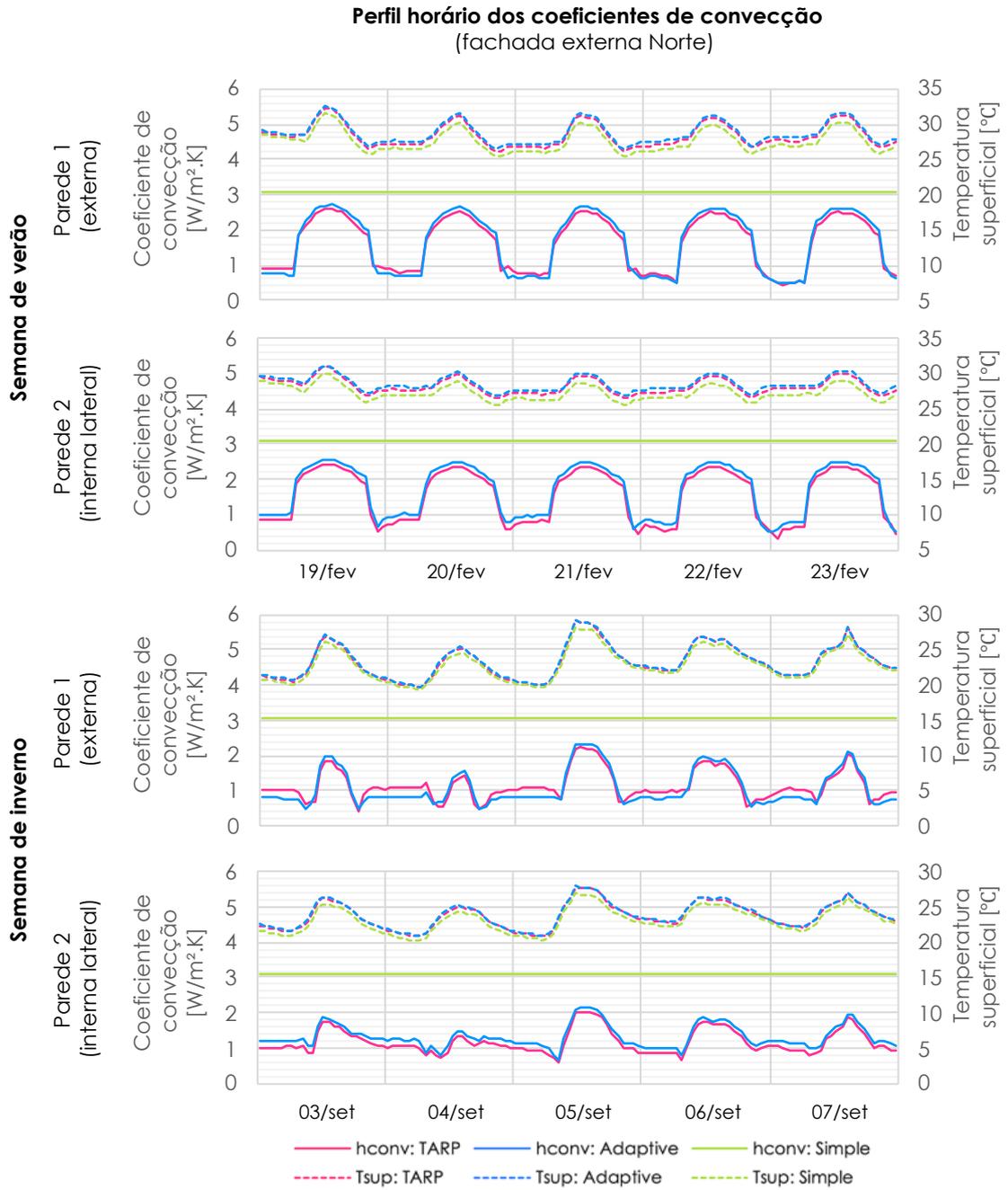


Figura 92 - Perfil anual da diferença na carga térmica diária entre os algoritmos de convecção (dias ocupados)

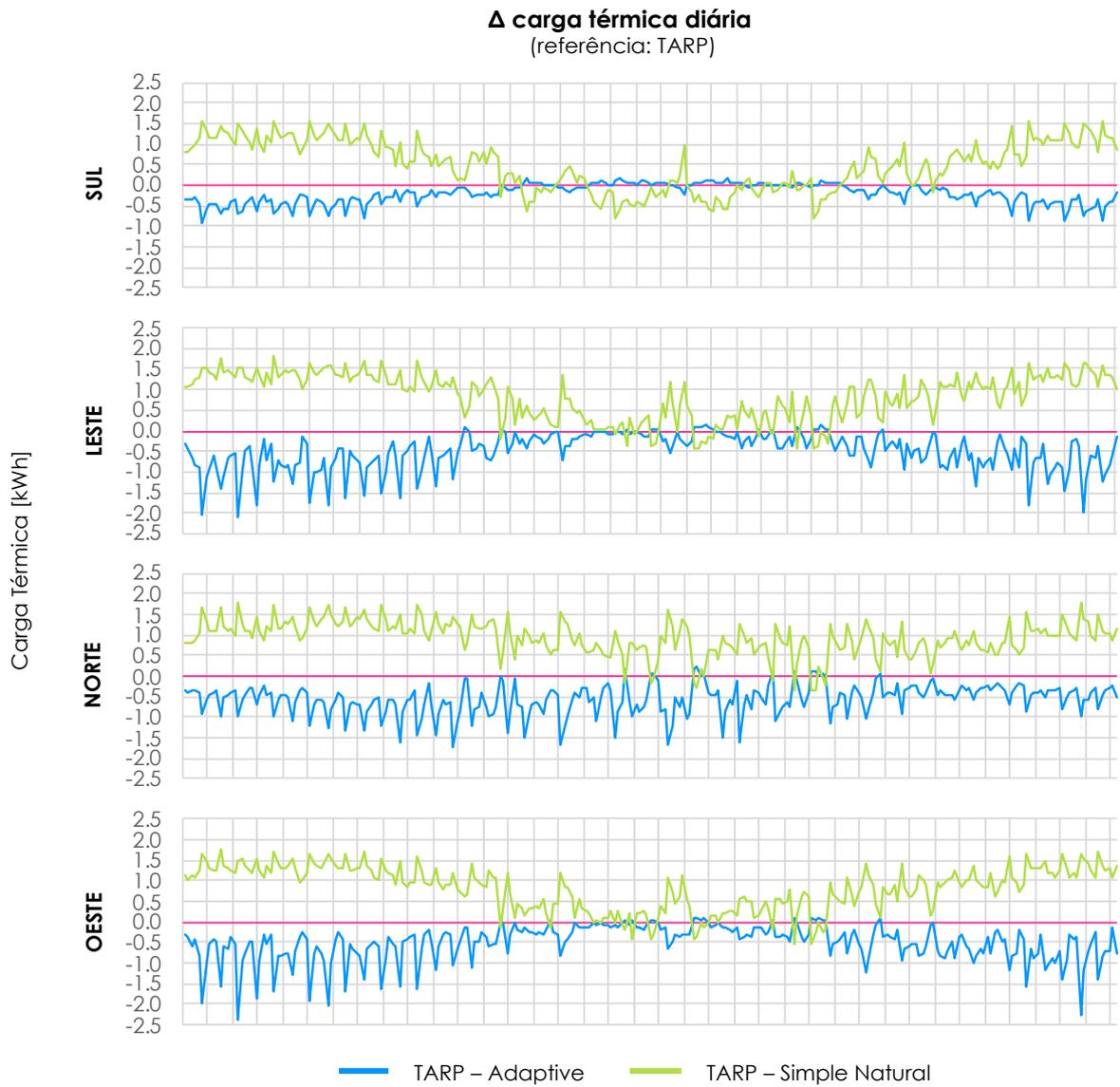


Figura 93 - Perfil semanal de carga térmica horária: semanas extremas de verão (19-23/fevereiro)

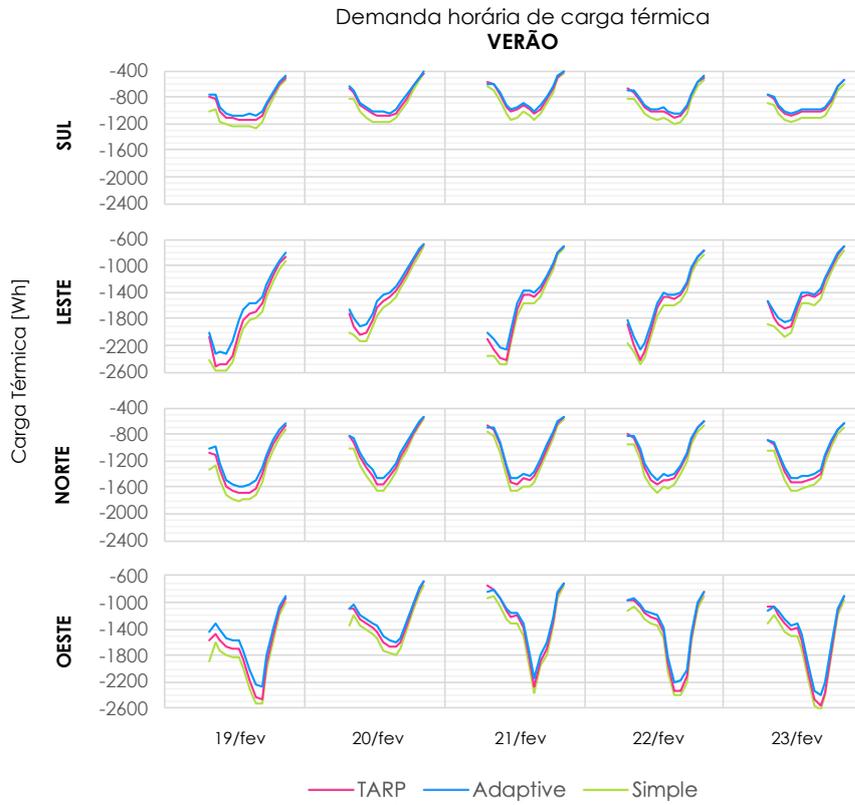


Figura 94 - Perfil semanal de carga térmica horária: semanas extremas de inverno (03-07/setembro)

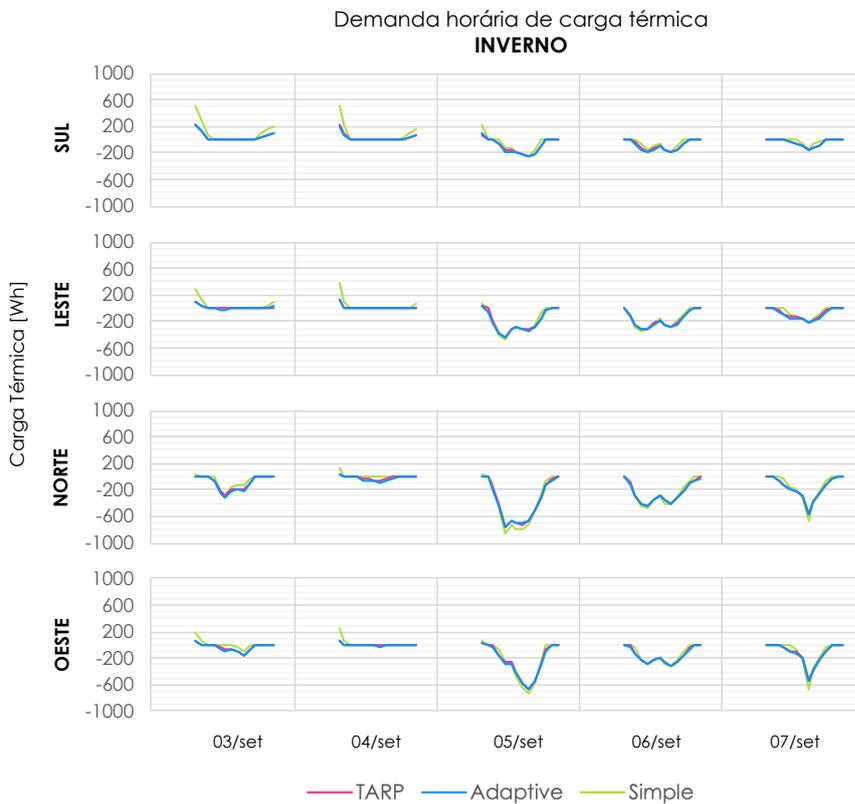


Figura 95 - Histograma de frequência relativa de ocorrência da diferença nos índices horários de conforto térmico: (a) PMV e (b) PPD. Referência: TARP

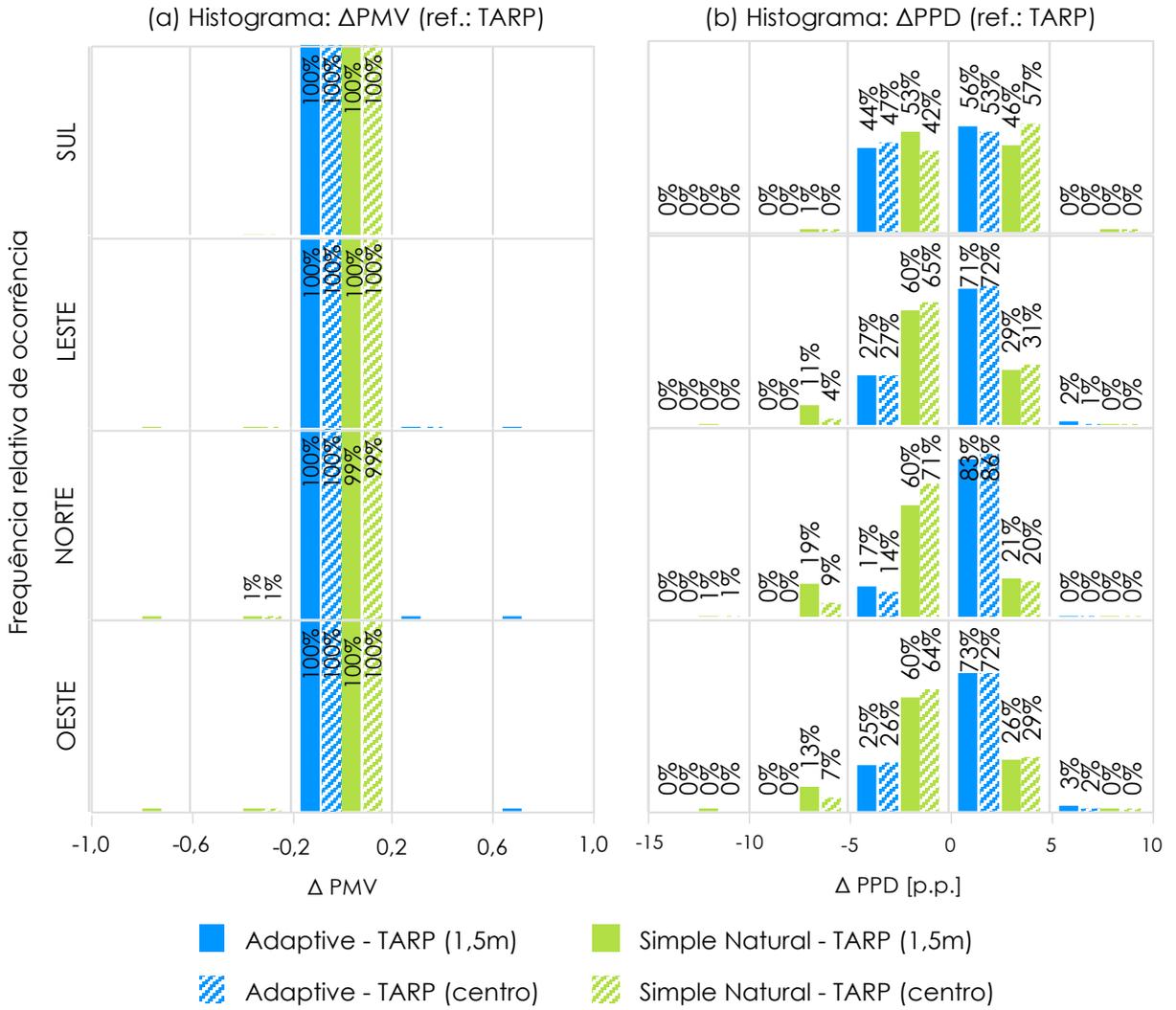


Figura 96 - Índice PMV de conforto térmico a 1,5m da janela: perfis das semanas extremas de verão (19-23/fevereiro)

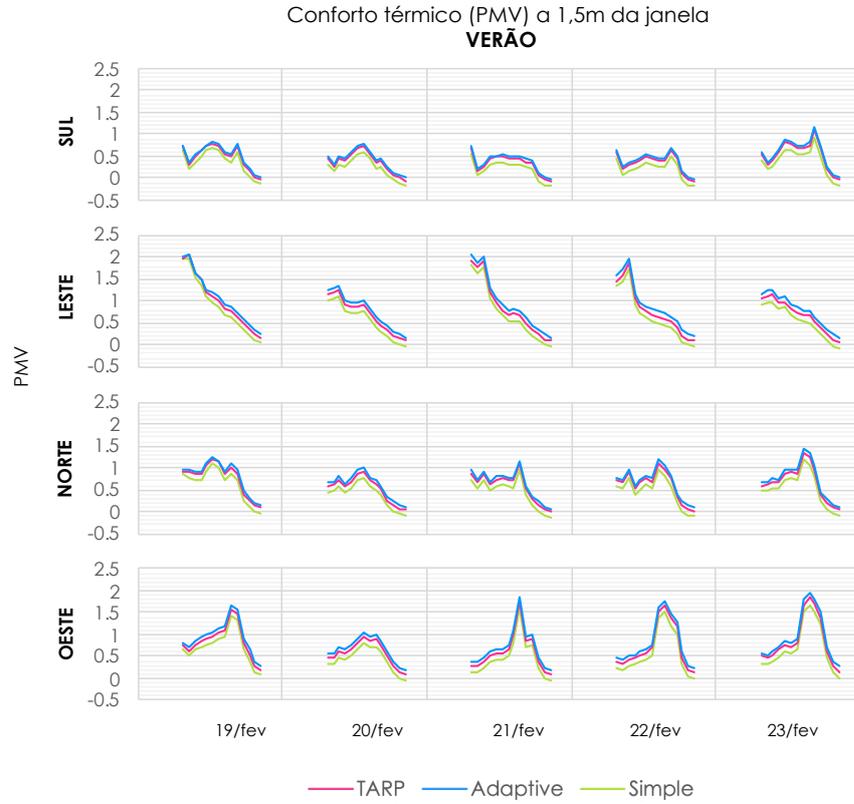


Figura 97 - Índice PMV de conforto térmico a 1,5m da janela: perfis das semanas extremas de inverno (03-07/setembro)

