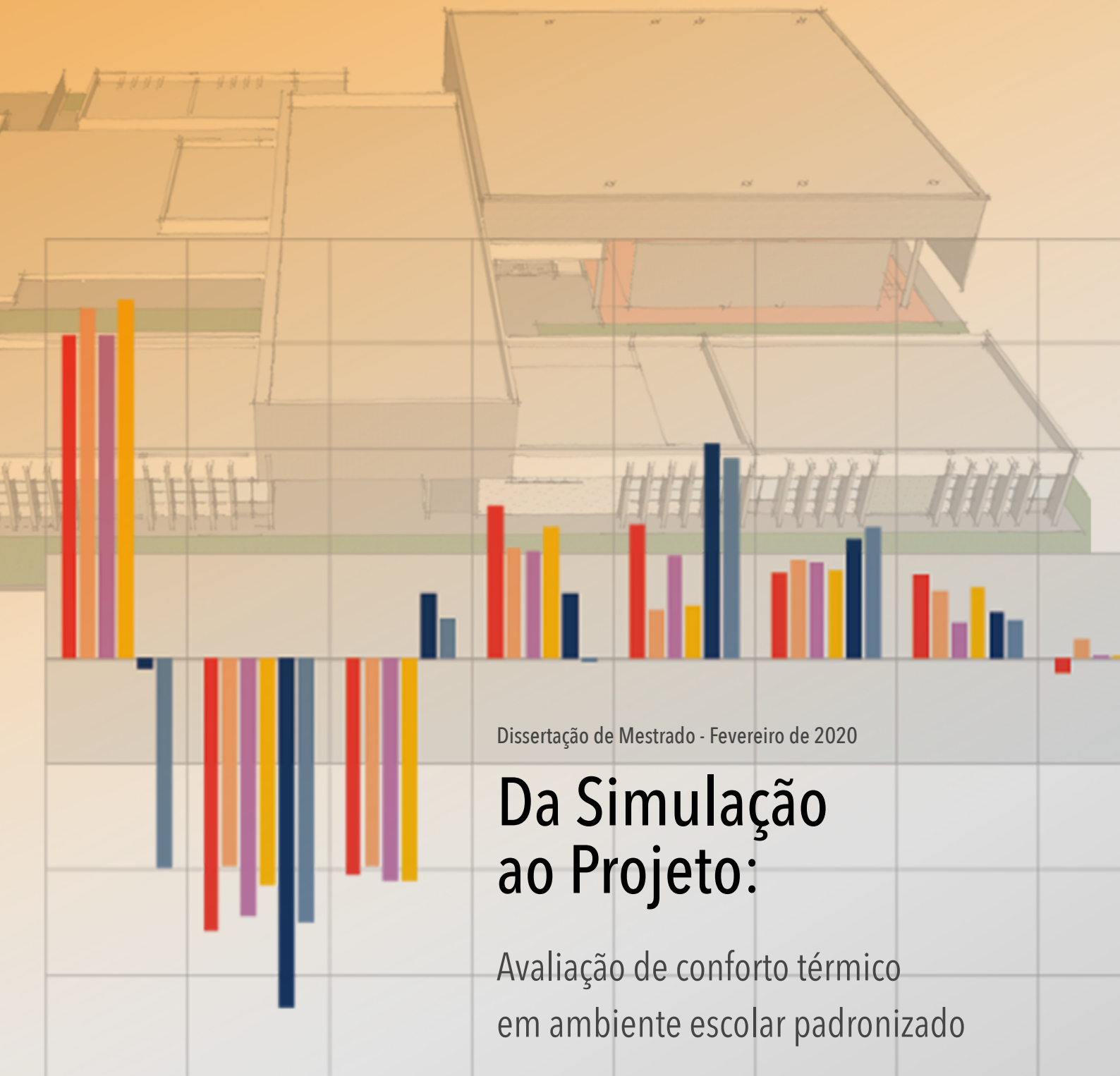




Universidade de Brasília



Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de pesquisa e pós-graduação



Adriano Felipe Oliveira Lopes

Orientador: Caio Frederico e Silva



Universidade de Brasília
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de pesquisa e pós-graduação

Da Simulação ao Projeto:

Avaliação de conforto térmico em
ambiente escolar padronizado

Mestrado em Arquitetura e Urbanismo

Adriano Felipe Oliveira Lopes

Orientador: Caio Frederico e Silva



SiCAC
Simulação Computacional
no Ambiente Construído



Lacam
Laboratório de Controle
Ambiental e Eficiência Energética

Brasília, fevereiro de 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

LOPES, ADRIANO FELIPE OLIVEIRA

Da Simulação ao Projeto: avaliação de conforto térmico em ambiente escolar padronizado [Distrito Federal] 2020.xvii, 152p., 210 x 297 mm (PPG/FAU/UnB, Mestre, Arquitetura e Urbanismo, 2020).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.

1. Conforto Térmico. 2. Simulação Termoenergética. 3. Escolas. 4. Projeto Padrão.

I. FAU/UnB. II. Título (série).

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LOPES, A. F. O. (2020). Da simulação ao projeto: avaliação de conforto térmico em ambiente escolar padronizado. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 152p.

CESSÃO DE DIREITOS

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização do autor.

Adriano Felipe Oliveira Lopes

SCRN 706/7, Bloco C, Entrada 40, Apto. 301

CEP: 70.740-630, Brasília-DF - Brasil

e-mail: adrianolopes.arq@gmail.com

Da Simulação ao Projeto:

Avaliação de conforto térmico em
ambiente escolar padronizado

Adriano Felipe Oliveira Lopes

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Caio Frederico e Silva

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Caio Frederico e Silva (1º membro - presidente)

Universidade de Brasília

Profa. Dra. Cláudia Naves David Amorim (2º membro)

Universidade de Brasília

Profa. Dra. Juliana Oliveira Batista (3º membro)

Universidade Federal de Alagoas

Prof. Dr. Gustavo Luna Sales

Universidade de Brasília (4º membro - suplente)



*“Never underestimate the ability of the human animal
to adapt to its environment.”*

Hideaki Anno - Neon Genesis Evangelion



Agradecimentos

“I lay on the side of the dirt road next to a rocky trench, looked up to the gray morning sky, thankful for air, thankful for light, thankful to be alive.”

Khaleid Hosseini - O Caçador de Pipas

Agradeço a estrada que me fez chegar até aqui, na qual muitas vezes tive que passar por caminhos de dúvidas, fraquezas e decepções, mas em todo tempo tive a oportunidade de ter pessoas caminhando junto comigo.

Sou grato primeiramente a Deus pela sua presença e provisão, mesmo minha fé sendo menor do que um grão de mostarda.

Agradeço à minha família pelo suporte em meus momentos de necessidade e por me terem me apoiado durante toda a trajetória. Em especial minha mãe Marleide, meu pai Raimundo, meus irmãos Guilherme e Pedro, minha tia Kleide e meus primos Gustavo e Lucas.

Agradeço especialmente a meu orientador Caio Silva pelas excelentes orientações e por ter me incentivado a não parar no meio do caminho. Também agradeço à professora Cláudia Amorim por ter sido uma referência desde o momento do embarque e à professora Juliana Batista pela disponibilidade em compor a banca avaliadora. Suas contribuições foram fundamentais ao desenvolvimento desta dissertação.

Também gostaria de agradecer as muitas horas de estradas compartilhadas com amigos muito especiais. A meus colegas do SICAC, Bárbara Gomes, Rejane Martins, Roberta Carolina, Fernanda Moreira e Gustavo Zorzeto, do LACAM, Ayanna Dantas e João Walter e do LASUS, Abner Calixter e Daniela Werneck. Em especial, meus caros colegas Thiago Góes e Júlia Adario que tive a oportunidade de conhecer pouco antes do embarque e tanto colaboraram para que eu chegasse até aqui.

Muito obrigado aos mestres que dentro e fora de sala de aula tanto contribuíram ao meu desenvolvimento acadêmico e pessoal: Marta Romero, Márcio Buson, Vanda Zanoni, Gustavo Luna e Juliana Andrade. Agradeço também ao Valmor Pazos e Francisco Júnior pela solicitude sempre que tive qualquer dúvida sobre algum procedimento burocrático.

Por último, não posso deixar de agradecer à minha segunda casa, a Universidade de Brasília, por todo o recurso que tive à disposição, e à CAPES, pelo apoio financeiro à realização desta pesquisa.



Resumo

A simulação computacional termoenergética é ferramenta chave para a concepção de projetos arquitetônicos mais adaptados ao lugar. Seu emprego pode auxiliar no desenvolvimento de diretrizes que busquem melhorar o desempenho de projetos apoiando a tomada de decisões. Nesse contexto, essa pesquisa se propõe a avaliar o conforto térmico de um ambiente escolar padronizado a partir de projeto de escola desenvolvido pela coordenação de projetos da Fundação Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) em busca de melhor adequá-lo à diferentes contextos climáticos. Os procedimentos metodológicos partem da relação entre normas e regulamentos que abordam o emprego da simulação como ferramenta de avaliação do conforto térmico em projetos e são divididos em 4 etapas: Análise climática de seis municípios de referência, desenvolvimento de modelo termoenergético do projeto padrão, diagnóstico do conforto térmico do ambiente de estudo e análise estatística para verificação da sensibilidade de variáveis de projeto sobre seu conforto térmico. Considera-se sua locação nas cidades de Brasília (DF), Curitiba (PR), Cuiabá (MT), Natal (RN), Porto Alegre (RS) e Rio de Janeiro (RJ), as quais representam seis zonas climáticas brasileiras definidas na revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro (ZBBR). Para desenvolvimento do modelo termoenergético, utiliza-se da simulação no EnergyPlus (versão 8.3), por meio da interface gráfica DesignBuilder (versão 6.1.3.005), no qual se calcula o percentual de horas ocupadas em conforto (POC) em função do índice de temperatura neutra (T_n), segundo método ASHRAE 55 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 16401. Os resultados de conforto térmico apontam para a dificuldade de se utilizar o mesmo padrão arquitetônico em diferentes contextos climáticos, pois o número de horas em conforto resulta superior ao total de horas ocupadas apenas em três das seis cidades analisadas, são elas: Brasília, Curitiba e Porto Alegre. Em seguida, é verificada a influência de 9 diferentes variáveis de projeto a partir da análise dos coeficientes de regressão padronizado (SRC), determinação (R^2) e probabilidade (p-value). Esses resultados são reunidos em diagramas síntese afim de auxiliar à compreensão do dados de saída das simulações, servindo também como ferramenta ao desenvolvimento de projetos futuros. Por fim, destaca-se que os parâmetros de maior influência sobre o POC estão associados à densidade ocupacional e transmitância de paredes e coberturas tornando possível identificar padrões de uso e envoltória mais adequados a cada contexto climático.

Palavras-chave: Simulação termonenergética; conforto térmico; projeto padrão; ventilação natural, escolas, análise de sensibilidade.

Abstract

Building performance simulation is a key tool towards the design of better adapted projects to its weather context. Their employment can assist the development of guidelines which seeks to improve building performance supporting decision making. In this perspective, this research aims to evaluate the thermal comfort of a standardized classroom from a school project developed by the architectural coordination of the National Foundation for Education Development (FNDE) in Brazil. The methodological procedures comes from the rapport between standards and regulations that address the use of building simulation as a tool for the thermal comfort evaluation, divided into 4 stages: Climatic analysis of six locations, development of a simulation model of the standard project, thermal comfort diagnosis of a classroom and statistical analysis in order to verify the sensitivity of some architectural parameters over its thermal comfort. The considered implementation corresponds to the cities of Brasília (DF), Curitiba (PR), Cuiabá (MT), Natal (RN), Porto Alegre (RS) and Rio de Janeiro (RJ), which represents six Brazilian climate zones according to the review of the Brazilian Bioclimatic Zoning (ZBBR). The EnergyPlus simulation tool (version 8.3) is used, from its graphical interface DesignBuilder (version 6.1.3.005), to the development of the model, in which the percentage of comfort occupied hours (POC) is calculated according to the neutral temperature index (T_n), in accordance with the ASHRAE 55 and ABNT NBR 16401 standards. The thermal comfort evaluation points to the difficulty of using the same architectural patterns in different climatic contexts, once only in the cities of Brasilia, Curitiba and Porto Alegre the number of hours in comfort is higher than the total of occupied hours. Then, the influence of 9 different design variables is verified from the analysis of the standardized regression (SRC), determination (R^2) and probability (p-value) coefficients. These results are gathered in an overview diagram which helps over the understanding of the simulation output data, attending also as tool towards the development of future projects. It was concluded that the occupational density and transmittances of walls and roofs presents greater influence over the POC making it possible to identify patterns related to the operation and envelope of the buildig more suitable to each climatic context.

Keywords: Building performance simulation; thermal comfort; standard design; natural ventilation, schools; sensitivity analysis.



Lista de figuras

<i>Figura 1 -Interações dinâmicas entre sistemas em um edifício inerentes à simulação termoenergética. Fonte: Hensen e Lamberts (2018), adaptado pelo autor.</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2 -Estrutura e conteúdo da dissertação.</i>	<i>10</i>
<i>Figura 3 -Relação entre os índices PMV e PPD e intervalo de conformidade com norma ISO 7730, entre -0,5 e 0,5 (em cinza). Adaptado de: Lamberts et al. (2014) e Ekici (2013).</i>	<i>16</i>
<i>Figura 4 - Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente condicionados. Fonte: ASHRAE, 2017.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 5 - 11 ciclos definidos pela norma ASHRAE 209, para modelagem e simulação distribuídos por fase de projeto. Fonte: American Institutes of Architects (2019), adaptado pelo autor.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 6 - Diagrama do método adotado por Silva, Almeida e Ghisi (2016). Adaptado pelo autor.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 7 – Classificação da sensibilidade de variáveis de projeto comparadas por índice adotado à análise de sensibilidade. Fonte: Gagnon, Gosselin e Decker (2018), p?.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 8 – Itens componentes do capítulo.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 9 - Diagrama resumo das etapas que constituem o método empregado nessa pesquisa.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 10 - Zoneamento Bioclimático Brasileiro vigente. Fonte: NBR 15520-3 (ABNT, 2003)</i>	<i>33</i>
<i>Figura 11 –Proposta de revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro representado por variação do desvio padrão da temperatura média. Fonte: <www.labee.ufsc.br/sites/default/files/Climas_v3.pdf> Último acesso: 19/03/2020. Adaptado pelo Autor.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 12 - Carta bioclimática de Givoni sobre carta psicrométrica. Adaptado de Lamberts, Pereira e Dutra(2014). 36</i>	
<i>Figura 13– Dados de entrada determinados no software Climate Consultant (ver. 6.0.12) para elaboração da carta psicrométrica a partir da leitura dos dados climáticos registrados em um arquivo EPW (EnergyPlusWeather Data). Elaborado pelo autor.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 14– Análise da carta psicrométrica a partir dos dados de saída obtidos no software Climate Consultant e sobreposição da carta de Givoni. Elaborado pelo autor.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 15 – Planta baixa e perspectiva esquemática do complexo escolar. Fonte: CODIN/FNDE, 2018, adaptado pelo autor.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 16 - Planta do bloco pedagógico e sua implantação no projeto, com indicação da sala de aula estudada. Fonte: CODIN/FNDE, 2018, adaptado pelo autor.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 17 - Modelo tridimensional elaborado no software DesignBuilder (versão 6.1.3.005).</i>	<i>45</i>
<i>Figura 18 - Características da envoltória e ângulos de sombreamento aplicados ao bloco pedagógico no projeto padrão.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 19 - Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente condicionados. Fonte: ASHRAE 55, adaptado pelo autor.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 20 - Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente condicionados. Fonte: Rackes et al. (2015), adaptado pelo autor.</i>	<i>50</i>

<i>Figura 21 - Esquema do fluxo de ar entre as aberturas do ambiente simulado. Fonte?</i>	52
<i>Figura 22 - Exemplo de gráfico para análise da influência da ventilação natural em um ambiente de sala de aula em um dia típico com temperaturas mais elevadas.</i>	53
<i>Figura 23 - Gráficos de curvas de distribuição por tipo. Fonte: Software DesignBuilder (2019), adaptado pelo autor.</i>	56
<i>Figura 24 – Variáveis contínuas consideradas à para determinação da análise de sensibilidade.</i>	56
<i>Figura 25– Variáveis discretas consideradas à para determinação da análise de sensibilidade.</i>	57
<i>Figura 26 - Exemplo de gráfico de coeficientes de regressão padronizado e probabilidade extraídos no software DesignBuilder.</i>	59
<i>Figura 27 - Escala para análise do coeficiente de determinação. Elaborado pelo autor a partir dos Designbuilder (2019)</i>	60
<i>Figura 28 – Carta de psicrométrica com sobreposição do modelo de Givoni para o clima de Brasília. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.</i>	63
<i>Figura 29 – Carta de psicrométrica com representação da zona de conforto definida segundo modelo de De Dear & Brager para o clima de Brasília. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.</i>	63
<i>Figura 30 – Carta de psicrométrica com sobreposição do modelo de Givoni para o clima de Curitiba. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.</i>	64
<i>Figura 31 – Carta de psicrométrica com representação da zona de conforto definida segundo modelo de De Dear & Brager para o clima de Curitiba. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.</i>	64
<i>Figura 32 – Carta de psicrométrica com sobreposição do modelo de Givoni para o clima de Cuiabá. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.</i>	65
<i>Figura 33 – Carta de psicrométrica com representação da zona de conforto definida segundo modelo de De Dear & Brager para o clima de Cuiabá. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.</i>	65
<i>Figura 34 – Carta de psicrométrica com sobreposição do modelo de Givoni para o clima de Natal. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.</i>	66
<i>Figura 35 – Carta de psicrométrica com representação da zona de conforto definida segundo modelo de De Dear & Brager para o clima de Natal. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant...</i>	67
<i>Figura 36 – Carta de psicrométrica com sobreposição do modelo de Givoni para o clima de Porto Alegre. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.</i>	68
<i>Figura 37 – Carta de psicrométrica com representação da zona de conforto definida segundo modelo de De Dear & Brager para o clima de Porto Alegre. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.</i>	68
<i>Figura 38 – Carta de psicrométrica com sobreposição do modelo de Givoni para o clima do Rio de Janeiro. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.</i>	69

<i>Figura 39 – Carta de psicrométrica com representação da zona de conforto definida segundo modelo de De Dear & Brager para o clima do Rio de Janeiro. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 40 - Definição do dia típico a partir dos dados do arquivo climáticos extraídos no DesignBuilder.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 41 - Comparação da temperatura operativa considerando as aberturas operáveis ou permanentemente fechadas para a cidade de Brasília no dia 13 de dezembro.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 42 - Comparação da temperatura operativa considerando as aberturas operáveis ou permanentemente fechadas para a cidade de Curitiba no dia 9 de fevereiro.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 43 - Comparação da temperatura operativa considerando as aberturas operáveis ou permanentemente fechadas para a cidade de Cuiabá no dia 3 de outubro.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 44 - Comparação da temperatura operativa considerando as aberturas operáveis ou permanentemente fechadas para a cidade de Natal no dia 29 de dezembro.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 45 - Comparação da temperatura operativa considerando as aberturas operáveis ou permanentemente fechadas para a cidade de Porto Alegre no dia 03 de dezembro.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 46 - Comparação da temperatura operativa considerando as aberturas operáveis ou permanentemente fechadas para a cidade de Rio de Janeiro no dia 13 de fevereiro.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 47 - Diagrama de conforto térmico em ambientes escolares naturalmente ventilados.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 48 – Síntese dos resultados relacionados à análise do clima e caracterização do projeto utilizado para a simulação.</i>	<i>91</i>
<i>Figura 49 – Descrição das variáveis de entrada e classificação em função de seu grau de influência sobre o percentual de horas ocupadas em conforto.</i>	<i>92</i>
<i>Figura 50 – Diagrama de conforto térmico para o projeto padrão no contexto climático de Brasília.</i>	<i>93</i>
<i>Figura 51 – Diagrama de conforto térmico para o projeto padrão no contexto climático de Curitiba.</i>	<i>94</i>
<i>Figura 52 – Diagrama de conforto térmico para o projeto padrão no contexto climático de Cuiabá.</i>	<i>95</i>
<i>Figura 53 – Diagrama de conforto térmico para o projeto padrão no contexto climático de Natal.</i>	<i>96</i>
<i>Figura 54 – Diagrama de conforto térmico para o projeto padrão no contexto climático de Porto Alegre.</i>	<i>97</i>
<i>Figura 55 – Diagrama de conforto térmico para o projeto padrão no contexto climático de Rio de Janeiro.</i>	<i>98</i>
<i>Figura 55 – Janela do DesignBuilder com caracterização das paredes externas.</i>	<i>116</i>
<i>Figura 56 – Janela do DesignBuilder com caracterização do tipo de cobertura.</i>	<i>117</i>
<i>Figura 57 – Janela do DesignBuilder com configuração dos elementos de sombreamento.</i>	<i>118</i>
<i>Figura 58 - Propriedades térmicas dos materiais. Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2003)</i>	<i>128</i>

Lista de equações

<i>Equação 1 – Cálculo do voto médio estimado (PMV). Fonte: Lamberts et al, 2011.</i>	16
<i>Equação 2</i>	17
<i>Equação 3</i>	17
<i>Equação 4</i>	17
<i>Equação 5 - Média da temperatura de bulbo seco dos último sete dias anteriores a um dia de referência.</i>	49
<i>Equação 6– Fluxo de ar entre nós.</i>	51

Lista de gráficos

<i>Gráfico 1 – Distribuição do número de ocupantes por sala entre as 6 e as 19 horas.</i>	<i>48</i>
<i>Gráfico 2 - Temperatura operativa representativa das 8760 horas na sala de aula 4 comparada aos limites de conforto térmico adaptativo para o contexto climático de Brasília.</i>	<i>75</i>
<i>Gráfico 3 - Temperatura operativa representativa das 8760 horas na sala de aula 4 comparadas aos limites de conforto térmico adaptativo para o contexto climático de Curitiba.....</i>	<i>76</i>
<i>Gráfico 4 - Temperatura operativa representativa das 8760 horas na sala de aula 4 comparadas aos limites de conforto térmico adaptativo para o contexto climático de Cuiabá.</i>	<i>77</i>
<i>Gráfico 5 - Temperatura operativa representativa das 8760 horas na sala de aula 4 comparadas aos limites de conforto térmico adaptativo para o contexto climático de Natal.</i>	<i>78</i>
<i>Gráfico 6 - Temperatura operativa representativa das 8760 horas na sala de aula 4 comparadas aos limites de conforto térmico adaptativo para o contexto climático de Porto Alegre.</i>	<i>79</i>
<i>Gráfico 7 - Temperatura operativa representativa das 8760 horas na sala de aula 4 comparadas aos limites de conforto térmico adaptativo para o contexto climático do Rio de Janeiro.....</i>	<i>80</i>
<i>Gráfico 8 - Coeficientes de determinação (R^2) resultantes das análises de sensibilidade realizada por cidade.</i>	<i>83</i>
<i>Gráfico 9 - Coeficientes de regressão padronizado (SRC) por variável de entrada do modelo simulado em cada cidade.</i>	<i>84</i>
<i>Gráfico 10 - Resultados de coeficiente de probabilidade (p-value) para cada variável.</i>	<i>85</i>

Lista de tabelas

<i>Tabela 1 – Limites de aceitabilidade para definição da zona de conforto segundo ASHRAE 55. Fonte: ASHRAE (2017)</i>	<i>18</i>
<i>Tabela 2 - Arquivos climáticos utilizados na pesquisa. Elaborado pelo autor.</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 3 - Especificação dos materiais e acabamentos. Fonte: CODIN/FNDE.</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 4 - Aumento nos limites de temperatura operativa aceitável em ambientes ventilados naturalmente resultantes de velocidades do ar acima de 0,3 m/s. Fonte: ASHRAE,55.</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 5 - Resumo das configurações de variáveis para realização de análise de sensibilidade.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 6 – Semanas e dias típicos de verão extraídas dos arquivos climáticos para as 6 cidades.</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 7 - Resumo de diagnóstico de conforto térmico para as 6 cidades avaliadas. Elaborado pelo autor.</i>	<i>81</i>

Lista de abreviaturas e siglas

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BPS	Building Performance Simulation
CODIN	Coordenação de Desenvolvimento e Infraestrutura
CGEST	Coordenação Geral de Infraestrutura Educacional
CLO	Índice de isolamento por tipo de vestimenta (clothing insulation index)
DOE	Department of Energy of the United State of America
DF	Distrito Federal
EN	European Standard (Norma Européia)
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EMEI	Escola Municipal de Ensino Infantil
EPW	EnergyPlus Weather Data
EPS	Expanded Polystyrene (Poliestireno expandido)
EUA	Estados Unidos da América
FNDE	Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação
MT	Mato Grosso do Norte
PAR	Plano de Ações Articuladas
PDE	Plano de Desenvolvimento da Educação
PMV	Predicted mean vote (Voto médio predito)
POC	Percentual de Horas Ocupadas em Conforto
PPD	Percentual de Pessoas Insatisfeitas (Predicted Percentage of Dissatisfied)
PR	Paraná
PRFV	Lâminas de plástico reforçadas com lã de vidro
Tn	Temperatura neutra
TMY	Typical Meteorological Year
TRNSYS	Transient System Simulation Tool

tpm (out)	Temperatura média do ar externo predominante.
RJ	Rio de Janeiro
RN	Rio Grande do Norte
RS	Rio Grande do Sul
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para Edifícios, Comerciais de Serviços e Públicos
USP	Universidade de São Paulo
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
SRC	Standardized Regression Coefficient
ZBBR	Zoneamento Bioclimático Brasileiro

Sumário

	Introdução	1
	Objetivo geral	7
	Estrutura do trabalho	8
Capítulo 1	Referencial Bibliográfico	11
	Simulação como método em normas e regulamentos	12
	Conforto térmico em ambientes escolares naturalmente ventilados	22
	Sensibilidade das variáveis sobre o projeto	26
Capítulo 2	Materiais e Método	31
	Caracterização Climática	33
	Materiais	40
	Modelagem	45
	Diagnóstico de horas ocupadas em conforto	48
	Análise de sensibilidade	54
Capítulo 3	Resultados e Discussão	61
	Análise climática dos municípios estudados.....	61
	Influência da ventilação natural	70
	Diagnóstico de horas ocupadas em conforto	75
	Análise de sensibilidade	82
	Diagrama síntese dos resultados	89
Capítulo 4	Considerações finais	99
	Limitações da pesquisa	101
	Trabalhos futuros	102
	Referências bibliográficas	103
	Apêndice	116
	Anexos	128

Introdução

A simulação de desempenho de edifícios, tradução livre do inglês *Building Performance Simulation* (BPS), é um importante método de apoio ao processo de projeto arquitetônico. O projeto concebido apoiado por simulações computacionais tende a ser melhor adaptado a seu contexto climático (GONÇALVES, MOURA & KUNIOCHI, 2015), sobretudo porque os programas de simulação computacional utilizam arquivos climáticos específicos que caracterizam amplamente o clima da cidade - *loci* do projeto.

A representação de fenômenos termodinâmicos por meio de modelos virtuais simplifica a compreensão ambiental no qual o edifício se insere, contribuindo, portanto, ao processo de projeção do arquiteto (AMORIM, 1998; CHRISTAKOU, 2004; CARLO, 2008; CARLO & LAMBERTS, 2010; SCALCO et al., 2012). Dessa maneira, a simulação computacional colabora à apreensão do impacto de variáveis de projeto sobre seu consumo energético ou sobre seu conforto térmico, por exemplo (DE WIT, 2004; AUGENBROE, 2012; HERNANDEZ, 2015).

Numa perspectiva histórica, as primeiras tentativas de uso de ferramentas computacionais à predição do comportamento de edifícios datam do final da década de 1960 (SPITLER, 2006). Até então, a quantificação do desempenho termoenergético de edifícios baseava-se em abordagens fragmentadas para lidar com cálculos de fluxo de calor, limitadas à simplificação de fenômenos por meio de formulações analíticas locais (CLARKE, 2001; AUGENBROE, 2004; CLARKE & HENSEN, 2015).

Ao longo da década seguinte, com o advento dos computadores pessoais, desenvolve-se uma geração de *software* capaz de aplicar técnicas de equações diferenciais parciais, as quais passam a considerar a dependência entre diversas variáveis à descrição do comportamento termodinâmico de edifícios (CLARKE, 2001) abarcando todos os aspectos esquematizados na Figura 1.

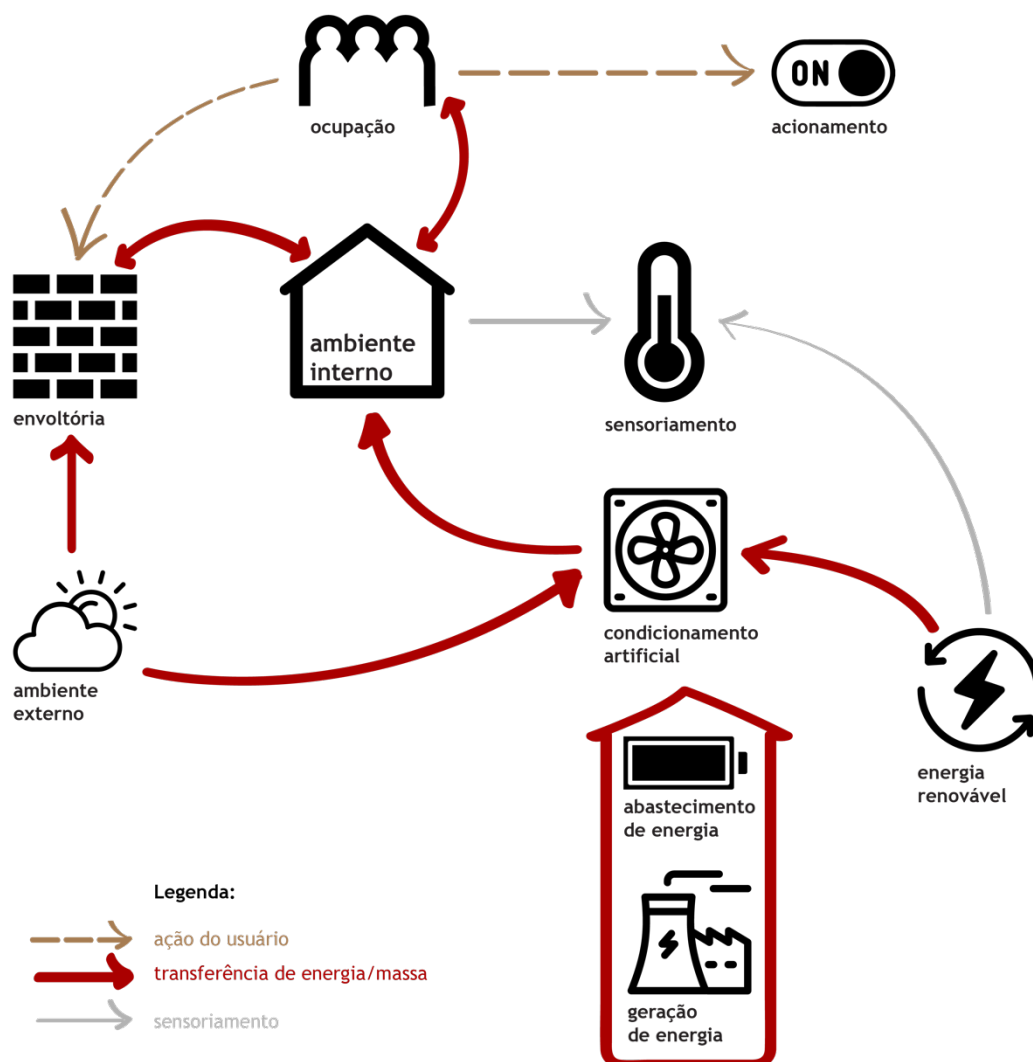


Figura 1 -Interações dinâmicas entre sistemas em um edifício inerentes à simulação termoenergética. Fonte: Hensen e Lamberts (2018), adaptado pelo autor.

Ainda na década de 1970, em decorrência da crise do petróleo, países europeus e os EUA, alarmados sobre a necessidade do uso racional de energia em edificações partiram para a formulação das primeiras políticas com foco em eficiência energética (MENDES et al., 2001; MENDES et al., 2005; AUGENBROE, 2004; SCHIMID, 2008; FREIRE et al., 2008; HENSEN & LAMBERTS, 2011; LAMBERTS et al., 2014;). Esse contexto impulsionou o desenvolvimento de métodos à avaliação do desempenho de edifícios e dimensionamento de sistemas mecânicos (MENDES et al., 2005; FREIRE et al., 2008; SCHIMID, 2008) e a evolução dos primeiros softwares de simulação a ferramentas mais robustas capazes de realizar cálculos dinâmicos (CLARKE, 2001; SPITLER, 2006; HERNANDEZ, 2015).

Na década de 1980, esforços substanciais de programação foram investidos no intuito de tornar os algoritmos de simulação disponíveis em ferramentas mais versáteis, validadas e de fácil utilização (AUGENBROE, 2004, 2012). A união de seus desenvolvedores no compromisso em evitar duplicidade de esforços, resultando no posterior lançamento do *EnergyPlus*, foi a causa da consolidação dessas ferramentas nesse período. Até meados da década de 1990, um número expressivo de ferramentas compunha o cenário da simulação termoenergética, como por exemplo: DOE-2, ESP-r e TRNSYS (AUGENBROE, 2004).

No Brasil, na década de 1980, grupos de pesquisas da USP, UFSC e UFRGS, atentos ao cenários de crise energética internacional, direcionaram suas pesquisas a temas relacionados à conservação de energia do edifício (MENDES et al., 2001). Até então, questões relacionadas à eficiência energética em edifícios constituíam importante lacuna na indústria da construção civil devido à ausência de normas dedicadas e profissionais capacitados para atuar nesse campo interdisciplinar (MENDES et al., 2001). Somente duas décadas depois, com impacto da crise hídrica sobre a matriz energética no início dos anos 2000, é publicado o Decreto 4.059 (BRASIL, 2001a) no qual é estabelecido grupo técnico responsável à elaboração do primeiro regulamento técnico para o nível de eficiência energética de edifícios (CARLO, J.C.C; LAMBERTS, 2010; FOSSATI et al, 2011).

Nesse contexto, a simulação computacional almeja aprimorar o processo de projeto (MORBITZER et al., 2001; HENSEN & LAMBERTS, 2011; CLARKE & HENSEN, 2015; RODRIGUES & PEDRINI, 2017). Seu uso permite investigar criteriosamente o impacto de diferentes aspectos arquitetônicos no desempenho ambiental dos edifícios (GONÇALVES et al., 2015), fornecendo melhor compreensão da influência de determinadas decisões de projeto sobre seu comportamento termoenergético (AUGENBROE, 2004; CHRISTAKOU, 2004; MENDES et al., 2005).

Pode-se conceituar a simulação como uma emulação da realidade por meio de modelos simplificados que representam entidades complexas (CLARKE, 2001; CARLO, 2008). Tais modelos reduzem, em um subconjunto limitado de elementos, qualidades específicas da entidade representada, ao mesmo tempo em que outras são abstraídos, permitindo a previsão de seu comportamento sob condições variáveis (MAHDAVI, 2003; AUGENBROE, 2004). No caso específico da simulação de edificações, Carlo & Lamberts (2010) definem o modelo como uma descrição numérica de determinadas

características suficientes à compreensão dos fenômenos envolvidos com as trocas térmicas, uso e ocupação do edifício e consumo de energia.

A qualidade no uso de ferramentas de simulação está associada diretamente à precisão dos dados de entrada que caracterizam um modelo (HENSEN & LAMBERTS, 2011). Segundo Spitler (2006), um dos principais desafios à prática da simulação reside na dificuldade de modelagem, seja pela demanda de tempo à sua execução ou complexidade na representação de seus sistemas e geometria. Portanto, é necessário compreender o modelo de simulação como uma representação da realidade a um certo nível de abstração (HENSEN & LAMBERTS, 2018). Nesse sentido, a simplificação do modelo a um número de elementos suficientes é fundamental, desde que possível verificar sua precisão e validar seus resultados para que sejam corretamente comunicados e integrados ao processo de projeto (GONÇALVES et al., 2015).

O maior benefício da simulação ocorre quando empregada durante a definição do partido arquitetônico (GONÇALVES et al., 2015). Além de servir à tomada de decisão de projeto por meio da predição do comportamento de diferentes cenários, a simulação também é uma importante ferramenta ao desenvolvimento de políticas públicas que busquem mitigar o impacto ambiental e econômico de edifícios melhorando seu desempenho (CRAWLEY, 2018). Para isso é essencial o conhecimento de uma amostra representativa do parque construído, incluindo o tamanho e número de edifícios, bem como suas características construtivas e de uso e ocupação, com o objetivo de estabelecer diretrizes de projeto a partir de dados de referência.

Nesse contexto, a simulação se emprega à determinação de requisitos de desempenho em normas, regulamentos e certificações. Como exemplo, a norma americana ASHRAE 90.1, publicada originalmente na década de 1970 (CRAWLEY, 2018), estabelece critérios para o desempenho energético de edifícios comerciais determinados a partir de saídas de simulações de protótipos que representassem uma classe de edifícios em contextos climáticos específicos. Baseado nessa norma, o Regulamento Técnico da Qualidade para edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), foi desenvolvido a partir do resultado de um conjunto de simulações, as quais serviram à formulação de equações para o cálculo da eficiência energética no contexto brasileiro.

Apesar do objetivo dessas normas e regulamentos centrar-se na avaliação individual de edifícios, é necessário que se compreenda seu impacto em um contexto mais amplo. A partir desse conhecimento acumulado, Crawley (2018) aponta para o

desenvolvimento de protótipos, suficientes à representação das características que definem o parque construído. Nesse sentido, é possível estabelecer não somente diretrizes à concepção de projetos visando melhor desempenho, mas também bases à padronização de tipologias específicas.

O desafio da padronização na arquitetura consiste na desconsideração de situações locais específicas de clima e sítio, resultando em ambientes desfavoráveis (KOWALTOWSKI, 2011). Essa restrição, associada a limites orçamentários, impacta diretamente no desempenho térmico do projeto, uma vez que as soluções adotadas, de modo geral, são insuficientes para garantir o conforto de seus ocupantes.

O desenvolvimento de projetos padronizados para instituições como escolas, hospitais e creches é uma prática recorrentes em obras públicas, nos quais busca-se sobretudo atender a objetivos econômicos e racionalidade construtiva (KOWALTOWSKI, 2011). No entanto, Kowaltowski (2011) aponta para a possibilidade de proliferação de falhas em projetos padronizados quando erros inerentes à determinada obra não são corrigidos em pós ocupação e são transmitidos a implantações futuras.

A adaptabilidade de um projeto padronizado a situações específicas de implantação nem sempre é simples ou eficiente, podendo indicar modificações substanciais que impactam no custo do projeto. Além disso, o projeto padrão apresenta obsolescência embutida, em virtude não somente de formas e técnicas construtivas, como também de demanda de fornecedores específicos e mão de obra especializada.

Nesse contexto, desde 2007, o Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação, (FNDE) no âmbito do Plano de Desenvolvimento da Educação (PDE) (BRASIL, 2007), tem atendido entes federados que não possuem equipe especializada para o desenvolvimento de projetos próprios, a possibilidade de dispor de um padrão arquitetônico que atenda aos requisitos mínimos para o bom funcionamento de uma edificação escolar (BRITO et al., 2019). O desenvolvimento de padrões de projeto faz parte do Plano de Ações Articuladas (PAR/PNE, 2014)¹, na dimensão de Infraestrutura

¹ Esse plano apresenta-se em conformidade com as metas 2 e 3 do Plano Nacional de Educação (PNE), sancionado pela Lei Nº. 13.005, que trata da universalização do ensino fundamental de 9 (nove) anos para toda a população de 6 (seis) a 14 (quatorze) anos e universalização do atendimento do ensino médio.

e recursos pedagógicos, responsável pelo apoio à implantação de 4.997 escolas de ensino fundamental.

Uma reflexão acerca dos pros e contras dessa padronização é discutida no âmbito do artigo intitulado “O processo de projeto de edifício escolar: barreiras e perspectivas para o conforto e a eficiência energética” (BRITO et al., 2019), publicado no XV ENCAC. Esse trabalho fundamenta-se pelo atendimento à Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) para edificações comerciais, de serviços e públicas de um projeto padrão de Unidade de Ensino Fundamental, contemplando sua implantação nas oito zonas bioclimáticas brasileiras.

Os dados obtidos no processo de do nível A de eficiência energética, em conjunto com equipe técnica de arquitetura do FNDE, demonstraram a relevância de se considerar estudos, avaliações e análises técnicas no processo de desenvolvimento do projeto padrão. Nesse sentido foi necessário a definição de três versões distintas do projeto para que o mesmo atendesse as especificidades das zonas bioclimáticas brasileiras.

Em justificativa à aplicação do PDE, cabe ao FNDE desenvolver e atualizar permanentemente os projetos padronizados aos entes federados enquanto assistência técnica. É função da Coordenação Geral de Infraestrutura Educacional (CGEST) acompanhar e desenvolver estudos propositivos que atendam às exigências arquitetônicas de novos prédios públicos, consoantes com as políticas pedagógicas disseminadas pelo Ministério da Educação.

Segundo Modler et al. (2018) projetos escolares padronizados, por basearem-se em modelos unificados para todo o país, acabam por desconsiderar sua diversidade, seja de ordem sociocultural, econômica ou climática. , o que pode acarretar prejuízos quanto aos aspectos pedagógicos, de conforto ambiental, funcionais ou técnico construtivos. Dessa forma, questiona-se a possibilidade de promoção de conforto térmico em ambientes escolares naturalmente ventilados para os diferentes contextos climáticos brasileiros, a partir de tipologia arquitetônica padronizada.

Objetivo geral:

Avaliar o conforto térmico de ambiente escolar padronizado e naturalmente ventilado por meio de simulação termoenergética em seis diferentes contextos climáticos brasileiros.

Objetivos específicos:

- Elaborar diagrama síntese dos resultados obtidos afim auxiliando a compreensão do projeto em função de parâmetros definidos;
- Compreender o grau de influência de cada variável de projeto sobre o percentual de horas ocupadas em conforto por meio de análise estatística.

Estrutura do trabalho

A presente dissertação apresenta três abordagens: teórica, experimental e quantitativa. A primeira abordagem aplica-se à definição dos procedimentos metodológicos a partir da relação entre normas e regulamentos que descrevem a simulação como método para avaliação de conforto térmico em edifícios. As abordagens experimental e quantitativa referem-se à utilização de índices quantitativos à definição do número de horas em conforto térmico e suas variáveis arquitetônicas mais influentes a partir de um ensaio sobre um projeto padronizado de escola.

O trabalho está dividido em cinco partes: a primeira corresponde à Introdução, na qual desenvolve-se o tema de pesquisa e são definidos seus objetivos gerais e específicos, seguida do primeiro capítulo referente ao referencial bibliográfico, segundo capítulo acerca dos procedimentos metodológicos e terceiro capítulo aos seus resultados. O quarto e último capítulo apresenta as considerações finais do trabalho, suas limitações e sugestão de trabalhos futuros.

A introdução contextualiza o uso da simulação como ferramenta de auxílio à tomada de decisões no desenvolvimento de projetos mais adequados a seu contexto climático. Além disso, problematiza o uso de projetos padronizados de escolas em climas diferentes e aponta o potencial do uso da simulação à melhoria da qualidade desses projetos.

O capítulo 1 apresenta a revisão bibliográfica, contendo as principais teorias que fundamentam o tema desenvolvido na dissertação. É dividido em três tópicos: simulação como método em normas e regulamentos, conforto térmico em ambientes escolares naturalmente ventilados e sensibilidade das variáveis sobre o projeto arquitetônico.

O capítulo 2 apresenta o método no qual são tratados os materiais e procedimentos necessários ao desenvolvimento da pesquisa. Esse capítulo dispõe o estudo de caso adotado, a partir do qual desenvolve-se modelo para avaliação do conforto térmico e análise das variáveis mais influentes sobre o percentual de horas ocupadas em conforto para seis diferentes contextos climáticos.

O capítulo 3 contém os resultados da pesquisa referentes à análise do clima de cada uma das cidades de implantação do projeto padronizado, diagnóstico do percentual de horas ocupadas em conforto, influência da ventilação natural associada

à operação das aberturas e, por último, à sensibilidade de nove diferentes variáveis sobre o projeto. Nesse capítulo também é apresentado o diagrama síntese dos resultados, que se propõe a representar de forma clara os resultados podendo ser empregado a experimentos similares ao dessa pesquisa.

O capítulo 5, e último, consiste nas considerações finais e discussão das limitações enfrentadas durante o desenvolvimento da pesquisa e também sugeridos trabalhos futuros a partir das conclusões. A Figura 2 resume a estrutura dessa dissertação.

Introdução	<p>Abordagem temática: Conceitos e histórico da simulação; Projetos padronizados de escolas em diferentes contextos climáticos.</p> <p>Problemática; Objetivos; Estrutura da dissertação.</p>
Capítulo 1: Referencial Bibliográfico	<p>Metodos de simulação em normas e regulamentos;</p> <p>Índices de conforto térmico;</p> <p>Emprego da simulação no processo de projeto (ASHRAE 209);</p> <p>Conforto térmico em ambientes escolares naturalmente ventilados;</p> <p>Estatística para análise de sensibilidade.</p>
Capítulo 2: Procedimentos Metodológicos	<p>Projeto padronizado de escola;</p> <p>Zoneamento Bioclimático Brasileiro;</p> <p>Modelo de simulação (software e caracterização);</p> <p>Carta psicrométrica (modelos racional e adaptativo de conforto térmico);</p> <p>Temperatura neutra (De Dear e Brager);</p> <p>Análise de sensibilidade por regressão linear.</p>
Capítulo 3: Resultados e Discussão	<p>Análise climática de seis municípios;</p> <p>Influência da ventilação natural sobre o modelo;</p> <p>Percentual de horas ocupadas em conforto (ASHRAE 55/NBR 16401);</p> <p>Coefficientes de determinação, regressão padronizado e probabilidade;</p> <p>Diagrama síntese de conforto térmico.</p>
Capítulo 4: Considerações finais	<p>Limitações da pesquisa;</p> <p>Trabalhos futuros.</p>
Apêndice e Anexos	<p>Curvas de distribuição das variáveis independentes;</p> <p>Janelas de configuração do DesignBuilder;</p> <p>Características dos materiais segundo NBR 15220;</p> <p>Caracterização dos materiais no EnergyPlus segundo WEBER et al. (2017)</p>

Figura 2 -Estrutura e conteúdo da dissertação.

Referencial Bibliográfico

Este capítulo apresenta a base conceitual utilizada nessa dissertação. Está subdividido em três itens: Simulação como método em normas e regulamentos, Conforto térmico em ambientes escolares e Sensibilidade das variáveis sobre o projeto arquitetônico.

O primeiro item discorre acerca de métodos que se servem da simulação termoenergética dispostos em normas e regulamentos, tanto nacionais quanto internacionais, e sua aplicação para análise e melhoria do conforto térmico em ambientes naturalmente ventilados.

O segundo item discute o emprego desses métodos à avaliação de ambientes escolares sobretudo no contexto de projetos padronizados implantados em diferentes contextos climáticos.

Por último, é abordado o potencial do uso de ferramentas de simulação à identificação dos parâmetros de projeto que mais influenciam no conforto térmico do projeto, por meio de procedimentos estatísticos de análise de sensibilidade..

1.1. Simulação como método em normas e regulamentos

No Brasil a simulação termoenergética abordada como método à avaliação de edifícios, está presente no Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais de Serviços e Públicos (RTQ-C) (INMETRO, 2017), no Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais (RTQ-R) (INMETRO, 2012) e na Norma de Desempenho de Edifícios Habitacionais - NBR 15575 (ABNT, 2013), vigente desde fevereiro de 2013. Em ambos os regulamentos, a simulação é apontada como um dos métodos para determinação da Etiqueta Nacional de Eficiência Energética (ENCE), enquanto a norma de desempenho, estabelece requisitos para a classificação do desempenho térmico de edifícios residenciais.

Segundo Rodrigues & Pedrini (2017), a simulação ainda tem sido empregada apenas como paradigma de um processo prescritivo. Os métodos apresentados nas normas nacionais de desempenho de edificações e nos regulamentos para classificação do nível de eficiência energética, foram concebidos com o propósito de avaliar o projeto em sua fase executiva. Além disso, essas normas e regulamentos apresentam abordagens diferentes quanto ao uso da simulação e muito tem se discutido sobre uma possível convergência entre os métodos, indicando a necessidade de se estabelecer condições precisas à realização das simulações e leitura crítica dos resultados obtidos.

A partir de agosto de 2014, a classificação do nível de eficiência energética de edifícios construídos com recursos federais se tornou obrigatória, em virtude da publicação da Instrução Normativa IN02 (BRASIL, 2014). A previsão, segundo o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf) publicado em 2011, é que até 2025 a obrigatoriedade se estenda a todas as tipologias de edificações comerciais, de serviços e públicas, e até 2030, a todos os edifícios residenciais (BRASIL, 2011; ELETROBRAS, 2014). Os dois primeiros artigos da Instrução Normativa dispõem:

“Art.1o Esta Instrução Normativa dispõe sobre regras para a aquisição ou locação de máquinas e aparelhos consumidores de energia pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional, e uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) nos projetos e respectivas edificações públicas federais novas ou que recebam retrofit.

Art.2o Para os efeitos desta Instrução Normativa, considera-se:

I -edificações públicas federais são os imóveis construídos ou adaptados com recursos públicos federais para exercício de atividade administrativa ou para a prestação de serviços públicos, tais como edifícios administrativos, escolas, hospitais, postos de saúde, clínicas, museus, instituições de pesquisa e outras instituições ou associações de diversos tipos; e

II -retrofit é qualquer reforma que altere os sistemas de iluminação, condicionamento de ar ou a envoltória da edificação.”

O RTQ-C apresenta a simulação como alternativa à avaliação conjunta dos três sistemas componentes da ENCE: Envoltória, Iluminação e Ar Condicionado. É exigido, portanto, que sejam realizados dois modelos de simulação, o primeiro deve ser concebido de acordo com o projeto proposto, enquanto o segundo caracterizado conforme critérios definidos pelo RTQ-C para que se sirva de referência para o nível de eficiência energética pretendido. A partir de então, deve se demonstrar que o consumo de energia do projeto proposto (modelo real), em kWh, deve ser igual ou menor do que o consumo do modelo de referência. No caso de edifícios classificados totalmente pelo método de simulação, a ENCE é determinada pela soma do Equivalente Numérico de Simulação (EqNumS) determinado pela comparação entre o consumo anual dos modelos, e as Bonificações, quando estas não estiverem presentes na simulação.

No caso de ambientes ventilados naturalmente e privados de sistema de condicionamento de ar, o RTQ-C exige que seja avaliado o Percentual de Horas Ocupadas em Conforto (POC). Segundo o RTQ-C, edifícios que possuam ambientes de permanência prolongada não condicionados artificialmente devem ser classificados pelo método prescritivo, substituindo o Equivalente Numérico de Condicionamento de Ar (EqNumCA) pelo Equivalente Numérico de Ventilação (EqNumV) no cálculo da Pontuação Total. Esse parâmetro é determinado a partir dos intervalos de POC e ponderados pelo número de ambientes.

Atualmente esse regulamento encontra-se em revisão determinada pela portaria nº248 do INMETRO (2018), a qual deverá sanar limitações do atual método. Propõe-se classificar o nível de eficiência energética pelo método simplificado a partir da utilização de dados provenientes de um metamodelo e treinamento de redes neurais, em substituição ao cálculo do indicador de consumo.

Nesse documento mantém-se a classificação do nível de eficiência energética pelo método de simulação a partir da comparação entre um modelo real e um modelo de referência. No entanto, além da conformidade com o percentual de horas ocupadas em conforto térmico, caso o modelo real apresente um valor de POC inferior a 90% no horário de ocupação deve-se calcular o consumo de energia da edificação para as horas não atendidas de conforto.

As bases para a definição dos métodos indicados no RTQ-C tem origem na norma americana *ASHRAE Standard 90.1 - Energy Standard for Buildings, Except Low-Rise Residential Buildings* (ANSI, ASHRAE, IESNA, 2016). No apêndice G dessa norma são indicados parâmetros para a elaboração de um modelo de simulação energética de um edifício em projeto ou construído, o qual serve de base à determinação do limite de consumo de uma edificação levando em consideração diferentes zonas bioclimáticas.

A avaliação dos perfis de consumo do modelo de referência estabelece valores limites à classificação energética que deve apresentar consumo igual ou inferior a esses valores. Essa norma concentra-se no consumo energético dos sistemas em função de sua envoltória, porém não menciona requisitos de conformidade para ambientes não condicionados artificialmente.

Em fevereiro de 2013, foi publicada a NBR 15575 (ABNT, 2013), na qual são estabelecidos requisitos e critérios de desempenho aplicáveis a edificações habitacionais. Nessa norma são determinadas condições de habitabilidade por meio de requisitos dos usuários expressos por diversos fatores, dentre os quais o desempenho térmico dos ambientes.

A Parte 1 da NBR 15575 apresenta dois métodos de avaliação do desempenho térmico de edifícios. Segundo essa norma, pelo método de simulação compara-se temperatura de bulbo seco da cidade de implantação com a temperatura máxima interna, em um dia típico de verão, ou com a temperatura interna mínima, em um dia típico de inverno. O método exige que sejam desconsideradas fontes internas de calor, como ocupantes, lâmpadas e equipamentos em geral, limitando a avaliação de desempenho térmico à uma abordagem estática, ao comparar a temperatura de apenas uma das 8760 horas que compõem o ano.

Nesse contexto, o RTQ-C mantém-se como único documento nacional a apresentar um indicador de conforto térmico, exigindo a avaliação do Percentual de Horas Ocupadas em Conforto (POC) no caso de ambientes ventilados naturalmente e

privados de sistema de condicionamento de ar. Segundo o item 6.2.3 do regulamento, em edifícios que possuem ambientes de permanência prolongada não condicionados artificialmente é obrigatório comprovar que o ambiente interno das áreas não condicionadas proporciona temperaturas dentro da zona de conforto durante um percentual de horas ocupadas. Todavia, é remetido a outros referenciais a determinação de conforto, não indicando método específico para esse cálculo.

Segundo Cena & Clark (1981) a consideração mais importante sobre a qualidade ambiental de um edifício é o conforto térmico, definido pela ASHRAE (2016) como o estado de espírito que expressa satisfação do usuário com seu ambiente térmico. Nesse sentido, entende-se que a noção de conforto térmico está muito mais associada à uma experiência ambiental do que apenas uma necessidade fisiológica pura (MONTEIRO et al., 2015), exigindo da arquitetura uma melhor relação com as características climáticas locais (BITTENCOURT, 2007).

A literatura define dois tipos de abordagem referentes à avaliação de conforto térmico no ambiente construído: o modelo racional ou estacionário (Rational Thermal Comfort - RTC) e o modelo adaptativo (Adaptive Thermal Comfort - ATC) (AULICIEMS, 1981; HUMPHREYS, 1976; HUMPHREYS & NICOL, 1998). O modelo racional é resultado de pesquisa desenvolvida por Fanger (1972), na década de 1970, ao definir o índice de voto médio predito (PMV, do inglês Predicted Mean Vote), enquanto o modelo adaptativo provém das pesquisas de Humphreys (1976), Auliciems (1981) e De Dear & Brager (1998), que expõem a dificuldade de se encontrar ambientes em condições estáticas, devido à sua relação com o clima local, sobretudo aqueles privados de condicionamento artificial.

O índice PMV tem o objetivo de avaliar o conforto térmico de ambientes condicionados artificialmente a partir da resposta média de um grupo de pessoas, traduzido em uma escala sétima com valores entre -3 a +3, associados respectivamente a desconforto por frio e calor, como mostra a Figura 3. Ao defini-lo, Fanger propôs uma equação que correlacionasse a sensação térmica com quatro variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade) e duas variáveis pessoais (vestimenta e atividade metabólica) (LAMBERTS, DUTRA & PEREIRA, 2014).

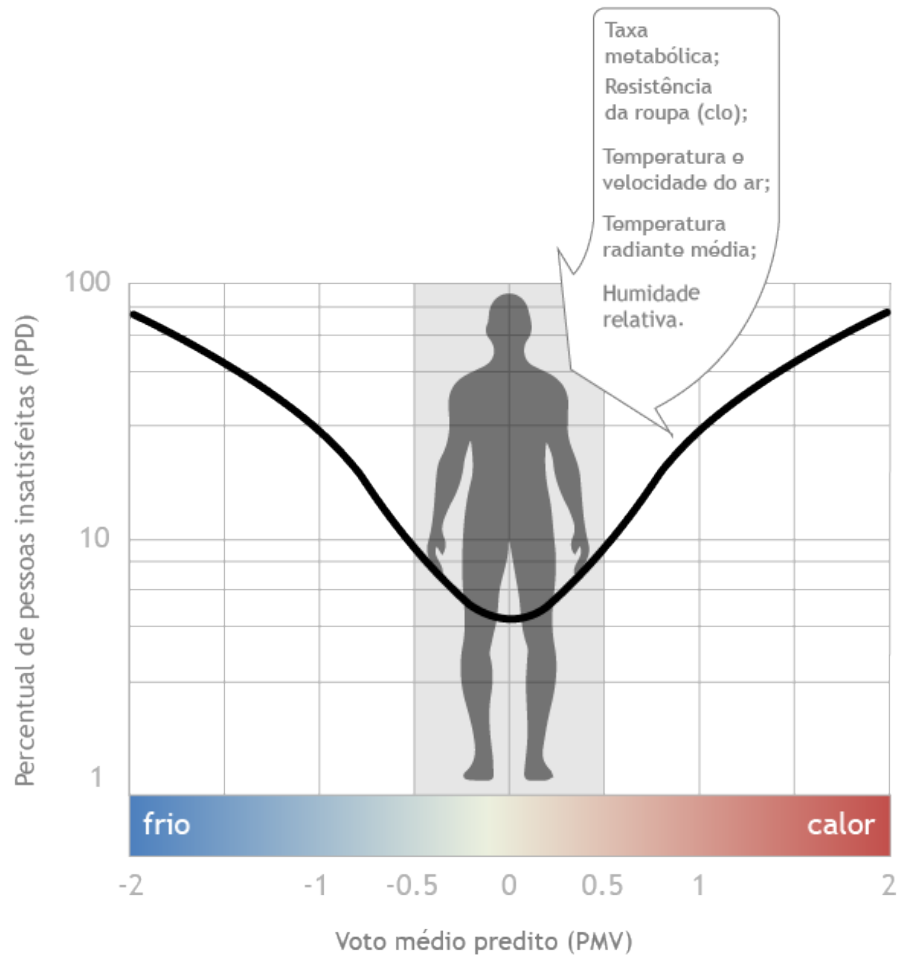


Figura 3 -Relação entre os índices PMV e PPD e intervalo de conformidade com norma ISO 7730, entre -0,5 e 0,5 (em cinza). Adaptado de: Lamberts et al. (2014) e Ekici (2013).

Equação 1 - Cálculo do voto médio estimado (PMV). Fonte: Lamberts et al, 2011.

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028) \cdot L$$

Onde:

M = Atividade desempenhada pelo indivíduo (met)

L = Carga térmica atuante sobre o corpo

O modelo adaptativo considera dinâmico o estado de equilíbrio térmico, resultante da associação de mecanismos comportamentais (ex. ajustes nas vestimentas, atividades físicas, ligar aparelhos de refrigeração, abrir ou fechar janelas

e portas), fisiológicos (aclimação) e psicológicos (hábito, exposição repetida). Segundo Humphreys (1995), precursor da teoria do conforto adaptativo, o fator de aclimação das pessoas frente a determinado clima e consequente reação do usuário a fim de permanecer em sua zona de conforto são determinados pela temperatura média do ar externo. Nesse sentido, o autor determina o índice de Temperatura Neutra, calculado por meio da Equação 2, no qual é possível definir a zona de conforto em condições de umidade relativa entre 35% e 65% (Equação 3), ou superior (Equação 4) (PEREIRA & ASSIS, 2010).

Equação 2 $T_n = 0,534 \cdot tmp(out) + 12,9$

Equação 3 Zona de conforto: $T_n \pm 1^\circ\text{C}$

Equação 4 Zona de conforto: $T_n \pm 2^\circ\text{C}$

Onde:

T_n = Temperatura neutra

$tmp(out)$ = Temperatura média do ar externo predominante

Desde 2004, a norma *ANSI/ASHRAE Standard 55* (ASHRAE, 2017), amplamente utilizada para avaliação do conforto térmico em edificações, passou a incluir a abordagem adaptativa aplicada a ambientes não condicionados. Essa norma adota o modelo desenvolvido por De Dear & Brager (1998), ao quantificar as diferenças entre sensações térmicas em ambientes condicionados artificialmente e ventilados naturalmente. O cálculo de conforto térmico é determinado em função da média da temperatura de bulbo seco de um período, a partir da qual define-se a faixa de temperatura operativa aceitável entre os limites superior e inferior para que 80% ou 90% dos usuários estejam em equilíbrio térmico, segundo as fórmulas indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Limites de aceitabilidade para definição da zona de conforto segundo ASHRAE 55.
 Fonte: ASHRAE (2017)

Aceitabilidade de 80% (normativo)	Limite superior (°C):	$0,31 \cdot tpma(out) + 21,3$
	Limite inferior (°C):	$0,31 \cdot tpma(out) + 20,3$
Aceitabilidade de 90% (informativo)	Limite superior (°C):	$0,31 \cdot tpma(out) + 15,3$
	Limite inferior (°C):	$0,31 \cdot tpma(out) + 14,3$

Onde:

$tpma(out)$ - Temperatura média do ar externo predominante.

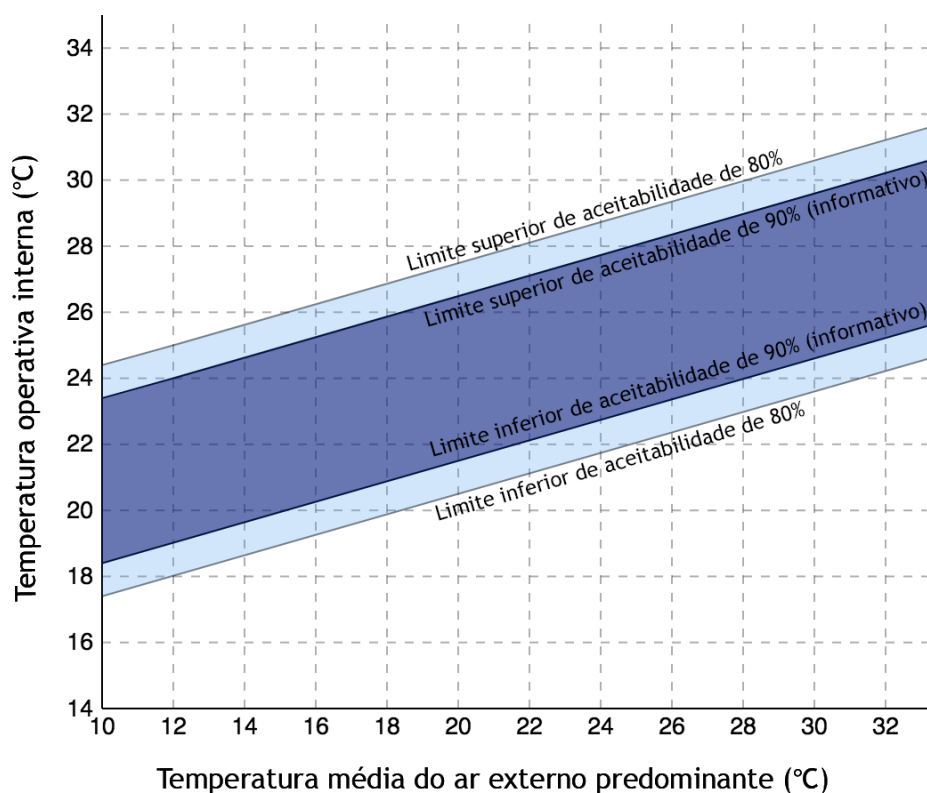


Figura 4 - Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente condicionados.
 Fonte: ASHRAE, 2017.

Segundo Cândido et al. (2011) limites de aceitabilidade térmica em conformidade com modelos de conforto adaptativo não tem sido abordados nas normas e regulamentos nacionais. A autora aponta para a necessidade de documentos centrados na relação entre conforto térmico e diferentes padrões de ventilação natural, considerando ser essa uma diretriz indicada em sete dentre oito zonas bioclimáticas brasileiras, segundo a norma NBR 15220-3 (ABNT, 2003). Pesquisas de campo desenvolvidas em diferentes climas brasileiros (PEREIRA & ASSIS, 2010; FERREIRA, 2013; PEGLOW et al., 2016; VIEIRA et al., 2018) oferecem mais detalhes sobre essa contexto.

Silva, Ghisi e Lamberts (2016) ao comparar indicadores de conforto térmico adotados pela ASHRAE *Standard* 55 para edifícios comerciais observaram perfis similares apesar dos resultados não se mostrarem convergentes. Nesse sentido Perillo, Campos e Abreu-Harbich (2017) afirmam que apesar dos inegáveis avanços proporcionados pelas normas e regulamentos nacionais, ainda há a necessidade de definir um método de avaliação de conforto térmico mais adequado ao contexto brasileiro. Borgstein, Lamberts e Hensen (2016) também abordam a necessidade de melhorar a relação entre métodos atuais que envolvam o uso de simulações termoenergéticas a fim de torná-los mais claros e de simples aplicação.

Segundo Lamberts et al (2013, 2016), no Brasil não existem normas específicas para avaliação do conforto térmico, restringindo-se a alguns documentos que envolvem parâmetros de conforto como a Norma Reguladora NR 17 (1990) e a NBR 16401-2 (ABNT, 2008). A NR 17 foi elaborada pelo Ministério do Trabalho, com o intuito de promover segurança e saúde no trabalho e empresa, apresentando condições de conforto térmico em ambientes internos definidas em função de limites de temperatura efetiva e de velocidade do ar. A NBR 16401 é focada no projeto de instalações de ar condicionado (parte 1), nos parâmetros de conforto térmico (parte 2) e na qualidade do ar interior (parte 3), e baseia-se fundamentalmente no texto disposto no ASHRAE Handbook of Fundamentals de 2005 (ASHRAE, 2005).

Em 2013 foi proposta a primeira revisão da NBR 16401 (LAMBERTS et al, 2013), na qual se inclui o modelo adaptativo de conforto térmico, em que são determinados limites superiores e inferiores de aceitabilidade em ambientes privados de condicionamento artificial, naturalmente ventilados e com possibilidade de adaptação do usuário. O texto de revisão da norma foi inspirado no método proposto pela ASHRAE 55, seguindo, portanto, os mesmos critérios para o cálculo da temperatura operativa

interna admissível. Esse texto encontra-se em consulta pública relativa à sua terceira revisão (ABNT, 2017).

Em abril de 2018 foi publicada a ASHRAE Standard 209-2018 (ANSI/ASHRAE, 2018). Segundo o Instituto Americano de Arquitetos (AIA, 2019), essa norma foi desenvolvida tanto para codificar procedimentos quanto desenvolver uma linguagem comum entre arquitetos e simuladores, em apoio aos métodos presentes em normas e regulamentos, em especial a norma ASHRAE 90.1. Pressupondo que a simulação tem sido tradicionalmente usada como ferramenta auxiliar à conformidade de projeto nos seus estágios finais, essa norma introduz a simulação no processo de projeto integrado para melhoria do desempenho do edifício.

Segundo Hensens e Lamberts (2019), a ASHRAE 209 foi elaborada com o propósito de definir procedimentos consistentes para o uso da simulação à quantificação do impacto de decisões de projeto no momento em que são tomadas. Essa norma define terminologias, procedimentos e requisitos para o uso da simulação termoenergética em todas as fases de projeto (Figura 5). Nela são descritos onze ciclos de modelagem alinhados às distintas fases do processo de projeto, desde a concepção à operação do edifício. Sete dentre esses ciclos de modelagem referem-se à etapa de concepção do edifício, enquanto os demais estão associados às etapas de construção, operação e pós-ocupação.

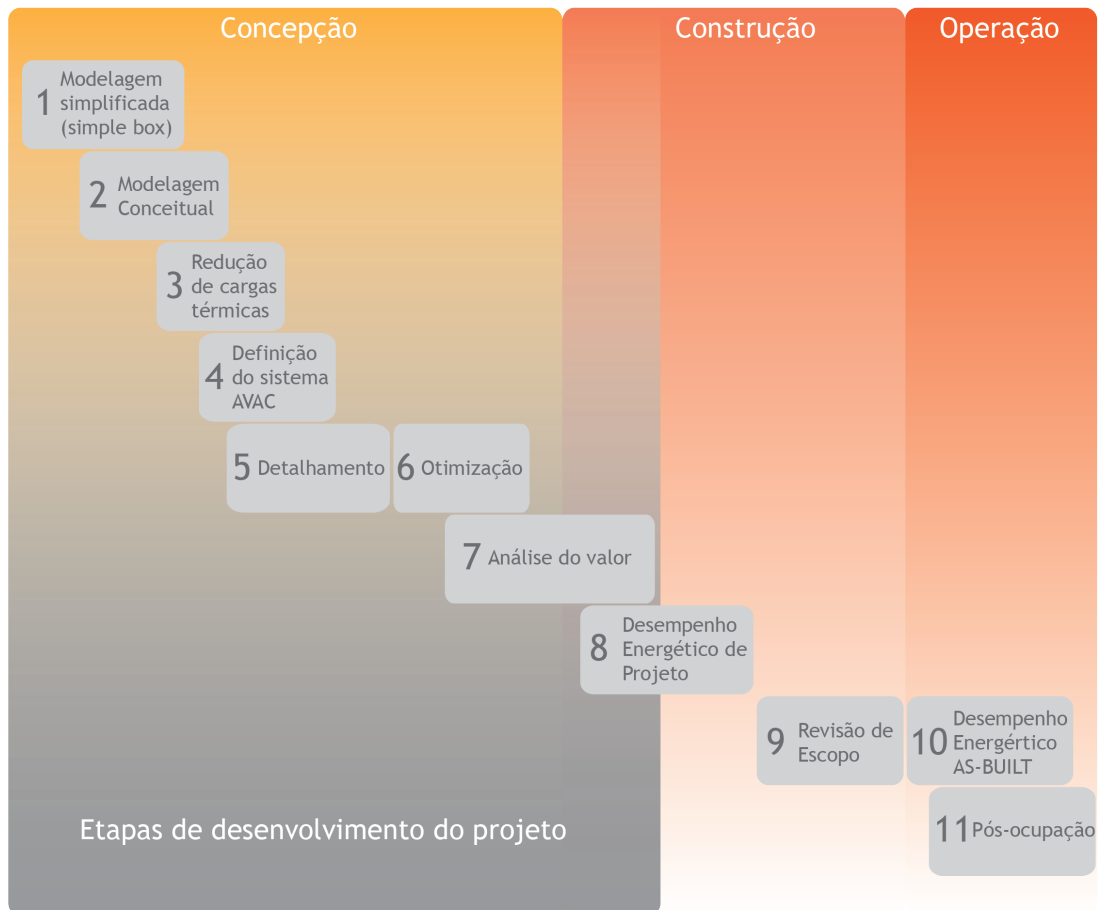


Figura 5 - 11 ciclos definidos pela norma ASHRAE 209, para modelagem e simulação distribuídos por fase de projeto. Fonte: American Institutes of Architects (2019), adaptado pelo autor.

Um dos ciclos de modelagem obrigatórios ao atendimento da norma refere-se à redução da demanda energética por uso final e cargas de pico para aquecimento e resfriamento. Para tal, propõe-se o estudo de estratégias de projeto que envolvam melhoria do desempenho da envoltória, redução das cargas internas de uso e ocupação e adoção de condicionamento passivo do ar interno. Além disso, é exigido o atendimento aos requisitos gerais, dentre os quais a análise preliminar do clima de implantação, e no mínimo dois entre os demais ciclos de modelagem pertinentes à etapa de concepção.

Dois importantes ciclos apresentados pela ASHRAE 209 referem-se à modelagem síntese (ou simplificada - tradução livre de “simple box modeling”) e à modelagem conceitual. O primeiro tem o propósito de identificar a demanda energética por uso final e avaliar seu impacto no partido do projeto, por meio de um modelo simplificado definido a partir de parâmetros referenciados pela norma. O segundo serve à avaliação

de estratégias vinculadas à forma, o qual pressupõe a interpretação do clima e local de implantação.

A simplificação dos modelos de simulação é requisito para saídas de dados mais claras e precisas (BATISTA et al., 2011; LAMBERTS, et al., 2016; GHISI, 2014; SORGATO et al., 2014). Neste contexto, Hensen e Lamberts (2011) ressaltam a necessidade de planejamento da simulação e importância de se manter o modelo o mais simples possível ao cumprimento de seu propósito. É essencial que seus dados de entrada sejam determinados em função do que se pretende analisar, o que determina a precisão do modelo que deve ser suficiente à uma coerente representação do comportamento termoenergético do objeto de simulação (EGAN et al., 2018; GHISI et al, 2011; RACKES et al., 2016).

1.2. Conforto térmico em ambientes escolares naturalmente ventilados

Edifícios educacionais representam grande parte do parque construído e são responsáveis por considerável parcela do consumo energético de um país (BARBHUIYA & BARBHUIYA, 2013; ZOMORODIAN et al., 2016) diretamente associado ao condicionamento térmico de salas de aula. Um ambiente desconfortável tem influência direta sobre o desempenho dos alunos e portanto é imprescindível a promoção de condições mínimas de conforto (KOWALTOWSKI, 2011; KOWALTOWSKI et al. ,2011; ARENHARDT & WANDER, 2018), inclusive devido a sua alta densidade de ocupação. Nesse contexto diversas pesquisas no Brasil e no mundo, descritas respectivamente nos trabalhos de revisão sistemática de literatura realizados por Perillo, Campos e Abreu-Harbach (2017) e Zomorodian, Tahsildoost e Hafezi (2016), tem se dedicado ao estudo do conforto térmico em ambientes escolares.

Zomorodian, Tahsildoost e Hafezi (2016) afirmam que o estudo do conforto térmico em ambientes escolares têm origem nos estudos de Auliciems (1969) e pesquisas na área tem sido amplamente desenvolvidas na última década. Nesse sentido, os autores revisaram internacionalmente a literatura acerca do tema, na qual estão presentes estudos que se utilizaram de medições em campo ou aplicação de questionários para avaliar o conforto térmico em escolas com qualidades arquitetônicas, sistemas construtivos e mecânicos diferentes. A maior parte desses estudos concentram-se em locais de clima temperado/mesotérmico, do grupo C segundo a classificação Koppen-Geiger, e foram conduzidos tanto em ambientes naturalmente ventilados quanto condicionados artificialmente, principalmente no

período de inverno ou meia estação, embora poucas pesquisas tenham sido realizadas considerando o ano completo.

Dentre os estudos levantados por Zomorodian, Mohammad e Hafezi (2016), a maior parte se atem à avaliação de ambientes escolares com o propósito de atender normas vigentes. Considerando a abrangências dos casos, Olesen e Parsons (2002) apontam para a necessidade de haja consenso entre os países, coordenado por um grupo responsável, para que então uma norma seja verdadeiramente considerada internacional. Nesse sentido, observou-se que as normas de conforto como a ISO 7730 e até mesmo a ASHRAE 55 ainda não se mostram precisas o suficiente para aplicação em ambientes escolares em contextos climáticos diferentes.

Com o objetivo de investigar o método adequado para avaliação de conforto térmico em ambientes escolares, Perillo, Campos e Abreu-Harbich (2017) mapearam sistematicamente artigos em três diferentes bases de dados internacionais - Science Direct, Scopus e Engineer Village. Os artigos considerados aderentes à revisão foram analisados segundo os critérios de localização e classificação climática de Koppen, período das medições de campo, variáveis ambientais, estratégias de ventilação e modelo de avaliação de conforto.

A partir do número de pesquisas levantado, os autores quantificaram uma pequena quantidade de pesquisas realizadas em climas tropicais, evidenciando a necessidade de mais estudos nesta que é a realidade climática do Brasil. Além disso, concluiu-se que o modelo racional de conforto térmico tende a apresentar resultados em que a sensação térmica dos usuários muitas vezes extrapola os limites superiores das zonas de conforto propostas pelo modelo. Propõe-se, portanto, que em regiões tropicais sejam aplicados mais de um método de avaliação de conforto bem como considerada a adaptação do usuário ao clima.

Freitas et al. (2019) avaliou o percentual de horas ocupadas em conforto de um bloco de salas de aula não condicionadas artificialmente do Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET), localizado na cidade de Belo Horizonte (MG). Adotou-se como hipótese de conforto, o modelo adaptativo da ASHRAE 55 para classificação do nível de eficiência energética desses ambientes segundo RTQ-C. A partir de levantamento in loco, realizou-se modelo de simulação, caracterizando suas vedações horizontais e verticais, absorvância das superfícies externas, tipo de vidro (fator solar e transmissão luminosa), bem como seus padrões de ocupação e calor dissipado por pessoa.

Os resultados indicaram ambientes com desconforto térmico elevado, a partir do qual propôs-se a implantação de novos dispositivos de sombreamento e substituição da cobertura utilizando telha sanduíche com enchimento em EPS. Tal intervenção resultou em valores mais elevados de POC e descartada a utilização de aparelhos de condicionamento artificial. Essa pesquisa apontou à possibilidade de adequação de edifícios existentes a fim de obter-se níveis mais altos de conforto térmico, ressaltando a importância da adoção de estratégias passivas nas fases iniciais de projeto.

Abreu-Harbich, Chaves e Brandstetter (2018) avaliaram o conforto térmico de um conjunto de salas de aulas em um edifício da Faculdade de Engenharia Civil da UFG em Goiânia (GO) considerando condicionamento artificial, resfriamento evaporativo e ventilação natural. A pesquisa foi conduzida por meio de medições in loco, questionários de percepção com usuários e desenvolvimento de simulações computacionais. A análise foi realizada em apenas uma sala de aula, na foram levantados seu sistema de condicionamento de ar e definidas as variáveis antropométricas para o cálculo do conforto térmico.

A partir dos dados mensurados, as médias de temperatura do ar e umidade da sala de aula foram respectivamente de 27,22°C e 63,42%, enquanto as médias de temperatura e umidade do ar externo foram respectivamente de 26,46°C e 72,35%. No período de ocupação matutino, a diferença de temperatura entre ambiente interno e externo foi de 2,16°C considerando condicionamento artificial, 2,73°C para ventilação mecânica (resfriamento evaporativo) e 1,30°C com ventilação natural. A ventilação natural ou condicionamento do ar não se mostraram suficientes para garantir conforto térmico quando a temperatura ultrapassava 30°C e a temperatura neutra, segundo a equação de De Dear e Brager, de 25,90°C.

Considerando o conceito de conforto térmico como o estado de espírito que reflete a satisfação de uma pessoa com o ambiente térmico que a envolve (ASHRAE (2017)), a pesquisa demonstrou que ocupantes em salas de aula se sentem em conforto quando não desejam mudanças nas condições do ambiente. Nesse sentido, em função dos resultados obtidos, De Abreu-Harbich, Chaves e Brandstetter (2018) afirmam que para proporcionar espaços internos mais confortáveis em climas tropicais, é necessário o uso de sistemas de condicionamento de ar, o que aumenta a demanda de energia. Outra conclusão importante da pesquisa refere-se à eficácia do resfriamento evaporativo para a promoção de conforto térmico de acordo com medições em campo.

Peglow et al. (2016) avaliou o nível de conforto térmico por meio de simulação computacional de uma escola municipal de educação infantil (EMEI) implantada no Município de Pelotas com projeto padrão desenvolvido pelo FNDE. Calculou-se o percentual de horas em conforto utilizando o modelo de De Dear e Brager devido à ausência de sistemas ativos de condicionamento de ar no edifício, considerando um nível de aceitabilidade de 80%.

A partir dos resultados obtidos na simulação do edifício construído foram avaliadas estratégias que pudessem contribuir ao aumento do o número de horas em conforto. Avaliou-se o isolamento térmico da cobertura e redução da absorção externa, inserção de dispositivo de proteção solar misto (ângulos verticais e horizontais) e diferentes sistemas de vedação verticais, em alvenaria com tijolos de 8 furos revestidos e com placas de PRFV (lâminas de plástico reforçadas com lã de vidro).

Utilizou-se para as simulações o arquivo climático da cidade de Santa Maria (RS), em formato TMY (Typical Meteorological Year, em virtude da ausência de arquivo para a cidade de Pelotas e o modelo representa uma das catorze EMEIS que a cidade conseguiu aprovar utilizando projeto padrão elaborado pelo FNDE. O intervalo de conforto foi determinado em função do cálculo da temperatura neutra extrapolados em $+2,5^{\circ}\text{C}$ e $-2,2^{\circ}\text{C}$. Os resultados obtidos indicaram, ao comparar o modelo com vedação vertical em placas de PRFV e com alvenaria convencional, que embora aquele sistema possua maior isolamento térmico, os ganhos térmicos, somados com a ausência de massa térmica interna, resultou em maior desconforto por calor.

Rackes, A. et al. (2016) avaliaram o potencial de conforto térmico de um projeto padrão de escola naturalmente ventilada em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras, tendo por referência os municípios de: Curitiba (ZBBR1), São Paulo (ZBBR3) e Salvador (ZBBR8). O modelo desenvolvido no EnergyPlus (versão 8.3), por intermédio do plug-in OpenStudio (versão 1.7), consiste em um único bloco térreo, com altura de pé-direito de 2,75 m, e dividido em sete zonas térmicas, sendo uma delas uma sala de aula de 35 m² para uma ocupação de sete alunos.

A ventilação natural foi simulada por meio de um modelo multizona - Airflow Network - em que cada ambiente se representa como um nó vinculado por percursos de fluxo de ar que atuam pela diferença de pressão. Para a caracterização da envoltória, utilizou-se padrões construtivos comumente utilizados no país com valores de transmitância de 2,46 W/m².K para paredes e 2,05 W/m².K para coberturas e aberturas com vidros simples de 3 mm, com fator solar de 0,87. Foram considerados

dois casos nos quais foram variadas as entradas referentes a frações máximas da abertura das janelas, a orientação principal, a absorvância solar das fachadas externas, a presença ou não de uma camada reflexiva no ático em cima do teto, massa térmica das paredes e a presença, ou não, de um ventilador para movimentação do ar, a fim de verificar qual apresentaria melhores condições de conforto.

O conforto térmico foi avaliado segundo modelo adaptativo descrito na ASHRAE 55, utilizando um período de 30 dias para cálculo da temperatura média predominante do ar externo e limite de aceitabilidade 80% com ajuste para outros valores de velocidade do ar e vestimenta (índice “clo”). Os resultados indicaram a possibilidade de condicionamento estritamente passivo, desde que os componentes construtivos sejam definidos em conformidade com as características climáticas locais, mesmo em se tratando de um projeto padronizado. Observou-se também que os meses com temperaturas mais extremas representam períodos de férias ou recesso e, portanto, a estratégia de ventilação natural não seria necessária.

De Vecchi, Cândido e Lamberts (2013) avaliaram o efeito de valores elevados do ar (entre 0,20 e 1,35 m/s) no conforto térmico de ocupantes em salas de aula com sistema de condicionamento híbridos (ventiladores de teto e ar condicionado). A avaliação consistiu na análise de variáveis ambientais medidas *in loco* e ponderação de respostas subjetivas dos ocupantes para o clima de Florianópolis. Os resultados indicaram benefício da associação entre maiores velocidades do ar e condicionamento artificial para regiões de climas quentes e úmidos. Nas condições em que o experimento foi realizado, foram consideradas “aceitáveis” e “confortáveis” valores de temperaturas operativas entre 24 e 28°C indicando oportunidade de ajustes no *set-point* de edifícios com sistemas de climatização artificial evitando consumo energético exacerbado.

1.3. Sensibilidade das variáveis sobre o projeto arquitetônico

Estudos recentes têm demonstrado o potencial da associação de métodos de otimização em modelos de simulação termoenergética (NGUYEN et al., 2014; SILVA & GHISI, 2013; FONSECA et al., 2017). A introdução de algoritmos de parametrização, aliados a ferramentas computacionais no processo de projeto, permite a rápida exploração de alternativas, aumentando as possibilidades de investigação de variáveis para avaliação de diversos fenômenos relacionados ao comportamento termoenergético do edifício (FELIPPE et al., 2015; FONSECA et al., 2017).

Hopfe e Hensen (2011) afirmam que grande parte dos estudos envolvendo simulação termoenergética baseiam-se em um princípio condicional no qual se analisa a variação da resposta de um sistema caso ocorram perturbações nos parâmetros de entrada. Esse conceito, segundo Silva e Ghisi (2014), é a base da análise de sensibilidade.

A abordagem instrumental da simulação no contexto brasileiro tem demonstrado recorrente especulação acerca das configurações dos modelos de simulação (LOPES & SILVA, 2019). Esta questão direcionou pesquisadores para a exploração de padrões metodológicos, análise dos dados de entrada que apresentem maior sensibilidade sobre os dados de saída e como simplificá-los (EGAN et al., 2018; COSTA, RORIZ & CHVATAL, 2017); SILVA & GHISI, 2014b; SILVA et al. 2014; MELO, SORGATO & LAMBERTS, 2014; PEREIRA & GHISI, 2011PER). Nesse contexto é imprescindível a simplificação dos parâmetros de entrada no sentido de torná-los mais claros e precisos, o que torna os estudos sobre análises de sensibilidade cada vez mais relevantes, especialmente como crítica a métodos atualmente dispostos em normas e regulamentos.

A análise de sensibilidade investiga de maneira sistemática a resposta de uma simulação quanto aos valores extremos dos parâmetros quantitativos analisados ou quanto a mudanças drásticas nos parâmetros qualitativos, podendo ser classificada como local ou global (SILVA & GHISI, 2014). A análise do tipo local trata apenas um parâmetro específico variado enquanto os demais permanecem fixos, já a análise global é mais complexa, variando-se todos os parâmetros simultaneamente.

Segundo Rodrigues e Pedrini (2015), as primeiras decisões de projeto frequentemente são as mais influentes no desempenho energético da edificação e portanto é importante identificar, ainda nos estágios iniciais de projeto quais são os parâmetros mais impactantes no desempenho das edificações. No entanto, a aplicação de ferramentas de simulação para predição do comportamento térmico de um edifício implica a consideração de incertezas, ou seja, todo tipo de imprecisão dos dados de entrada referentes às propriedades térmicas dos materiais, dos componentes construtivos, presença do usuário, entre outro (SILVA & GHISI, 2014b).

Silva, Almeida e Ghisi (2016) apontam que análises de sensibilidade não são amplamente utilizadas, pois demandam um grande número de simulações a partir de perturbações nas variáveis dependentes em pequenas faixas de amplitude para avaliar a influência dessas variações sobre os dados de saída. A observação de um intervalo

confiável, por meio de uma análise de incertezas, orienta-se à tomada de decisões mais precisas com foco no melhor desempenho do edifício.

A simulação, por se tratar de um experimento numérico, está sujeita a várias fontes de incertezas, oriundas dos próprios métodos e algoritmos utilizados para realizar os cálculos, bem como as variáveis de entrada do edifício e seus sistemas, uso e ocupação, além das condições climáticas. Portanto, considerar as incertezas de um modelo de simulação é fundamental à sua coerente representação termodinâmica.

Nesse contexto, Silva, Almeida e Ghisi (2016) estudam um processo de tomada de decisões orientado à melhoria do desempenho térmico e energético de edifícios residenciais considerando incertezas nos dados de entrada referentes a seu uso e ocupação. O método empregado consiste na definição de um critério de desempenho para ser avaliado em quatro contextos climáticos diferentes a partir de um modelo de simulação. A partir desses dados de entrada realizou-se uma análise de sensibilidade com o propósito de compreender a influência de diferentes tipos de envoltória sobre o conforto térmico e consumo energético.

Os autores evidenciam a adequação do método para indicação do sistema construtivo mais adequado à envoltória para cada uma das cidades considerando um número específico de alternativas (Figura 6). O objetivo foi o de orientar à escolha mais adequada de vedações externas para as condições de exposição apresentados, não necessariamente solução ideal. Mesmo a melhor alternativa encontrada para cada clima resultou em um percentual considerável de desconforto e consumo de energia, indicando a abordagem de um modelo de otimização.

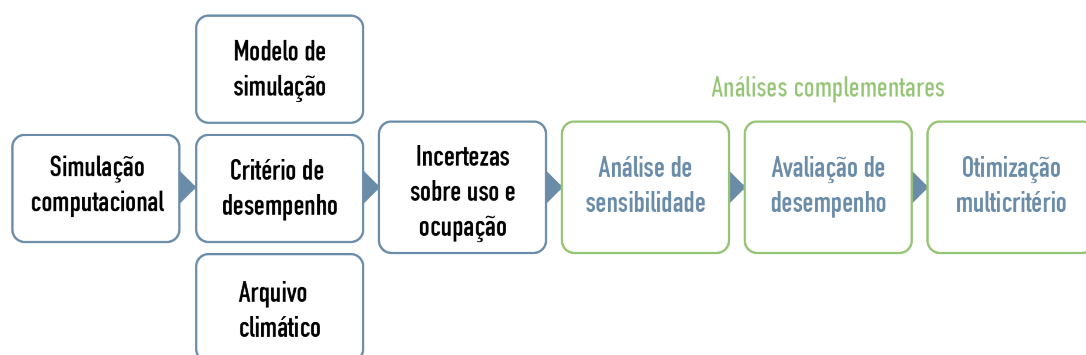


Figura 6 - Diagrama do método adotado por Silva, Almeida e Ghisi (2016). Adaptado pelo autor.

Gagnon, Gosselin e Decker (2018) avaliaram a sensibilidade de 30 variáveis de projeto sobre o desempenho energético e conforto térmico de um edifício de escritórios. A análise de sensibilidade foi realizada em função dos coeficientes de regressão padronizados (SRC), de correlação parciais ordenados (PRCC) e do índice de segunda ordem de Sobol (tradução livre de Sobol second order index), como mostra Figura 7. Observou-se a ordem de importância dos parâmetros sobre os dados de saída dos modelos utilizados, a linearidade dos resultados em função do reconhecimento de padrões e por último a intenção entre as variáveis estudadas.

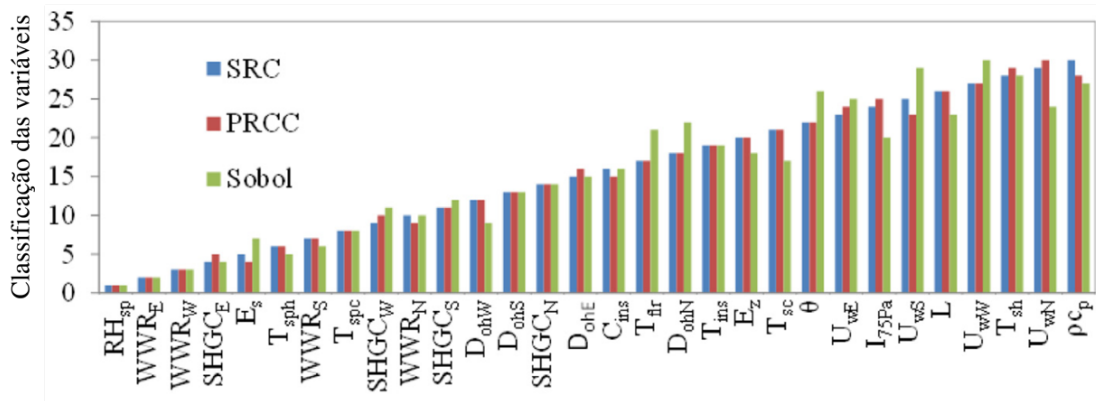


Figura 7 - Classificação da sensibilidade de variáveis de projeto comparadas por índice adotado à análise de sensibilidade. Fonte: Gagnon, Gosselin e Decker (2018), p?

A análise de sensibilidade foi conduzida no contexto de um processo tradicional projeto, no qual um conjunto de variáveis são determinadas e fixadas em sequência, em cada fase do processo. Segundo os autores, o método empregado tende a reduzir o número de amostras necessárias para que se encontre soluções que otimizem o desempenho térmico e energético de projetos. Nesse sentido, uma análise global que inclua mais variáveis simultaneamente nos estágios iniciais de projeto colabora ao desenvolvimento de soluções com melhor desempenho.

Dentre os 11 ciclos de modelagem definidos pela ASHRAE 209, um deles se refere à simulação como subsídio à otimização do projeto, foco deste trabalho. Nesse ciclo é exigido que o responsável pela simulação indique no mínimo duas variáveis de interesse para realização de análise multifatorial e identifique as restrições de projeto ou delimite intervalos específicos para cada variável analisada. A norma ressalta que análise de otimização não deve garantir o alcance máximo do objetivo disposto, apenas a melhor solução possível considerando suas variáveis e restrições assim como o método de otimização adotado.

1.4. Considerações finais do capítulo

Bryan Lawson (2011) afirma que no processo de tomada de decisões, os projetistas têm de ser capazes de equilibrar, de algum modo, critérios qualitativos e quantitativos. Nesse sentido a simulação deve-se integrar ao processo de projeto não como uma ferramenta puramente avaliadora, mas como auxílio à abordagem da relação entre problemas e soluções de projeto, por meio de processos que envolvam fases de avaliação, análise e síntese.

Esse capítulo buscou levantar referências à reflexão sobre o problema da padronização de projetos escolares naturalmente ventilados implantados em diferentes contextos climáticos. Assim parte-se da compreensão do papel da simulação como ferramenta de auxílio à tomada de decisões projetuais, contribuindo à avaliação de diferentes cenários mais bem adequados a seu contexto climático e em conformidades com normas e regulamentos.

O emprego da simulação em pesquisas envolvendo ambientes escolares naturalmente ventilados aponta para a ineficiência de se adotar as mesmas soluções de projeto em diferentes contextos climáticos. Nesse sentido os estudos abordados buscam aferir o desempenho de projetos de escolas ante a diferentes alternativas que possam contribuir à melhoria do conforto térmico. Além disso, a abordagem apresentada por esses estudos considera a análise local de cada variável de projeto, expondo a dificuldade de integração da simulação durante sua concepção.

A análise de sensibilidade se apresenta como potencial método para a integração da simulação no processo de projeto ao possibilitar a análise conjunta de diferentes variáveis e projeto. Assim sendo, no caso de projetos padronizados de escola é possível definir, a partir de uma proposta específica, diferentes cenários que contemplem distintas possibilidades de implantação em função do conforto térmico do usuário.

A revisão bibliográfica foi essencial à definição dos procedimentos metodológicos apresentados no capítulo seguinte. Além do estudo de normas e regulamentos associados ao uso da simulação à avaliação do conforto térmico de projetos, as demais pesquisas levantadas forneceram um repertório à abordagem problema apresentado.

Capítulo 2.

Materiais e Método

O capítulo 2 apresenta os materiais e procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento dessa pesquisa (Figura 8). A partir de revisão bibliográfica envolvendo estudos que abordam o uso da simulação como ferramenta de projeto, sobretudo à melhoria do conforto térmico em ambientes escolares naturalmente ventilados, e da relação entre normas e regulamentos nacionais e internacionais foram determinadas as etapas descritas nos itens a seguir.

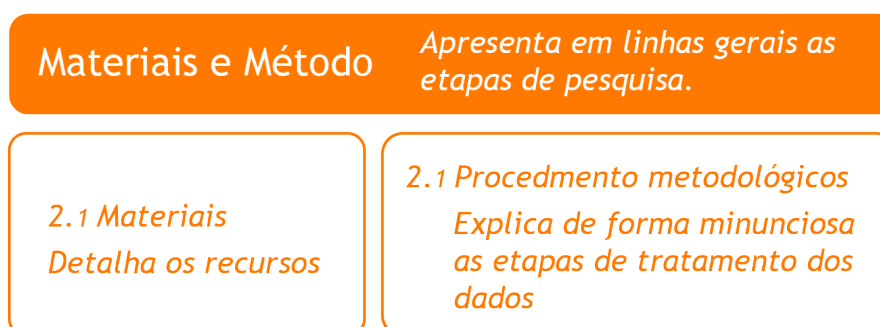


Figura 8 - Itens componentes do capítulo.

Nesse sentido o método foi definido com o propósito de atender ao objetivo proposto de avaliar o conforto térmico em ambientes escolares naturalmente ventilados a partir de um projeto padrão e representar seus resultados em diagrama síntese que possa servir a contextos similares. Utilizou-se como principal referência a norma ASHRAE 209 e sua aplicação por meio dos procedimentos descritos nas normas ASHRAE 55, NBR 15220, NBR 16401 e no RTQ-C.

A Figura 9 apresenta em linhas gerais as etapas aprofundadas nos itens 2.1 a 2.4. Considerando a necessidade de se implantar o projeto padrão em diferentes contextos climáticos, realizou-se inicialmente a análise climática de 6 municípios representativos por meio de cartas psicrométricas, seguido da configuração do modelo no software *DesignBuilder*, diagnóstico do percentual de horas ocupadas em conforto e interpretação dos parâmetros mais influentes no projeto por meio de análise estatística de sensibilidade.

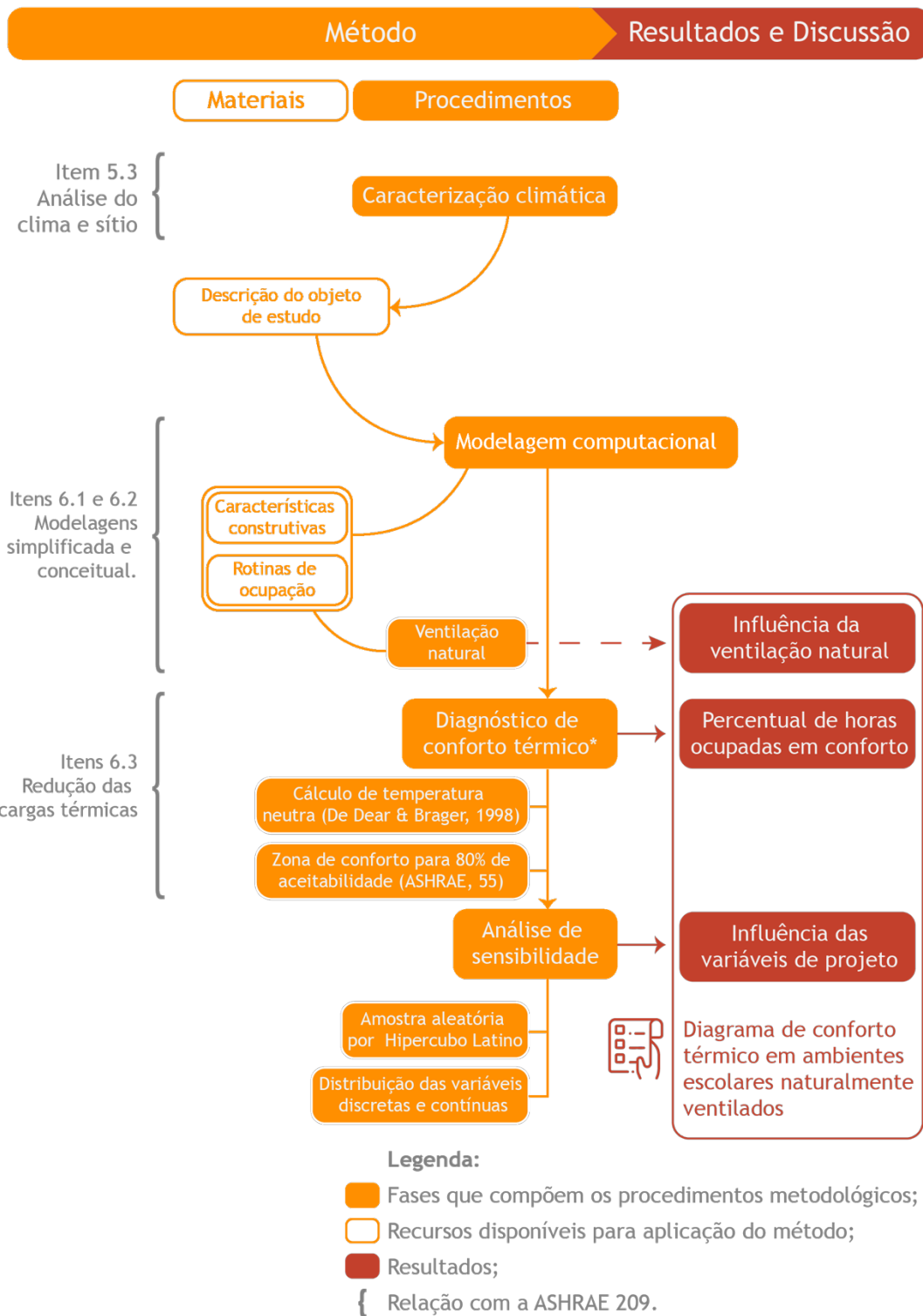


Figura 9 - Diagrama resumo das etapas que constituem o método empregado nessa pesquisa.

2.1. Caracterização Climática

De acordo com a norma que define o Zoneamento Bioclimático Brasileiro (ZBBR) vigente, a NBR 15220-3 (ABNT, 2003), o território nacional está dividido em 8 zonas, como mostra a Figura 10, com características climáticas definidas por três parâmetros principais: médias mensais das temperaturas máximas, médias mensais das temperaturas mínimas e umidade relativa do ar. Desde 2008 essa divisão tem sido questionada, pois existem cidades com características climáticas distintas classificadas na mesma zona bioclimática, resultando em recomendações inadequadas de princípios bioclimáticos para alguns municípios (BOGO, 2016; FERREIRA et al., 2017; BAVARESCO et al., 2017).

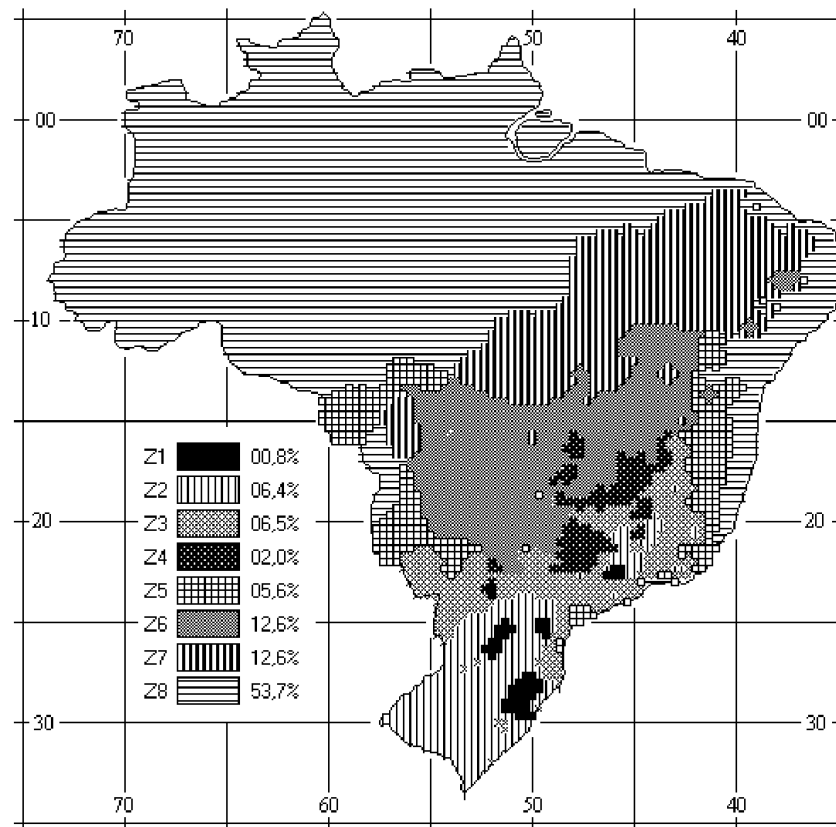


Figura 10 - Zoneamento Bioclimático Brasileiro vigente. Fonte: NBR 15520-3 (ABNT, 2003)

Em 2013 foi proposta uma nova classificação de climas nacionais (RORIZ, 2014). Nesse novo documento os municípios brasileiros foram subdivididos em 24 zonas climáticas segundos os parâmetros de: temperatura média anual, desvio padrão da temperatura média, amplitude média anual e desvio padrão de amplitude. A revisão em curso dos Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência

Energética, tanto para Edifícios Comerciais de Serviços e Públicos (RTQ-C), quanto Residenciais (RTQ-R), disponível para consulta pública desde julho de 2018, adota essa nova classificação bioclimática (BAVARESCO et al., 2017).

Nesse contexto, optou-se pela escolha de 6 municípios para avaliação do projeto padrão, a partir das zonas caracterizadas pela variação do desvio padrão da temperatura média segundo projeto de revisão do ZBBR de modo a representar todas as zonas bioclimáticas que o compõem. Os municípios selecionados foram: Brasília (DF), Curitiba (PR), Cuiabá (MT), Natal (RN), Porto Alegre (RS) e Rio de Janeiro (RJ), como indicado na Figura 11.

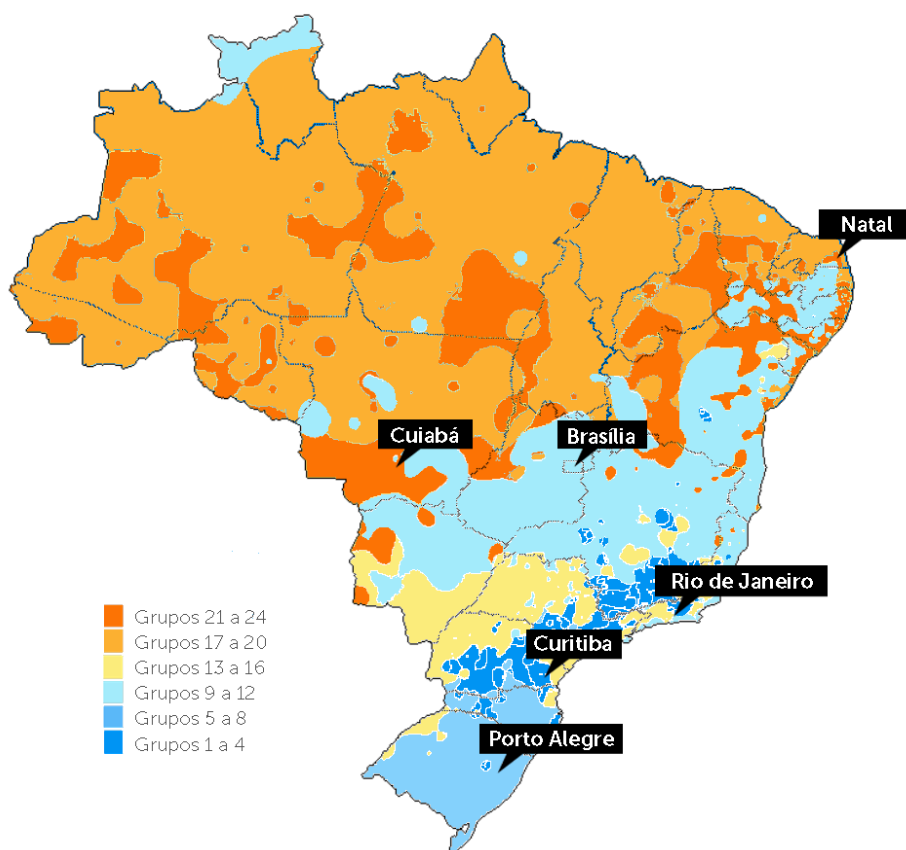
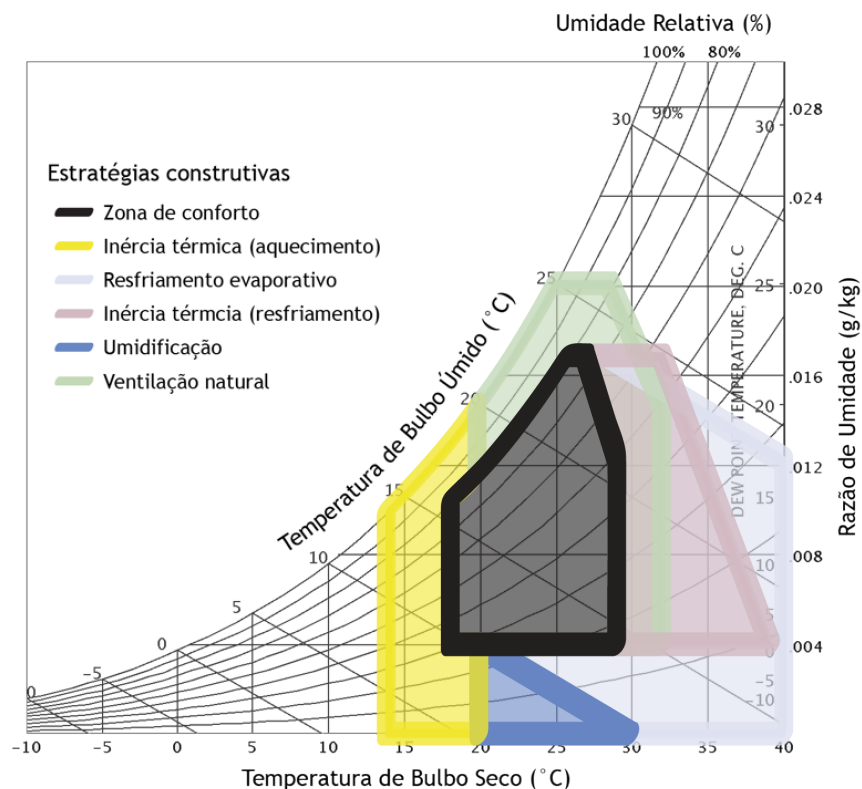


Figura 11 -Proposta de revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro representado por variação do desvio padrão da temperatura média. Fonte: <www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/Climas_v3.pdf> Último acesso: 19/03/2020. Adaptado pelo Autor.

A NBR 15220-3 (ABNT, 2003) recomenda um conjunto de soluções técnico-construtivas apropriadas à um nível adequado de desempenho térmico das edificações para cada zona bioclimática por meio da Carta de Givoni (1992). Essa ferramenta, desenvolvida com base nos trabalhos de Olgay (1968) auxilia à compreensão das variações de temperatura do ar e umidade, possibilitando obter valores destas

variáveis para cada uma das 8760 horas de um ano típico, e sua influência nos processos de transferência de calor.

A Carta de Givoni (1992), representada na Figura 12, foi elaborada sobre a base de uma carta psicrométrica² e é um instrumento bastante eficaz à leitura das condições climáticas de um lugar, pois por meio dela é possível definir um conjunto de estratégias bioclimáticas adequadas ao número de horas que se encontrarem além da zona de conforto a partir de uma carta psicrométrica. No entanto, segundo Walsh et al. (2016), algumas características devem ser claramente definidas para evitar conclusões precipitadas. Deve-se atentar à determinação da zona de conforto, já que a carta não adota o modelo adaptativo, e além disso, algumas variáveis climáticas importantes para o balanço térmico da edificação, como a radiação solar e a influência do vento são desconsideradas.



² Diagrama que simplifica o estudo das propriedades do ar a partir da relação entre temperaturas de bulbo seco, ponto de orvalho e bulbo úmido, umidades relativa e absoluta e volume específico. Fonte: Lamberts, Pereira & Dutra (2014).

Para cada um dos municípios representativos, foi então construída sua respectiva carta psicrométrica como instrumento à compreensão do clima local, na qual encontram-se representadas todas as horas de um ano meteorológico típico. Para tal, utilizou-se o *software ClimateConsultantv6.0*, que permite a inserção de arquivos climáticos no formato EPW (*energyplus weather data*) para visualização das 8760 horas de acordo com quatro modelos de conforto disponíveis: *California Energy Code*, Temperatura Efetiva (ASHRAE Fundamentals), PMV (Predicted mean vote) e Modelo Adaptativo para ambientes ventilados naturalmente (ASHRAE 55-2017).

Os arquivos climáticos utilizados, descritos na Tabela 2 , foram elaborados pelo professor Roriz (2014), a partir de registros em 411 estações climatológicas do INMET entre os anos de 2000 e 2010, no âmbito do projeto de revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro (ABNT, 2003). Esses arquivos foram revisados em 2018 pelo LabEEE em conjunto com Dru Crawley e Linda Lawerie (LabEEE, 2018).

Tabela 2 - Arquivos climáticos utilizados na pesquisa. Elaborado pelo autor.

Cidade	Arquivo	Fonte	Último Acesso:
Brasília	BRA_DF_Brasilia.867150_INMET.epw	climate.onebuilding.com	17/03/2020
Curitiba	BRA_PR_Curitiba.838420_INMET.epw	climate.onebuilding.com	17/03/2020
Cuiabá	BRA_MT_Cuiaba.867050_INMET.epw	climate.onebuilding.com	17/03/2020
Natal	BRA_RN_Natal.818390_INMET.epw	climate.onebuilding.com	17/03/2020
Porto Alegre	BRA_RS_Porto.Alegre.869880_INMET.epw	climate.onebuilding.com	17/03/2020
Rio de Janeiro	BRA_RJ_Rio.de.Janeiro-Vila.Militar.868790_INMET.epw	climate.onebuilding.com	17/03/2020

A partir do arquivo climático e modelo de conforto escolhido, nesse caso o modelo adaptativo da ASHRAE 55-2017, o software também calcula o número de horas em conforto, dentre as 8760 horas do ano ou em intervalo específico, no qual adotou-se o período entre as 7 e 19 horas. Nesse sentido é possível compreender quais são as estratégias mais adequadas a determinado clima a partir da identificação de suas

condições de umidade e temperatura, referentes a um ano meteorológico típico, para cada hora do ano.

No software *ClimateConsultant*, após a inserção do arquivo climático definiu-se o limite de aceitabilidade de 80% e o intervalo de ocupação entre 7 e 19 horas, como indicado na Figura 13. Em seguida, na Figura 14 é apresentada a carta psicrométrica com representação do número de horas entre o intervalo especificado e o intervalo relativo à zona de conforto adaptativo (em verde), sobre a qual são sobrepostas as estratégias climatização passiva de Givoni.

LOCATION:	Brasilia, DF, BRA
Latitude/Longitude:	15.78° South, 47.93° West, Time Zone from Greenwich -3
Data Source:	INMET 867150 WMO Station Number, Elevation 1160 m

7. ADAPTIVE COMFORT USING NATURAL VENTILATION:

80.0 % Acceptability Limits (80% or 90%)

19.1 Minimum Mean Monthly Outdoor DB Temp (10° C or less)

22.8 Maximum Mean Monthly Outdoor DB Temp (33.5° C or less)

20.2 Comfort Low - Min Operative Temp in this Climate (°C)

28.4 Comfort High - Max Operative Temp in this Climate (°C)

(Air Velocity is controlled by opening and closing windows)

MODEL:	ADAPTIVE COMFORT ONLY	<input checked="" type="radio"/> Hourly	<input type="radio"/> Daily Min/Max
PLOT:	COMFORT INDOORS	<input type="radio"/> All Hours	<input checked="" type="radio"/> Select Hours
		7 a.m.	through 7 p.m.
		<input checked="" type="radio"/> All Months	<input type="radio"/> Select Months
		JAN	through DEC
		<input type="radio"/> 1 Month	JAN Next
		<input type="radio"/> 1 Day	1 Next
		<input type="radio"/> 1 Hour	7 a.m. Next

Figura 13- Dados de entrada determinados no software Climate Consultant (ver. 6.0.12) para elaboração da carta psicrométrica a partir da leitura dos dados climáticos registrados em um arquivo EPW (EnergyPlusWeather Data). Elaborado pelo autor..

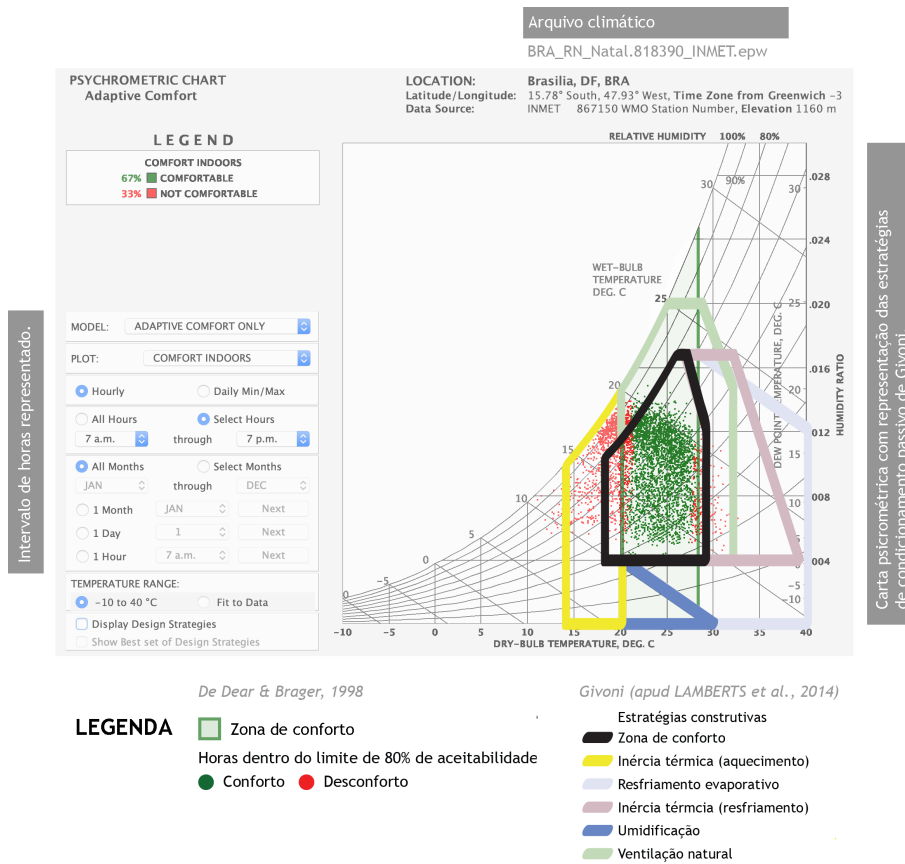


Figura 14- Análise da carta psicrométrica a partir dos dados de saída obtidos no software *Climate Consultant* e sobreposição da carta de Givoni. Elaborado pelo autor.

Os pontos dispostos em diferentes posições da carta indicam as condições temperatura e umidade referentes às horas dentro do intervalo especificado de 7 às 19h, que caso representados na cor verde significa estarem dentro da zona de conforto adaptativo. Já os seis polígonos sobrepostos na carta se referem à zona de conforto determinado por Givoni e possíveis estratégias de condicionamento passivo de um ambiente.

2.2. Materiais

Este item apresenta os recursos materiais disponíveis e necessários à execução da pesquisa. A seguir descreve-se o projeto padrão utilizado como estudo de caso e suas especificações, bem como o software utilizado para as simulações.

2.2.1. Estudo de caso: Projeto Padrão de Escola

O projeto padrão de uma unidade de ensino fundamental utilizado nesta pesquisa faz parte do banco de projetos desenvolvido pela Coordenação de Desenvolvimento e Infraestrutura (CODIN) do FNDE para atender aos preceitos do novo ensino fundamental em conformidade com o PAR (2014). Caracteriza-se por blocos térreos de acesso independentes com área total de aproximadamente 2.290 m² e marcado por um bloco pedagógico principal constituído por 5 salas. Dada à grande escala desse programa e seu impacto sobre o desenvolvimento de milhares de crianças por todo o Brasil, observa-se a necessidade de verificação quanto ao cumprimento de parâmetros relativos à sua implantação e adequação climática.

Seu programa arquitetônico é definido por: Bloco de serviços com cozinha, vestiários para funcionários, lavanderia, despensa, depósito e área para refeitório; Bloco administrativo com secretaria almoxarifado, coordenação, sala de professores; copa, diretoria e dois banheiros acessíveis; Conjunto de salas multiuso e recursos funcionais; Biblioteca; Bloco pedagógico com cinco salas de aulas, dois banheiros coletivos e dois banheiros acessíveis; Quadra Poliesportiva e Pátio coberto com conjunto de dois vestiários que atendem à quadra. Todas as aberturas posicionadas no perímetro do projeto são sombreadas por placa metálica perfurada distante cerca de 80 centímetros. A Figura 15 ilustra o projeto em questão.

Distribuição dos blocos por atividades:

- Sala de Aula
- Serviços
- Administração
- Biblioteca
- Multiuso



Figura 15 - Planta baixa e perspectiva esquemática do complexo escolar. Fonte: CODIN/FNDE, 2018, adaptado pelo autor.

Esta pesquisa analisa o bloco pedagógico por duas principais razões. Primeiro, por representar, em um conjunto de salas de aula, as características centrais do projeto e segundo, por representar um modelo mais facilmente encontrado em outras edificações escolares (Figura 16). A partir de sua configuração, desenvolveu-se um modelo termoenergético composto por apenas uma zona térmica representativa de uma sala de aula (sala 4), já que ambas as salas apresentam as mesmas características espaciais, volumetria, vedações externas, sombreamento e, portanto, similares condições de exposição ao ambiente externo.

A orientação solar adotada, considerando diferentes possibilidades de implantação, baseou-se no item 11.5.1 da NBR 15575, no qual determina-se orientar a fachada com maior área envidraçada no sentido oeste, condição mais desfavorável para ganhos térmicos. Nesse sentido a fachada do bloco pedagógico com maior percentual de área de abertura encontra-se orientado perpendicularmente a oeste conforme Figura 16.

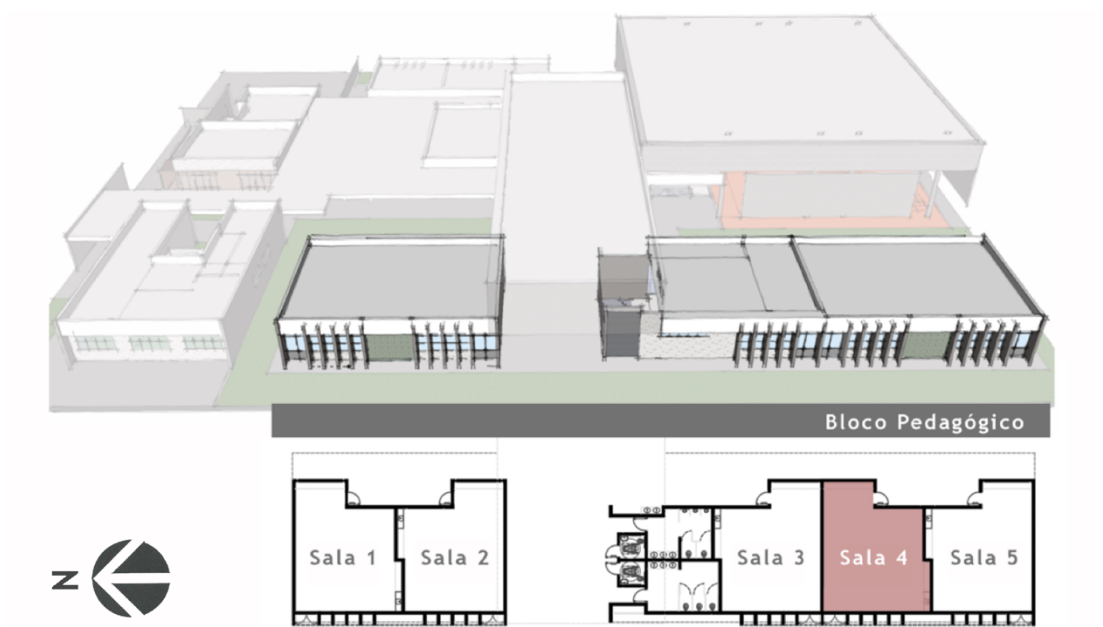


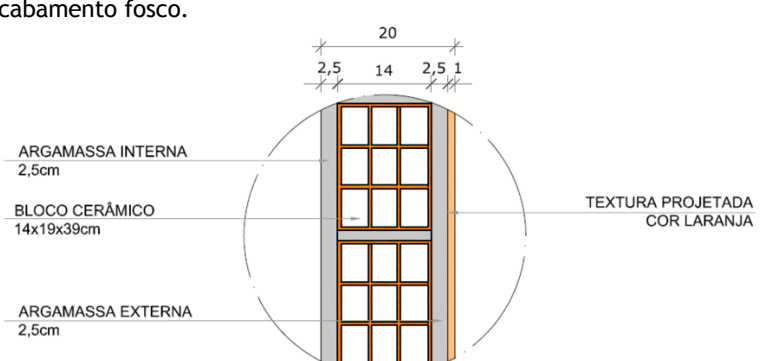
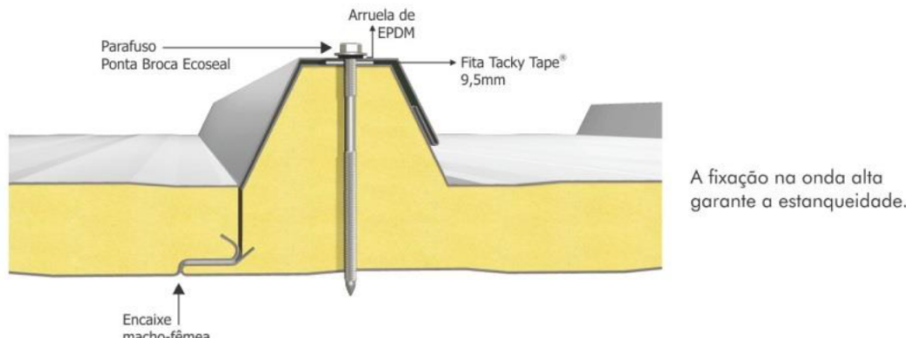

Figura 16 - Planta do bloco pedagógico e sua implantação no projeto, com indicação da sala de aula estudada.
Fonte: CODIN/FNDE, 2018, adaptado pelo autor.

2.2.2. Especificações de projeto

Os conjuntos funcionais que compõem o projeto do edifício escolar possuem estrutura de concreto, paredes em alvenaria convencional e coberturas em estrutura metálica. Os materiais e acabamentos são padronizados e especificados de acordo com

os requisitos de uso, operação e manutenção (BRITO et al., 2019). O catálogo de especificações definido pela CODIN é resumido na Tabela 3.

Tabela 3 - Especificação dos materiais e acabamentos. Fonte: CODIN/FNDE.

Sistema de vedação de vertical	<ul style="list-style-type: none"> Alvenaria de vedação com tijolo cerâmico de 14x19x39cm assentado em 1/2 vez com argamassa traço 1:2:8. Espessura final de 20cm; Revestimento de pintura acrílica para fachadas sobre reboco desempenado fino e acabamento fosco.  <p>ARGAMASSA INTERNA 2,5cm</p> <p>BLOCO CERÂMICO 14x19x39cm</p> <p>ARGAMASSA EXTERNA 2,5cm</p> <p>TEXTURA PROJETADA COR LARANJA</p>
Cobertura do edifício	<ul style="list-style-type: none"> Estrutura metálica com treliças em aço galvanizado tipo <i>light steel frame</i> (lsf); Telhas termo acústicas com preenchimento em PIR (espuma rígida de poliacetato), fixadas sobre treliças. Modelo de Referência - Isotelho IF 30mm 10,74 kg/m² (largura útil de 1000mm).  <p>Parafuso Ponta Broca Ecoseal</p> <p>Arruela de EPDM</p> <p>Fita Tacky Tape® 9,5mm</p> <p>Encaixe macho-fêmea</p> <p>A fixação na onda alta garante a estanqueidade.</p>
Fechamento metálico	<ul style="list-style-type: none"> Dispositivos de sombreamento em chapa de aço carbono, perfurada, galvanizada, soldada nos perfis metálicos 5x5cm; Acabamento em tinta esmalte Suvinil, cor tijolo queimado ou equivalente. Modelo de referência - Grade Furos, Multi furos.  <p>E.C.</p> <p>D</p> <p>EC=13,8mm</p> <p>D=9,52mm</p> <p>DISPOSIÇÃO DOS FUROS: Alternada longitudinal</p>

2.2.3. Programa de simulação computacional

A ferramenta utilizada para elaboração e simulação do modelo termoenergético foi o *software* DesignBuilder (versão 6.1.3.005), interface gráfica do algoritmo de cálculo EnergyPlus³ (versão 8.9.0). O EnergyPlus é um programa de código aberto (open source) desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) em cooperação com o Laboratório de Energias Renováveis (NREL) da Universidade de Berkeley (CRAEWLEY et al.2001). Em desenvolvimento há mais de 20 anos, tem suas raízes nos códigos fonte dos programas BLAST e DOE-2, e é um dos melhores representantes do estado da arte referente a softwares de simulação termoenergética (WETTER et al., 2015).

O EnergyPlus é essencialmente um motor de simulação, justificando a escolha do DesignBuilder para elaboração dos modelos virtuais de simulação (CRAEWLEY et al.2001). Esse software integra todos os módulos de cálculo presentes no EnergyPlus, e sua interface gráfica contribuiu à inserção dos dados de entrada visíveis tanto no modelo tridimensional quanto nas abas de configuração (WEYTJENS et al. ,2011).

O DesignBuilder é um dos mais poderosos, versáteis e intuitivos softwares de simulação termoenergética atualmente disponíveis (JANKOVIC, 2013). Nele é possível definir todos os dados de entrada pertinentes à simulação termoenergética de um edifício, bem como realizar análises paramétricas, de incertezas e otimizações a partir de um ou mais fatores. As variáveis de projeto podem ser definidas com bases em parâmetros de estanqueidade, diversas combinações de materiais, massa térmica, opções de energia renovável, dentre outras.

3 A preocupação com as limitações dos programas de simulação BLAST e DOE-2 no final da década de 1990, assim como a dificuldade de manutenção de seus códigos de programação, fez com que a comunidade de programadores reunissem esforços ao desenvolvimento do EnergyPlus. Esse programa foi originalmente escrito em Fortran e em 2014 convertido em C++. Não possui interface gráfica funcionando, portanto, como motor de cálculo de softwares como DesignBuilder, Euclid e Openstudio.

2.3. Modelagem

O modelo elaborado no DesignBuilder seguiu o projeto padrão descrito no item 2.2.1 com enfoque no bloco pedagógico, como mostra a Figura 17. Nesse sentido, como o objetivo é avaliar o conforto térmico em relação às características gerais do projeto para ambientes de sala de aula, optou-se pela redução do modelo em uma única zona térmica. Apesar dessa simplificação, o modelo se mostra suficiente à representação do bloco pedagógico, uma vez que foram caracterizadas suas reais condições de exposição e implantação.

As paredes entre duas salas de aulas foram modeladas como adiabáticas e também foi considerada a adjacência do piso ao chão e teto como cobertura externa, uma vez que se trata de edificação térrea. Além do desenvolvimento do modelo tridimensional referente à zona térmica representativa de uma sala de aula foram modelados os ângulos de sombreamento, definidas as características de exposição e adjacência das superfícies externas, caracterizados os materiais componentes da envoltória e tipo de vidro das aberturas, assim como a densidade de ocupação no interior dessa zona, suas rotinas de ocupação e densidade de potência instalada.

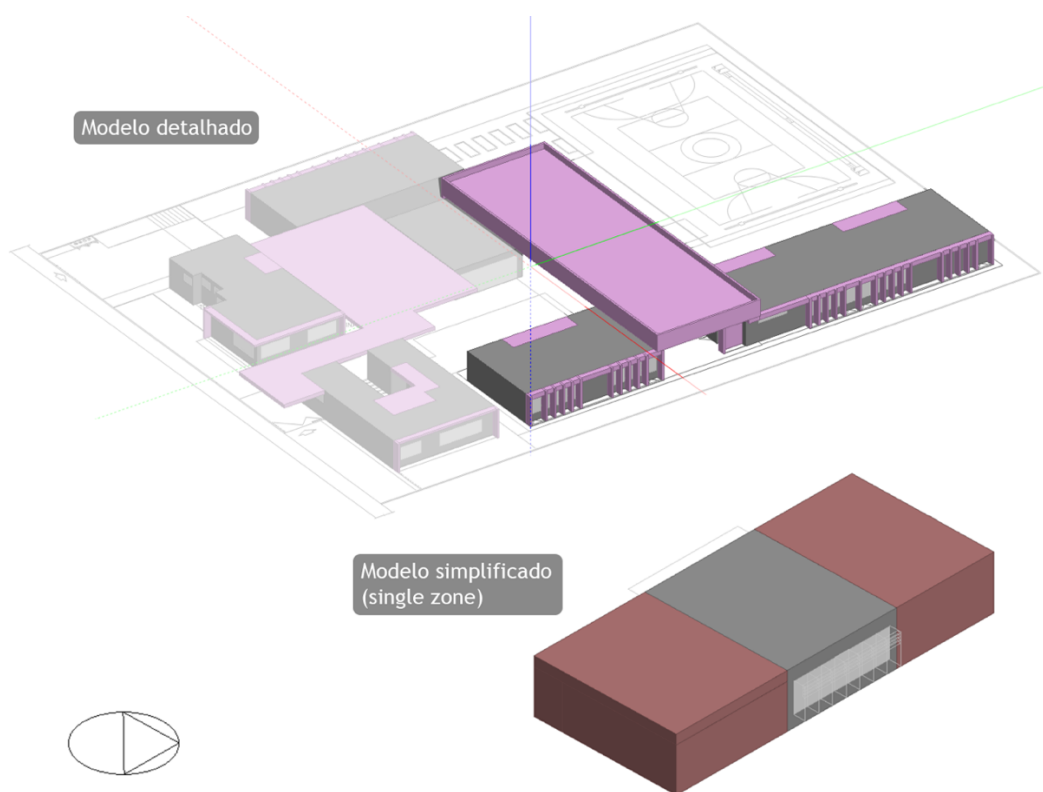


Figura 17 - Modelo tridimensional elaborado no software *DesignBuilder* (versão 6.1.3.005).

2.3.1. Caracterização da envoltória

O tipo de envoltória caracterizado no modelo, tanto para paredes quanto coberturas, provém do catálogo de especificações para projetos padrão do FNDE mencionado no item 2.2.2. Para uma correta representação de suas propriedades térmicas é necessário a inserção dos dados de condutividade, densidade e calor específico, por material, ou a resistência térmica do componente. Para tal utilizou-se como referência a NBR 15220-2 (ABNT, 2004) (Anexo 1) e biblioteca de componentes construtivos brasileiras desenvolvida pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) (WEBER et al., 2017) (Anexo 2) e em seguida registrados os valores de transmitância térmica, calculados no próprio *DesignBuilder*.

A Figura 18 ilustra, sobre a volumetria utilizada para realização do modelo de simulação, a caracterização e valor de transmitância dos sistemas que compõem a envoltória, as características do vidro adotado e ângulos de sombreamento considerados em conformidade com especificações de projeto. A configuração das paredes e cobertura no *DesignBuilder*, bem como seu cálculo de transmitância e caracterização dos elementos de sombreamento encontram-se descritos no Apêndice 1.

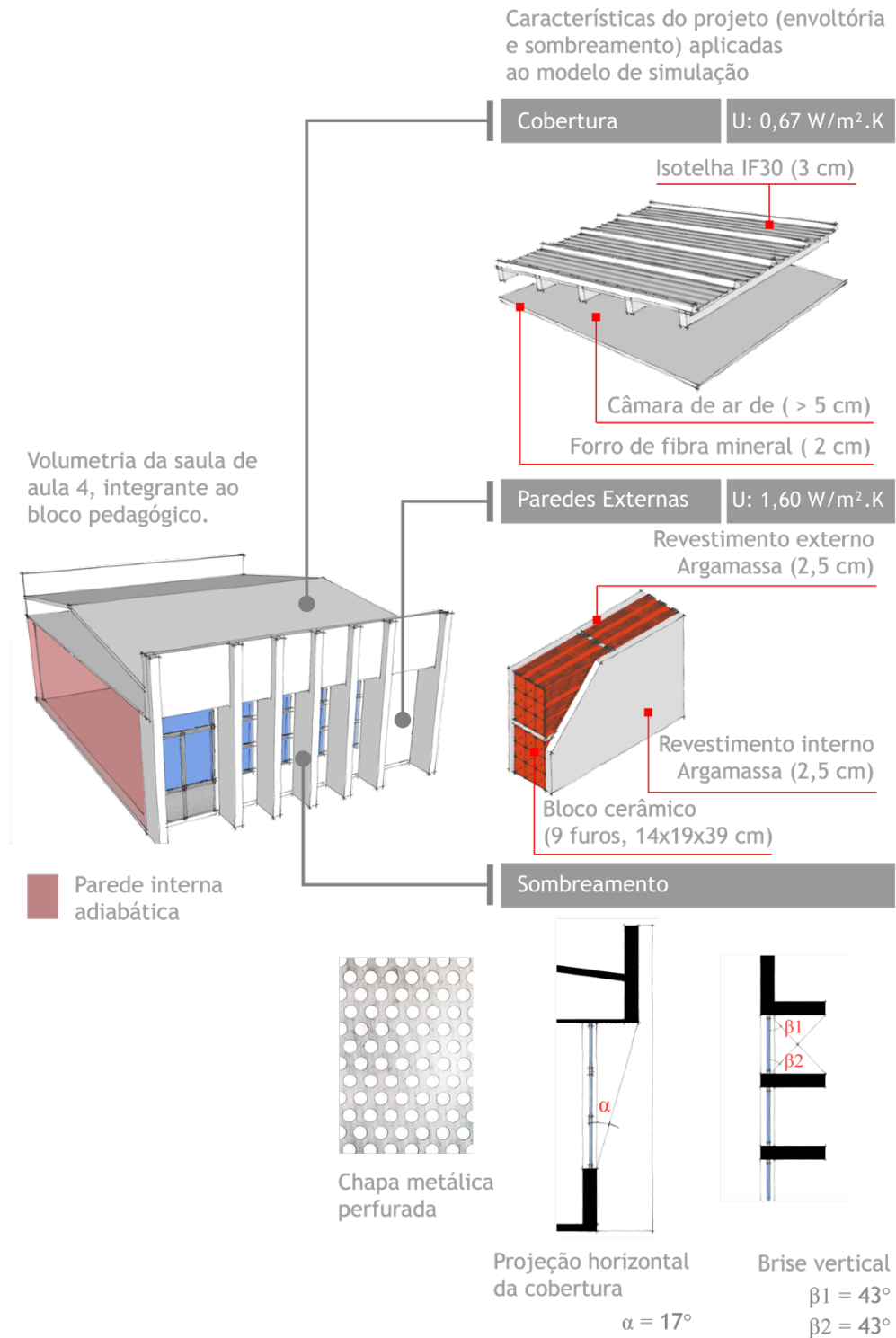


Figura 18 - Características da envoltória e ângulos de sombreamento aplicados ao bloco pedagógico no projeto padrão.

2.3.2. Rotina de uso e operação

Em reuniões com equipe técnica da CODIN, definiu-se que a ocupação da sala de aula se daria no intervalo das 7h00 às 19h00. A partir desse dado definiu-se uma variação de distribuição do número de ocupantes por sala, como mostrado no Gráfico 1, utilizando como referência a norma ASHRAE 55, da qual também foi extraído a densidade de ocupantes em ambientes de sala de aula, de 0,3767 pessoas por m².

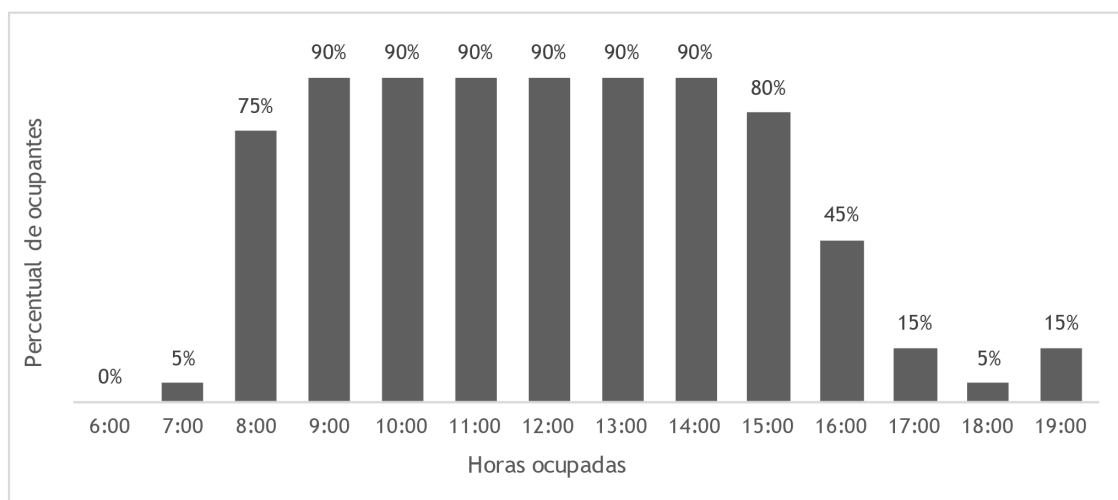


Gráfico 1 - Distribuição do número de ocupantes por sala entre as 6 e as 19 horas.

2.3.3. Diagnóstico de horas ocupadas em conforto

O cálculo do número de horas ocupadas em conforto adotado nessa dissertação utiliza a fórmula de temperatura neutra definida por De Dear, Brager e Cooper (1998), presente na norma ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2017). Por meio dessa fórmula é possível definir a zona de conforto térmico em função da temperatura média predominante do ar externo, calculada a partir da média aritmética das temperaturas de bulbo seco de não menos que 7 dias ou mais que 20 dias anteriores em relação a um dia de referência. Optou-se pela média aritmética das temperaturas de bulbo seco dos últimos sete dias em relação ao dia analisado, obtidas em cada um dos seis arquivos climáticos utilizados, como mostra a Equação 5.

Equação 5 - Média da temperatura de bulbo seco dos último sete dias anteriores a um dia de referência.

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

Onde:

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

t_{od-1} é a temperatura média do dia anterior ao dia de referência;

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

A ASHRAE 55 estabelece, como critério de conformidade, um limite de aceitabilidade de 80 %. Isso significa que para definição da zona de conforto extrapola-se a temperatura neutra calculada em 3,5 °C, tanto para calor quanto frio, como mostra a Figura 19. Dessa forma a avaliação do percentual de horas ocupadas em conforto é determinado pela comparação entre a temperatura operativa extraída dos resultados de simulação para cada hora do ano com a temperatura de conforto calculada. Neste método, os efeitos de desconforto térmico local, roupa, atividade metabólica, umidade e velocidade do ar não devem ser analisados isoladamente, pois já são considerados dentro da zona de conforto resultante.

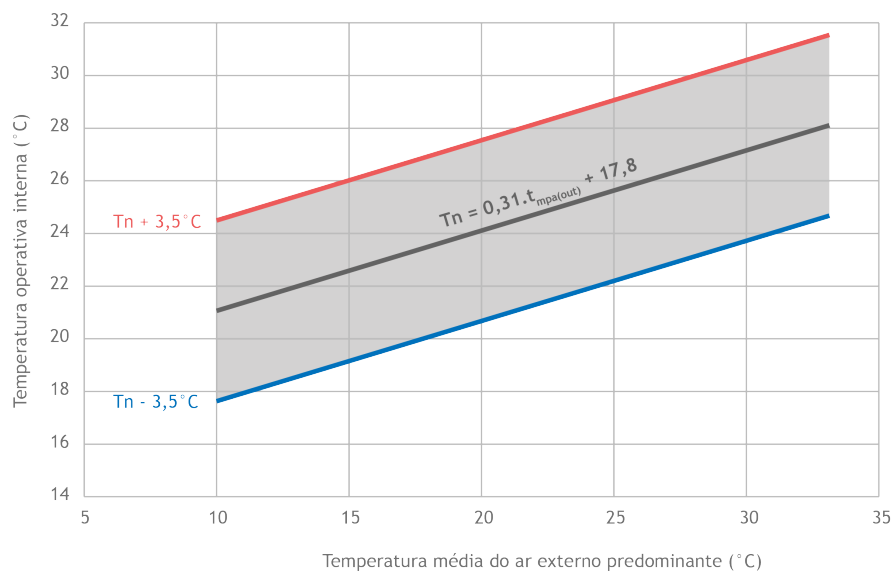


Figura 19 - Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente condicionados. Fonte: ASHRAE 55, adaptado pelo autor.

Caso a temperatura operativa interna seja superior a 25 °C, é previsto o aumento do limite superior de aceitabilidade proporcionalmente aos valores de velocidade do ar superiores a 0,3 m/s, como descrito na Tabela 4. O limite inferior de aceitabilidade também pode ser expandido quando a temperatura operativa interna for superior a 19,5 °C ao mesmo tempo em que temperatura média do ar externo exceder a 16,5 °C. Nessa condição a zona de adaptação ao “clo” deve ser utilizada como mostra Figura 20.

Tabela 4 - Aumento nos limites de temperatura operativa aceitável em ambientes ventilados naturalmente resultantes de velocidades do ar acima de 0,3 m/s. Fonte: ASHRAE,55.

Velocidade média do ar até 0,6 m/s	Velocidade média do ar até 0,9 m/s	Velocidade média do ar até 1,2 m/s
1,2°C	1,8°C	2,2 °C

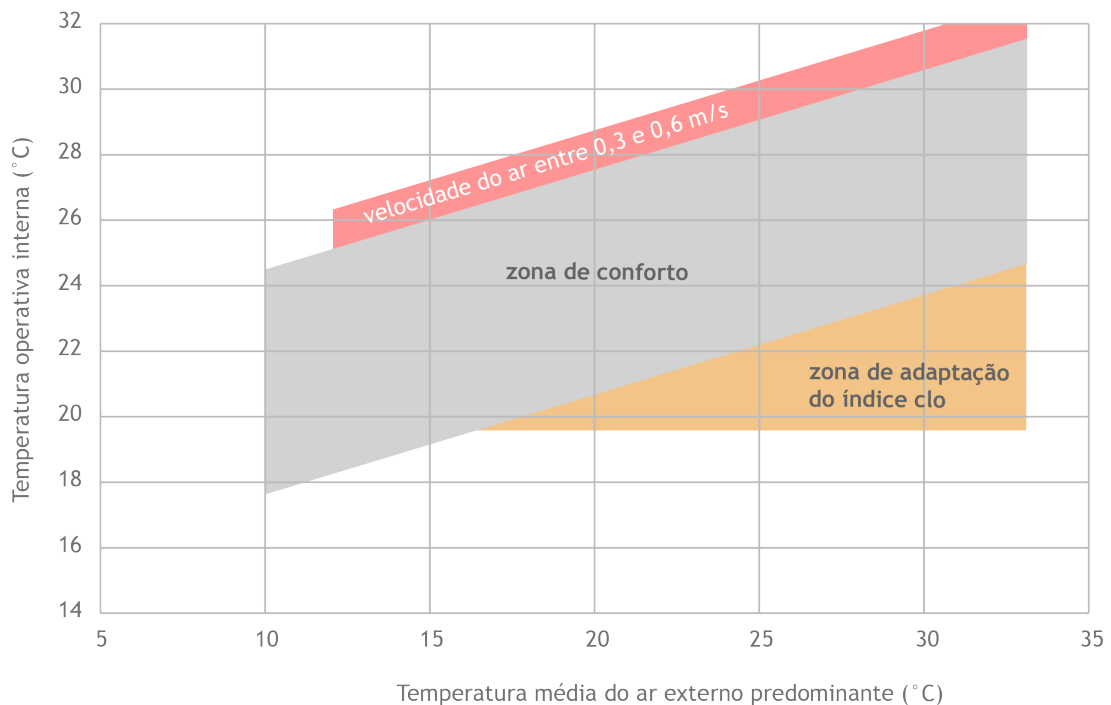


Figura 20 - Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente condicionados. Fonte: Rackes et al. (2015), adaptado pelo autor.

A partir dos resultados de simulação da sala de aula, comparam-se as temperaturas operativas com os limites de conforto térmico calculados. Dessa forma

é possível computar o número de horas dentro dos limites da zona e conforto e o número de horas em desconforto por frio ou calor. O resumo desses dados é em seguida representado, para cada cidade avaliada, em formato de gráfico de barras.

2.3.4. Ventilação Natural

Para configuração da ventilação natural, o *EnergyPlus* se baseia no algoritmo *Airflow Network* (WALTON, 1989), definindo, portanto, uma rede de ventilação. Esse algoritmo representa um modelo matemático simples para o cálculo da distribuição do fluxo de ar entre ambientes por meio de equações de conservação de massa, energia e concentração em função de um número aproximações. O modelo representa o fluxo de ar entre zonas térmicas e o exterior considerando a trajetória do ar no interior do ambiente devido diferenças de pressão, e estima com precisão o número de renovações de ar (SREBRIC, 2018).

O *Airflow Network* é configurado a partir da definição de um número de “nós” conectados por elementos de fluxo de ar e possibilita a determinação de entradas do fluxo de ar, a caracterização do entorno da edificação, as condições de abertura das janelas e portas e as condições de ventilação. A relação entre fluxo de ar e pressão deve ser especificada para cada elemento. Essa abordagem assume o fluxo de ar de um nó para outro, calculado com base na diferença de pressão do vento e efeito da pressão por empilhamento, conforme a Equação 6 (GU, 2007).

Equação 6- Fluxo de ar entre nós.

$$q = 0,65 \cdot (\Delta P)^{0,6}$$

Onde:

q - Fluxo de ar entre zonas (volume de ar através de aberturas)

ΔP - diferença de pressão através da abertura ou elemento de infiltração.

0,65 - coeficiente de fluxo de ar (MATEUS et al., 2016)

0,6 - fluxo de ar típico por infiltração em aberturas (DOLS & WALTON, 2002)

O modelo de rede de ventilação também considera, além da direção dos ventos, velocidade e do ar, diferença de pressão e altura das áreas de abertura de entrada e saída do ar. A literatura sugere uma extensa gama de valores para configuração do coeficiente de fluxo de ar (ACOSTA-ACOSTA & EL RAYES, 2020), no entanto, devido à

incertezas no cálculo da ventilação natural (coeficientes de pressão do vento, frações de aberturas dos diferentes tipos de esquadrias, valores reais do fluxo de ar por infiltração, etc.), a adoção de um valor de coeficiente de fluxo de ar entre 0.60 e 0.65 é suficiente para aferir precisão no modelo.

Em conformidade com o projeto disponibilizado pela CODIN, foram adotados dois tipos de esquadrias para caracterização da área de abertura do modelo, com seção longitudinal representada na Figura 21. A abertura Tipo A, com altura de 2,1 m, apresenta duas folhas fixas e uma móvel do tipo maxim-ar, enquanto a abertura Tipo B, é de correr disposta em fita na fachada posterior do bloco pedagógico, com altura de 0,8 m. A fração de abertura das janelas adotada nessa pesquisa foi de 33%, a partir da qual são calculadas as áreas de entrada e saída do ar.

A operação das aberturas, ou seja, as vezes em que são abertas ou fechadas, depende do período de ocupação da sala. Além disso, o *Airflow Network* limita-se ao cálculo do fluxo de ar para ventilação de um ambiente a partir da relação entre a temperatura do ar interno e a temperatura de bulbo seco (DESIGNBUILDER, 2019). Sendo assim, entre o horário de 7 e 19 h as janelas são abertas sempre que a temperatura do ar interno for inferior à temperatura do ar externa e superior a 22 °C.

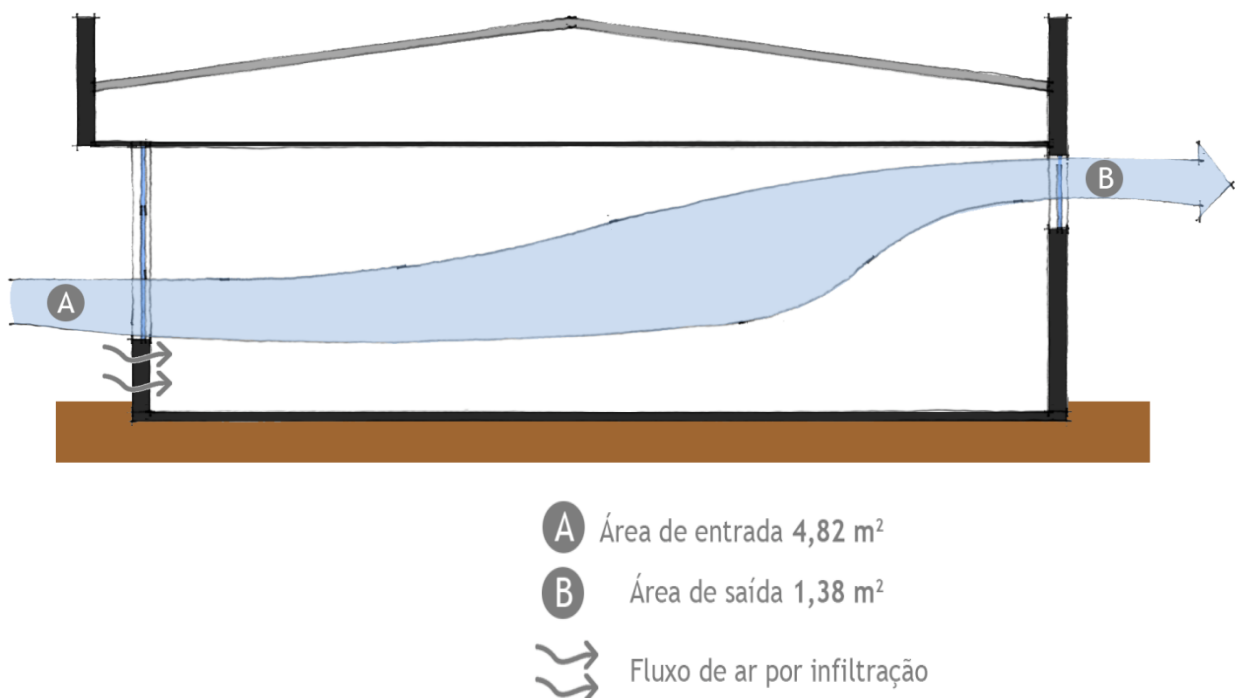


Figura 21 - Esquema do fluxo de ar entre as aberturas do ambiente simulado. Fonte?

Assim sendo, com o propósito de verificar a influência da ventilação natural sobre o diagnóstico de conforto térmico compara-se a temperatura operativa interna de uma sala de aula e a temperatura de bulbo seco. Nesse sentido considera-se duas situações para as simulações: janelas operáveis em função da temperatura do ar externo ou permanentemente fechadas.

Nessa pesquisa optou-se pela análise considerando, para as seis cidade, uma dia típico em que as horas apresentem temperatura de bulbo seco mais elevadas. Em seguida compara-se o perfis de temperatura operativa representado em um gráfico de barras, tanto no caso com as janelas operáveis quanto permanente fechadas, com a temperatura do ar externo representado em um gráfico de linhas para um intervalo de 24 horas, como ilustrado na Figura 22.

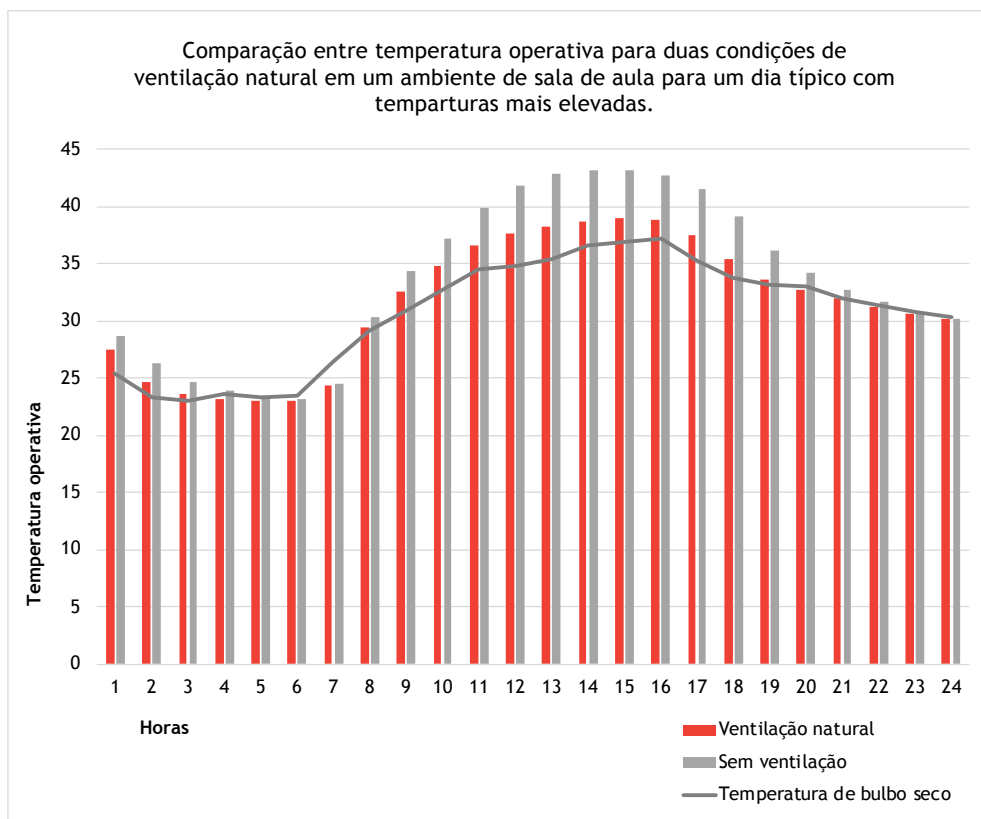


Figura 22 - Exemplo de gráfico para análise da influência da ventilação natural em um ambiente de sala de aula em um dia típico com temperaturas mais elevadas.

2.4. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade é, segundo Saltelli et al. (2008), o estudo de como a incerteza nas saídas de um modelo pode ser repartida em diferentes fontes de incertezas nas entradas do modelo. Hopfe, Christina J.; Hensen (2011), apontam nesse contexto que, independentemente do tipo de edificação, as incertezas físicas estão sempre presentes e referem-se a todo tipo de imprecisão associada à caracterização de um modelo de simulação.

Segundo Silva (2016), esse tipo de abordagem é crucial ao entendimento dos modelos e de seu desempenho, tornando-se cada vez mais necessária quando o modelo é complexo e com muitas variáveis, como é o caso da simulação dinâmica de edifícios. Tian (2013) divide a análise de sensibilidade em “local”, baseado na influência pontual de alguma variável, enquanto as demais permanecem fixas, e “global”, a qual se propõe investigar a influência das variáveis em todo o domínio da amostra, combinando simultaneamente todas as variáveis entre si.

Este método é utilizado para indicar quais parâmetros, caracterizados como dados de entrada do modelo de simulação, exercem maior influência nos dados de saída estudados. É resultado de simulações sistemáticas a partir de uma amostragem aleatória, em que se observa a relação de uma série de variáveis independentes sobre uma ou mais variáveis dependentes. Nesse caso observa-se o impacto das variáveis relacionadas à arquitetura, em termos de envoltória, e cargas internas provenientes do uso e ocupação sobre o número de horas em desconforto por calor (*Discomfort summer hours*) em cada uma das seis cidades avaliadas.

Nessa pesquisa adotou-se o método do Hipercubo Latino⁴ para definição da amostragem. A partir dessa amostra, aplica-se o método estatístico de regressão linear múltipla⁵, no qual várias possibilidades são comparadas entre si com o intuito de

4 O Hipercubo Latino é um método para definição de amostras aleatórias a partir de vetores associados a cada uma das variáveis independentes. Esse método considera uma determinada probabilidade de ocorrência em função do tipo de distribuição adotada (SILVA & GHISI, 2013).

5 Segundo Melo (2012) este método estima o valor esperado de uma variável “y” (variável dependente), com relação aos valores de outras variáveis “k” (variáveis independentes) que também são denominadas de variáveis explicativas ou repressoras, pois explicam a variação em “y”.

interpretar a relação entre diferentes parâmetros de entrada, auxiliando à compressão de variâncias em um dado de saída típico.

O resultado da análise é determinado pelo coeficiente de regressão padronizado (*Standardized Coefficient Regression, SRC*), que exprime o grau de influência de determinada variável sobre os dados de saída de um modelo de simulação (SILVA & GHISI, 2014, 2014a; GAGNON, GOSELINI & DECKER, 2018b). Outros índices resultantes desse tipo de análise são os coeficientes de determinação (adjusted R-squared) e probabilidade (p-value), responsáveis por indicar o nível de confiabilidade dos resultados (DESIGNBUILDER, 2019).

Foram definidas nove variáveis independentes a partir das características do modelo padrão de sala de aula descritas nos itens 2.2.2 a 2.3.2. Tais dados representam parâmetros que não apresentam correlação entre-se, ou seja, dados de entrada que exprimem diferentes características do modelo. Nesse sentido, para cada uma dessas variáveis considerou-se intervalos de variação, com o propósito de definir diferentes cenários de simulação constituindo assim a amostra aleatória (SILVA & GHISI, 2014, 2014a, 2020; GAGNON, GOSELINI & DECKER, 2018b). Para tal, o método de regressão linear exige a caracterização do tipo de distribuição, entre discreta e contínua, assim como sua frequência para cada variável.

A definição da amostra seguiu as referências de configuração indicadas pelo software DesignBuilder (2019). Nesse sentido, para uma amostragem segundo Hipercubo Latino, um tamanho de amostra de 10 a 20 vezes o número de variáveis independentes é suficiente para que a média da amostra seja modelada com precisão. Portanto, considerou-se um número de 180 simulações como adequado à maior precisão da análise.

As curvas de distribuição representam padrões de frequência de determinada variável na amostra (TRIOLA, 1385). Por meio delas é possível interpretar a possibilidade de ocorrência de um parâmetro entre seus valores mínimo, médio e máximo, e dependem do tipo de variável, se discreta ou contínua (SILVA & GHISI, 2014a; 2020) e de sua função que pode ser uniforme, binomial e triangular, como mostra a Figura 23. As curvas de distribuição de cada uma das variáveis são apresentadas em detalhes no Apêndice 1, no qual é possível observar a frequência, segundo o gráfico de função de probabilidade, ou distribuição, de um valor determinado para cada variável, descrito no gráfico de distribuição cumulativa.

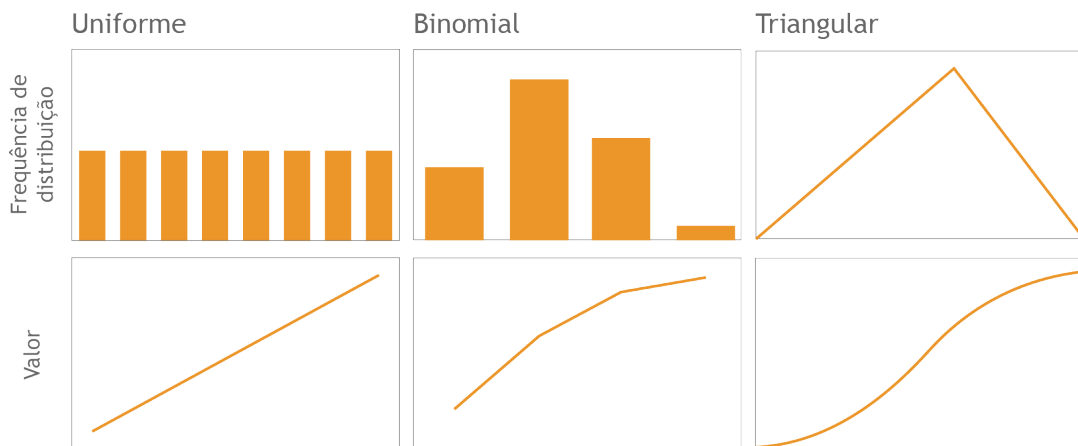


Figura 23 - Gráficos de curvas de distribuição por tipo. Fonte: Software DesignBuilder (2019), adaptado pelo autor.

As variáveis contínuas, representadas na Figura 24, são aquelas que podem assumir qualquer valor em um intervalo definido, como é o caso das taxas de renovação de ar por hora em função da ventilação natural ou estanqueidade da envoltória, percentual de abertura nas fachadas e densidades de ocupação e potência. As variáveis discretas, ilustradas na Figura 25, representam valores determinados, inteiros e contáveis. Nessa pesquisa essas variáveis representam intervalos caracterizados por possíveis ângulos de implantação, diferentes tipos de paredes externas e cobertura, determinados por seus valores de transmitância, fator solar do vidro e tipos de sombreamento adotados.

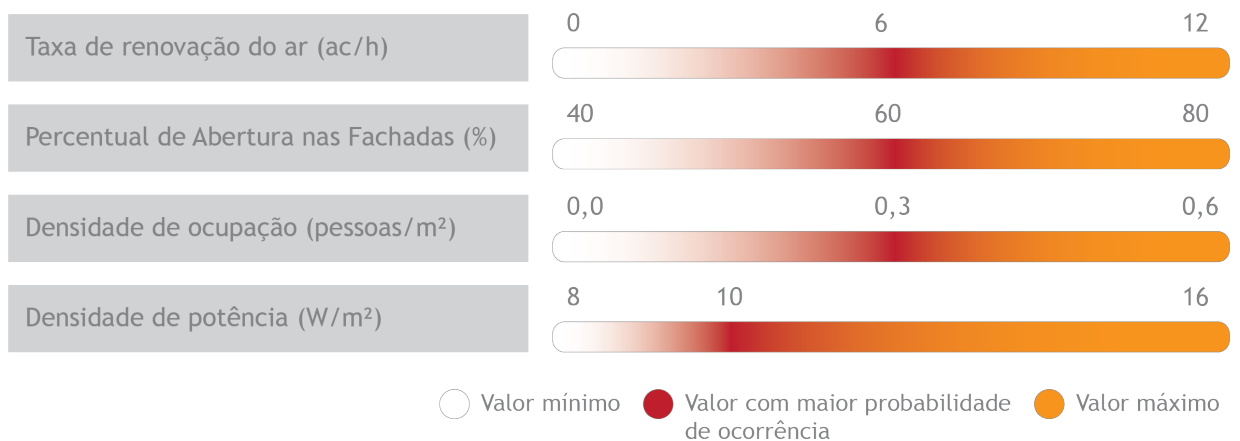


Figura 24 - Variáveis contínuas consideradas à para determinação da análise de sensibilidade.

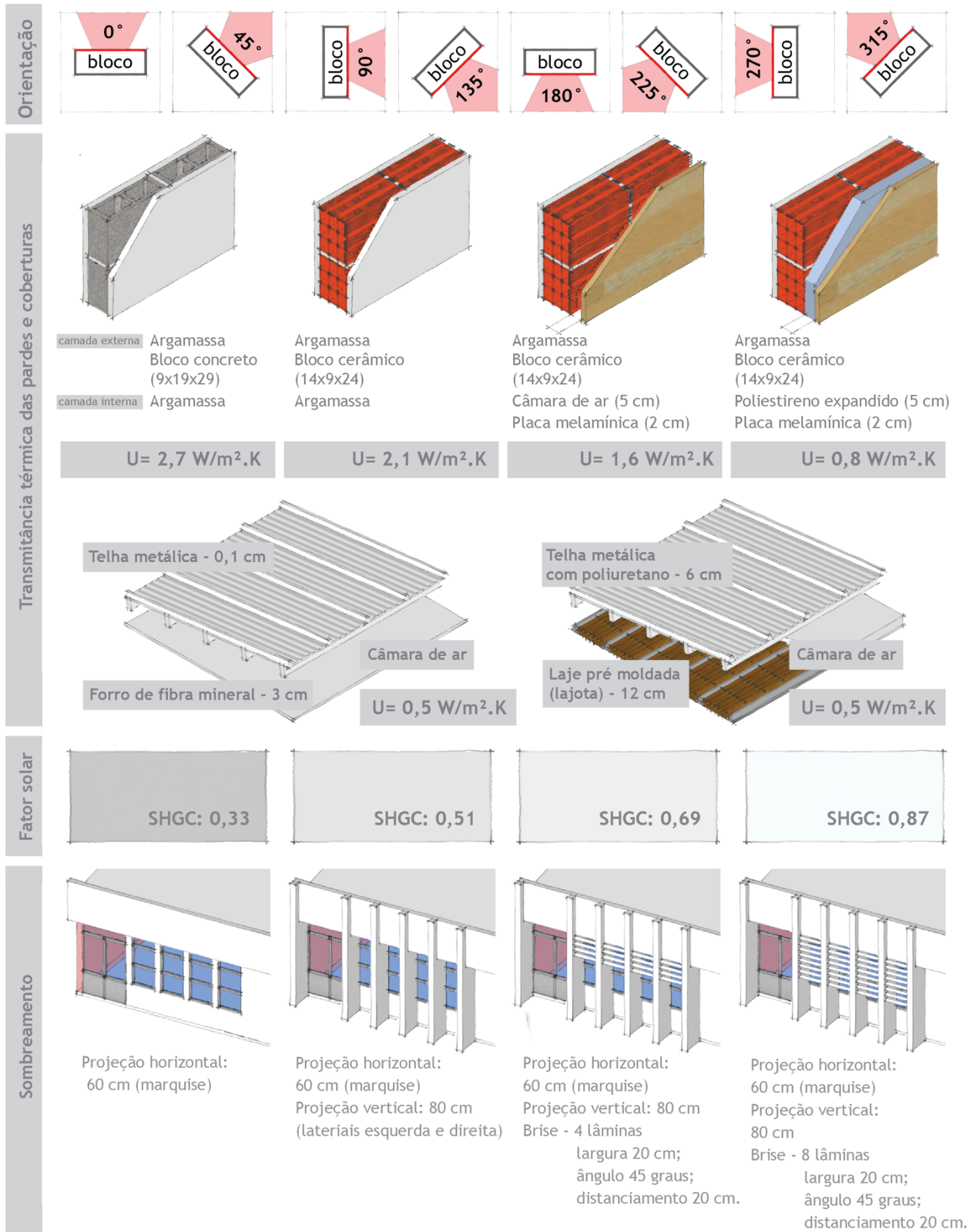
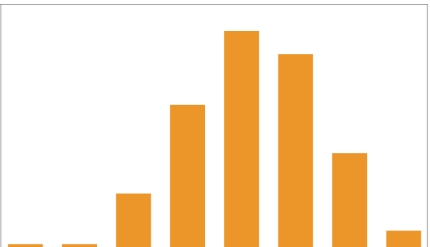
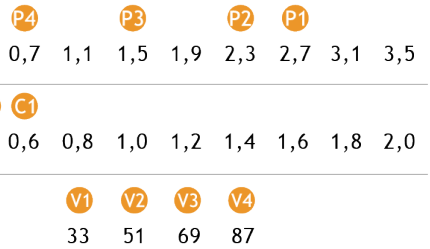
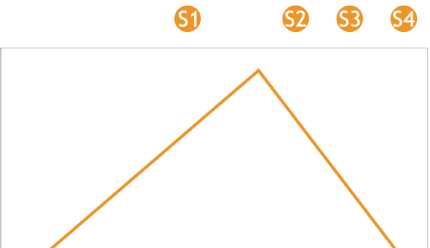
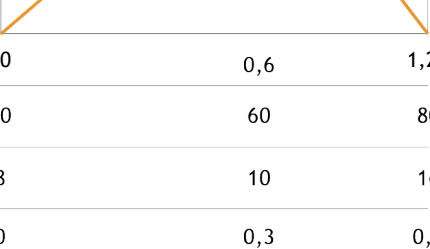


Figura 25- Variáveis discretas consideradas à para determinação da análise de sensibilidade.

A Tabela 5 resume os valores adotados para a configuração das variáveis independentes discretas e contínua e seus respectivos valores e tipo de frequência de distribuição.

Tabela 5 - Resumo das configurações de variáveis para realização de análise de sensibilidade.

	Variável independente	Unidade	Valor e distribuição
	Distribuição discreta	Orientação solar	° (graus)
Transmitância térmica das paredes.		W/m ² .K	 P4 P3 P2 P1
Transmitância térmica da cobertura		W/m ² .K	 C2 C1
Fatos solar do vidro		%	 V1 V2 V3 V4
Sombreamento		adimensional	 S1 S2 S3 S4
Distribuição contínua		Ventilação natural	W/m ² .K
	Percentual de abertura na fachada	%	40 60 80
	Densidade de Potência Instalada	W/m ²	8 10 16
	Densidade de Ocupação	pessoas/m ²	0 0,3 0,6

Uma vez determinadas as variáveis para análise de sensibilidade e caracterizadas no modelo de simulação, procede-se com a leitura dos coeficientes de regressão padronizado (SRC), determinação (*adjusted R²*) e probabilidade (*p-value*) resultantes da regressão linear. Os valores de SRC pra cada variável independente são extraídos em formato de gráfico de barras no software DesignBuilder, no qual também estão expressos seus respectivos coeficientes de probabilidade, como ilustra exemplo da Figura 26.

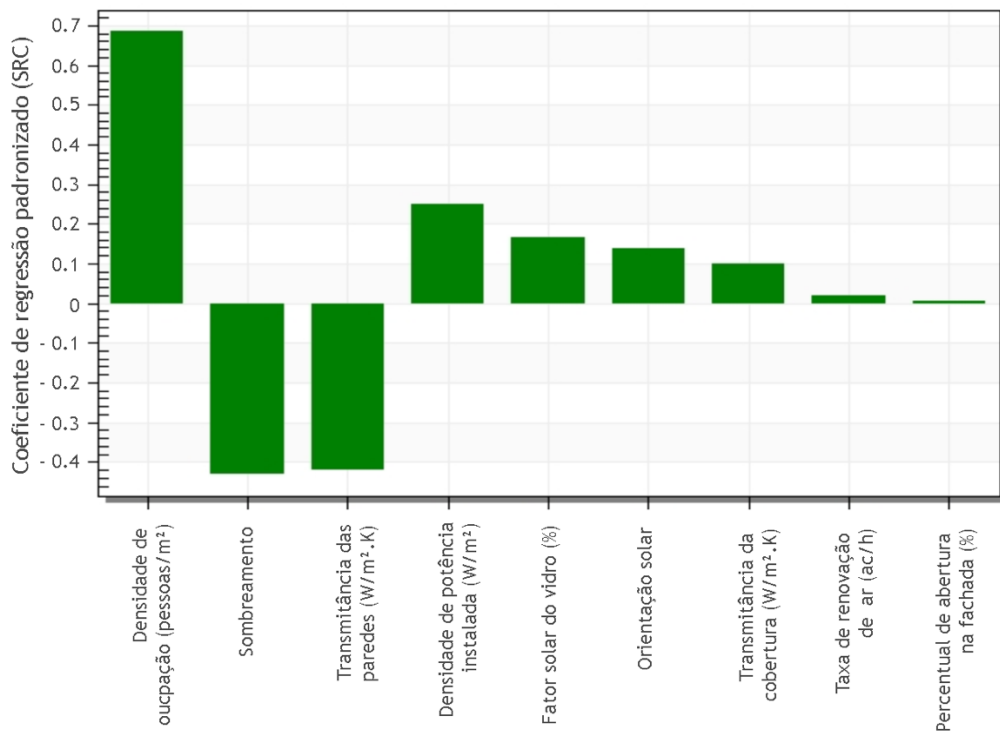


Figura 26 - Exemplo de gráfico de coeficientes de regressão padronizado e probabilidade extraídos no software DesignBuilder.

Além dos valores resultantes citados o software reporta a interpretação estatística da qualidade do modelo em descrever a variável dependente em estudo a partir do coeficiente de determinação. Dessa forma, para cada análise realizada obtém-se um valor indicativo do quanto os dados de saída de simulação são afetados por variações nos parâmetros de entrada.

O índice R^2 mede estatisticamente, em um intervalo entre 0 e 1, o quão próximo o modelo está de representar com exatidão um fenômeno e portanto se a maioria dos dados de entrada essenciais foram identificados. Nessa pesquisa, a partir dos resultados obtidos definidos três intervalos de R^2 , como ilustrado na Figura 28 dentre os quais apenas valores acima de 0,8 apresentam um modelo preciso o suficiente para a descrição da sensibilidade dos dados de entrada sobre o número de horas em desconforto por calor. Valores inferiores a 0,8 indicam que com relação ao dado de saída estudado é exigido um modelo que apresente um número maior de variáveis.

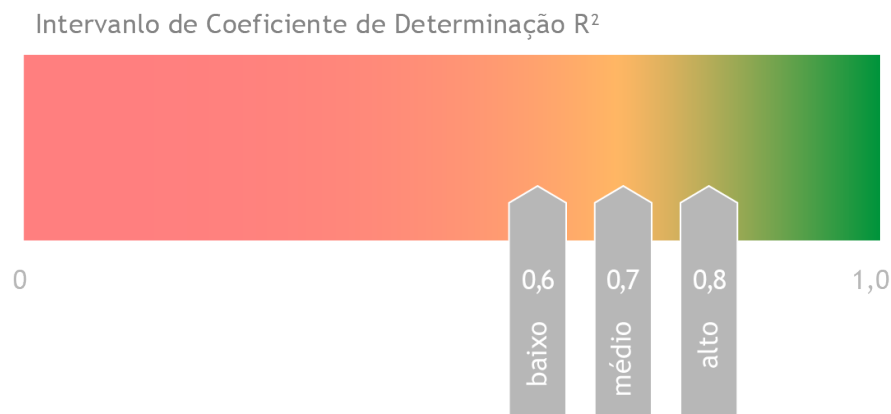


Figura 27 - Escala para análise do coeficiente de determinação. Elaborado pelo autor a partir dos Designbuilder (2019).

Resultados e discussão

O presente capítulo descreve e discute todos os resultados da pesquisa conforme aplicação do método enunciado no capítulo anterior. É dividido em quatro partes: análise climática por meio da carta bioclimática de Givoni comparado ao modelo adaptativo da Ashrae 55, visualização do impacto da ventilação natural sobre os modelos simulados, diagnóstico do percentual de horas ocupadas em conforto e por último verificação dos índices de coeficiente de regressão padronizado para cada modelo e descrição das variáveis de projeto mais influentes sobre o número de horas em desconforto por calor.

3.1. Análise climática dos municípios estudados

As características climáticas das seis cidades escolhidas para avaliação do conforto térmico em um ambiente de sala de aula são representadas por meio das cartas psicrométricas apresentadas nos tópicos a seguir. Em cada uma delas são plotadas as horas obtidas a partir dos arquivos climáticos utilizados e possíveis estratégias de condicionamento passivo conforme proposto por Givoni (apud BOGO et al, 1994; LAMBERTS et al., 2014). Além disso é possível comparar a discrepância entre a zona de conforto proposto por Givoni e o número de horas em conforto segundo modelo de De Dear e Brager.

3.1.1. Brasília - DF

Para o clima de Brasília é possível observar, segundo carta de Givoni (Figura 28 **Error! Reference source not found.**), que o maior número de horas ocupadas, de um total de 4745 horas, encontram-se entre os limites da zona de conforto de Givoni. Já segundo o modelo de De Dear e Brager (Figura 29), considerando uma aceitabilidade de 80%, essa zona apresenta-se mais estreita com um número de 3157 horas em conforto, equivalente a 66%. Para as demais horas que se encontram fora desses intervalos é possível adotar estratégias de condicionamento passivo da edificação como ventilação natural ou resfriamento evaporativo para as horas em desconforto por calor e inércia térmica para aquecimento. Esse último recurso pode estar diretamente associada aos ganhos internos resultantes da densidade de ocupação da sala de aula.

Figura 28 - Carta de psicrométrica com sobreposição do modelo de Givoni para o clima de Brasília. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.

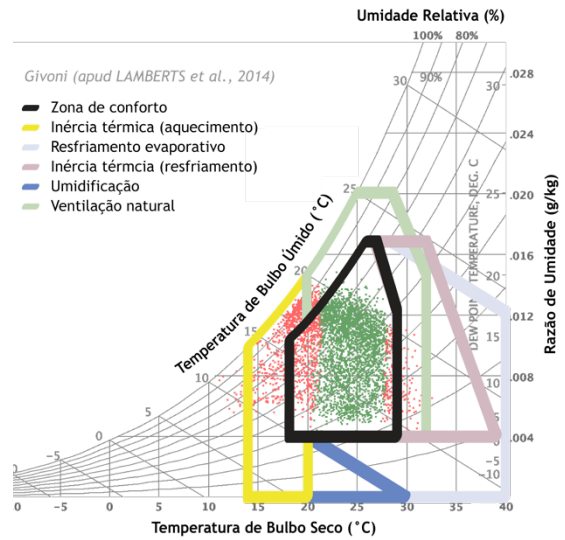
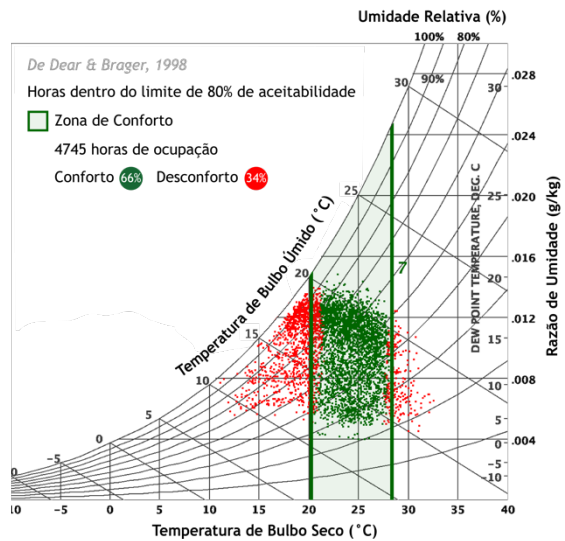


Figura 29 - Carta de psicrométrica com representação da zona de conforto definida segundo modelo de De Dear & Brager para o clima de Brasília. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.



3.1.2. Curitiba - PR

Para o clima de Curitiba observa-se um número relevante de horas em desconforto por frio. Segundo a carta de Givoni (Figura 30), é possível adotar a inércia térmica de aquecimento para que os limites de conforto térmico no interior do ambiente se mantenham mesmo quando a temperatura de bulbo seco estiver entre 14 e 20°C. No entanto estratégias climatização passiva não são suficientes quando a temperatura de bulbo seco for inferior 14°C. Em comparação à zona de conforto de Givoni, o modelo de De Dear apresenta limites mais restritivos, resultando em apenas 1778 horas em conforto adaptativo, equivalente a 37,5% (Figura 31).

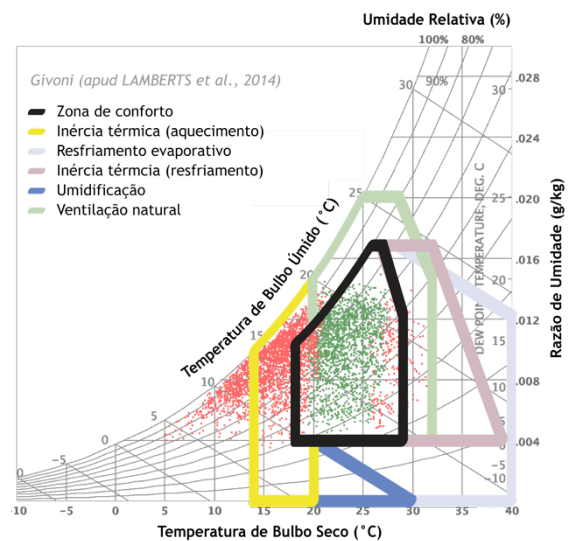


Figura 30 - Carta de psicrométrica com sobreposição do modelo de Givoni para o clima de Curitiba. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.

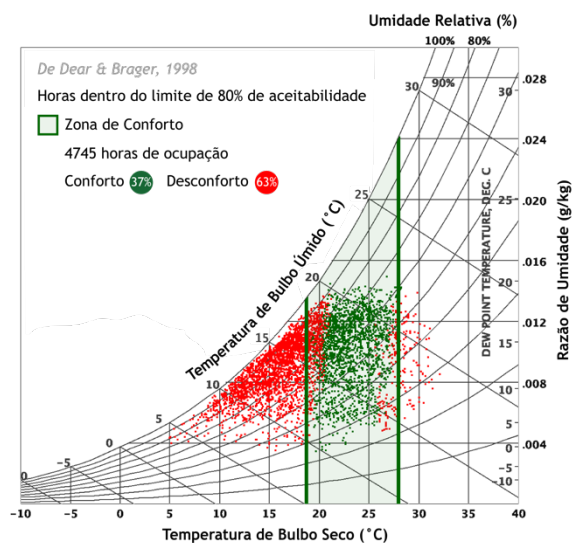


Figura 31 - Carta de psicrométrica com representação da zona de conforto definida segundo modelo de De Dear & Brager para o clima de Curitiba. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.

3.1.3. Cuiabá - MT

No contexto climático de Cuiabá, é possível observar, segundo carta bioclimática de Givoni, um número reduzido de horas que se encontram dentro dos limites da zona de conforto (Figura 32. Nota-se também que a adoção de ventilação natural diurna é suficiente para que haja conforto nas horas em que a umidade do ar for superior a 60 %. O intervalo de conforto de De Dear para esse clima, comparado a Givoni, também se mostra mais restritivo, indicado 2003 horas ocupadas em conforto, equivalente a 42% (Figura 33. Esse dado indica compatibilidade entre os modelos de Givoni e de De Dear e Brager uma vez que esse considera entre os limites de conforto valores superiores de velocidade do ar.

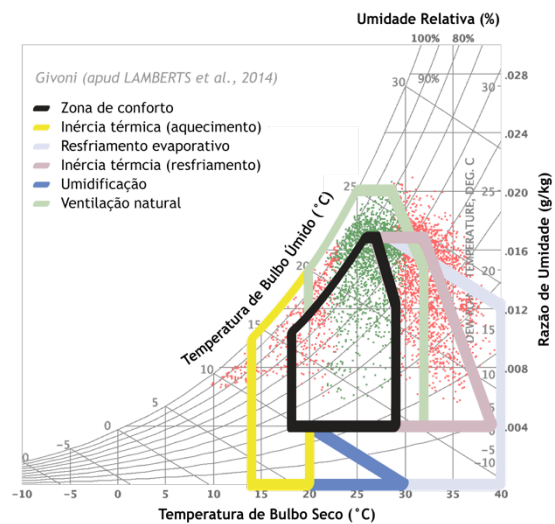


Figura 32 - Carta de psicrométrica com sobreposição do modelo de Givoni para o clima de Cuiabá. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.

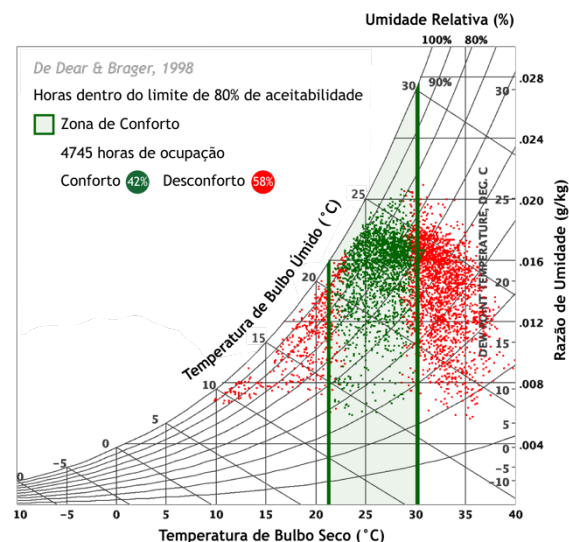


Figura 33 - Carta de psicrométrica com representação da zona de conforto definida segundo modelo de De Dear & Brager para o clima de Cuiabá. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.

As estratégias de resfriamento evaporativo e inércia térmica para resfriamento podem ser adotadas para promoção de conforto térmico quando a umidade do ar externo for inferior a 60 % e a temperatura de bulbo seco superior a 29 °C. Além disso, nota-se a dificuldade de promoção de conforto térmico passivo para algumas horas em que a temperatura de bulbo seco estiver entre 30 e 35 °C associada a um intervalo de umidade do ar entre 40 e 80 %.

3.1.4. Natal - RN

No clima de Natal, observa-se um número relevante de horas com temperatura de bulbo seco no intervalo entre 23 e 29 °C e humidade relativa do ar superior a 60%. Nesse sentido observa-se na carta de Givoni a possibilidade de se adotar estratégias de ventilação para a promoção de conforto térmico nessas horas (Figura 34. A combinação dessa estratégia aos limites de conforto de Givoni é equivalente ao intervalo de conforto adaptativo de De Dear para esse contexto climático, uma vez que já considera valores superiores de velocidade do ar. Nesse sentido o número de horas em conforto representa 71 % do período de ocupação, equivalente a 3389 horas (Figura 35).

A adoção de estratégias de resfriamento evaporativo e inércia térmica de resfriamento são adequadas para promoção de conforto térmico à horas em que umidade relativa do ar externo estiver entre 30 e 60% e a temperatura de bulbo seco for superior a 30 °C.

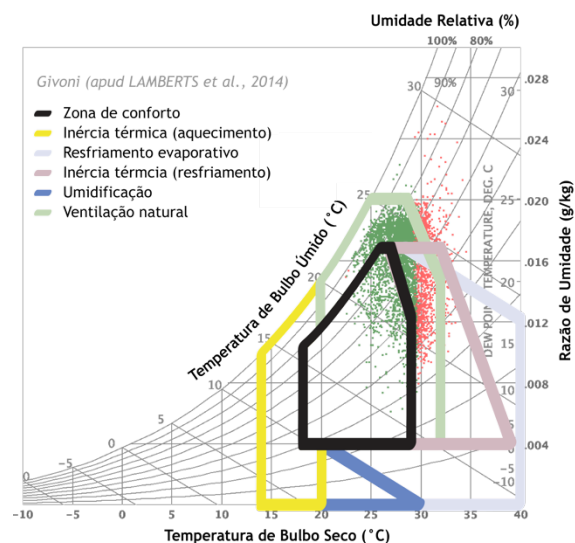


Figura 34 - Carta de psicrométrica com sobreposição do modelo de Givoni para o clima de Natal. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.

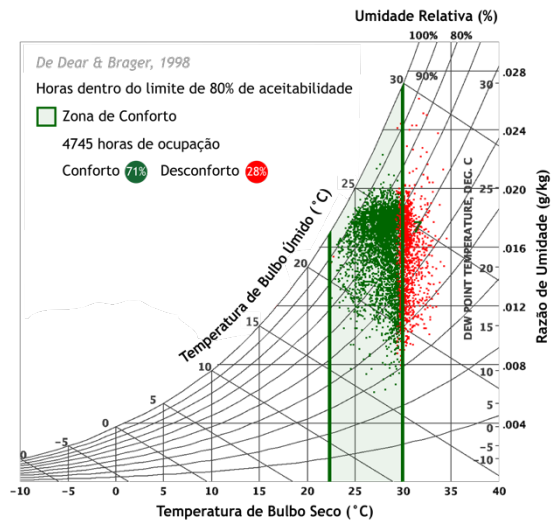


Figura 35 - Carta de psicrométrica com representação da zona de conforto definida segundo modelo de De Dear & Brager para o clima de Natal. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.

3.1.5. Porto Alegre - RS

A carta psicrométrica da cidade de Porto Alegre descreve alta amplitude térmica anual durante o período de ocupação, com intervalo de temperatura de bulbo seco entre 3 e 36°C. Na faixa de temperatura do ar externo entre 18 e 29 °C observa-se um razoável número de horas entre os limites da zona de conforto definido por Givoni (Figura 36). Observa-se também a possibilidade de adoção da ventilação natural diurna como estratégia possível à promoção de conforto térmico quando a umidade relativa do ar for superior a 60 %, inércia térmica para aquecimento quando a temperatura de bulbo seco estiver entre 14 e 20 °C e inércia térmica para resfriamento ou resfriamento evaporativo quando essa temperatura for superior a 29 °C nesse contexto climático.

Segundo o modelo adaptativo de De Dear & Brager, a zona de conforto é definida pelos limites mínimo e máximo de temperatura de bulbo seco de respectivamente 19 e 29,1 °C. Esse intervalo compreende 2018 das horas ocupadas, equivalente a 42% (Figura 37).

Figura 36 - Carta de psicrométrica com sobreposição do modelo de Givoni para o clima de Porto Alegre. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.

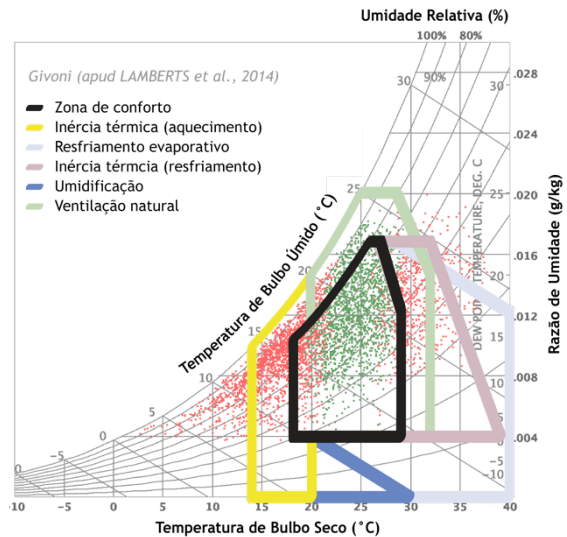
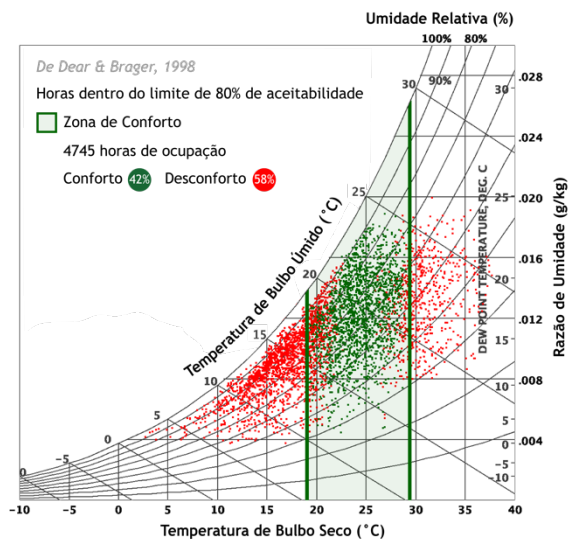


Figura 37 - Carta de psicrométrica com representação da zona de conforto definida segundo modelo de De Dear & Brager para o clima de Porto Alegre. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.



3.1.6. Rio de Janeiro - RJ

A partir da carta psicrométrica para o clima do Rio de Janeiro, é possível observar ao longo do ano a predominância de horas com umidade relativa superior a 50% e temperatura de bulbo seco entre 15 e 35 °C (Figura 38). Para esse contexto climático a estratégia de ventilação natural diurna é eficiente à promoção de conforto térmico durante as horas com umidade relativa acima de 80% e temperatura de bulbo seco entre 22 e 29 °C. As estratégias construtivas de resfriamento passivo e inércia térmica para resfriamento se mostram adequadas para o intervalo de horas em que a temperatura de bulbo seco for superior a 29 °C para essa cidade.

A zona de conforto segundo o modelo de De Dear e Brager abrange 2849 horas, equivalente a 60%, considerando o período de ocupação de 4745 horas (Figura 39). Das horas ocupadas além dos limites de conforto, apenas 9,2 % apresentam desconforto por frio. Todavia observa-se que as cargas internas associadas à densidade de ocupação e potência instalada são suficientes à promoção de conforto térmico nesse período.

Figura 38 - Carta de psicrométrica com sobreposição do modelo de Givoni para o clima do Rio de Janeiro. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.

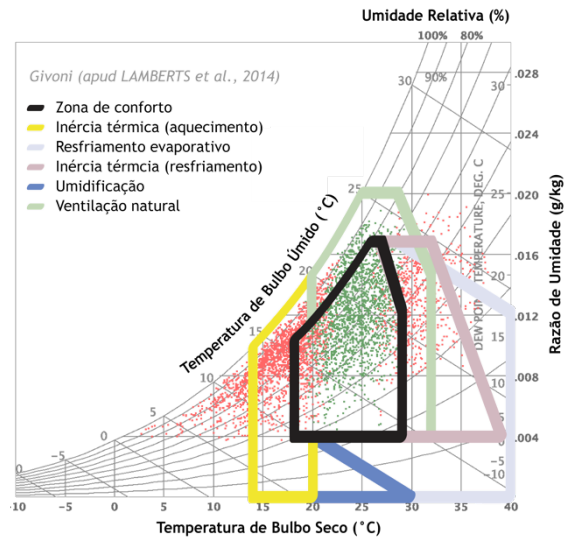
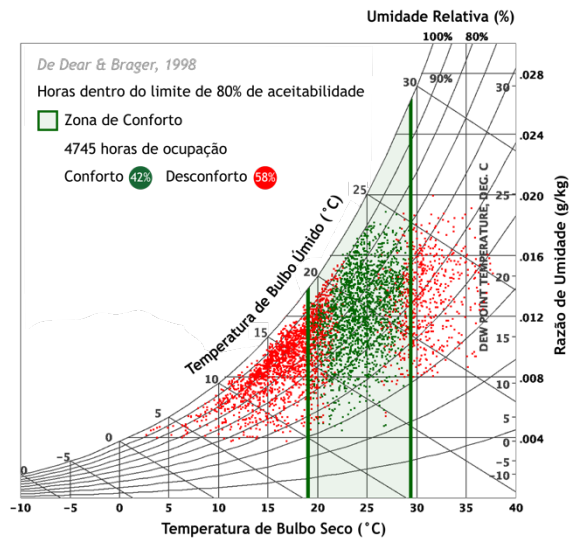


Figura 39 - Carta de psicrométrica com representação da zona de conforto definida segundo modelo de De Dear & Brager para o clima do Rio de Janeiro. Elaborado pelo autor a partir dos dados extraídos do software ClimateConsultant.



3.2. Influência da ventilação natural no período de ocupação

Conforme descrito no item 2.3.3, a abertura das janelas ocorre sempre que a temperatura operativa da zona térmica avaliada for superior à temperatura do ar externo (bulbo seco). Nesse sentido apresenta-se os gráficos 3 a 8 com o objetivo de comparar, em um dia típico de verão, a temperatura operativa da zona considerando as aberturas operáveis ou totalmente fechadas em função da temperatura de bulbo seco.

O dia utilizado para a análise foi escolhido a partir de uma semana típica com temperaturas mais elevadas (typical hot week), extraída no DesignBuilder, a partir do arquivo climático utilizado para cada cidade. Dessa forma, ao observar o perfil de temperatura de bulbo seco para essa semana é possível identificar o dia com a temperatura mais elevada. A Figura 40 exemplifica, a partir de interface do software, o método adotado para definição dos dia utilizados, descritos na Tabela 6.

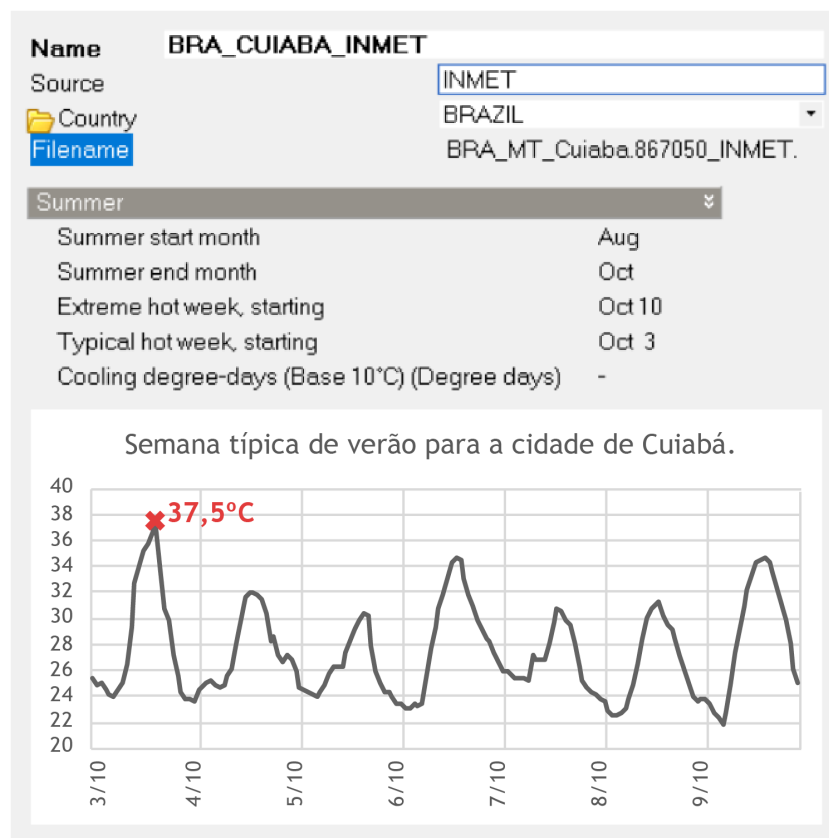


Figura 40 - Definição do dia típico a partir dos dados do arquivo climáticos extraídos no DesignBuilder.

Tabela 6 - Semanas e dias típicos de verão extraídas dos arquivos climáticos para as 6 cidades.

Cidade	Semana típica (typical hot week)	Dia escolhido
Cuiabá	03/10 a 09/10	03/10
Brasília	10/12 a 16/12	13/12
Curitiba	03/02 a 09/02	09/02
Natal	24/02 a 30/12	29/12
Porto Alegre	29/11 a 05/12	03/12
Rio de Janeiro	12/02 a 18/02	13/02

As Figura 56 a 60 apresentam os gráficos de comparação entre as temperaturas operativas da sala de aula considerando as aberturas operáveis durante o período de ocupação ou permanentemente fechadas, nos quais estão representados os perfis de temperatura de bulbo seco e limite de aceitabilidade para desconforto por calor. Também são representadas as rosas dos ventos nas quais é possível observar a direção e velocidade do ar tanto em um média anual, quanto específica ao dia típico.

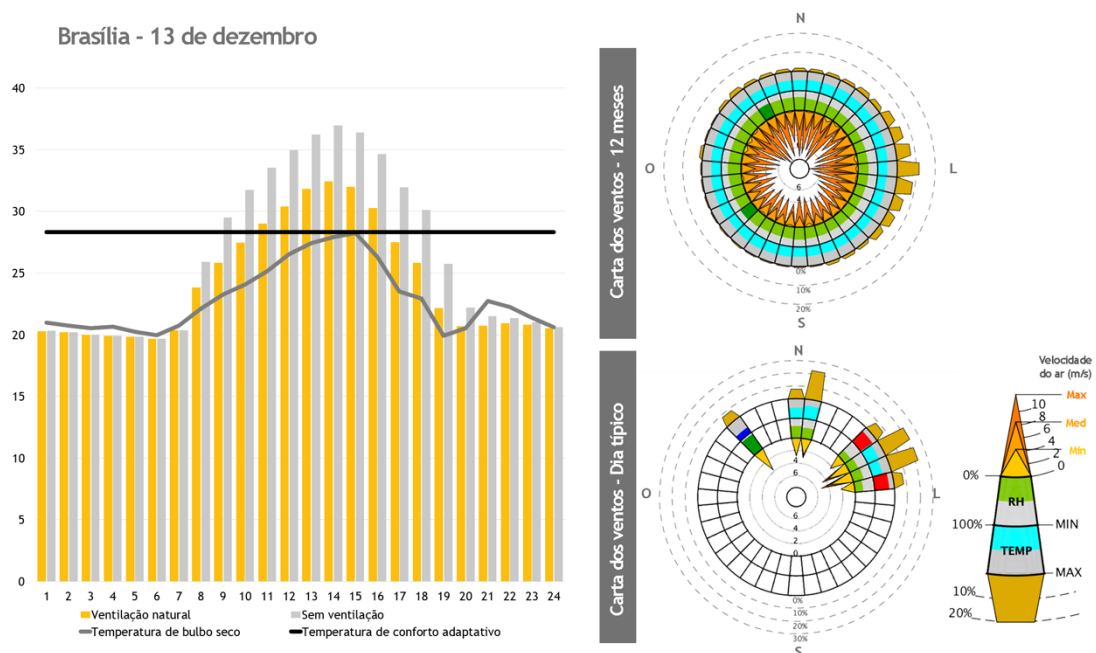


Figura 41 - Comparação da temperatura operativa considerando as aberturas operáveis ou permanentemente fechadas para a cidade de Brasília no dia 13 de dezembro.

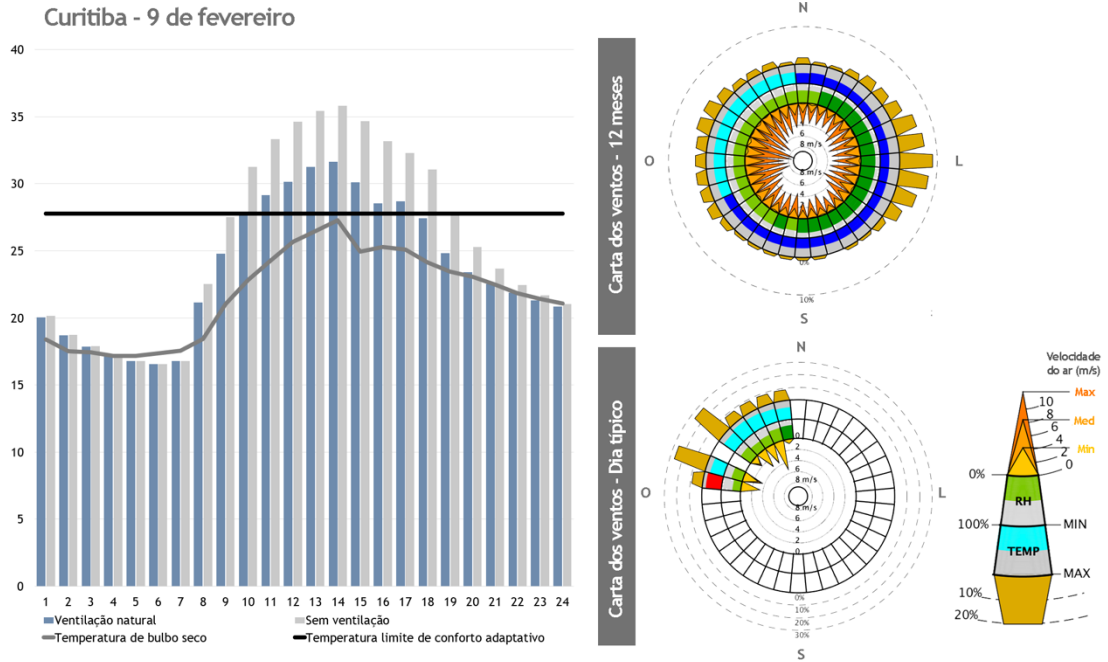


Figura 42 - Comparação da temperatura operativa considerando as aberturas operáveis ou permanentemente fechadas para a cidade de Curitiba no dia 9 de fevereiro.

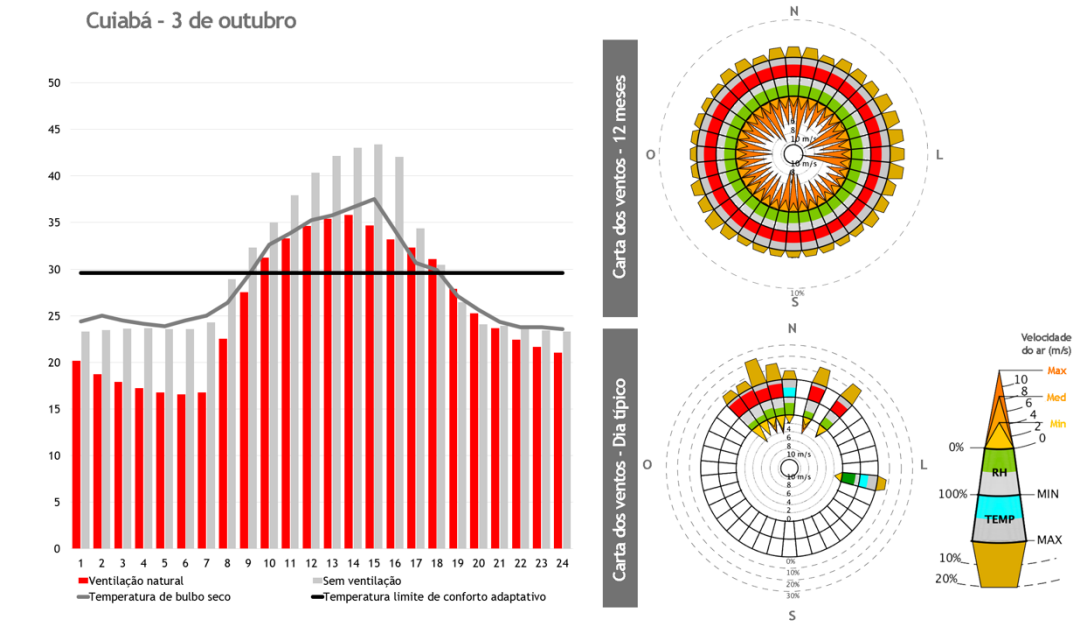


Figura 43 - Comparação da temperatura operativa considerando as aberturas operáveis ou permanentemente fechadas para a cidade de Cuiabá no dia 3 de outubro.

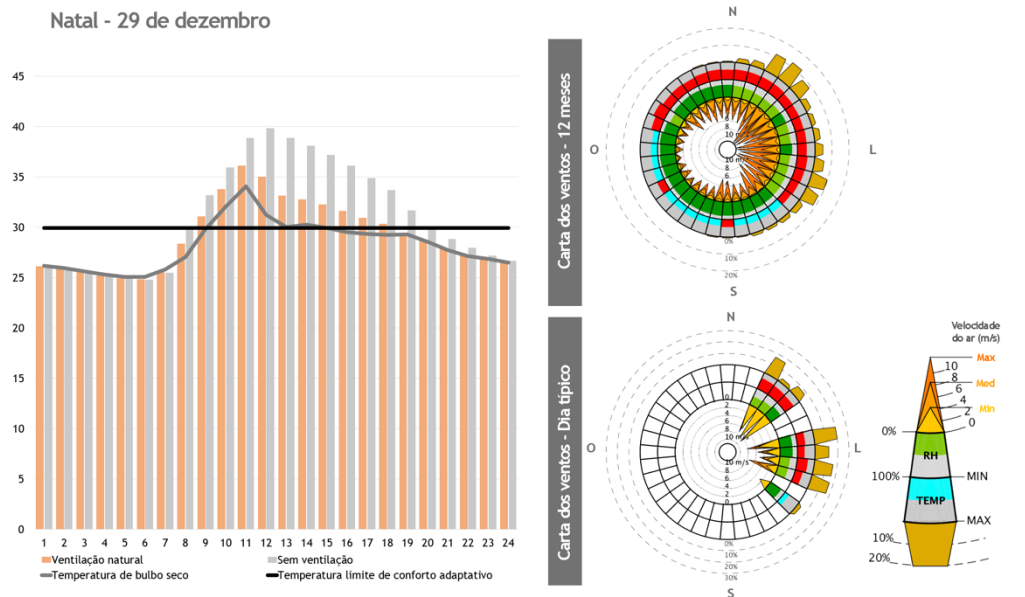


Figura 44 - Comparação da temperatura operativa considerando as aberturas operáveis ou permanentemente fechadas para a cidade de Natal no dia 29 de dezembro.

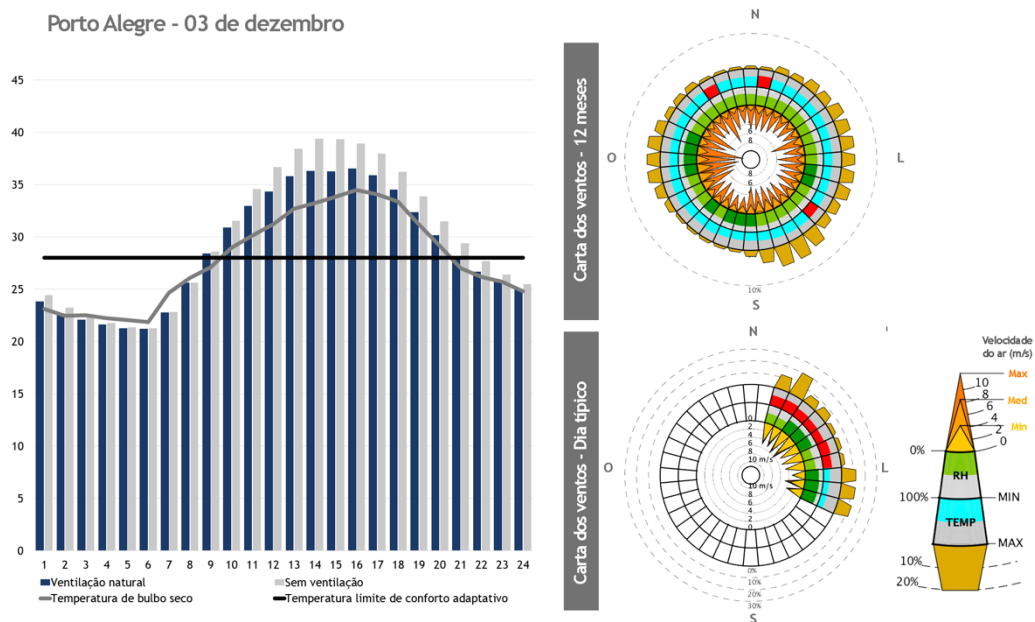


Figura 45 - Comparação da temperatura operativa considerando as aberturas operáveis ou permanentemente fechadas para a cidade de Porto Alegre no dia 03 de dezembro.

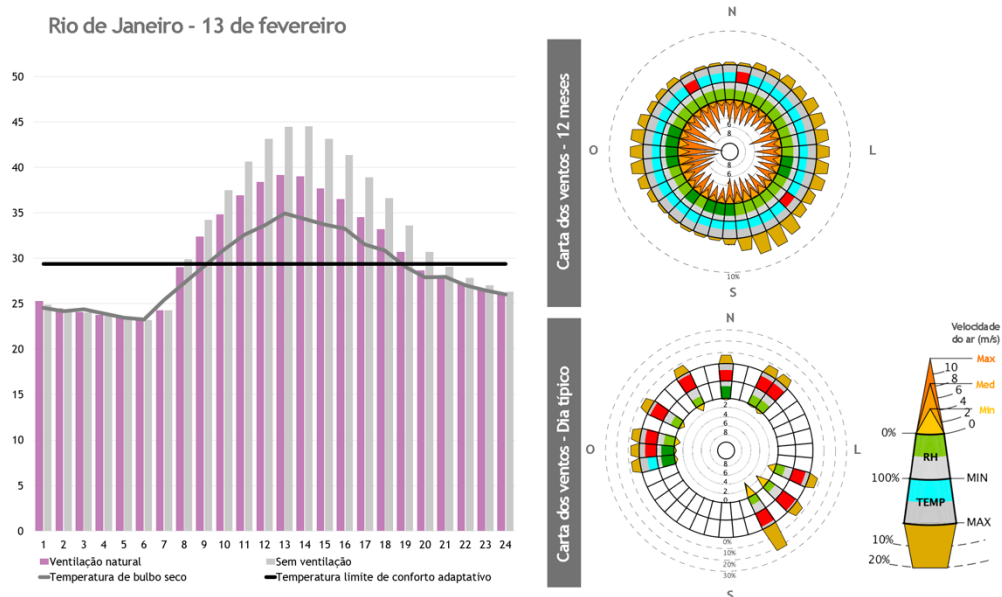


Figura 46 - Comparação da temperatura operativa considerando as aberturas operáveis ou permanentemente fechadas para a cidade de Rio de Janeiro no dia 13 de fevereiro.

Observa-se, em todos os contextos climáticos, valores muito próximos de temperatura operativa, tanto considerando operação das aberturas quanto fixas, durante o período de ocupação, o que corrobora para a sua influência sobre a carga térmica interna do ambiente. Outro dado equivalente refere-se à temperatura limite de conforto térmico adaptativo, superada entre as 9h e 19 h nas cidades do Rio de Janeiro, Porto Alegre e Natal, entre 10 e 17 h nas cidades de Cuiabá e Curitiba e entre 10 e 15 h na cidade de Brasília.

Na cidade de Porto Alegre, a operação das aberturas apresenta baixa influência sobre o conforto térmico da sala de aula no dia avaliado, o qual pode estar diretamente associado à predominância dos ventos em oposição à orientação considerada no modelo de simulação. Nas cidades de Cuiabá e Curitiba a diferença de temperatura entre os dois casos chega a ser de até 5 °C entre as 12 e as 16 horas e nas cidades de Brasília, Natal e Rio de Janeiro de até 4 °C nesse período.

3.3. Diagnóstico de horas ocupadas em conforto

Os itens a seguir descrevem o diagnóstico de horas ocupadas em conforto da sala de aula 4 para cada cidade. Em cada caso apresenta-se um gráfico com os resultados de temperatura operativa para as 8760 horas do ano em função da temperatura operativa do ambiente, nos quais é possível comparar aos limites de aceitabilidade, superior e inferior, de 80 %. A partir desses resultados foram calculados os percentuais de horas ocupadas em conforto ou em desconforto por calor ou frio considerando apenas o período efetivo de ocupação de 3398 horas.

3.3.1. Brasília - DF

Observa-se, no Gráfico 2, médias de temperaturas do ar externo predominante para o clima de Brasília entre 18 e 25°C. No entanto, os resultados de simulação indicam um intervalo de temperatura operativa mais amplo com mínimas de 16 °C e máximas de 34 °C. Nesse sentido, apesar do clima dessa cidade se apresentar mais ameno, apontado pela amplitude da temperatura média diária, apenas 42 % (1440) das horas ocupadas encontram-se entre os limites de conforto, enquanto 40 % (1321) apresentam desconforto por calor e 19 % (637) por frio.

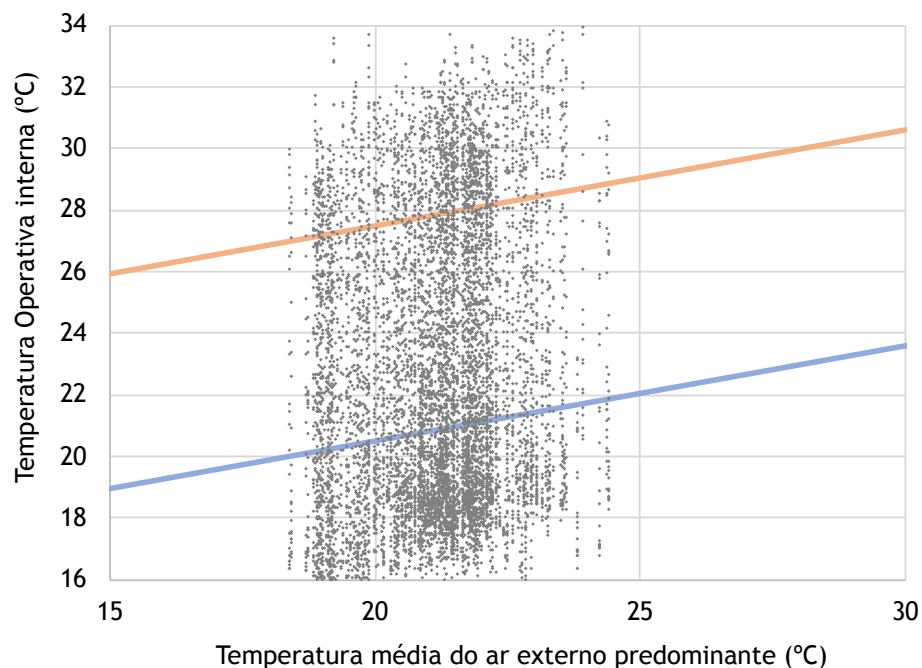


Gráfico 2 - Temperatura operativa representativa das 8760 horas na sala de aula 4 comparada aos limites de conforto térmico adaptativo para o contexto climático de Brasília.

3.3.2. Curitiba - PR

Os resultados obtidos no clima de Curitiba, descritos no Gráfico 3, indicam médias de temperatura do ar externo predominante inferiores a 23 °C, expressando maior possibilidade de adaptação a temperaturas mais baixas. Todavia, em função dessas médias mais baixas, não é possível estender a zona de conforto adaptativo pela variação no índice “clo” ou aumento da velocidade do ar.

Observa-se, ao comparar as temperaturas operativas extraídas da simulação com os limites de aceitabilidade, que apenas 46 % (1587) das horas ocupadas encontram-se dentro da zona de conforto térmico. Entre as horas excedentes 30 % representam desconforto por calor enquanto 22 % (637) desconforto por frio no período de ocupação.

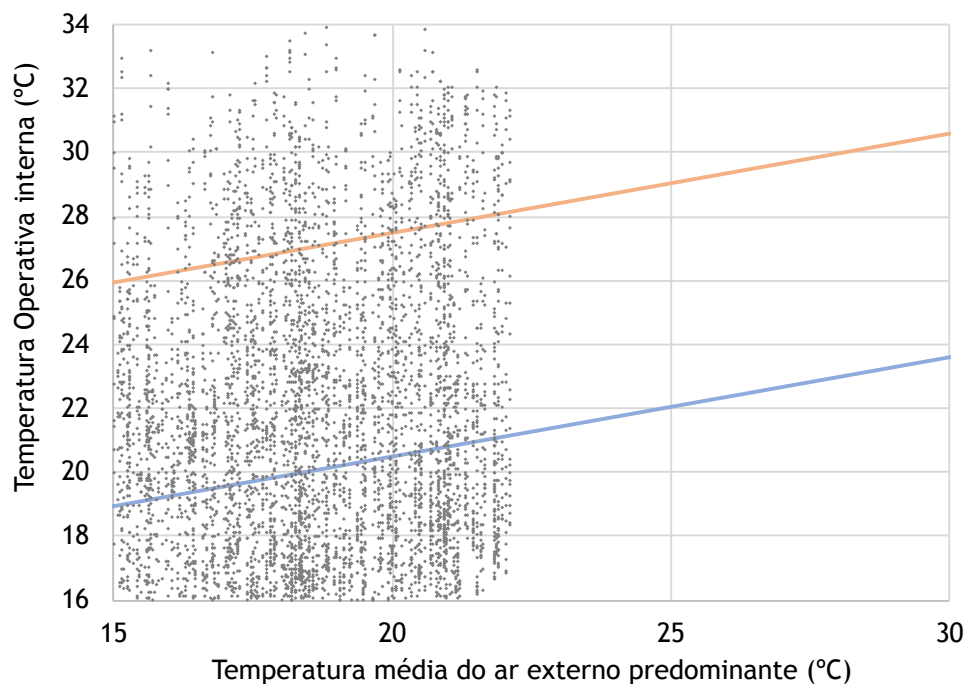


Gráfico 3 - Temperatura operativa representativa das 8760 horas na sala de aula 4 comparadas aos limites de conforto térmico adaptativo para o contexto climático de Curitiba.

3.3.3. Cuiabá - MT

As médias de temperatura do ar externo predominante simuladas para o clima de Cuiabá encontram-se em um intervalo de 18,9 e 30,27 °C. Todavia a amplitude térmica calculada a partir das temperaturas de bulbo seco é de 30,32 °C, com mínima de 9,65 °C e máxima de 39,9 °C.

Segundo o Gráfico 4, 625 das horas ocupadas, que representam um total de 18,39 %, encontram-se dentro do intervalo de conforto adaptativo, enquanto 74,10 % (2518) das horas apresentaram temperaturas superiores aos limites de 26 °C a 31,68 °C caracterizando desconforto por calor. Apenas 7,5 % (255) das horas ocupadas apresentam desconforto por frio, todavia esse valor pode ainda ser reduzido com extensão da zona de conforto considerando variação do índice “clo”.

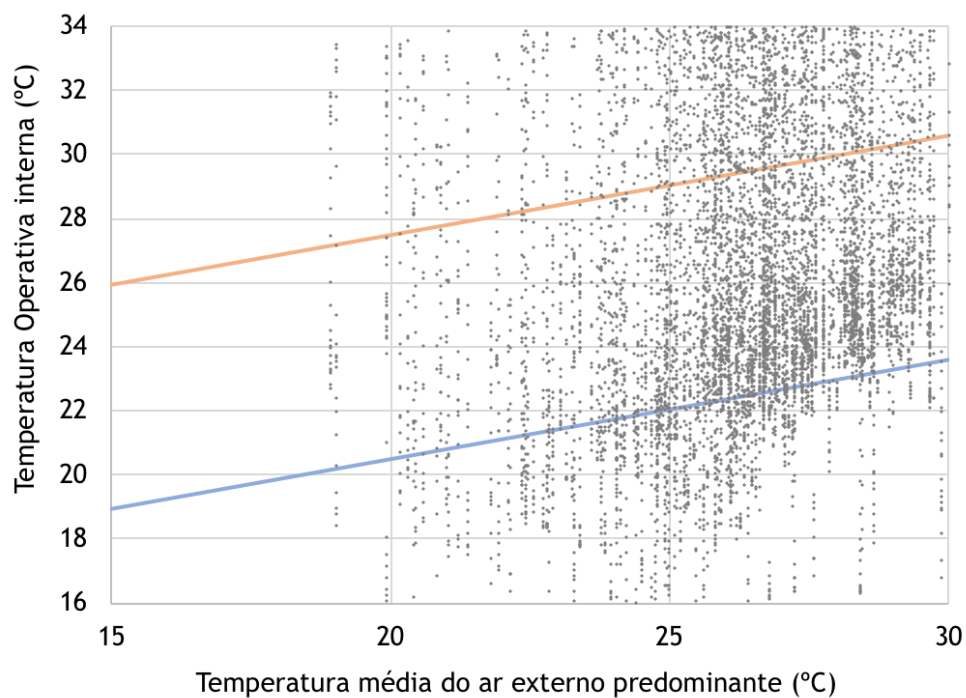


Gráfico 4 - Temperatura operativa representativa das 8760 horas na sala de aula 4 comparadas aos limites de conforto térmico adaptativo para o contexto climático de Cuiabá.

3.3.4. Natal - RN

No clima de Natal a amplitude entre as médias de temperatura do ar externo no clima de é de apenas 3°C, com médias mínima de 25,17 e máxima de 28,04 °C. Esse dado indica condições de conforto térmico razoavelmente constantes ao longo do ano, como se pode observar pela compactidade das horas plotadas no Gráfico 5.

Observa-se também que os limites máximos de aceitabilidade para essa cidade encontram-se entre 28 e 29 °C, porém registram-se temperaturas operativas de até 37,13 °C. O percentual de horas ocupadas em conforto calculadas a partir desses resultados indica que apenas 27,19 % (924) das horas ocupadas encontram-se dentro do intervalo de conforto adaptativo, enquanto 72,45 % (2.462) das horas indicam desconforto por calor e menos de 1% (12) desconforto por frio.

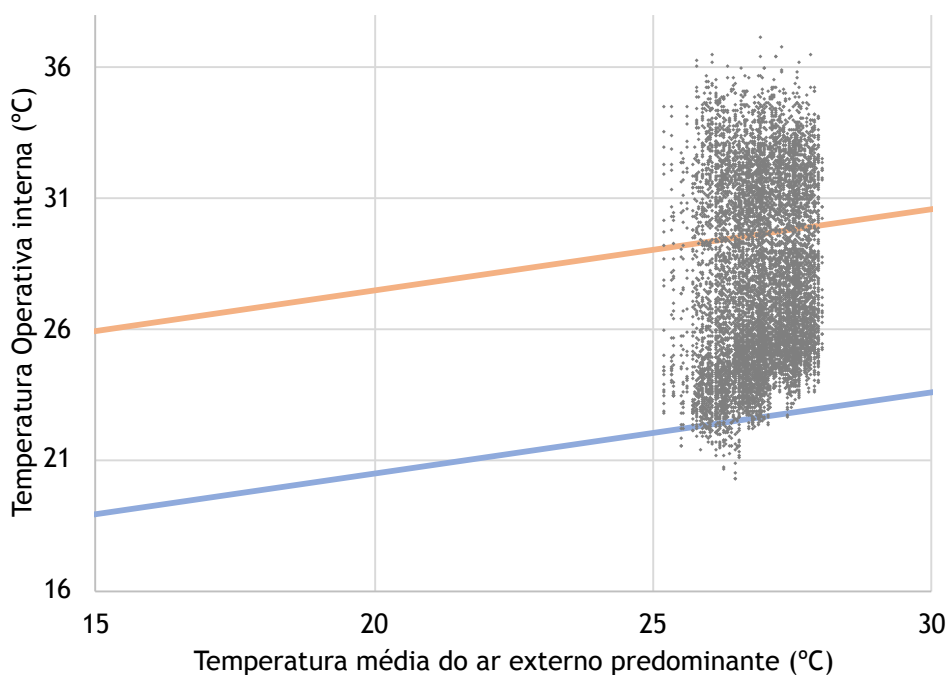


Gráfico 5 - Temperatura operativa representativa das 8760 horas na sala de aula 4 comparadas aos limites de conforto térmico adaptativo para o contexto climático de Natal.

3.3.5. Porto Alegre - RS

Em Porto Alegre as médias de temperatura do ar externo encontradas apontam para um clima mais extremo com amplitude da temperatura média do ar externo predominante de 15 °C , como mostra o Gráfico 6. Os resultados de temperatura operativa da sala de aula simulada apresentam mínimas de 2,45 °C e máximas de 40,61 °C.

Tais resultados indicam que apenas 38,85 % (1320) das horas ocupadas encontram-se dentro da zona de conforto adaptativo para esse clima, enquanto 34,93 % (1.187) apresentam desconforto por calor e 26,22 % (891) desconforto por frio. Considerando expansão da zona de conforto em função do índice “clo” e maiores velocidades do ar, o percentual de horas ocupadas em conforto pode chegar a até 52,18 %.

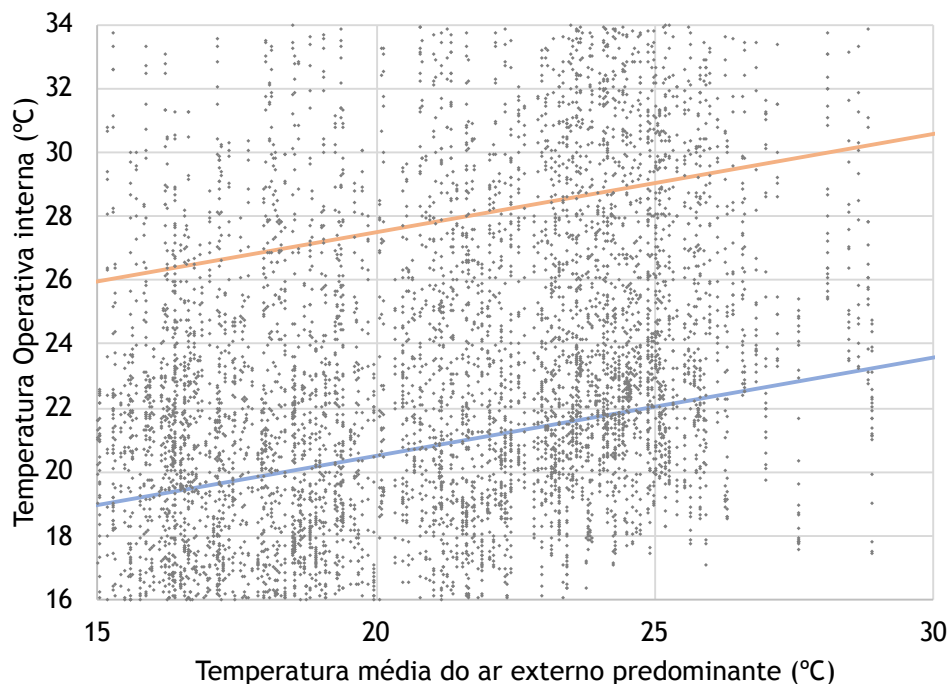


Gráfico 6 - Temperatura operativa representativa das 8760 horas na sala de aula 4 comparadas aos limites de conforto térmico adaptativo para o contexto climático de Porto Alegre.

3.3.6. Rio de Janeiro - RJ

Na cidade de Rio de Janeiro as médias de temperatura do ar externo apresentaram amplitude de 9,88 °C, com máxima e mínima médias de 28 °C e 18 °C respectivamente, como mostra Gráfico 7. É possível observar uma maior amplitude com relação à temperatura operativa simuladas para o ambiente de sala de aula, indicando mais horas com temperaturas muito acima do limite de aceitabilidade para calor.

O percentual de horas ocupadas em conforto calculado aponta para um percentual de 42,20 % de horas dentro dos limites de conforto, considerando a velocidade do ar normativa de 0,3 m/s, enquanto 47,88 % das horas ocupadas apresentam desconforto por calor e 10% desconforto por frio. Todavia pode-se considerar expansão dos limites máximos de aceitabilidade para que até 62,27 % das horas ocupadas encontrem-se entre os limites de conforto em uma condição em que a velocidade média do ar na sala de aula seja de 1,2 m/s.

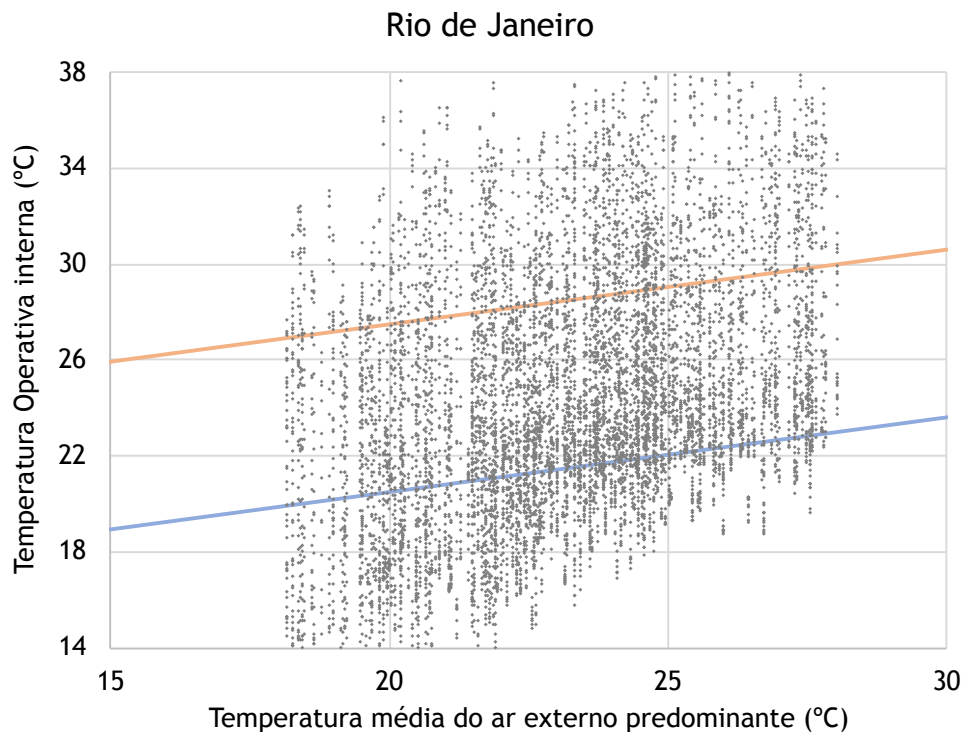


Gráfico 7 - Temperatura operativa representativa das 8760 horas na sala de aula 4 comparadas aos limites de conforto térmico adaptativo para o contexto climático do Rio de Janeiro.

3.3.7. Tabela resumo

Os resultados relacionados a Análise climática dos municípios estudados e Diagnóstico de horas ocupadas em conforto são resumidos na Tabela 7. Nessa tabela são descritos, para cada cidade, a probabilidade de conforto térmico e as estratégias passivas mais adequadas conforme análise das cartas psicrométricas e o diagnóstico de conforto térmico, indicando o número de horas dentro da zona de conforto adaptativo e as horas em desconforto por calor ou frio.

Tabela 7 - Resumo de diagnóstico de conforto térmico para as 6 cidades avaliadas. Elaborado pelo autor.

Cidade	Carta psicrométrica		Diagnóstico de conforto térmico ²		
	Zona de Conforto (horas) ¹	Estratégias de condicionamento passivo	Desconforto por frio	Zona de conforto	Desconforto por calor
Brasília	3157	(B) (D)	19%	42%	39%
Curitiba	1778	(B)	31%	47%	22%
Cuiabá	2003	(A) (C) (D)	8%	18%	74%
Natal	3389	(D)	1%	27%	72%
Porto Alegre	2018	(A) (B) (D)	35%	39%	26%
Rio de Janeiro	2849	(B) (C) (D)	10%	42%	48%

¹ Esse dado considera todos os dias do ano, porém apenas o intervalo de ocupação entre 7 e 19 horas, em um total de 4746 horas.

² Esse dado filtra o período efetivo de ocupação, excluindo os meses de janeiro, dezembro e agosto, em um total de 3398 horas.

Legenda:

- (A) Ventilação natural
 - (B) Inércia térmica (aquecimento)
 - (C) Resfriamento evaporativo
 - (D) Inércia térmica (resfriamento)
 - (E) Umidificação
- Desconforto por calor
 - Zona de conforto
 - Desconforto por frio

3.4. Análise de sensibilidade

A seguir são apresentados os resultados da análise de sensibilidade segundo o coeficiente de regressão padronizados (SRC) para cada uma das variáveis de entrada definidas e os coeficientes de probabilidade (p-value) e determinação (R^2). Esse índice indica o quanto o resultado de uma variável dependente, nesse caso, o número de horas em desconforto por calor, é influenciado pelas variáveis independentes determinadas.

A amostra utilizada é resultante da aplicação do método de Hipercubo Latino e tem sua origem no modelo utilizado para realização do diagnóstico de conforto térmico. Nesse sentido, para cada contexto climático analisado alterou-se somente o arquivo climático do modelo. Nesse sentido, o emprego do Hipercubo latino gerou em média 1440 rodadas de simulação, uma vez que para cada cidade considerou-se um número de 240 combinações entre variáveis.

Os resultados do índice R^2 para cada cidade, a partir do mesmo modelo de simulação, são descritos no Gráfico 8. Observa-se que para as cidades de Brasília, Natal, Rio de Janeiro e Cuiabá o valor resultante de R^2 foi superior a 0,8. Isso significa que, para esses climas, o modelo se apresenta suficiente à descrição das variáveis de entrada mais sensíveis sobre o percentual de horas ocupadas em conforto e, portanto, os coeficientes de regressão padronizados (SRC) são precisos para determinar o grau de influência de cada variável.

Para as cidades de Porto Alegre e Curitiba, os resultados indicaram valores de R^2 considerados baixos, respectivamente de 0,70 e 0,61. Esses valores indicam insuficiência do número de variáveis para uma correta descrição da sensibilidade do modelo perante o POC, representados no gráfico em vermelho. Dessa forma, afirmações conclusivas sobre esses modelos devem ser tomadas com atenção, além da necessidade de consideração de outras variáveis para que se haja maior precisão nos dados de saída.

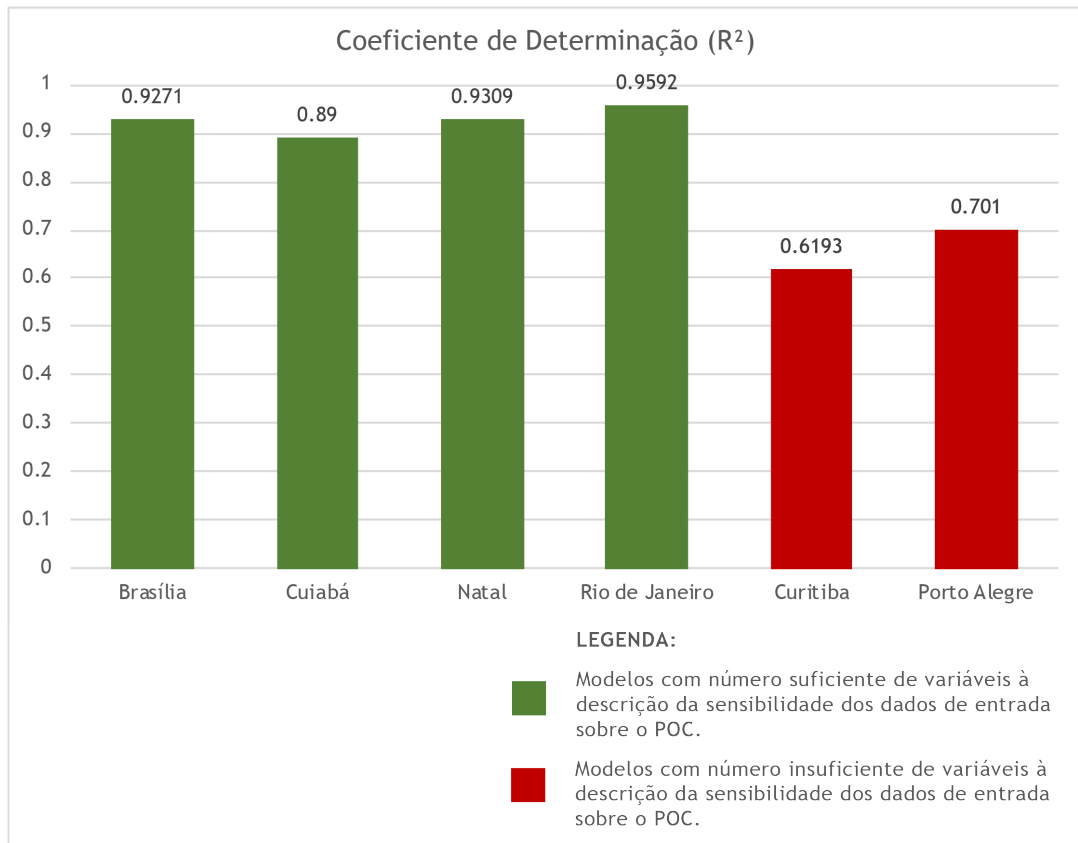


Gráfico 8 - Coeficientes de determinação (R²) resultantes das análises de sensibilidade realizada por cidade.

Esse resultado se mostra coerente uma vez que a análise de sensibilidade considera, para todas as cidades, a variável dependente relativa ao número de horas em desconforto por calor. No entanto, para as cidades de Porto Alegre e Curitiba, como indicado nos itens 3.5.5 e 3.5.6, verifica-se maior percentual de desconforto por frio e, portanto, para esses casos seria necessário a determinação de outro tipo de variável de saída.

O Gráfico 9 ilustra os resultados de índices SRC para cada uma das 9 variáveis de entrada configuradas no modelo de simulação. Seu valor indica a ordem de sensibilidade de cada variável sobre o número de horas em desconforto por calor e representa o quanto a variação nesse dado de entrada reflete em alterações no dado de saída. O sinal identifica a relação com a variável de saída se diretamente ou indiretamente proporcional.

Apenas as variáveis de entrada com valores superiores a 0,2 ou inferiores a -0,2 foram consideradas relevantes à variação no número de horas em desconforto por calor.

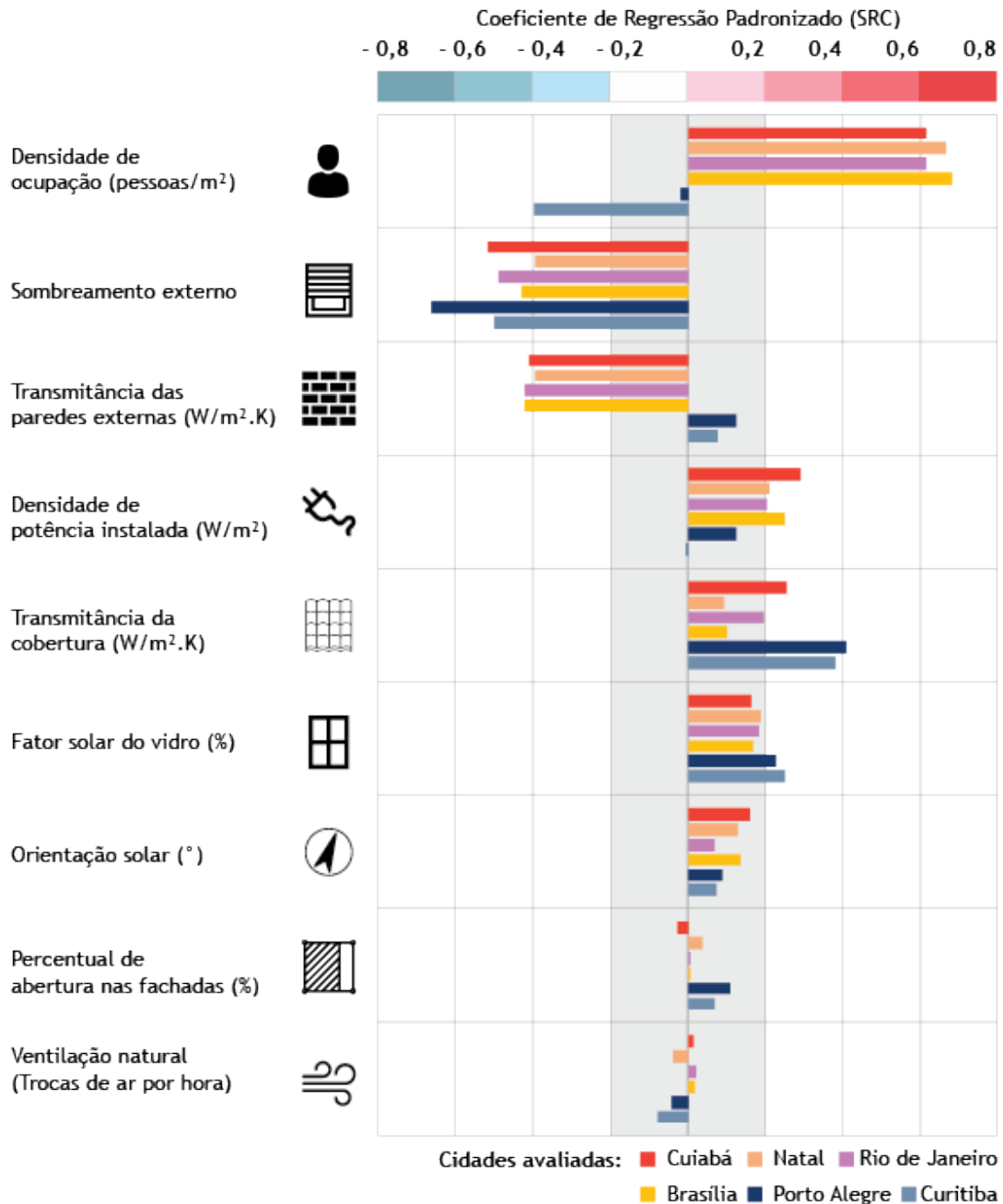











Gráfico 9 - Coeficientes de regressão padronizado (SRC) por variável de entrada do modelo simulado em cada cidade.

Além do coeficiente R^2 , outro índice capaz de indicar o grau de confiança dos resultados da análise de sensibilidade é o coeficiente de probabilidade (*p-value*). Esse coeficiente indica, estatisticamente, o quanto uma variável independente tem efeito sobre a variável dependente. Nesse sentido, as variáveis com coeficiente de probabilidade superior a 0,05 indicam baixo grau de confiança em seus respectivos resultados de regressão. Na Gráfico 10 é possível observar quais das variáveis

apresentaram coeficiente de probabilidade superior a 0,05 para o mesmo modelo simulado em cada cidade.

		Brasília	Curitiba	Cuiabá	Natal	Porto Alegre	Rio de Janeiro
Densidade de ocupação (pessoas/m ²)							
Sombreamento							
Transmitância das paredes externas (W/m ² .K)							
Densidade de potência instalada (W/m ²)							
Transmitância da cobertura (W/m ² .K)			0,053				
Fator solar do vidro (%)			0,056			0,003	
Orientação solar (°)			0,067			0,018	
Percentual de abertura nas fachadas (%)		0,348	0,089	0,116	0,039	0,280	0,079
Ventilação natural (trocas de ar por hora)		0,763	0,909	0,467	0,040	0,646	0,821

p-value = 0,00
 p-value ≤ 0,05

Gráfico 10 - Resultados de coeficiente de probabilidade (p-value) para cada variável.

Nota-se que as variáveis com p-value superior a 0,05 referem-se em geral ao percentual de abertura nas fachadas e ventilação natural, com exceção para o modelo simulado no clima de Natal. Esse dado indica limitações do modelo ao representar o impacto desses parâmetros sobre o número de horas em desconforto por calor. Isso se dá pelo baixo percentual de abertura nas fachadas em relação ao total de área de envoltória considerado. Além disso a pesquisa limitou-se a analisar a ventilação em função de um intervalo de trocas de ar por hora, e portanto podem haver imprecisões associadas à configuração do *Airflow Network*.

3.4.1. Relação entre as variáveis de entrada por cidade

Os tópicos a seguir discutem os resultados encontrados para cada uma das variáveis de entrada e sua relação com o clima das cidades escolhidas para avaliação do conforto térmico em um ambiente de sala de aula. Essas considerações traduzem os coeficientes *SRC* e *p-value* e se aplicam somente em um de análise de sensibilidade global, ou seja, em que todas as variáveis de entradas são verificadas simultaneamente, e diretamente relacionadas às configurações adotadas no modelo de simulação.

a. Densidade de Ocupação

A densidade de ocupação (pessoas/m²) apresenta maior influência sobre a variável de saída em ordem diretamente proporcional nas cidades de Cuiabá, Natal e Rio de Janeiro, enquanto em Curitiba em ordem inversamente proporcional. Esse resultado indica que qualquer alteração nessa variável impacta consideravelmente o percentual de horas ocupadas em conforto.

Considerou-se uma frequência de valores em ordem crescente à definição da curva de distribuição. Nesse sentido, a influência em ordem diretamente proporcional significa que o aumento na densidade de ocupação representa um maior número de horas em desconforto por calor. No caso de Curitiba e Porto Alegre, por representarem climas mais frios, seu aumento implica em possível redução do número de horas em desconforto.

Para a cidade de Porto Alegre, no entanto, o valor resultante de SRC de -0,017 indica irrelevância dessa variável sobre as demais. Dessa maneira, entende-se que para o clima dessa cidade, a variação da densidade de ocupação não representa qualquer impacto sobre o número de horas em desconforto no modelo utilizado.

b. Sombreamento

Como observado nas cartas psicrométricas, em ambas as cidades há um expressivo número de horas com temperaturas de bulbo seco superiores a 20 °C. Esse dado aponta a importância do sombreamento das aberturas para o conforto térmico do usuário. Concomitante a isso, os valores de SRC resultantes, comprovam a

relevância da adoção de dispositivos de sombreamento à obtenção de um maior número de horas ocupadas em conforto.

Em função do número de horas em desconforto, essa variável representa alto grau de impacto em ordem indiretamente proporcional à variável de saída. Entende-se, portanto, que o POC é expressivamente sensível ao tipo de sistema de sombreamento adotado, representando um dos mais importantes elementos de projeto a serem adequadamente dimensionados em função das características de exposição do projeto.

c. Densidade de potência instalada (DPI)

A Densidade de Potência instalada tem impacto em ordem diretamente proporcional sobre o número de horas em desconforto por calor nas cidades de Cuiabá, Brasília, Natal e Rio de Janeiro. Para essas cidades quanto maior o DPI considerado, maior o número de horas em desconforto em seu período de operação. Pelo contrário, nas cidades de Porto Alegre e Curitiba, a variância nos valores de DPI não inferem em alterações significativas na variável de saída, sendo possível portanto considerar intervalos mais flexíveis.

d. Transmitância das paredes (U-value)

O valor de transmitância térmica, disposto nas curvas de distribuição do menor para o maior, representa a influência da envoltória sobre o POC. Segundo os resultados de SRC para as cidades de Rio de Janeiro, Brasília, Cuiabá e Natal, a transmitância das paredes tem relação inversamente proporcional ao número de horas em desconforto. Portanto, para essas cidades a redução da resistência térmica seria favorável à um aumento do POC, até um limite de $2,3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Para as cidades de Porto Alegre e Curitiba, os resultados indicam que quanto menor a transmitância térmica, maior influência sobre o conforto térmico da sala de aula avaliada. Sendo assim dentre os tipos de parede considerados à análise de sensibilidade, valores próximos a $0,8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ mostram-se mais adequados a esses contextos climáticos.

e. Transmitância da cobertura (U-value)

Com relação a transmitância das coberturas, essa relação se inverte e as cidades que mais sofrem influência dessa variável sobre o número de horas em desconforto por calor são Curitiba, Porto Alegre e Cuiabá. Os altos valores de SRC na ordem diretamente proporcional à variável de saída indicam que as pequenas variações com o objetivo de aumentar os valores de transmitância térmica contribuem para que um maior número de horas represente desconforto térmico ao usuário. Nesse sentido para ambos os contextos climáticos a adoção de cobertura com transmitância térmica próxima a valores entre 0,8 e 06 W/m².K diretamente associado à redução da transmissão de calor no interior do ambiente.

f. Fator solar do vidro

Com relação ao fator solar dos vidros, observou-se que apenas para as cidades de Porto Alegre e Curitiba sua variação pode ser considerada relevante ao número de horas em desconforto para o modelo simulado. O valor do coeficiente de regressão para essas cidades encontra-se entre 0,2 e 0,4, indicando que o acréscimo dessa variável tem impacto diretamente proporcional sobre o número de horas em desconforto por calor, porém em uma escala inferior às demais. Já para as demais cidades é possível desconsiderar o efeito do fator solar, determinando um valor fixo economicamente mais viável.

g. Orientação solar, percentual de abertura nas fachadas e ventilação natural

Dentre as 9 variáveis de entrada independentes para realização da análise de sensibilidade, três delas apresentam SRC em um intervalo entre -0,2 e 0,2, são elas: orientação solar, percentual de abertura nas fachadas e a taxa de renovação de ar por hora. Nesse sentido, para o modelo simulado o acréscimo ou redução no valor desses parâmetros pouco influem sobre o percentual de horas ocupadas em conforto.

A baixa influência dessas variáveis está diretamente associada à relação entre volume da sala de aula e área de envoltória, bem como ao reduzido percentual de abertura da fachada. A aplicação do método em padrões de projeto com volume

similar, porém com outras características de exposição seria necessária para melhor investigação desses parâmetros.

3.5. Diagrama síntese dos resultados

A partir dos resultados obtidos e sua relação com os ciclos de modelagem apresentados pela ASHRAE 209, propõe-se um padrão de representação no qual seja possível compreender de forma mais clara e objetiva as características dimensionais e percentual de horas ocupadas em conforto de um modelo representativo de projeto. Além disso, tendo em vista os intervalos de variância dos dados de entrada adotados nessa pesquisa, verificar seu grau de impacto orientando o desenvolvimento do projeto, nas fases de anteprojeto, em que sejam possíveis alterações referentes à especificação de materiais, à área de aberturas e potência instalada.

O diagrama proposto representa a síntese do método empregado para o desenvolvimento da pesquisa aplicado em um ambiente escolar a partir de um projeto padrão específico. No entanto, uma vez que o cálculo do percentual de horas em conforto depende sobretudo das características dimensionais do modelo e hipótese de conforto adotada, é possível desenvolvê-lo a outras tipologias. Nesse sentido é necessário que sejam consideradas as variáveis independentes necessárias para a realização de análise de sensibilidade para cada caso.

Sua diagramação, como mostra a Figura 47, é dividida em três partes: Geometria do projeto, variáveis de desempenho e Influência das variáveis sobre o POC. As duas primeiras partes representam a síntese de todas as características do projeto essenciais à modelagem termoenergética e diagnóstico do conforto térmico e o modelo de simulação. A terceira parte apresenta índice que classifica, em escala, o nível de influência de cada variável sobre o percentual de horas ocupadas em conforto.

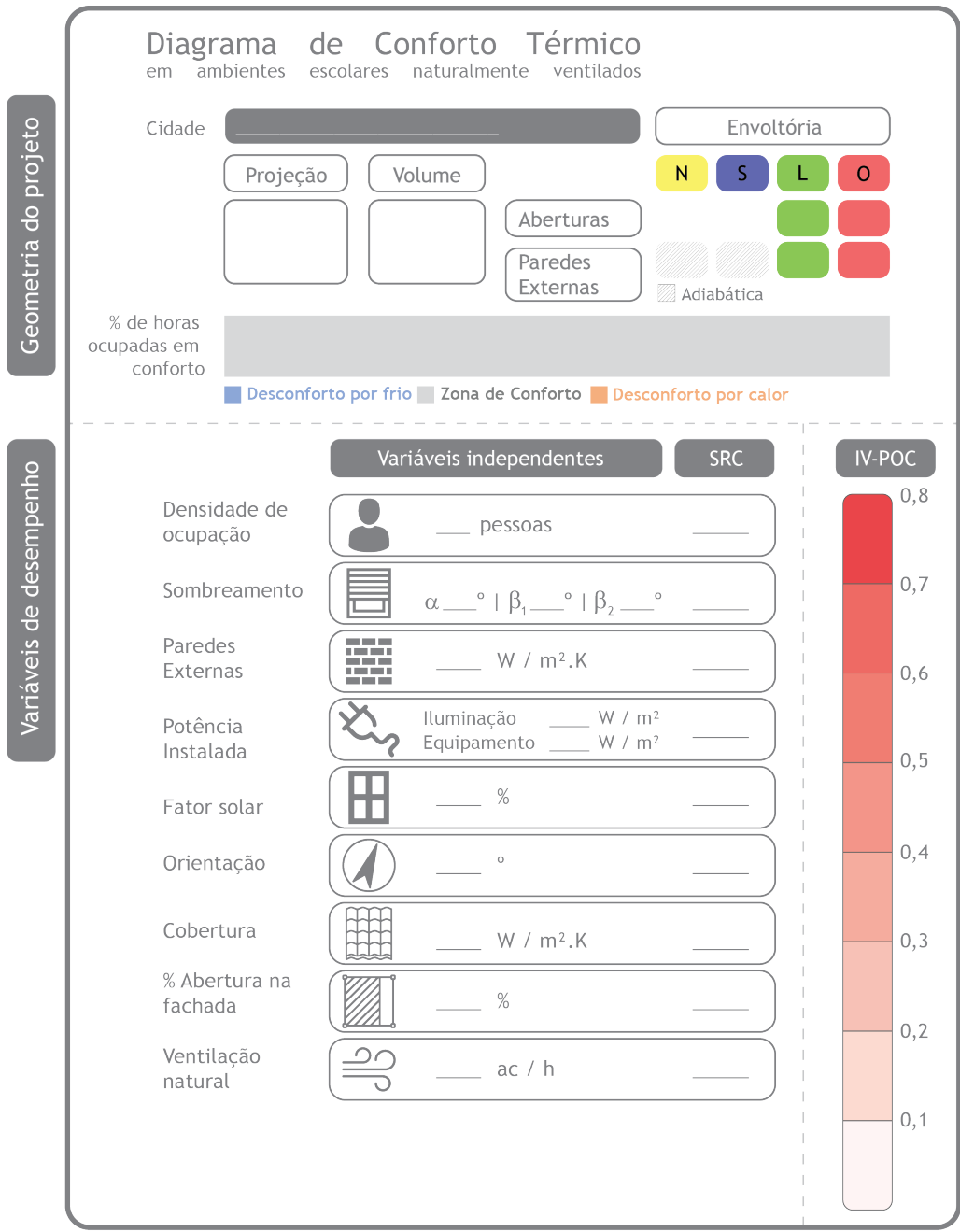


Figura 47 - Diagrama de conforto térmico em ambientes escolares naturalmente ventilados.

A Figura 48 ilustra a relação entre os dados apresentados no diagrama referentes às características do projeto padrão e a aplicação dos procedimentos metodológicos. Nessa parte indica-se a cidade de implantação, pressupondo a análise do clima e sítio, seguido das as características dimensionais do modelo de simulação e o percentual de horas ocupadas em conforto e em desconforto por calor ou frio. As características de exposição são dadas pela geometria do modelo, definida a partir da área de projeção, relacionada à cobertura do edifício, sistemas de vedação verticais ou superfícies adiabáticas, e seu volume.

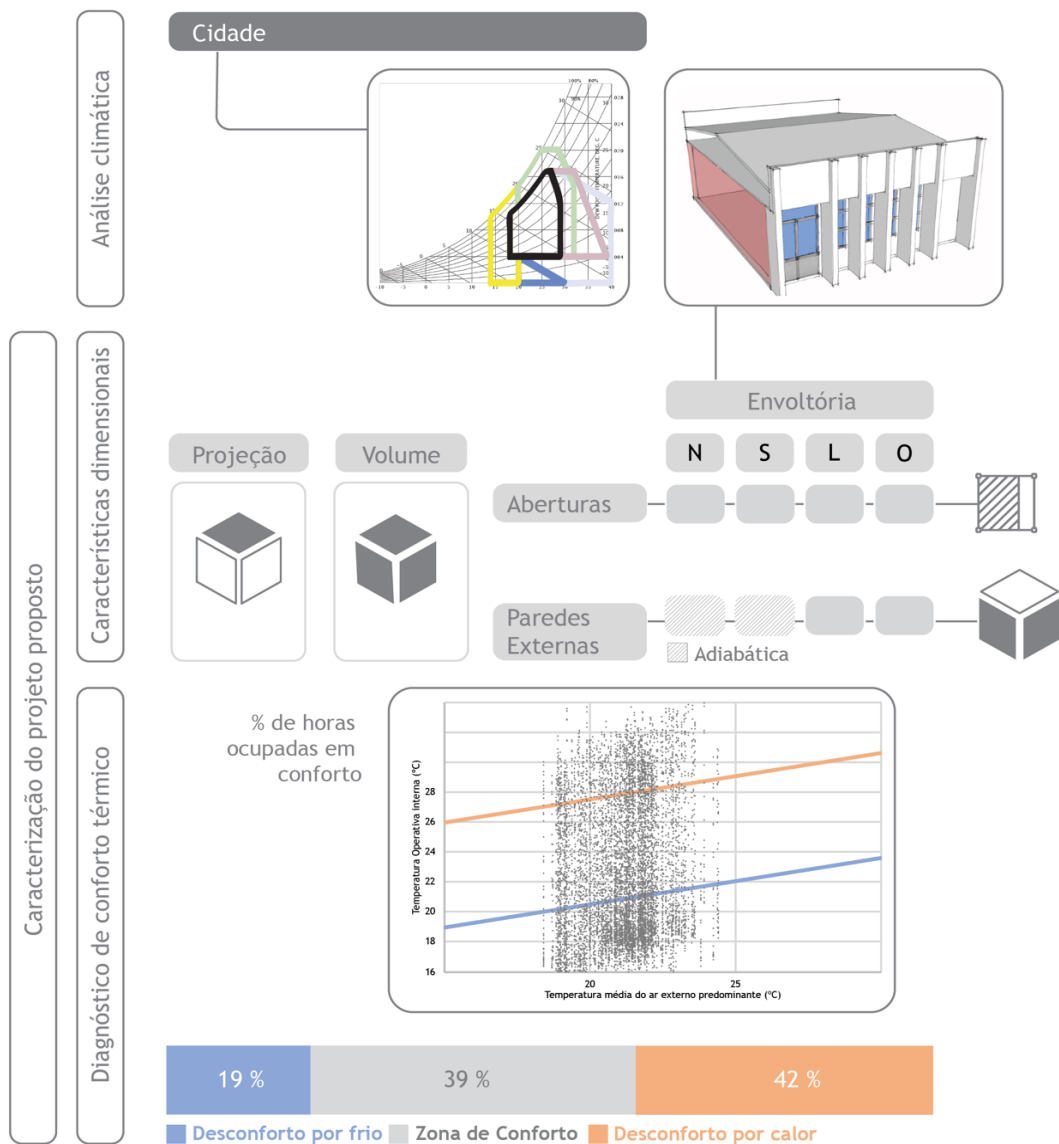


Figura 48 - Síntese dos resultados relacionados à análise do clima e caracterização do projeto utilizado para a simulação.

A segunda parte do diagrama, ilustrada na Figura 49, descreve os valores utilizados para a configuração das variáveis de entrada no modelo de simulação, a partir dos quais são determinados os intervalos contínuos e discretos e suas respectivas curvas de distribuição. Essas variáveis são distribuídas em um intervalo de 0,0 a 0,8 em função de seu grau de influência sobre o percentual de horas ocupadas em conforto. Esse indicador é resultante da sobreposição entre os intervalos de SRC diretamente e indiretamente proporcionais à variável de saída.

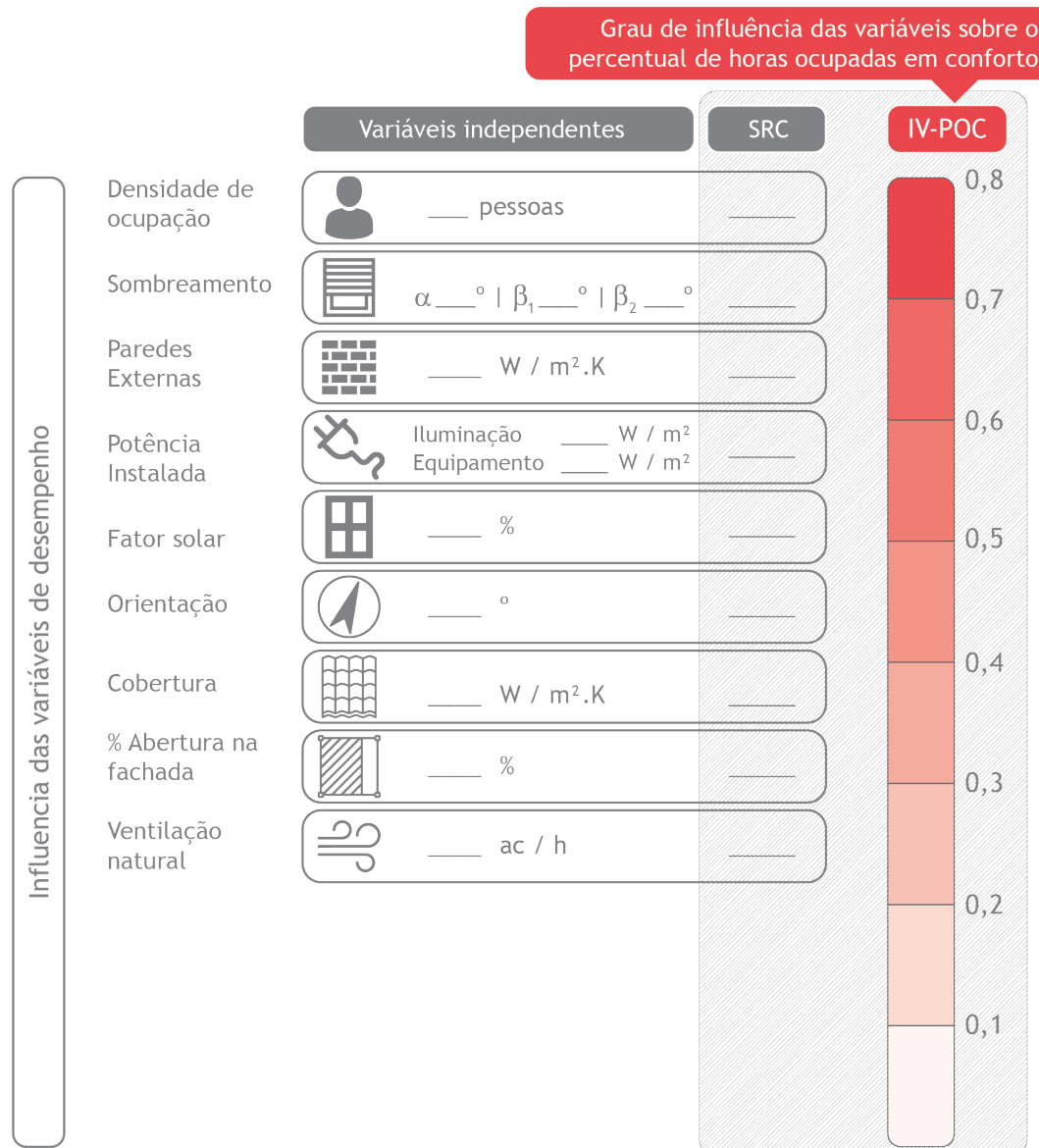


Figura 49 - Descrição das variáveis de entrada e classificação em função de seu grau de influência sobre o percentual de horas ocupadas em conforto.

A seguir são apresentados os diagramas de conforto térmico com a síntese dos resultados relativos ao diagnóstico do percentual de horas ocupadas e análise de sensibilidade do modelo simulado para cada cidade.

3.5.1. Brasília - DF

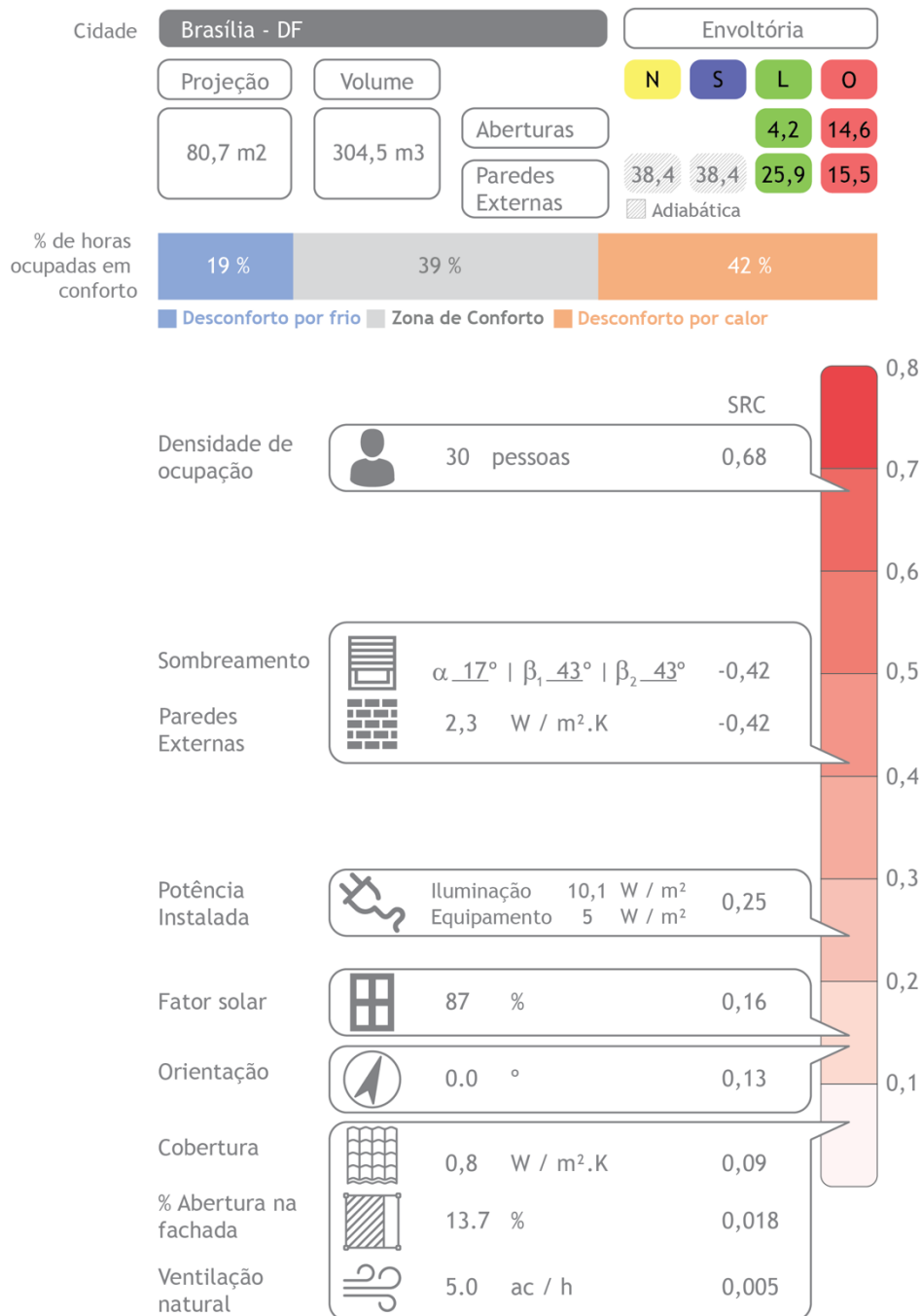


Figura 50 - Diagrama de conforto térmico para o projeto padrão no contexto climático de Brasília.

3.5.2. Curitiba - PR

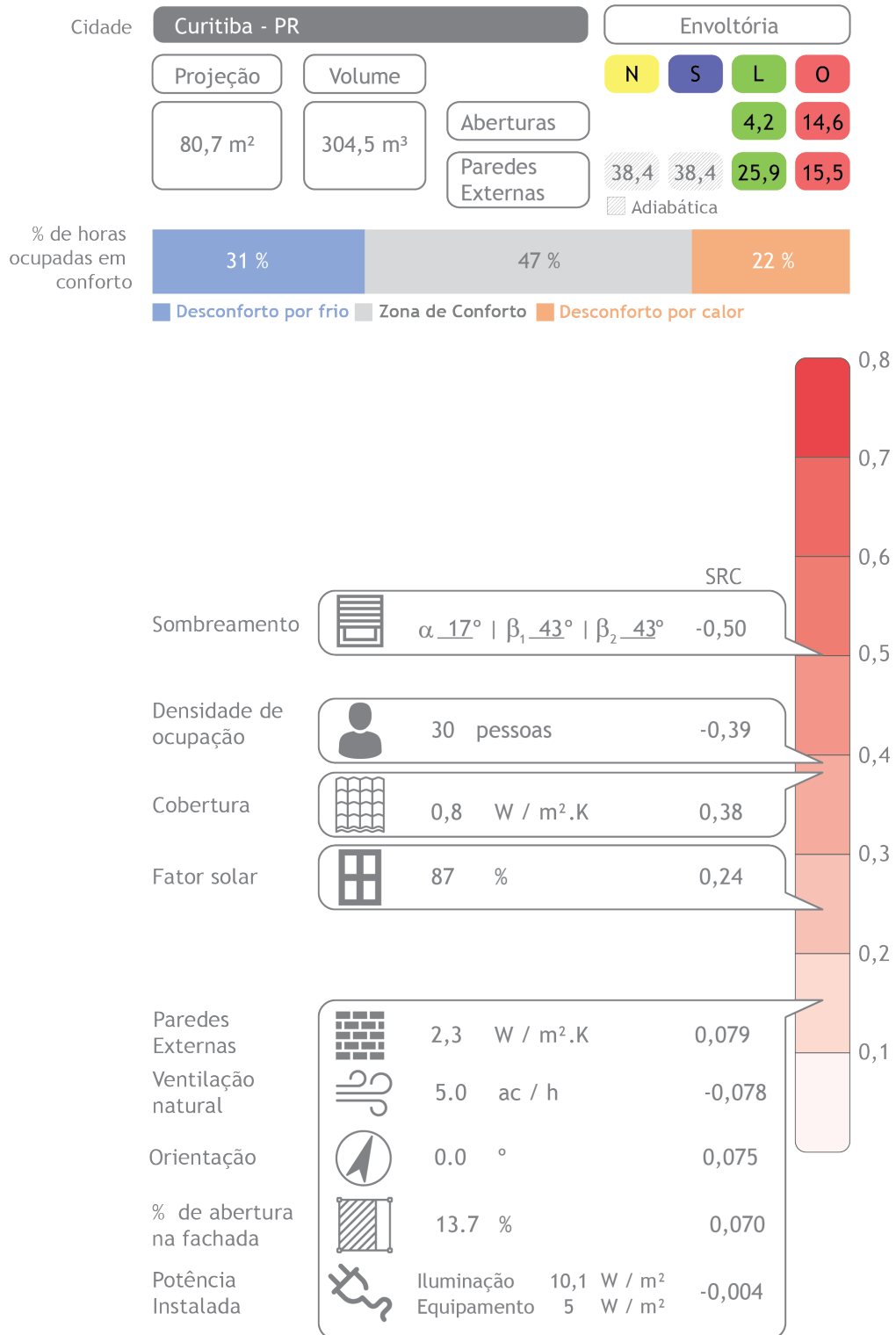


Figura 51 - Diagrama de conforto térmico para o projeto padrão no contexto climático de Curitiba.

3.5.3. Cuiabá - MT

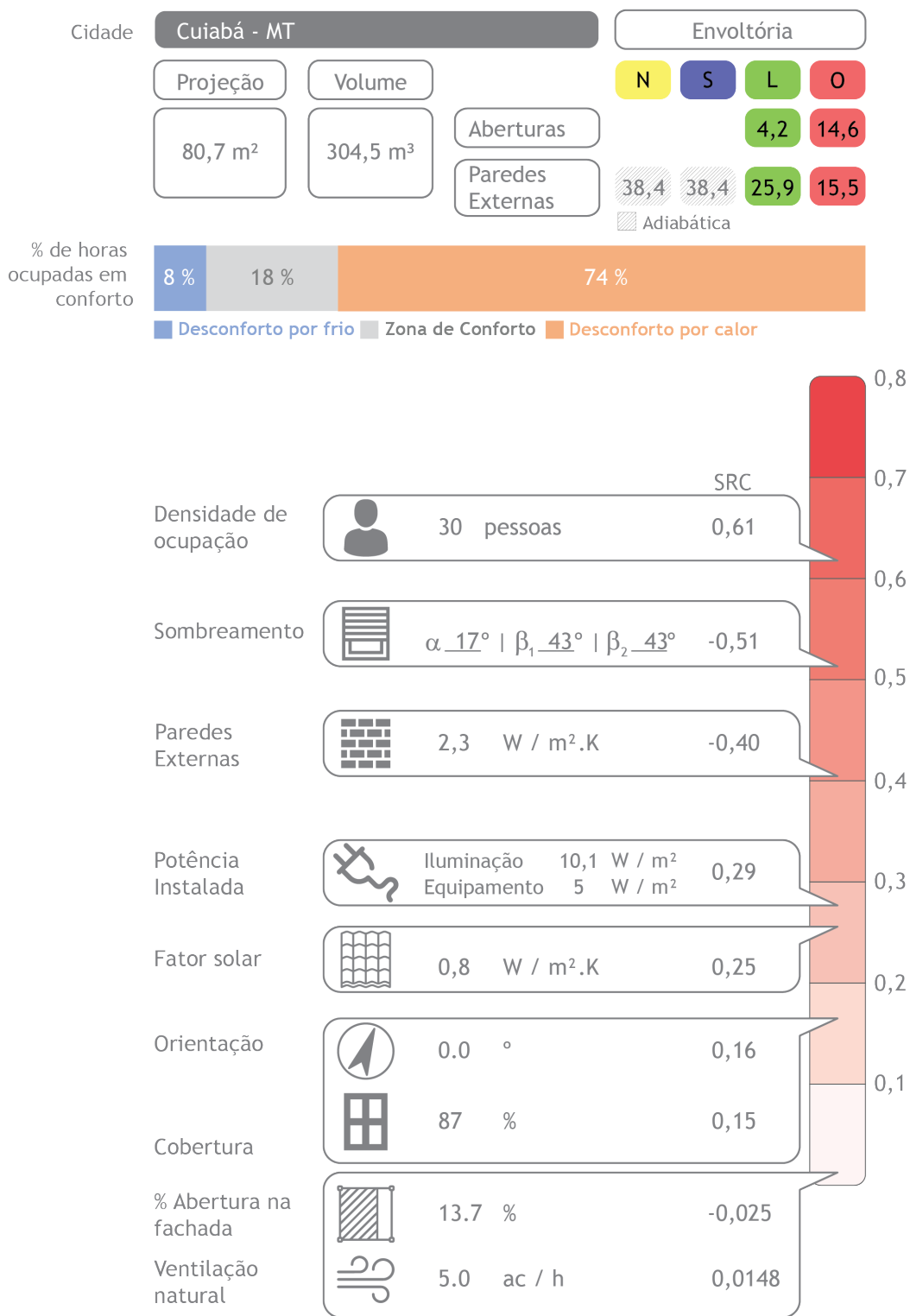


Figura 52 - Diagrama de conforto térmico para o projeto padrão no contexto climático de Cuiabá.

3.5.4. Natal - RN

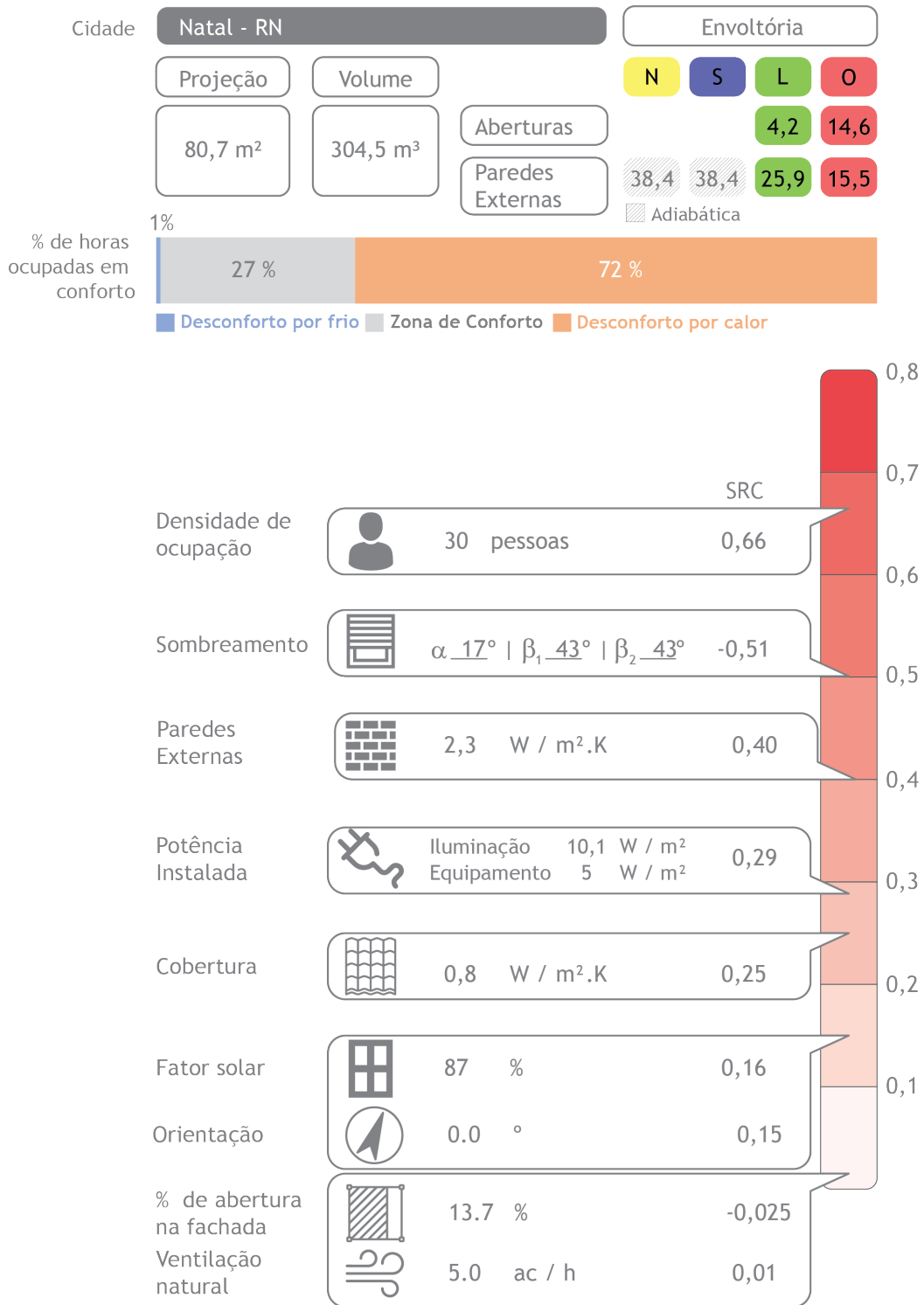


Figura 53 - Diagrama de conforto térmico para o projeto padrão no contexto climático de Natal.

3.5.5. Porto Alegre - RS

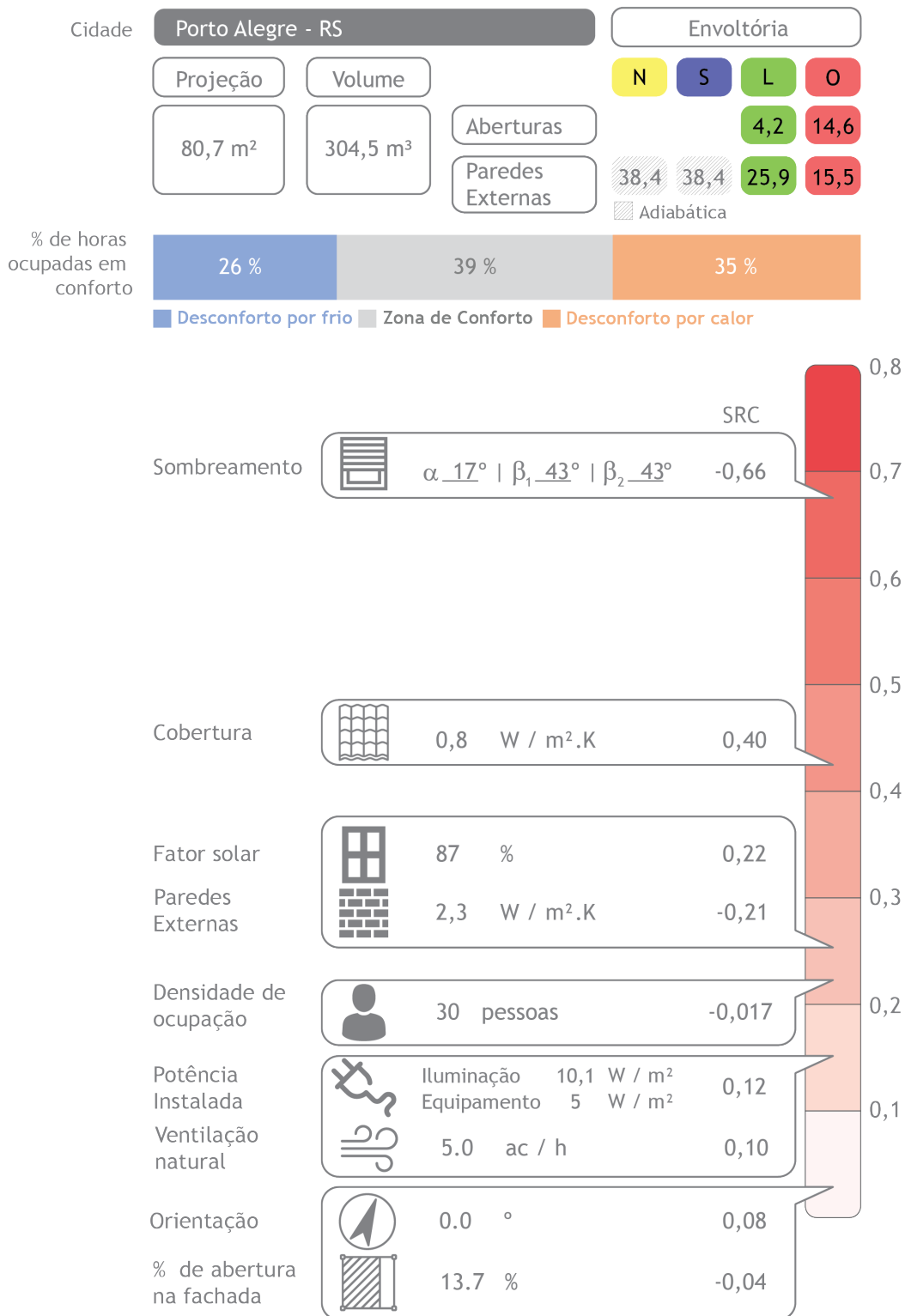


Figura 54 - Diagrama de conforto térmico para o projeto padrão no contexto climático de Porto Alegre.

3.5.6. Rio de Janeiro - RJ

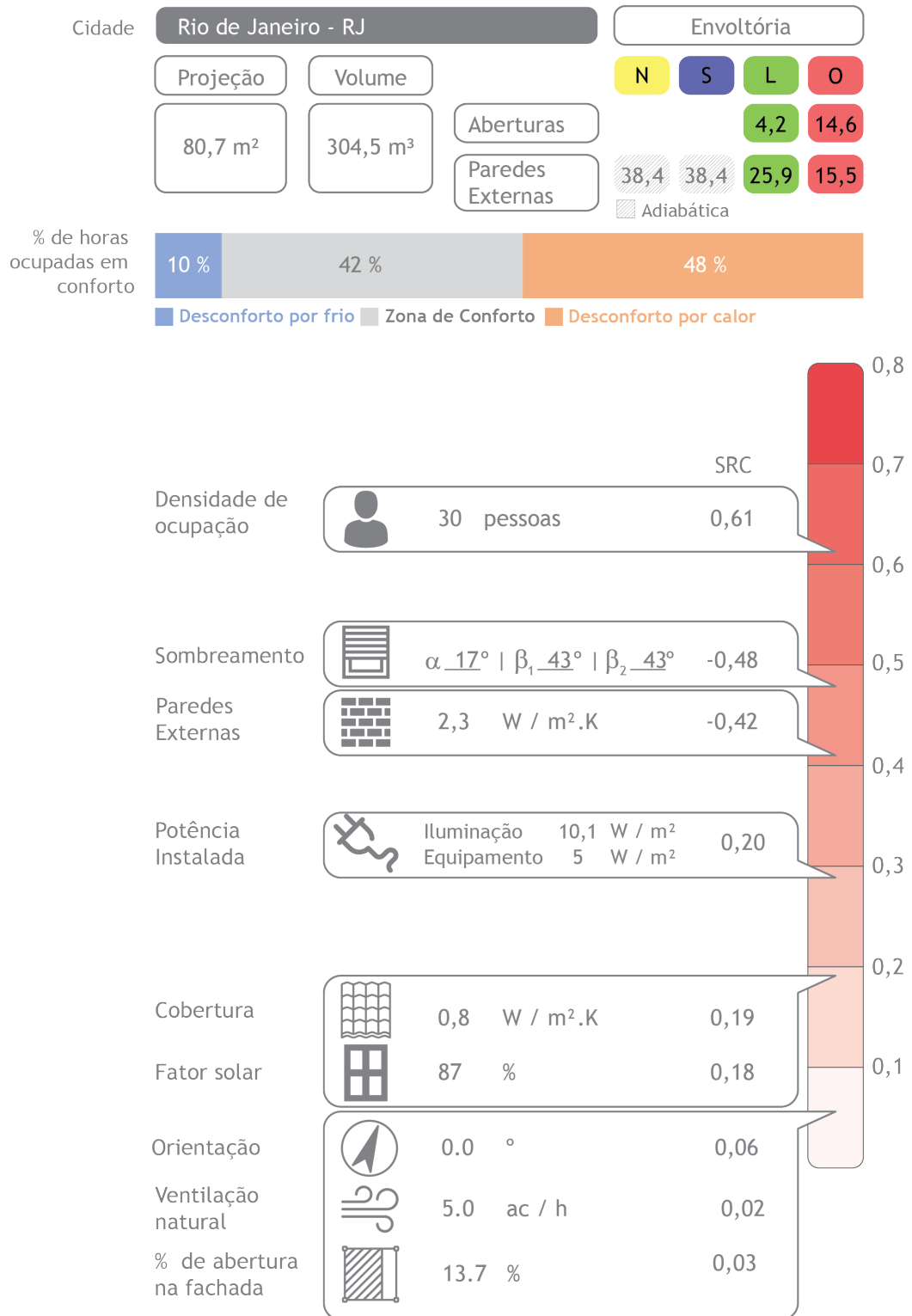


Figura 55 - Diagrama de conforto térmico para o projeto padrão no contexto climático de Rio de Janeiro.

Considerações finais

A simulação termoenergética é uma ferramenta chave à quantificação de critérios de desempenho que informam decisões projetuais. Seu uso confere precisão aos resultados, pois permite uma abordagem multidisciplinar, convertendo processos físicos complexos que incluem psicrometria, transferência de calor, iluminação, fluxo de ar e o comportamento do usuário, em modelos simplificados.

Todavia, apesar da existência de documentos técnicos que apresentam métodos para avaliação do desempenho térmico e energético de edifícios por meio de simulações, esses documentos referem-se somente a requisitos de conformidade, omitindo a concepção projetual. Nesse sentido a norma ASHRAE 209, foi a primeira publicação a apresentar diretrizes para o uso da simulação durante todos os estágios de desenvolvimento do projeto auxiliando projetistas à quantificação de suas hipóteses.

O propósito central no emprego de métodos baseados em simulação é aprimorar a compreensão do comportamento termodinâmico do projeto. Nesse sentido, tem importante papel a formulação de diretrizes, como no caso do desenvolvimento de projetos padronizados de escolas no contexto do PAR na qual é fundamental o entendimento de uma amostra em diferentes contextos climáticos.

Essa pesquisa se propôs a avaliar o conforto térmico de um projeto padronizado, integrante do catálogo de projetos do FNDE, sistematizando seus resultados a partir da relação entre métodos dispostos em normas e regulamentos a fim de auxiliar à tomada de decisões. Para tal realizou-se diagnóstico de conforto térmico desse projeto em seis diferentes cidades segundo modelo adaptativo de De Dear e Brager, seguido da análise das variáveis de projeto mais influentes sobre o POC, por meio de método estatístico.

O conforto térmico é essencial ao melhor desempenho acadêmico em ambientes escolares. Sendo assim, a adequação de projetos padronizados sob esse enfoque representa quebra de paradigma da lógica da padronização para uma aproximação à lógica bioclimática. Portanto é essencial uma adequada compressão das características

climáticas como orientação à proposição de soluções mais coerentes a seu contexto de implantação.

A partir da comparação da temperatura operativa interna de uma sala de aula, considerando ou não a operação das aberturas, foi possível observar a relevância da ventilação natural no período de ocupação, a partir da diferença de temperatura entre as duas condições. No entanto, o efeito dessa estratégia aplica-se somente quanto a temperatura de bulbo seco for inferior à temperatura operativa do ambiente.

A redução do modelo de simulação à apenas uma zona representativa se mostrou adequado à compreensão do conforto térmico do projeto padrão e viável à aplicação em outros contextos. Todavia, a utilização desse tipo de modelo não prescinde uma modelagem mais complexa em que outros fatores relativos ao comportamento termoenergético do edifício são avaliados.

O diagnóstico de conforto térmico destacou a dificuldade de se utilizar o mesmo padrão arquitetônico em contextos climáticos diferentes a partir da discrepância entre os percentuais de horas ocupadas em conforto ou em desconforto por calor ou frio.

A adoção de modelos de conforto adaptativo, como os descritos nas normas ASHRAE 55 e EN 1525, são imprescindíveis à compreensão de incertezas relativas ao comportamento do usuário e do quanto a arquitetura se relaciona com seu clima de implantação. No entanto, por se aplicarem somente à análise do número de horas em desconforto por calor, são limitados a climas com baixas amplitudes térmicas.

Dessa forma, observa-se também a necessidade de integração entre modelos adaptativos e racionais à avaliação de climas com temperaturas de bulbo seco muito superiores a 33,3 °C, tornando pouco aplicáveis o uso somente de estratégias passivas. É o caso de Cuiabá e Rio de Janeiro e Porto Alegre, com máximas de respectivamente 39,97 e 36,75 °C. Porto Alegre, por sua vez, apresenta uma amplitude térmica de 34,45 °C.

A análise de sensibilidade se mostrou uma importante ferramenta à otimização de projetos. A aplicação desse método viabiliza a aferição do efeito de um extenso número de variáveis sobre os dados de saída, reduzindo o tempo destinado a simulações e análises de desempenho do projeto. Portanto, a equipe de projeto tem a possibilidade de acessar informações fundamentais à tomada de decisões em menor prazo.

As variáveis mais influentes no percentual de horas em conforto para todos os casos relacionam-se à densidade de ocupação e características da envoltória. Assim sendo, é possível identificar padrões de uso e caracterização do projeto mais adequados a cada contexto climático. Já às demais variáveis pode-se considerar valores fixos economicamente mais viáveis.

O diagrama síntese resume os resultados obtidos a partir da aplicação dos procedimentos metodológicos adotados e se apresenta como uma ferramenta útil à simplificação das informações necessárias ao desenvolvimento do projeto. Serve-se também à conformidade com itens da norma ASHRAE 209. A partir dos dados dimensionais e especificações do projeto é possível fazer alterações nas características do projeto padrão para cada cidade com o propósito de reduzir o número de horas em desconforto por calor. No entanto essa etapa exige não somente a proposição empírica baseado na escala de influência das variáveis, mas em novas rodadas de simulação.

4.1. Limitações da pesquisa

A pesquisa apresentou algumas limitações descritas nos parágrafos a seguir, sobretudo relacionadas a aspectos dos procedimentos metodológicos podendo ser explorados em trabalhos futuros. Além disso seriam necessárias simulações locais a partir da amostragem resultante da análise de sensibilidade para comparação do percentual de horas ocupadas em conforto para outras combinações entre variáveis.

A caracterização do modelo baseou-se em uma das tipologias de projeto fornecida pela equipe da CODIN/FNDE reduzida a apenas uma sala de aula representante de uma condição padrão. Seriam necessários outros modelos, representativos de outras situações padronizadas, para validação do método.

O modelo de ventilação natural empregado foi o *airflow network* e para análise de sensibilidade verificou-se valores de renovação de ar por hora fixos. A conferência dos cálculos de ventilação natural se limitou ao processamento dos dados de temperatura operativa e temperatura de bulbo seco.

Ressalta-se que foi simulada apenas uma condição de exposição aplicável à sala de aula escolhida para a simulação. Nesse sentido, uma vez que duas paredes foram configuradas como adiabáticas a área de envoltória foi razoavelmente reduzida com relação ao volume utilizado. Salienta-se que esta condição foi favorável à obtenção de

um maior número de horas ocupadas em conforto e conseqüentemente à ocorrência de imprecisões.

Em função do modelo de conforto adotado nessa pesquisa, a variável de saída para verificação da influência das características do modelo sobre o número de horas ocupadas em conforto foi o número de horas em desconforto por calor (*discomfort hours*). Ao verificar o coeficiente de determinação observou-se que a utilização dessa variável não foi suficiente à representação das condições de conforto térmico em climas frios como de Curitiba e Porto Alegre.

4.2. Diretrizes para trabalhos futuros

A seguir são apresentados alguns tópicos que podem lançar diretrizes para trabalhos futuros considerando as lacunas e limitações observadas durante o desenvolvimento desta pesquisa:

- Diagnóstico do conforto térmico considerando outras variáveis de entrada;
- Aplicação dos procedimentos metodológicos considerando todas as 24 zonas bioclimáticas consideradas no novo zoneamento;
- Comparação entre diferentes modelos de conforto térmico (racionais e adaptativos);
- Comparação dos valores encontrados com outras cidades representantes da mesma zona bioclimática;
- Inserção de dados dimensionais da arquitetura na análise de sensibilidade considerando parametrização da forma;
- Criação de banco de dados resultante de regressão linear ou rede neural⁶ para que o diagrama síntese possa efetivamente servir a outros casos;
- Monitoramento de edifícios escolares reais para maior precisão dos dados de análise e calibração dos modelos de simulação.

⁶ Segundo Melo (2012) a regressão linear não apresenta resultados satisfatórios quando a relação entre os dados de entrada e o de saída não é linear. Nesse sentido, o uso de redes neurais permite avaliar a resposta do desenvolvimento de modelos simplificados, nas quais, semelhantemente ao comportamento dos neurônios no cérebro humano, são determinadas diferentes conexões entre variáveis de entrada determinando sua influência nos dados de saída. Sua aplicação contribui à previsão ou reconhecimento de padrões, uma vez que possuem a capacidade de aprender com os exemplos apresentados e aplicá-los para influenciar no desempenho de suas funções.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 16401 - Instalações de ar-condicionado, sistemas centrais e unitários. Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR 16401-2 Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, 2017.

ABREU-HARBICH, L. V.; CHAVES, V. L. A.; BRANDSTETTER, M. C. G. O. Evaluation of strategies that improve the thermal comfort and energy saving of a classroom of an institutional building in a tropical climate. **Building and Environment**, v. 135, p. 257-268, 2018.

ACOSTA-ACOSTA, D. F.; EL-RAYES, K. Optimal design of classroom spaces in naturally-ventilated buildings to maximize occupant satisfaction with human bioeffluents/body odor levels. **Building and Environment**, v. 169, p. 106543, 2020.

AIA. **Architect 's Guide to Building Performance**. 2019.

AMORIM, C. N. D. **Desempenho Térmico de Edificações e Simulação Computacional no contexto da arquitetura bioclimática: estudo de casos na região de Brasília**, 1998. Universidade de Brasília.

American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). Standard 90.1 - Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. **ASHRAE/IESNA Standard**. Atlanta, 1999.

American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). **ASHRAE Handbook of Fundamentals**. Atlanta, 2005.

_____. **Thermal Environment Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, 2017.

_____. Standard 209: Energy Simulation Aided Design for Buildings Except Low-Rise. Atlanta, 2018.

ARENHARDT, N. L.; WANDER, P. R. Um panorama sobre os estudos relacionados ao conforto térmico em salas de aula. **Revista Produção Online**, v. 18, n. 3, p. 901-

919, 2018. Associação Brasileira de Engenharia de Produção - ABEPRO.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15575-1 2013 Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 1 : Requisitos gerais Prefácio. Rio de Janeiro, 2013.

AUGENBROE, G. The role of simulation in performance based building. In: **Building Performance Simulating for Design and Operation**. LAMBERTS, R.; HENSEN, J. L. M. 1 ed, p.15-35, 2012. London: Routledge (Taylor and Francis).

AUGENBROE, G. L. M. Trends in building simulation. In: **Advanced building simulation**. MALKAWI, A.; AUGENBROE, G. L. M. (org). Spon: London, 2004.

AULICIEMS, A. Thermal requirements of secondary schoolchildren in winter. **Journal of Hygiene**, v. 67, n. 1, p. 59-65, 1969.

AULICIEMS, A. Towards a psycho-physiological model of thermal perception. **International Journal of Biometeorology**, v. 25, n. 2, p. 109-122, 1981.

BARBHUIYA, SAADIA; BARBHUIYA, SALIM. Thermal comfort and energy consumption in a UK educational building. **Building and Environment**, v. 68, p. 1-11, 2013.

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

BAVARESCO, M. V.; MAZZAFERRO, L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Classificação de climas brasileiros empregada na atualização dos Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações. UFSC: Florianópolis, 2017.

BITTENCOURT, L. S. Meu, dele ou de outros? Especulações sobre o desejo no projeto arquitetônico. In: L. Leitão; L. Amorim (Orgs.); **A casa nossa de cada dia**. UFPE: Recife, 2007.

BOGO, A. J. Reflexões críticas quanto às limitações do texto das normas brasileiras de desempenho NBR 15220-3 e NBR 15575. **Revista HOLOS**, v. 7, p. 290, 2016.

BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. L. M. Evaluating energy performance in non-domestic buildings: A review. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 734-755, 2016.

BORGSTEIN, E.H.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. L. M. Evaluating energy performance in non-domestic buildings: A review. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 734-755, 2016.

BRITO, A. C. P. DE; BRITO, C. M. B. DE; BORTOLOTTI, V. M.; SILVA, C. F. E; AMORIM, C. N. D. O processo de projeto de edifício escolar: Barreiras e perspectivas para o conforto e eficiência energética. XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais...**, 2019.

CÂNDIDO, C.; LAMBERTS, R.; DE DEAR, R.; BITTENCOURT, L. **Towards a Brazilian Standard on Thermal Comfort**. Relatório de pesquisa. UFSC: Florianópolis, 2013.

CÂNDIDO, C.; LAMBERTS, R.; DE DEAR, R.; BITTENCOURT, L.; DE VECCHI, R. Towards a Brazilian standard for naturally ventilated buildings: Guidelines for thermal and air movement acceptability. **Building Research and Information**, v. 39, n. 2, p. 145-153, 2011.

CARLO, J. C. Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envoltório de Edificações Não-residenciais. Tese de doutorado. UFSC, p. 196, 2008.

CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios: parte 1: método prescritivo. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 2, p. 7-26, 2010a.

CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios: parte 2: método de simulação. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 2, p. 27-40, 2010b.

CENA, K.; CLARK, J. A. Physics, physiology and psychology. **Studies in Environmental Science**, v. 10, n. C, p. 271-283, 1981.

CHRISTAKOU, E. D. A Simulação Computacional da Luz Natural Aplicada ao Projeto de Arquitetura. Dissertação de mestrado. UnB: Brasília, 2004.

CLARKE, J. A. A. **Energy Simulation in Building Design**. 2001. Routledge: London, 2011.

CLARKE, J. A. A.; HENSEN, J. L. M. L. M. Integrated building performance simulation: Progress, prospects and requirements. **Building and Environment**, v. 91, p. 294-306, 2015.

COSTA, V. A. C. DA; RORIZ, V. F.; CHVATAL, K. M. S. Modeling of slab-on-grade

heat transfer in EnergyPlus simulation program. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 117-135, 2017.

CRAWLEY, D. B. Building simulation for policy support. In: **Building Performance Simulating for Design and Operation**. HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. (Orgs.); 2º ed. Routledge (Taylor and Francis): London, 2018.

CRAWLEY, D. B.; LAWRIE, L. K.; WINKELMANN, F. C.; et al. EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 4, p. 319-331, 2001.

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.

DESIGNBUILDER. v. 6.1.3. DesignBuilder Software Ltd. Stroud, 2019.

DOLS, W. S.; G. N. WALTON. **CONTAMW 2.0 - User Manual National Institute of Standards and Technology (NIST), NISTIR**. 2002.

EGAN, J.; FINN, D.; SOARES, P. H. D.; et al. Definition of a useful minimal-set of accurately-specified input data for Building Energy Performance Simulation. **Energy and Buildings**, v. 165, p. 172-183, 2018.

EKICI, C. A review of thermal comfort and method of using Fanger's PMV equation. **5th International Symposium on Measurement, Analysis and Modelling of Human Functions, ISHF 2013**, , n. October, p. 61-64, 2013.

FANGER, P. O. **Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering**. McGraw Hil ed. New York, 1972.

FELIPPE, A. R.; FONSECA, R. W. DA; MORAES, L. N.; PEREIRA, F. O. R. Modelagem paramétrica para simulação do desempenho da iluminação natural e termo-energético da edificação. **Anais do SIGRADI 2015: informação de projeto para interação**. **Anais...** . p.398-404, 2015.

FERREIRA, C. **Avaliação da aplicabilidade de índices de conforto adaptativo para o caso brasileiro**. **Anais do XII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**. 2013.

FERREIRA, C. C.; SOUZA, H. A. DE; ASSIS, E. S. DE; et al. Discussão dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos segundo as normas de desempenho térmico brasileiras. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 183-200, 2017.

FONSECA, L. P. G.; NUNES, V. D. L.; SANTANA, L. O.; CARLO, J. C.; CÉSAR JÚNIOR, K. M. L. Otimização multiobjetivo das dimensões dos ambientes de uma residência unifamiliar baseada em simulação energética e estrutural. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 267-288, 2017. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ANTAC.

FONSECA, L. P. G.; NUNES, V. D. L.; SANTANA, L. O.; CARLO, J. C.; CÉSAR JÚNIOR, K. M. L. Otimização multiobjetivo das dimensões dos ambientes de uma residência unifamiliar baseada em simulação energética e estrutural. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 267-288, 2017.

FREIRE, R. Z.; OLIVEIRA, G. H. C.; MENDES, N. Development of regression equations for predicting energy and hygrothermal performance of buildings. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 5, p. 810-820, 2008.

FREITAS, L. F. DE; LIMA, F. R.; OLIVEIRA, R. D. Análise das condições de conforto térmico dos usuários em ambientes naturalmente ventilados: Simulação aplicada à edificação escolar pública. Anais do XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído., 2019.

GAGNON, R.; GOSELIN, L.; DECKER, S. Sensitivity analysis of energy performance and thermal comfort throughout building design process. **Energy and Buildings**, v. 164, p. 278-294, 2018a.

GAGNON, R.; GOSELIN, L.; DECKER, S. Sensitivity analysis of energy performance and thermal comfort throughout building design process. **Energy and Buildings**, v. 164, p. 278-294, 2018b. Elsevier Ltd.

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

GONÇALVES, J. C. S.; MOURA, N. C. DA S.; KUNIOCHI, E. M. U. Avaliação de desempenho, simulação computacional e o projeto arquitetônico. In: **Edifício Ambiental**. GONÇALVES, J. C. S.; KLAUS, B. (orgs.). Oficina de Textos: São Paulo, 2015.

GU, L. Airflow network modeling in energyplus. **IBPSA 2007 - International Building Performance Simulation Association 2007**, , n. January 2007, p. 964-971, 2007.

HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. Introduction to Building Performance Modeling

and Simulation. In: Building Simulation for Design and Operation. HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. Routledge (Taylor and Francis): London, 2011.

HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. Building performance simulation - challenges and opportunities. In: Building Simulation for Design and Operation. HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. (orgs.); 2º ed. Routledge (Taylor and Francis): London, 2018.

HENSEN, J. L. M. M. Towards more effective use of building performance simulation in design. *Developments in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning. Anais...* . p.291-306, 2004.

HERNANDEZ, A. Fundamentos da simulação energética de edificações. **Edifício Ambiental**. In: **Edifício Ambiental**. GONÇALVEZ, J. C. S.; KLAUS, B. (orgs.). Oficina de Textos: São Paulo, 2015.

HOPFE, CHRISTINA J; HENSEN, J. L. M. Uncertainty analysis in building performance simulation for design support. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 10, p. 2798-2805, 2011.

HOPFE, CHRISTINA J.; HENSEN, J. L. M. M. Uncertainty analysis in building performance simulation for design support. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 10, p. 2798-2805, 2011.

HUMPHREYS, M. A. Field studies of thermal comfort compared and applied. **Building Services Engineer**, v. 41, n. December, p. 69969, 1976.

HUMPHREYS, M. A. Thermal Comfort Temperatures and the Habits of Hobbits. **Standards for the thermal comfort: Indoor Air Temperature Standards for 21st Century.**, 1995.

HUMPHREYS, M. A.; NICOL, J. F. Understanding the adaptive approach to thermal comfort. *ASHRAE Transactions. Anais...* . v. 104, p.991-1004, 1998.

INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais**. Rio de Janeiro: 2012.

INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos**. Rio de Janeiro, 2017.

JANKOVIC, L. **Designing zero carbon buildings using dynamic simulation methods**. Routledge (Taylor and Francis): London, 2013.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K. **Arquitetura escolar: O projeto de ambiente de ensino**.

Oficina de Textos: São Paulo, 2011.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; DELIBERADOR, M. S.; PEREIRA, P. R. P. Arquitetura escolar e seu processo de projeto. In: D. C. C. K. Kowaltowski; D. C. Moreira; J. R. D. Petreche; M. M. Fabrício (Orgs.); **O processo de projeto em arquitetura: da teoria a tecnologia**. 1º edição ed., 2011. São Paulo: Oficina de Textos.

LAMBERTS, ROBERTO; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3º ed. 2014.

LAMBERTS, R.; XAVIER, A. A.; GOULART, S.; DE VECCHI, R. **Conforto e stress térmico**. Notas de aula. UFSC: Florianópolis, 2016.

LAWSON, B. **Como Arquitetos e Designers Pensam**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LOPES, A. F. O.; SILVA, C. F. E. Building Performance Simulation in Brazil : A systematic review University of Brasilia. Proceedings of 16th IBPSA Conference and Exhibition. Rome, 2019.

MAHDAVI, A. COMPUTATIONAL BUILDING MODELS: THEME AND FOUR VARIATIONS. Proceedigs of the 8th IBPSA Conference and Exhibition. Netherland , 2003.

MATEUS, N. M.; SIMÕES, G. N.; LÚCIO, C.; DA GRAÇA, G. C. Comparison of measured and simulated performance of natural displacement ventilation systems for classrooms. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 185-196, 2016. Elsevier Ltd.

MELO, A. P.; SORGATO, M. J.; LAMBERTS, R. Building energy performance assessment: Comparison between ASHRAE standard 90.1 and Brazilian regulation. **Energy and Buildings**, v. 70, p. 372-383, 2014.

MENDES, N.; LAMBERTS, R.; NETO, J. A. B. D. C. Building simulation in brazil. **Proceedings of Seventh International IBPSA Conference**, p. 3-14, 2001. Disponível em: <www.lmpt.ufsc.br>. Acesso em: 20/4/2019.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; DA CUNHA NETO, J. A. B. The use of computational tools for thermal and energy performance analysis of buildings in Brazil. **Ambiente Construído**, v. 5, n. 4, p. 47-68, 2005.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. **NR 17: Ergonomia**. Brasília, 1990.

MODLER, N. L.; BERLEZE, A. S.; TSUTSUMI, E. K.; LINCZUK, V. C. C.; AZEVEDO, G. A. N. Avaliação de desempenho de um projeto padrão do programa Proinfância:

escola de educação infantil no sul do Brasil. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 13, n. 2, p. 95, 2018.

MONTEIRO, L. M.; BITTENCOURT, L.; YANNAS, S. A Arquitetura da Adaptação. In: J. C. S. Gonçalves; K. Bode (Orgs.); **Edifício Ambiental**, 2015. Oficina de Textos.

MORBITZER, C.; STRACHAN, P.; WEBSTER, J.; SPIRES, B.; CAFFERTY, D. Integration of building simulation into the design process of an architecture. *Building Simulation 2001. Anais...* . p.697-704, 2001.

NGUYEN, A.-T.; REITER, S.; RIGO, P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, v. 113, p. 1043-1058, 2014. Elsevier.

OLESEN, B. W.; PARSONS, K. C. Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730. *Energy and Buildings. Anais...* . v. 34, p.537-548, 2002.

PEGLOW, J.; RITTER, V.; RONCA, A.; et al. Avaliação Do Conforto Térmico De Escola Municipal De Educação Infantil Em Pelotas / Rs - Zb2 1. **XVI Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído**, , n. September, p. 1354-1369, 2016.

PEREIRA, CLAUDIA DONALD; GHISI, E. The influence of the envelope on the thermal performance of ventilated and occupied houses. **ENERGY AND BUILDINGS**, v. 43, n. 12, p. 3391-3399, 2011.

PEREIRA, CLÁUDIA DONALD; GHISI, E. The influence of the envelope on the thermal performance of ventilated and occupied houses. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 12, p. 3391-3399, 2011.

PEREIRA, I. M.; ASSIS, E. S. DE. Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 1, p. 31-51, 2010a.

PEREIRA, I. M.; ASSIS, E. S. DE. Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 1, p. 31-51, 2010b.

PERILLO, P. J. L.; CAMPOS, M. A. S.; ABREU-HARBICH, L. V. DE. CONFORTO TÉRMICO EM SALAS DE AULA : REVISÃO. , p. 236-248, 2017a.

PERILLO, P. J. L.; CAMPOS, M. A. S.; ABREU-HARBICH, L. V. DE. Conforto térmico em salas de aula: revisão sistemática da literatura. **PARC Pesquisa em Arquitetura e**

Construção, v. 8, n. 4, p. 236-248, 2017b. Universidade Estadual de Campinas.

RACKES, A.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Naturally comfortable and sustainable: Informed design guidance and performance labeling for passive commercial buildings in hot climates. **Applied Energy**, v. 174, p. 256-274, 2016.

RACKES, ADAMS; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Naturally comfortable and sustainable: Informed design guidance and performance labeling for passive commercial buildings in hot climates. **Applied Energy**, v. 174, p. 256-274, 2016.

RACKES, A.; WALGER DA FONSECA, R.; BECK, E. D. O.; et al. Avaliação Do Potencial De Conforto Térmico Em Escolas Naturalmente Ventiladas. **XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído**, , n. 1, p. 1-10, 2015.

RODRIGUES, C. O. DE M.; PEDRINI, A. ANÁLISE DE VARIÁVEIS POR MEIO DE SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA NAS PRIMEIRAS FASES DO PROCESSO DE PROJETO. **infohab.org.br**, , n. 1, p. 1-10.

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

RORIZ, M. **CLASSIFICAÇÃO DE CLIMAS DO BRASIL-VERSÃO 3.0**. 2014.

SALTELLI, A.; RATTO, M.; ANDRES, T. Global sensitivity analysis: The primer. , 2008. London, England: John Wiley & Sons.

SCALCO, V. A.; FOSSATI, M.; DE SOUZA VERSAGE, R.; et al. Innovations in the Brazilian regulations for energy efficiency of residential buildings. **Architectural Science Review**, v. 55, n. 1, p. 71-81, 2012.

SCHMID, A. L. The introduction of building simulation into an architectural faculty: Preliminary findings. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 1, n. 3, p. 197-208, 2008.

SILVA, A. S. **Desenvolvimento de um método para avaliação do desempenho térmico e energético de edificações aplicando análise de incertezas e sensibilidade**, 2016. Universidade Federal de Santa Catarina.

SILVA, A. S.; ALMEIDA, L. S. S.; GHISI, E. Decision-making process for improving thermal and energy performance of residential buildings: A case study of constructive systems in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 270-286, 2016.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Análise de sensibilidade global dos parâmetros termofísicos de uma edificação residencial de acordo com o método de simulação do RTQ-R. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 135-148, 2013. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ANTAC.

SILVA, A.S.; GHISI, E. Uncertainty analysis of user behaviour and physical parameters in residential building performance simulation. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 381-391, 2014.

SILVA, ARTHUR SANTOS; GHISI, E. Uncertainty analysis of the computer model in building performance simulation. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 258-269, 2014a.

SILVA, ARTHUR SANTOS; GHISI, E. Análise comparativa dos resultados do desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial pelos métodos de simulação do RTQ-R e da NBR 15575-1. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p. 215-230, 2014b.

SILVA, ARTHUR SANTOS; GHISI, E. Uncertainty analysis of user behaviour and physical parameters in residential building performance simulation. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 381-391, 2014c.

SILVA, ARTHUR SANTOS; GHISI, E. Uncertainty analysis of user behaviour and physical parameters in residential building performance simulation. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 381-391, 2014d.

SILVA, ARTHUR SANTOS; GHISI, E. Uncertainty analysis of the computer model in building performance simulation. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 258-269, 2014e.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Estimating the sensitivity of design variables in the thermal and energy performance of buildings through a systematic procedure. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, 2020. Elsevier Ltd.

SILVA, A. S.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. Performance evaluation of long-term thermal comfort indices in building simulation according to ASHRAE Standard 55. **Building and Environment**, v. 102, p. 95-115, 2016.

SILVA, A. S.; SORGATO, M. J.; MAZZAFERRO, L.; MELO, A. P.; GHISI, E. Incerteza do método de simulação da NBR 15575-1 para a avaliação do desempenho térmico de habitações. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 103-117, 2014.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. Análise do procedimento de simulação da NBR 15575 para avaliação do desempenho térmico de

edificações residenciais. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 83-101, 2014.

SPITLER, J. D. Building Performance Simulation: The Now and the Not Yet. **American Society of Heating**, v. 12, n. November, p. 549-551, 2006.

SREBRIC, J. Ventilation performance prediction. In: R. Lamberts; J. L. M. Hensen (Orgs.); **Building Performance Simulation for Design and Operation Simulation**. 2nd ed, 2018. Oxon: Routledge (Taylor and Francis).

TIAN, W. A review of sensitivity analysis method in building energy analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 411-419, 2013.

TRIOLA, M. F. **Essential of Statistics**. 5th ed. Boston: Pearson, 2015.

DE VECCHI, R.; CÂNDIDO, C.; LAMBERTS, R. O efeito da utilização de ventiladores de teto no conforto térmico em salas de aulas com condicionamento híbrido em um local de clima quente e úmido. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 189-202, 2013.

VIEIRA, E. M. A.; SILVA, J. M. N. DA; LEITE, W. K. DOS S.; TORRES, M. G. L.; SILVA, L. B. DA. Comportamento de modelos adaptativos de conforto térmico frente ao modelo de Fanger em intensivistas adaptados ao clima tropical. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 479-490, 2018.

WALSH, A.; LABAKI, L. C.; CÓSTOLA, D. Panorama do zoneamento bioclimático nas américas Improvement of the method of evaluation of heat exposure in civil construction in outdoor work on concrete slabs View project Implantação do Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações CB3E View project. , 2016.

WALTON, G. N. Airflow network models for element-based building airflow modeling. **ASHRAE Transactions (95)**, 1989.

WEBER, F. S.; MELO, A. P.; MARINOSKI, D. L.; GUTHS, S.; LAMBERTS, R. Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus. , p. 52, 2017.

WETTER, M.; NOUIDUI, T. S.; LORENZETTI, D.; LEE, E. A.; ROTH, A. **Prototyping the next generation EnergyPlus Simulation engine**. 14th IBPSA Conference and Exhibition. Hyderabad, 2015.

WEYTJENS, L.; ATTIA, S.; VERBEECK, G.; DE HERDE, A. SUSB Journal Technical Paper The “Architect-friendliness” Of Six Building Performance Simulation Tools: A Comparative Study. **International Journal of Sustainable Building Technology and**

Urban Development, 2011.

DE WIT, S. Uncertainty in building simulation. In: Ali Malkawi; Godfried Augenbroe (Org.); **Advanced Building Simulation**. Spon Press ed., 2004. Spon Press.

ZOMORODIAN, Z. S.; TAHSILDOOST, M.; HAFEZI, M. Thermal comfort in educational buildings: A review article. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 895-906, 2016.

Apêndice

Apêndice 1) Configuração do modelo de simulação no DesignBuilder.

Definition	
Definition method	1-Layers
Calculation Settings	
Layers	
Number of layers	5
Outermost layer	
Material	Argamassa ($\alpha=0,5$)
Thickness (m)	0.0250
<input type="checkbox"/> Bridged?	
Layer 2	
Material	Cerâmica
Thickness (m)	0.0165
<input type="checkbox"/> Bridged?	
Layer 3	
Material	Câmara de Ar ($Rt=0,311$)
Thickness (not used in thermal calcs) (m)	0.1070
Layer 4	
Material	Cerâmica
Thickness (m)	0.0165
<input type="checkbox"/> Bridged?	
Innermost layer	
Material	Gesso
Thickness (m)	0.0300
<input type="checkbox"/> Bridged?	
With Bridging (BS EN ISO 6946)	
Thickness (m)	0.1950
Km - Internal heat capacity (KJ/m ² -K)	47.7780
Upper resistance limit (m ² -K/W)	0.625
Lower resistance limit (m ² -K/W)	0.625
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	2.197
R-Value (m ² -K/W)	0.625
U-Value (W/m²-K)	1.600

Figura 56 - Janela do DesignBuilder com caracterização das paredes externas.


Definition	
Definition method	1-Layers
Calculation Settings	
Layers	
Number of layers	1
Single layer	
 Material	Telha sanduíche
Thickness (m)	0.0420
<input type="checkbox"/> Bridged?	
With Bridging (BS EN ISO 6946)	
Thickness (m)	0.0420
Km - Internal heat capacity (KJ/m ² -K)	4.7695
Upper resistance limit (m ² -K/W)	1.473
Lower resistance limit (m ² -K/W)	1.473
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	0.750
R-Value (m ² -K/W)	1.473
U-Value (W/m²-K)	0.679

Figura 57 - Janela do DesignBuilder com caracterização do tipo de cobertura.

Louvre Blade Geometry

- Louvres

Number of blades	4
Vertical spacing (m)	0.200
Angle (°)	45.000
Distance from window (m)	0.600
Blade depth (m)	0.200
Vertical offset from window top (m)	0.000
Horizontal window overlap (m)	0.000

Side Elevation

Sidefin Geometry

- Left sidefin

Projection (m)	0.800
Horizontal offset from window left (m)	0.000
Top overlap (m)	0.000
Bottom overlap (m)	0.000
- Right sidefin

Projection (m)	0.800
Horizontal offset from window right (m)	0.000
Top overlap (m)	0.000
Bottom overlap (m)	0.000

Left Sidefin **Right Sidefin**

Overhang Geometry

- Overhangs

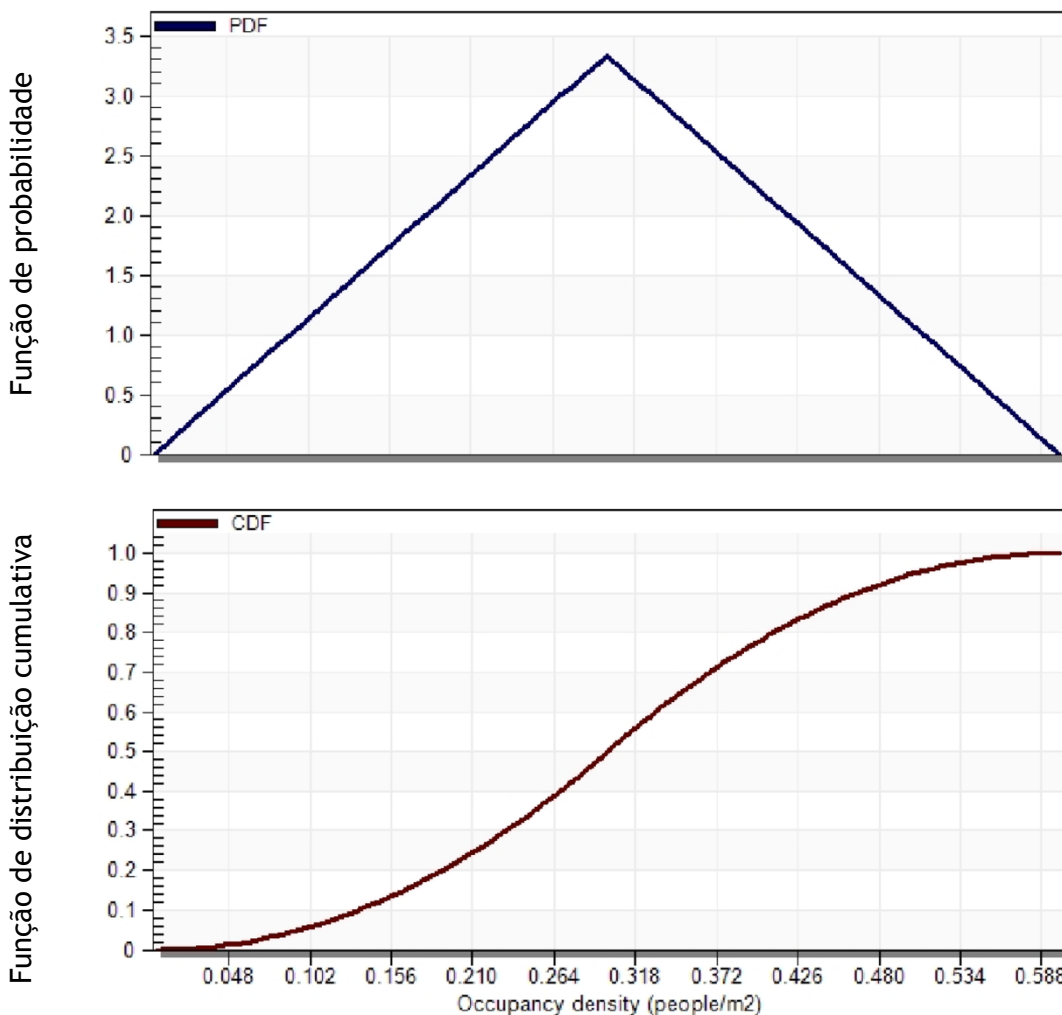
Vertical offset from window top (m)	0.000
Projection (m)	0.600
Horizontal window overlap (m)	0.000

Side Elevation

Figura 58 - Janela do DesignBuilder com configuração dos elementos de sombreamento.

Apêndice 2) Curvas de distribuição das variáveis independentes

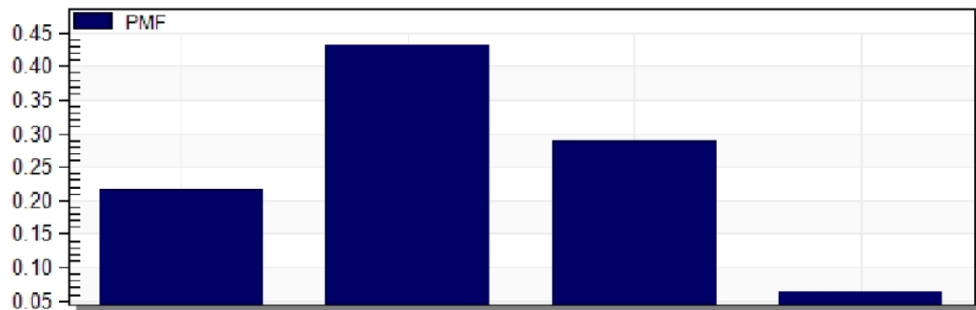
Variável dependente	Densidade de ocupação	01
Probabilidade de distribuição	Triangular	
Características de distribuição	Valor de Pico:0,30; Mínimo: 0,0; Máximo: 0,6	



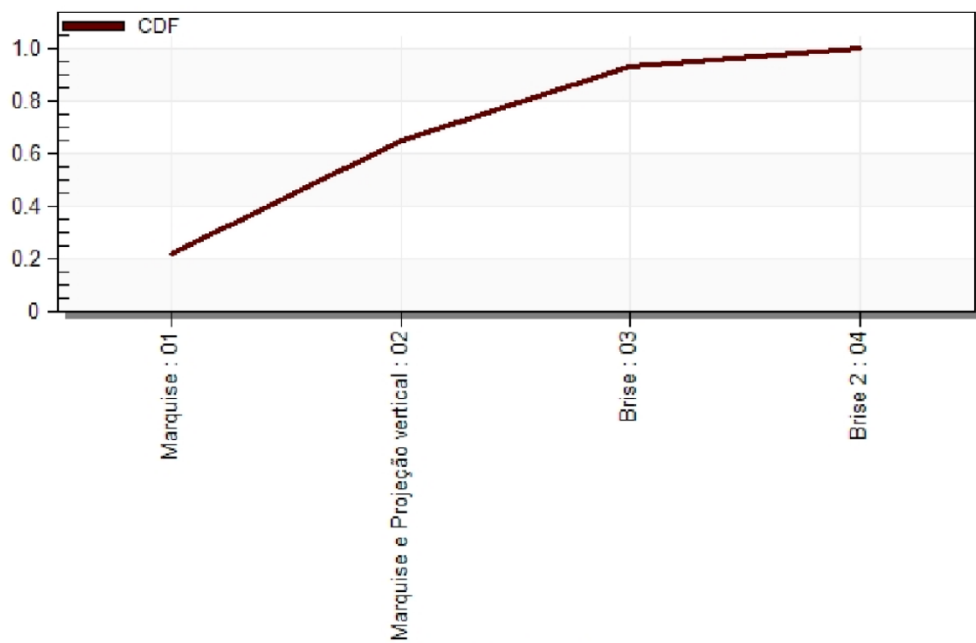
Probabilidade de distribuição Binomial

Características de distribuição Valor de prob.:0,4; Tentativas: 3; Opções: 4

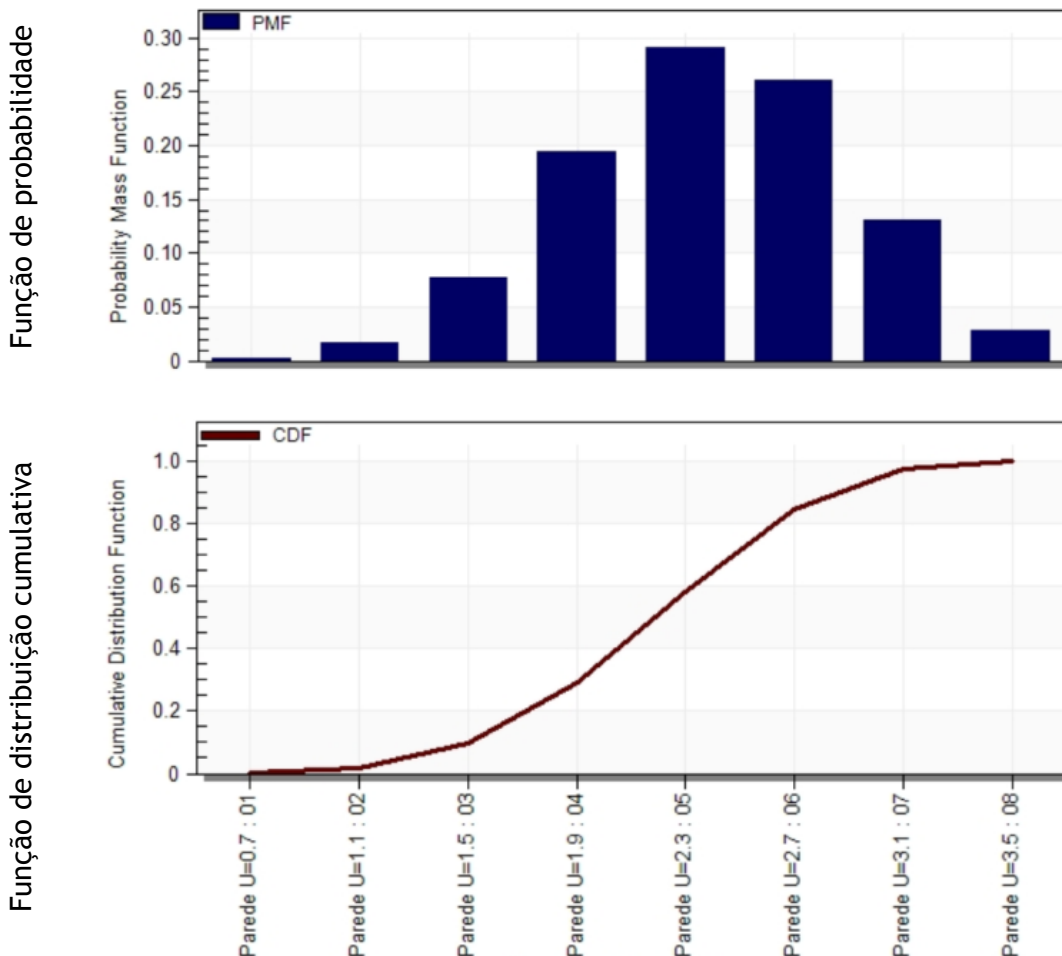
Função de probabilidade



Função de distribuição cumulativa



Variável dependente	<i>Transmitância das paredes externas</i>	03
Probabilidade de distribuição	Binomial	
Características de distribuição	Valor de prob.:0,6; Tentativas: 7; Opções: 8	

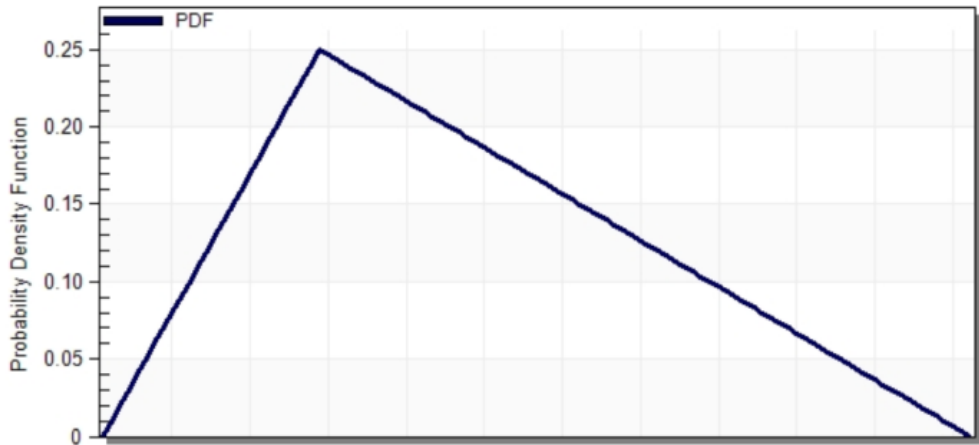


Variável dependente *Densidade de potência instalada (DPI)* 04

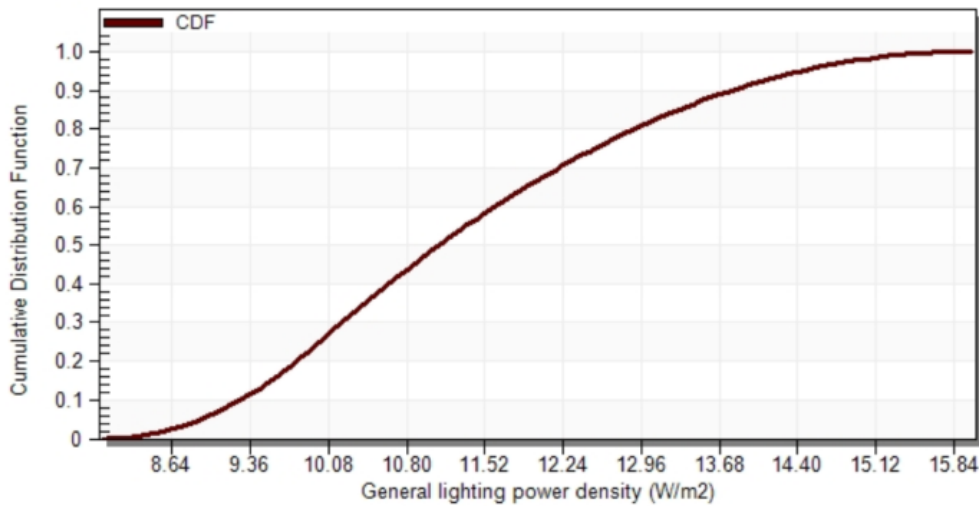
Probabilidade de distribuição Triangular

Características de distribuição Valor de pico: 10,0; Mínimo: 8,0; Máximo: 16,0

Função de probabilidade

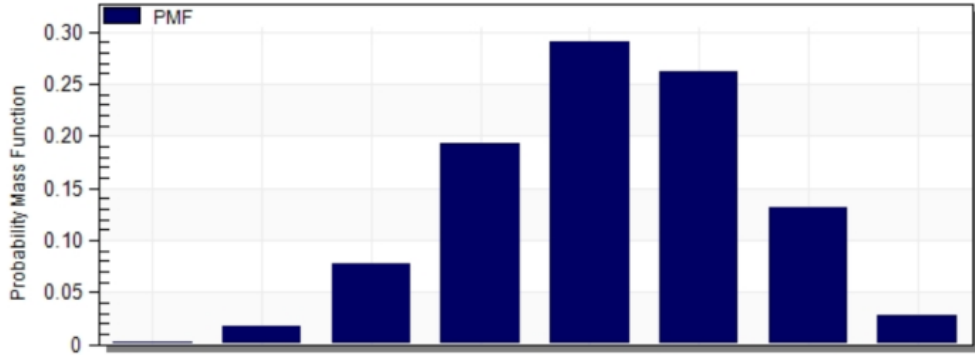


Função de distribuição cumulativa

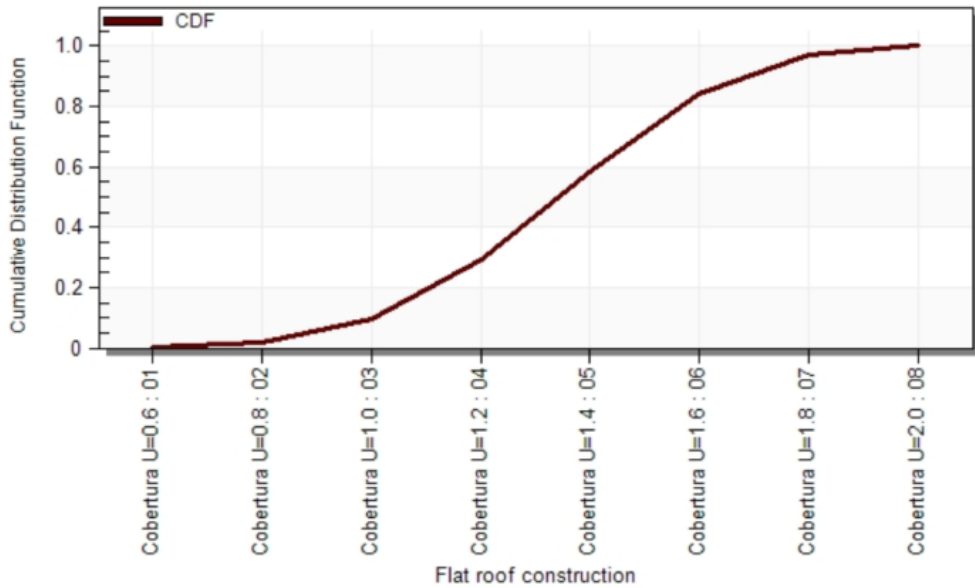


Variável dependente	<i>Transmitância da cobertura</i>	05
Probabilidade de distribuição	Binomial	
Características de distribuição	Valor de prob.:0,6; Tentativas: 7; Opções: 8	

Função de probabilidade



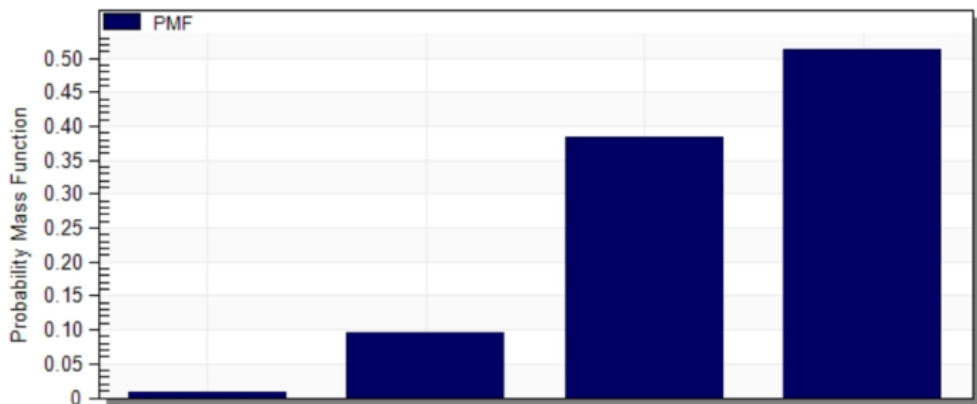
Função de distribuição cumulativa



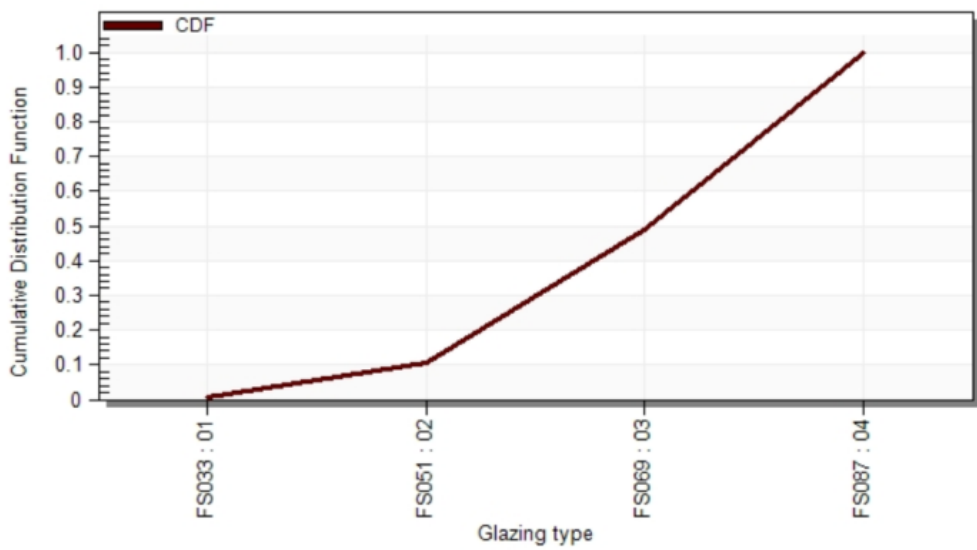
Probabilidade de distribuição Binomial

Características de distribuição Valor de prob.:0,8; Tentativas: 3; Opções: 4

Função de probabilidade

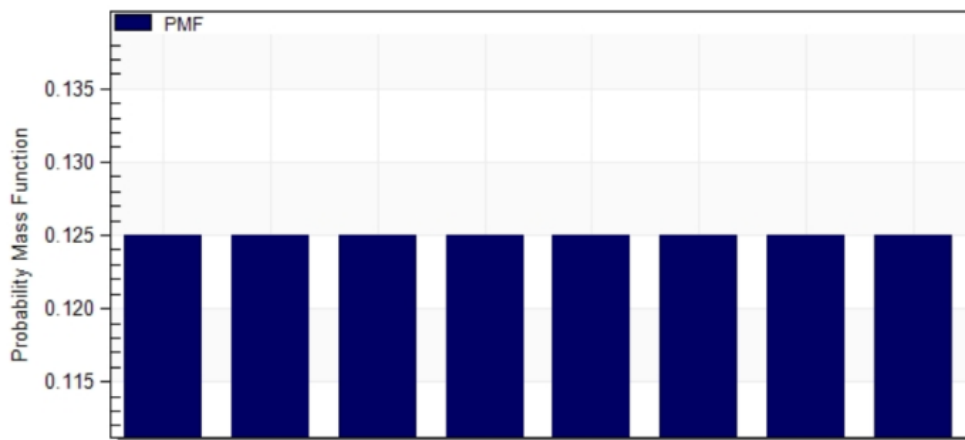


Função de distribuição cumulativa

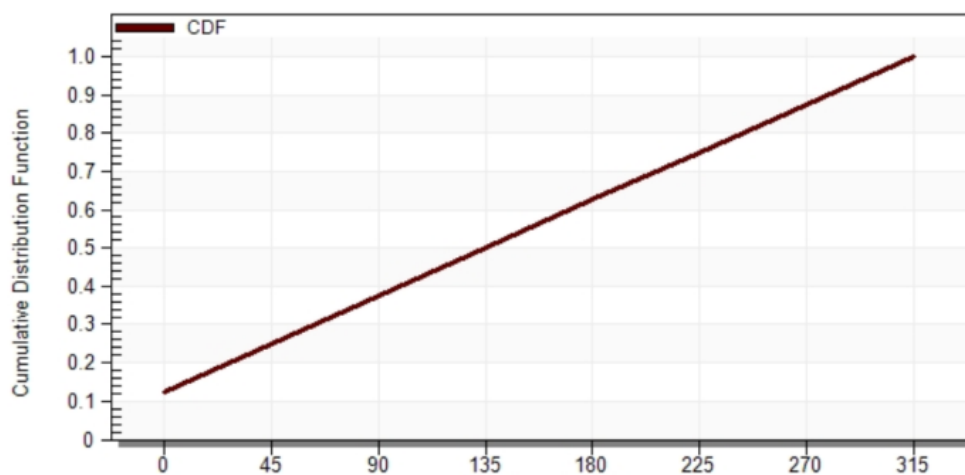


Variável dependente	Orientação solar	07
Probabilidade de distribuição	Uniforme	
Características de distribuição	Valor mínimo: 0,0; Dimensão da escala de frequência: 45,0; Número de fase: 8,0	

Função de probabilidade



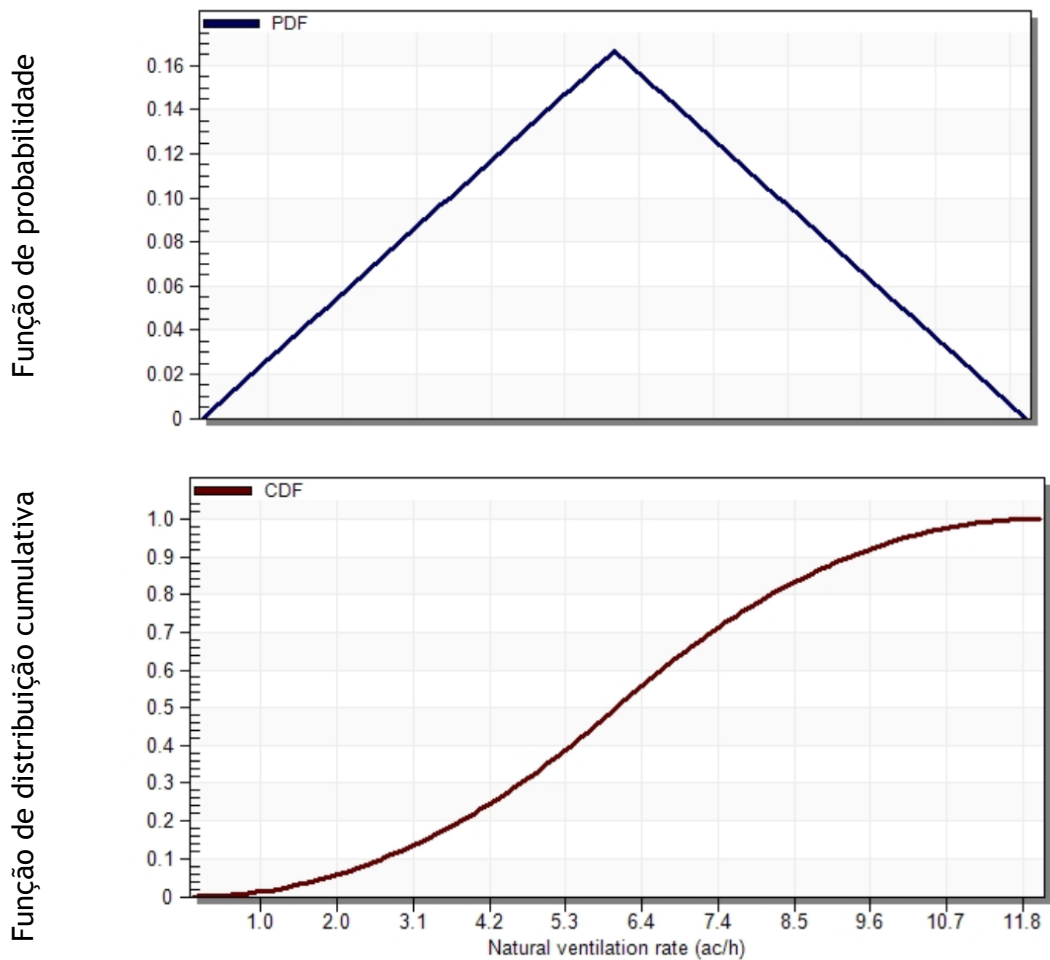
Função de distribuição cumulativa



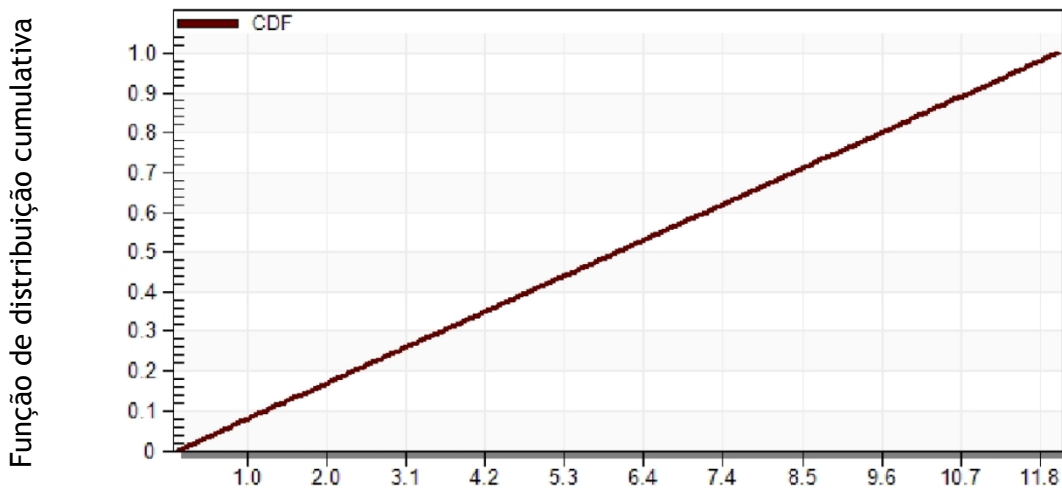
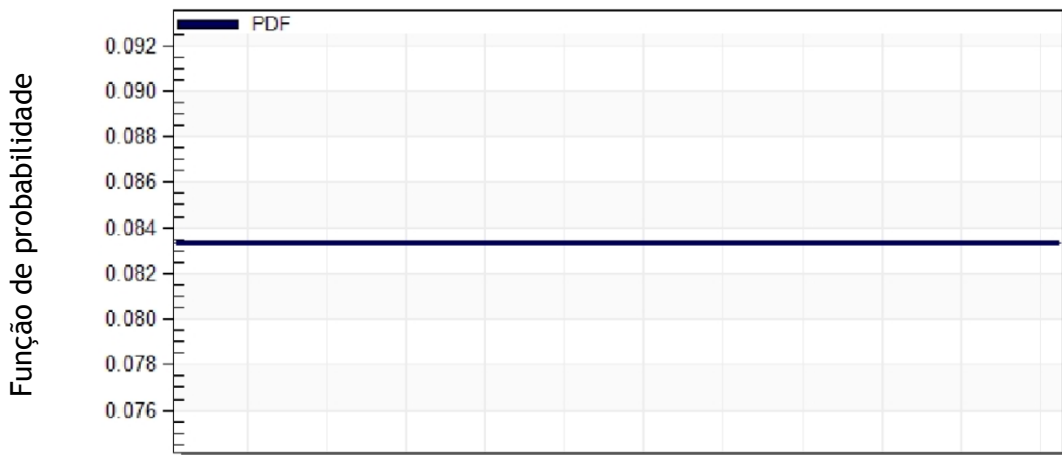
Variável dependente *Ventilação natural (renovação de ar)* 08

Probabilidade de distribuição Triangular

Características de distribuição Valor de pico: 0,6; Mínimo: 0,0; Máximo: 1,2



Variável dependente	<i>Percentual de abertura na fachada</i>	09
Probabilidade de distribuição	Uniforme	



Anexo

4.3. Anexo 1) Características dos materiais segundo NBR 15220.

Tabela B.3 - Densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) de materiais

	ρ (kg/m ³)	λ (W/(m.K))	c (kJ/(kg.K))
Argamassas			
argamassa comum	1800-2100	1,15	1,00
argamassa de gesso (ou cal e gesso)	1200	0,70	0,84
argamassa celular	600-1000	0,40	1,00
Concreto (com agregados de pedra)			
concreto normal	2200-2400	1,75	1,00
concreto cavernoso	1700-2100	1,40	1,00
Concreto com pozolana ou escória expandida com estrutura cavernosa (ρ dos inertes ~750 kg/m³)			
com finos	1400-1600	0,52	1,00
	1200-1400	0,44	1,00
sem finos	1000-1200	0,35	1,00
Isolantes térmicos			
lã de rocha	20-200	0,045	0,75
lã de vidro	10-100	0,045	0,70
poliestireno expandido moldado	15-35	0,040	1,42
poliestireno estrudado	25-40	0,035	1,42
espuma rígida de poliuretano	30-40	0,030	1,67
Madeiras e derivados			
madeiras com densidade de massa aparente elevada	800-1000	0,29	1,34
carvalho, freijó, pinho, cedro, pinus	600-750	0,23	1,34
	450-600	0,15	1,34
	300-450	0,12	1,34
aglomerado de fibras de madeira (denso)	850-1000	0,20	2,30
aglomerado de fibras de madeira (leve)	200-250	0,058	2,30
aglomerado de partículas de madeira	650-750	0,17	2,30
	550-650	0,14	
placas prensadas	450-550	0,12	2,30
	350-450	0,10	2,30
placas extrudadas	550-650	0,16	2,30
compensado	450-550	0,15	2,30
	350-450	0,12	2,30
aparas de madeira aglomerada com cimento em fábrica	450-550	0,15	2,30
	350-450	0,12	2,30
	250-350	0,10	2,30
palha (capim Santa Fé)	200	0,12	
Metais			
aço, ferro fundido	7800	55	0,46
alumínio	2700	230	0,88
cobre	8900	380	0,38
zinco	7100	112	0,38

Figura 59 - Propriedades térmicas dos materiais. Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2003)

4.4. Anexo 2) Caracterização dos materiais no EnergyPlus segundo WEBER et al (2017).

Disponível em:

http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/Biblioteca_ComponentesConstrutivos_0.pdf. Acessado no dia 08.01.2020.

1. Paredes

CÓDIGO	Composição	e (cm)	λ (W/m.°C)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kg.K)	Rt (m ² . °C/W)	U (W/m ² . °C)
P01	Argamassa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	2,39
	Cerâmica	1,65	0,90	1600	0,92	0,018	
	Câmara de ar	10,7				0,268	
	Cerâmica	1,65	0,90	1600	0,92	0,018	
	Argamassa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	
P02	Argamassa	2,50	1,15	2000	1,00	0,057	2,21
	Cerâmica	1,65	0,90	1600	0,92	0,018	
	Câmara de ar	10,7				0,268	
	Cerâmica	1,65	0,90	1600	0,92	0,018	
	Gesso	2,00	0,35	900	0,87	0,057	
P03	Argamassa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	1,61
	Cerâmica	1,65	0,90	1600	0,92	0,018	
	Câmara de ar	10,7				0,268	
	Cerâmica	1,65	0,90	1600	0,92	0,018	
	Câmara de ar	5,00				0,386	
	Placa melamínica	0,60	0,27	1500	2,30	0,022	
P04	Argamassa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	0,41
	Cerâmica	1,65	0,90	1600	0,92	0,018	
	Câmara de ar	10,7				0,268	
	Cerâmica	1,65	0,90	1600	0,92	0,018	
	EPS	8,00	0,04	35	1,40	2,000	
	Placa melamínica	0,60	0,27	1500	2,30	0,022	

2. Coberturas

CÓDIGO	Composição	e (cm)	λ (W/m.°C)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kg.K)	Rt (m ² . °C/W)	U (W/m ² . °C)
C01	Telha sanduíce (PU)	4,20	0,0315	136	1,67	1,334	0,55
	Câmara de ar	25,0				0,21	
	Forro de gesso	3,00	0,35	900	0,87	0,086	
C02	Telha sanduíche (PU)	4,20	0,0315	136	1,67	1,334	0,53
	Câmara de ar	25,0				0,21	
	Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023	
	Cerâmica	1,20	1,05	2000	0,92	0,011	
	Câmara de ar	4,60				0,081	
	Cerâmica	1,20	1,05	2000	0,92	0,011	
	Argamassa	1,00	1,15	2000	1,00	0,009	