

Universidade Federal do Espírito Santo
Centro de Artes
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

ARIANE LOUZADA SASSO-FERRÃO

**TERRAÇO CAPIXABA: ESTRATÉGIA PASSIVA FRENTE ÀS
MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Vitória - ES
2022

ARIANE LOUZADA SASSO-FERRÃO

**TERRAÇO CAPIXABA: ESTRATÉGIA PASSIVA FRENTE ÀS
MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Dissertação desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo - PPGAU - da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Edna A. Nico Rodrigues.

*Vitória - ES
2022*

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

S252t Sasso-Ferrão, Ariane Louzada, 1981-
Terraço Capixaba: Estratégia passiva frente às mudanças climáticas / Ariane Louzada Sasso-Ferrão. - 2022.
153 f. : il.

Orientadora: Edna Aparecida Nico-Rodrigues.
Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Artes.

1. Arquitetura e clima. 2. Mudanças climáticas. 3. Construção civil. 4. Telhados - Projetos e construção. 5. Normas técnicas (Engenharia). I. Nico-Rodrigues, Edna Aparecida. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Artes. III. Título.

CDU: 72

ARIANE LOUZADA SASSO FERRÃO

“TERRAÇO CAPIXABA: ESTRATÉGIA PASSIVA FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito final para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Aprovada em 29 de setembro de 2022.

Comissão Examinadora

Profa. Dra. Edna Aparecida Nico Rodrigues
(orientadora – PPGAU/UFES)

Profa. Dra. Cristina Engel de Alvarez
(membro interno – PPGAU/UFES)

ROBERTA VIEIRA GONCALVES DE SOUZA:70888167687 Assinado de forma digital por ROBERTA VIEIRA GONCALVES DE SOUZA:70888167687
Dados: 2022.11.14 08:55:03 -03'00'

Profa. Dra. Roberta Vieira Gonçalves de Souza
(membro externo – UFMG)

ASSINATURA

Documento original assinado eletronicamente, conforme MP 2200-2/2001, art. 10, § 2º, por:

CRISTINA ENGEL DE ALVAREZ
CIDADÃO
assinado em 24/10/2022 11:36:53 -03:00



INFORMAÇÕES DO DOCUMENTO

Documento capturado em 24/10/2022 11:36:53 (HORÁRIO DE BRASÍLIA - UTC-3)
por CRISTINA ENGEL DE ALVAREZ (CIDADÃO)
Valor Legal: ORIGINAL | Natureza: DOCUMENTO NATO-DIGITAL

A disponibilidade do documento pode ser conferida pelo link: <https://e-docs.es.gov.br/d/2022-8Q6TVB>

DEDICATÓRIA

À D^a. Almerinda Dillen, minha querida avó. Mulher forte, muito à frente do seu tempo.

A Heitor, Ana e Alex.

AGRADECIMENTO

Agradeço inmensuravelmente à Professora Dr^a Edna Aparecida Nico-Rodrigues, professora na graduação e orientadora no mestrado, pela compreensão, apoio e ajuda. Pelo olhar humano e pela confiança ao me entregar o Terraço Capixaba no meio da pandemia da Covid-19. Pela gentileza e pela misericórdia (*miserere-cordis*) ao ensinar, e na forma como acolheu meus limites e desafios.

Às Professoras Dr^a. Cristina Engel de Alvarez e Dr^a. Roberta Vieira Gonçalves de Sousa, referências que tanto contribuíram para o processo de desenvolvimento e revisão da pesquisa.

Aos demais Professores Doutores e Pós-doutores que me ajudaram a construir esses dois anos de pesquisa: Professora Eneida Maria Souza Mendonça, Professor Bruno Massara Rocha, Professor Jarryer Andrade de Martino e Professora Andréa Coelho Laranja (PPGAU) e Professores Doutores e Pós-doutores Carlos Afonso Nobre, Wagner Soares e Madlles Queiroz (PPGEA).

Ao sempre solícito Wendelsol Silva Lima, ou Wendel PPGAU, nosso assistente de administração. Pela ajuda, por tirar as dúvidas, por responder todos os e-mails, por mandar os documentos. Obrigada Wendel!

Às amigas e colegas Professoras MSc. Leticia Maria Andrião Rocha e Professora Layra Freire Pereira Marin, pelo encontro, apoio e incentivo.

Aos colegas de trabalho da Quali-A Conforto Ambiental e Eficiência Energética, pelo apoio, trocas, e pela companhia diária.

À minha querida família pelo suporte sempre. Aos meus pais Ângela, André e Jacyra.

Aos amores da minha vida: Heitor, Ana e Alexander. Pela compreensão na ausência, e pela alegria na presença. Por me ajudarem a ser a melhor mãe que eu poderia ser, durante o processo do mestrado. À minha companheira Ana, que me ajudou enormemente no levantamento e fez com que as caminhadas fossem mais prazerosas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida.

Ao ensino público gratuito e de qualidade, mantido pelos milhões de cidadãos que sustentam o nosso país.

À Universidade Federal do Espírito Santo pela oportunidade do ensino remoto em forma EARTE durante o período de pandemia da Covid-19, sem o qual seria impossível chegar ao fim deste processo de aperfeiçoamento profissional e acadêmico.

“Ser capaz de olhar o que não se olha, mas que merece ser olhado.
As pequenas, as minúsculas coisas da gente anônima. De gente que os intelectuais costumam desprezar.
Esse micromundo onde eu acredito que se alimenta de verdade a grandeza do universo. E ao mesmo tempo ser capaz de alimentar, de contemplar o universo através do buraco da fechadura, ou seja, a partir das pequenas coisas ser capaz de olhar as grandes, os grandes mistérios da vida.”

Eduardo Galeano

RESUMO

Diante das mudanças do clima os desafios energéticos imposto às edificações tem suscitado a pesquisa e o desenvolvimento de soluções para o enfrentamento do aumento da demanda energética e, ao mesmo tempo, do aumento da emissão de gases de efeito estufa (GEE). A íntima relação entre demanda energética e emissão de GEE habitualmente apontam para a busca de recursos passivos, que corroborem com a redução de cargas térmicas sem consumo de energia. Assim, a pesquisa analisou diferentes tipos de cobertura em relação ao desempenho térmico na condição do clima atual, e dois diferentes tipos de coberturas na condição de clima futuro de alta emissão de gases de efeito estufa, em região quente e úmida, sob estresse ocasionado pela ausência de ventilação; considerando nas análises a utilização do Terraço Capixaba (TC) como estratégia passiva para melhoria do desempenho térmico durante a vida útil (VU) de edifícios brasileiro. O processo metodológico desenvolvido durante a pesquisa permitiu identificar a dificuldade para edifícios alcançarem os níveis intermediário e superior em regiões com condição de ventilação desfavorável. A metodologia investigativa foi desenvolvida em cinco etapas: **Etapa 1:** a qual tratou da justificativa para escolha e caracterização da área de estudo; **etapa 2:** levantamento de observação; **etapa 3:** modelagem; **etapa 4:** avaliação termo-energética; **etapa 5:** avaliação termo-energética em cenários futuros. Os resultados apontaram para a capacidade dos sistemas de cobertura do tipo terraço capixaba contribuírem para a melhoria do desempenho térmico de edificações, nas condições de clima do recorte amostral, até a proximidade dos anos de 2050 com a continuidade do processo de mudanças do clima, e a tendência de se tornarem incapazes de continuar contribuindo posteriormente. Secundariamente as análises indicaram fragilidades no critério para a definição de faixas de temperaturas operativa (FT) da metodologia da NBR 15575/2021, baseado exclusivamente na temperatura de bulbo seco (TBS) de arquivos climáticos, sem considerar outras variáveis climáticas. Além disso observou-se que a forma utilizada para a definição das FT, as quais são definidas considerando parâmetros do conforto adaptativo, pode mascarar os resultados de desempenho, conferindo à uma pior relação modelo-de-referência–modelo-real um nível de desempenho mais elevado, e à uma melhor relação modelo-de-referência–modelo-real desempenho menos elevado, e com maior dificuldade de galgar níveis acima do mínimo, o que ocorre exclusivamente em virtude da FT utilizada na análise, e da dependência de condições de vento capaz de realizar dissipação de calor no ambiente construído, o que tende a obsolescência em diversas regiões do país com a continuidade do processo de mudanças climáticas.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Desempenho termo-energético. Cobertura de pele dupla. Cobertura flutuante. Cobertura para ZB8.

ABSTRACT

Faced with climate change, the energy challenges imposed on buildings have given rise to research and the development of solutions to face the increase in energy demand and, at the same time, the increase in the emission of greenhouse gases (GHG). The intimate relationship between energy demand and GHG emissions is usually directed towards the search for passive resources, which corroborate with the reduction of temperatures without energy consumption. Thus, the research analyzed different roof system in relation to thermal performance in the current climate condition, and two different roof systems in the future climate condition of high emission of greenhouse gases, in a hot and humid region, under stress caused by the absence of ventilation; considering in the analyzes the use of Terraço Capixaba (TC) as a passive strategy to improve the thermal performance during the useful life (VU) of Brazilian buildings. The methodological process developed during the research allowed identifying the difficulty for buildings to reach intermediate and superior levels in regions with unfavorable ventilation conditions. The investigative methodology was developed in five stages: **Stage 1**: which dealt with the justification for choosing and characterizing the study area; **stage 2**: observation survey; **step 3**: modeling; **step 4**: thermal evaluation; **step 5**: thermal evaluation in future scenarios. The results pointed to the ability of roofing systems of the terraço capixaba contributes to the improvement of the thermal performance of buildings, in the climate conditions of the sample cutout, until the proximity of the 2050's with the continuity of the climate change process, and the tendency to become unable to continue contributing later. Secondly, the analyzes indicated weaknesses in the criterion for defining operating temperature ranges (FT) of the NBR 15575/2021 methodology, based exclusively on the dry bulb temperature (TBS) of climate files, without considering other climate variables. In addition, was observed that the way used to define the FT, which are defined considering parameters of adaptive comfort, can mask the performance results, giving to a worse performance level to a reference-model-real-model relationship a higher performance level, and to a better model-reference-model-real relationship, less high performance, and with greater difficulty in climbing levels above the minimum, which occurs exclusively due to the FT used in the analysis, and the dependence on wind conditions capable of dissipating heat in the built environment, which tends to obsolescence in several regions of the country with the continuity of the climate change process.

Keywords: Climate change. Thermal performance. Double skin roof. Floating roof. Roof system for brazilian ZB8.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Medidas de Mitigação na Oferta e Demanda de Energia.....	20
Figura 2: Terraço capixaba. Vista da R. Vieira da Cunha, Bairro de Vila Isabel, Castelo-ES.....	22
Figura 3: Telhado flutuante.....	22
Figura 4: Folha de São Paulo, 10/04/1957.....	25
Figura 5: Medidas de mitigação no setor de construção - estratégias.....	26
Figura 6: Síntese das mudanças extremas relacionadas ao calor extremos observada e confiança na contribuição humana para as mudanças observadas.....	27
Figura 7: Representação poligonal utilizada em análises de tendências históricas e futuras mudanças de clima em <i>Assessment Reports</i> – América do Sul.....	28
Figura 8: Emissões globais direta e indireta a partir da energia e produção de calor em subsectores das construções.....	29
Figura 9: Emissões latino-americanas direta e indireta a partir da energia e produção de calor em subsectores das construções.....	30
Figura 10 (a e b): Primeira casa <i>Passive House</i> Brasileira.....	31
Figura 11 (a e b): Princípio da ventilação de fluxo duplo: analogia entre sistema de ventilação controlada com recuperação de calor e sistema respiratório humano.....	32
Figura 12: Recuperador de calor e célula higroscópica.....	32
Figura 13: Uso de energia no Brasil pelo setor residencial em 2020.....	33
Figura 14: Representação esquemática da rede cartesiana dos modelos climáticos de circulação geral.....	38
Figura 15: Conceito do UTCI como temperatura equivalente da resposta dinâmica multivariada do modelo termo fisiológico UTCI-Fiala (Fiala et al. 2012), acoplado a um modelo de vestuário (Havenith et al. 2012).....	44
Figura 16: Número de dias acima do limite fisiológico mortal.....	45
Figura 17: Número de artigos por país.....	49
Figura 18: Principais características dos sistemas de cobertura encontrados por Abuseif e Gou (2018) – sem utilização de água.....	50
Figura 19: Principais características dos sistemas de cobertura encontrados por Abuseif e Gou (2018) – com utilização de água (<i>Roof Ponds</i>).....	51
Figura 20: Comparação entre propriedades térmicas de tipos de cobertura.....	55
Figura 21: Acequia Real do El Generalife, Granada, Andaluzia, Espanha.....	56
Figura 22: Edificações com terraços cobertos do bairro de Albaicín, Granada, Andaluzia, Espanha.....	56
Figura 23: Edificações com terraços cobertos do bairro de Albaicín, Granada, Andaluzia, Espanha.....	56
Figura 24: Edificações com terraço coberto. Rua Europa, Sevilla, Andaluzia, Espanha.....	56
Figura 25: Edificações com terraços cobertos. Rua Dos de Mayo, Sevilla, Andaluzia, Espanha.....	56
Figura 26: Fluxograma da Metodologia de Pesquisa.....	59
Figura 27: Fluxograma Subprocesso da Metodologia de Pesquisa – Avaliação Termo-energética em Cenários Futuros de altas emissões de GEE.....	60
Figura 28 (a e b): Classificação do Clima Brasileiro de acordo com Köppen (1936) e recorte da classificação para o estado do Espírito Santo.....	61
Figura 29: Temperaturas médias anuais registradas pelo INCAPER (1977-2006).....	62
Figura 30: Modelo digital de Terreno – Alegre, ES.....	63
Figura 31: Modelo digital de Terreno – Castelo, ES.....	64
Figura 32: Ventos predominantes região Sul do Espírito Santo.....	65
Figura 33: Relação geomorfológica entre Alegre e Castelo (ES) e ventos.....	66
Figura 34: Fluxo de ventos de zonas de alta pressão para zonas de baixa pressão.....	67

Figura 35: Ventilação em vale ao longo do ciclo diário.....	67
Figura 36: Frequência e Velocidades Predominantes de ventos na cidade de Alegre (ES).	72
Figura 37: Diagrama solar Alegre (ES) com temperaturas e radiação global média.	74
Figura 38: Cadeias de montanhas de Castelo.	75
Figura 39: Situação Bairro Vila Isabel.	76
Figura 40: Aproximação do recorte amostral.	77
Figura 41: Recorte amostral.	78
Figura 42: Exemplos de casas isoladas em lote.....	79
Figura 43: Exemplos de casas não conjugadas em mesmo lote.	79
Figura 44: Exemplo de casas conjugadas em mesmo lote – mesmo nível.	79
Figura 45: Exemplo de casas conjugadas em mesmo lote – diferentes níveis, 2021.	79
Figura 46: Tipo de cobertura 1 - UH com cobertura de telhas à vista.....	80
Figura 47: Tipo de cobertura 2 - UH com cobertura de telhas à vista e abertura de ventilação.....	80
Figura 48: Tipo de cobertura 3 - UH com platibandas.	80
Figura 49: Tipo de cobertura 4 - UH com terraço capixaba.....	80
Figura 50: Tipo de cobertura 5 - UH com laje de concreto exposta.....	80
Figura 51: Levantamento dos tipos de coberturas.	81
Figura 52: Informação da Construção: Modelo Unifamiliar.	84
Figura 53: Informação da Construção: Modelo Unifamiliar.	84
Figura 54: Mref, vista sudeste, OpenStudio.	86
Figura 55: Mref, vista noroeste, OpenStudio.	86
Figura 56: Mref_T, vistas sudeste e noroeste, OpenStudio.....	87
Figura 57: Mnor, vistas sudeste e noroeste, OpenStudio.	87
Figura 58: Modelos de Mnor, vistas sudeste e noroeste, OpenStudio.....	87
Figura 59: Modelos derivados de Mnor, vistas sudeste e noroeste, OpenStudio.	88
Figura 60: Tabelas 20 e 21 da NBR 15575-1/2021 com o fluxo de trabalho para modelos com PHFT _{UH,ref} abaixo de 70%.	92
Figura 61: Ábaco e equações para obtenção do Δ PHFT _{mín} quando o PHFT _{UH,ref} for inferior a 70%.	93
Figura 62: Critério Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT _{UH}). Fonte: ABNT, 2021a.	93
Figura 63: Interface Ferramenta CCWorldWeatherGen.	98
Figura 64: Variação média mensal e para variáveis climáticas em cenários 2050's.....	99
Figura 65: Variação média mensal e para variáveis climáticas em cenários 2080's.....	99
Figura 66: Mudança na temperatura máxima média anual.....	103
Figura 67: Heat map anual APP Sala em Mref – relação hora-temperatura.	112
Figura 68: Heat map anual APP Sala em Mnor – relação hora-temperatura.....	112
Figura 69: Heat map anual APP Sala em Mnor_T – relação hora-temperatura.	113
Figura 70: Heat map anual APP Q1 em Mref – relação hora-temperatura.	115
Figura 71: Heat map anual APP Q1 em Mnor – relação hora-temperatura.....	115
Figura 72: Heat map anual APP Q1 em Mnor_T – relação hora-temperatura.	116
Figura 73: Heat map anual APP Q2 em Mref – relação hora-temperatura.	118
Figura 74: Heat map anual APP Q2 em Mnor_T – relação hora-temperatura.	118
Figura 75: Apresentação parcial da ferramenta de apoio ao método simplificado de avaliação Metamodelo da INI-R.	143
Figura 76: Tabelas 20 e 21 da NBR 15575-1/2021.	145
Figura 77: Ábaco e equações para obtenção do Δ PHFT _{mín} quando o PHFT _{UH,ref} for inferior a 70%.	146

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Distribuições de mortalidade de verão relacionada ao calor em experimentos década 2010, e em climas com temperaturas estabilizadas em +1,5 ° C e +2 ° C do registro para a década..	42
Gráfico 2: Número de artigos por clima.....	48
Gráfico 3: Quantitativo de publicações para cada sistema de cobertura.	48
Gráfico 4: Estatística mensais de velocidades horárias de ventos.....	72
Gráfico 5: Estatística anual de estresse térmico por UTCI para o período 2001-2010.	73
Gráfico 6: Gráfico Global Horizontal Média Mensal.....	74
Gráfico 7: Temperaturas anuais horárias de Alegre a partir do arquivo climático e Limite Superior da Faixa de Temperatura Operativa.	90
Gráfico 8: Variação média mensal e para temperaturas em cenários 2050's.....	100
Gráfico 9: Variação média mensal de variáveis climáticas cobertura de nuvens, precipitação umidade relativa e velocidade de ventos em cenários 2050's.....	100
Gráfico 10: Variação média mensal de radiação solar horizontal em cenários 2050's.....	100
Gráfico 11: Variação média mensal e para temperaturas em cenários 2080's.....	101
Gráfico 12: Variação média mensal de variáveis climáticas cobertura de nuvens, precipitação umidade relativa e velocidade de ventos em cenários 2080's.....	102
Gráfico 13: Variação média mensal de radiação solar horizontal em cenários 2080's.....	102
Gráfico 14: Percentual de horas dentro da faixa de temperatura operativa dos modelos de UH (PHFT _{UH}).....	105
Gráfico 15: Temperaturas operativas de APP em Mref com sobreposição da TBS do arquivo climático.....	107
Gráfico 16: Temperaturas operativas de APP em Mnor com sobreposição da TBS do arquivo climático.....	108
Gráfico 17: Temperaturas operativas de APP em Mnor_T com sobreposição da TBS do arquivo climático.....	109
Gráfico 18: Temperaturas operativas do APP Sala em Mref, Mnor e em Mnor_T.....	111
Gráfico 19: Temperaturas operativas do APP Q1 em Mref, Mnor e em Mnor_T.....	114
Gráfico 20: Temperaturas operativas do APP Q2 em Mref, Mnor e em Mnor_T.....	117
Gráfico 21: PHFT _{UH} sazonal JanMar.	120
Gráfico 22: PHFT sazonal JanMar por APP – Sala, Q1 e Q2.....	121
Gráfico 23: PHFT _{UH} sazonal SetDez.....	123
Gráfico 24: PHFT sazonal SetDez por APP – Sala, Q1 e Q2.....	124
Gráfico 25: PHFT _{UH} sazonal JanMar + SetDez.....	125
Gráfico 26: PHFT _{UH} período atual, <i>slicetime 2050's</i> e <i>slicetime 2080's</i>	127

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Compêndio de tabelas do método de simulação da NBR 15575-1/2021 – Tabela 2, Tabela 3.....	36
Quadro 2: Comparação entre propriedades térmicas de tipos de cobertura.	47
Quadro 3: Resumo das capacidades de melhoria de desempenho térmico de diferentes tipos de cobertura.....	52
Quadro 4: Porcentagem de redução do ganho de calor e a redução da temperatura dentro do edifício.	54
Quadro 5: Considerações sobre fluxos atmosféricos sobre relevo em Alegre e Castelo (ES).	68
Quadro 6: Zonas Naturais e Informações de Temperatura Alegre e Castelo (ES).	70
Quadro 7: Unidades Habitacionais Unifamiliares (UH) existentes no recorte amostral, demonstrando com indicação dos tipos de cobertura considerado.	82
Quadro 8: Representação dos modelos reais analisadas.....	87
Quadro 9: Representação dos modelos reais analisadas.....	88
Quadro 10: Interações e relações entre os modelos simulados	96
Quadro 11: Síntese dos resultados obtidos por modelos com TC no recorte amostral	128
Quadro 12: Tabela 4 da NBR 15575-1/2021 – Níveis de desempenho.....	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Mapa de cor de velocidades de vento média horária para o mês em m/s de Alegre-ES. ..	69
Tabela 2: Mapa de cor de velocidades de vento média horária para o mês em m/s de Alegre-ES. ..	71
Tabela 3: Tabulação de características construtivas das unidades habitacionais - Sistemas de Cobertura.....	82
Tabela 4: Análise dos parâmetros normativos e legislativos para áreas de elementos transparentes e ventilação.	85
Tabela 5: Propriedades térmicas de paredes e pisos para o modelo de referência (Tabela 7 – NBR 15575-1/2021).....	86
Tabela 6: Propriedades térmicas da cobertura para o modelo de referência (Tabela 8 – NBR 15575-1/2021)	86
Tabela 7: Propriedades térmicas do material de isolamento da cobertura para o modelo de referência na zona bioclimática 8 (Tabela 9 – NBR 15575-1/2021).....	87
Tabela 8: Propriedades térmicas da cobertura para o Mref_T.....	87
Tabela 9: Propriedades térmicas para Modelos Energéticos Reais sem TC.....	88
Tabela 10: Temperaturas operativas do APP Q1 em Mref e em Mnor_T.....	123
Tabela 11: Relação entre os PHFT _{APP} de Mnor e Mnor_T em função dos períodos sazonais e da cobertura.....	125
Tabela 12: Anomalias de janeiro.....	152
Tabela 13: TO dos APP em JanMar e SetDez. Dados de saída de 05 de janeiro à 31 de março e 01 de setembro à 31 de dezembro.	153

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTAC	Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers
BEM	Balço Energético Nacional
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CB3E	Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações
COP-21	21ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas
EN	European Committee for Standardization
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPW	EnergyPlus Weather
ES	Espírito Santo (Estado)
FT	Faixa de Temperatura Operativa
IEA	International Energy Agency
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INI-R	Instrução Normativa do Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
IJSN	Instituto Jones dos Santos Neves
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NZEBs	Edifícios de Balço Energético Próximo a Zero
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PHFT	Percentual de Horas Dentro da Faixa de Temperatura Operativa
PHPP	Passive House Planning Package
PHI	Passive House Institute
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
ProjetEEE	Projetando Edificações Energeticamente Eficientes
RedCgTT	Redução de Cargas Térmicas Totais
TBS	Temperatura de Bulbo Seco
TBSm	Temperatura de Bulbo Seco Média Anual
TBU	Temperatura de Bulbo Úmido
TMY	Test Meteorological Year
TO	Temperatura Operativa
TRY	Test Reference Year
UH	Unidade Habitacional Unifamiliar
ZB	Zona Bioclimática

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO, PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA.....	19
1.1. Problema:	23
1.1.1. Problema principal:	23
1.1.2. Problema secundário:	23
1.2. Hipótese.....	23
1.3. Objetivo Geral.....	24
1.4. Objetivos Específicos.....	24
2. REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1. Fatos Inequívocos – Assessment Report Fifth & Sixth (AR5 e AR6):	25
2.2. A eficiência energética no Brasil e a Norma de Desempenho	33
2.2.1. Metodologia de avaliação de desempenho térmico de edifícios – NBR 15575/2021 – Método de simulação computacional.....	35
2.3. Os estudos de edifícios em cenários de clima com aumento de emissões de gases de efeito estufa (GEE)	37
2.4. A saúde, a mudança do clima, e o desempenho térmico atual de edifícios brasileiros	41
2.5. Desempenho Térmico dos Sistemas de Cobertura (SC).....	46
2.6. Terraço Capixaba (TC).....	55
3. METODOLOGIA DA PESQUISA.....	58
3.1. Justificativa para escolha da área de estudo	60
3.2. Etapa 1 – Caracterização da área de estudo	72
3.2.1. Dados de clima - Alegre.....	72
3.2.2. Dados de relevo e recorte para observação - Castelo	74
3.3. Etapa 2 – Levantamento de observação	77
3.4. Etapa 3 – Modelagem.....	83
3.5. Etapa 4 – Avaliação Termo-energética	89
3.6. Etapas 5 e 6 – Avaliação Termo-energética em Cenários Futuros e Geração Cenários de Alta Emissão de Gases de Efeito Estufa	97
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	104
4.1. Desempenho térmico das UH em clima atual – anual.....	104
4.1.1. Análise anual do percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa entre unidades habitacionais (PHFT _{UH}).....	104
4.1.2. Análise anual das TO dos APP de Mref, Mnor e Mnor-T.....	106
4.1.3. Análise sazonal do percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa das unidades habitacionais (PHFT _{UH})	119
4.1.4. Análise do incremento sazonal do PHFT de Mref, Mnor e Mnor-T	125
4.2. Desempenho térmico da UH em clima atual – clima futuro – 50's e 80's.....	126
5. CONCLUSÕES.....	130
5.1. Limitações da pesquisa.....	132

5.2. Melhorias para publicações futuras.....	132
BIBLIOGRAFIA.....	134
ANEXOS.....	142
ANEXO 1 – INTERFACE METAMODELO INI-R.....	143
ANEXO 2 – TABELAS E ÁBACOS DA NBR 15575-1/2021.....	144
APÊNDICES.....	147
APÊNDICE 1 - FORMULÁRIOS DE RUA.....	148
APÊNDICE 2 – CABEÇALHO PLANILHA DE ANÁLISE DE DADOS.....	150
APÊNDICE 3 – INCONSISTÊNCIAS DO ARQUIVO CLIMÁTICO PARA O PERÍODO SAZONAL JANEIRO-MARÇO.....	152

1. INTRODUÇÃO, PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA

Os impactos das mudanças climáticas são discutidos desde 1960 (MANABE, e WETHERALD, 1967), e a partir de 1980 foram ampliados os estudos na temática (ALVAREZ e BRAGANÇA, 2018). Em 2018 a NASA apontou que a temperatura foi 0,83°C mais alta do que a média do período de 1951 a 1980, e os cinco anos seguintes foram os mais quentes do registro moderno (NASA, 2018, FERRÃO-SASSO; NICO-RODRIGUES, 2022, MACHADO et al., 2023). O aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, provenientes de atividades antrópicas, será considerado fator inequívoco responsável pelas mudanças no clima, a partir da publicação do texto completo do sexto *Assessment Reports* do *Intergovernmental Panel on Climate Change*, previsto para setembro de 2022, que incluirá o texto do *Work Group I (WGI)* e que já está disponibilizado (IPCC, 2022).

Na Europa, que objetiva reduzir até 90% dos GEE até 2050, os códigos de edificações nacionais têm incorporado as diretrizes da *Energy Performance of Building Directive* (WASSOUF, 2014), com a adoção de características passivas e ativas de projetos arquitetônicos, haja vista a importância da indústria da construção civil no processo de geração de GEE, e a grande demanda de energia primária durante a fase de uso dos edifícios. A adequação dos projetos arquitetônicos a normas como a *Passivhaus* tem apresentado resultados importantes (WASSOUF, 2014) para alcançar esse objetivo, uma vez que reduzir a demanda de energia primária representa reduzir a geração de GEE (SASSO-FERRÃO; NICO-RODRIGUES, 2022).

Embora o Brasil ocupe posição única entre as economias mundiais devido à sua baixa de emissão de GEE oriundos de combustíveis fósseis dado à predominância da utilização de energias renováveis, sobretudo energia elétrica de origem hídrica, existem grandes fontes de emissões de GEE no país, como a agropecuária, as mudanças no uso do solo, devido ao desmatamento para expansão da fronteira agropecuária. O país ainda enfrenta o desafio de melhorar o padrão de vida da maioria da população, o que inclui oferta de habitações com melhores padrões de qualidade e desempenho, e ao mesmo tempo se manter numa trajetória de desenvolvimento com baixas emissões de GEE do sistema energético, lançando novas estratégias de descarbonização de sua economia (ROVERE, 2016).

Deve-se ressaltar que, embora na matriz energética brasileira predomine a energia hidrelétrica, os limites ambientais e territoriais para o aumento da produção se impõem como grande desafio. E a transmissão da energia produzida em um país continental como o Brasil acarreta perdas baixa eficiência do sistema.

Os principais compromissos firmados voluntariamente pelo Brasil durante a COP-21 em Paris estabeleceram “meta de redução das emissões totais do país em 37% no ano de 2025 e de 43% em 2030, com relação ao nível registrado em 2005 sendo que apenas o objetivo da União Europeia é comparável em termos de alta ambição (ROVERE, 2016). Especialistas brasileiros afirmam que:

existe um potencial enorme para redução das emissões nacionais de GEE através da implantação de um amplo espectro de medidas de mitigação, incluindo: eficiência energética, energias renováveis, técnicas agropecuárias de baixo carbono, mudanças de modais de transportes, captura de metano no setor de resíduos (aterros sanitários e estações de tratamento de esgotos) e reflorestamento com espécies nativas e de crescimento rápido. (ROVERE, 2016, p.3)

Mas, no âmbito da eficiência energética, os documentos não explicitam a relação entre eficiência energética e edificações, e o potencial de colaboração com a eficiência energética de edifícios, na tentativa de alcançar as metas dos compromissos assumidos na COP-21 frente as necessidades energéticas críticas do país.

“O sistema energético contempla o conjunto de atividades emissoras de GEE associadas à produção e consumo de energia no país” (ROVERE et al., 2016, p.40). Estudos e relatórios importantes como o Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Mitigação de Gases de Efeito Estufa no Brasil Até 2030 Sumário Técnico, de 2016, apresentaram dados sobre as perspectivas de mitigações setoriais, com base nos resultados do acordo de Paris. O setor Energia abordou a necessidade do aumento da eficiência energética dos setores residências e de serviços até 2030 conforme Figura 1 (destaque vermelho).

Medidas de Mitigação pelo Lado da Oferta de Energia	Nível CPG em 2030	Nível MA1 em 2030	Nível MA2 em 2030
Redução da expansão de usinas termelétricas a combustíveis fósseis	Carvão Mineral: CapInst = 4.705 MW Gás Natural: CapInst = 24.330 MW	Carvão Mineral: CapInst = 3.705 MW Gás Natural: CapInst = 19.300 MW	Carvão Mineral: CapInst = 3.705 MW Gás Natural: CapInst = 14.134 MW
Expansão da geração a bagaço de cana	Capacidade instalada: 17.170 MW	Capacidade instalada: 27.170 MW	Capacidade instalada: 27.170 MW
Expansão da geração eólica	Capacidade instalada: 24.325 MW	Capacidade instalada: 31.325 MW	Capacidade instalada: 29.325 MW
Expansão da geração solar PV concentrada	Capacidade instalada: 6.500 MW	Capacidade instalada: 6.500 MW	Capacidade instalada: 8.500 MW
PV em geração distribuída	10.000 MW	10.000 MW	10.000 MW
Expansão da geração hidrelétrica	Capacidade instalada: 134.086 MW	Capacidade instalada: 134.086 MW	Capacidade instalada: 144.086 MW
Melhorias em refinarias	Óleo processado: 2,68 Mbbl/dia	Mantém CPG	Ganhos de eficiência energética de 3% em todas as refinarias existentes até 2025
Aumento da eficiência energética no setor residencial	Consumo energético: 33,7 Mtep	Maior eficiência nos queimadores dos fogões a GLP	Maior penetração de aquecedores termossolares e substituição de lâmpadas fluorescentes por LED
Aumento da eficiência energética no setor de serviços	Consumo energético: 24,0 Mtep	Substituição de lâmpadas fluorescentes tubulares de 40 W pelas lâmpadas fluorescentes tubulares de 32 W	Igual ao MA1
Uso de biocombustíveis no setor agropecuário	Consumo energético: 14,6 Mtep	Uso de 10% de biodiesel misturado ao óleo diesel a partir de 2020.	Mistura de biodiesel aumentaria para 15% a partir de 2020

Figura 1: Medidas de Mitigação na Oferta e Demanda de Energia

Fonte: ROVERE et al., 2016.

Todavia, observou-se que as ações propostas se apresentaram incipientes diante das reais necessidades energéticas do país, e não abrangeu aspectos importantes da demanda energética que tange as edificações, como conforto ambiental e conservação de alimentos, limitando-se ao aquecimento de água.

Segundo Abrahão e Souza (2021), a etiquetagem de eletrodomésticos ainda apresenta elevando potencial para reduzir a necessidade de expansão da matriz energética relacionada a edifícios, e a adoção de medidas que incorporem o atendimento aos critérios relacionados ao conforto e bem-estar humano na construção de edifícios, que esbarra em limitações econômicas, demandará empenho governamental, sobretudo nas habitações de interesse social.

Considerando que “o sistema energético contempla o conjunto de atividades emissoras de GEE,” nas palavras de Rovere et al. em 2016, as ações do país para emissões de GEE no setor energético apresentaram-se superficiais e tímidas.

O *Fourth Assessment Report* (AR4), de 2007, foi o primeiro a concluir que o processo de aquecimento do sistema climático é inequívoco, pois mudanças com tendência de permanência foram documentadas em todos os principais elementos do sistema climático: atmosfera, terra, criosfera, biosfera e oceano (MASSON-DELMOTTE et al., 2021). O trabalho desenvolvido pelo *Work Group I* (WGI) para o *Sexty Assessment Report* (AR6) de 2022 avaliou novas evidências científicas de relevância, em um mundo cujo sistema climático está mudando rapidamente, predominantemente devido à influência humana.

Estudo desenvolvido por Guarda et. al (2019), indicou que as estratégias de ventilação natural e de resfriamento artificial são as estratégias que mais serão influenciadas pelas mudanças climáticas até o final do século XXI na cidade de Cuiabá-MT. A pesquisa indicou para a cidade que, o potencial de obtenção de conforto térmico por meio da ventilação natural poderá ser reduzido de 56% para 21% das horas anuais até 2080, e que a necessidade de climatização artificial subirá de 9% para 56% das horas do ano.

A redução do potencial de utilização da ventilação natural indicado por Guarda et al. (2019) evidenciou que o resfriamento artificial, recurso energeticamente custoso, assumiria predominância como estratégia de melhoria do conforto térmico de ambientes construídos em regiões quentes como Cuiabá-MT, e que análises sobre as condições climáticas futuras para edificações brasileiras precisariam ser consideradas sob a perspectiva de durabilidade, tempo de uso e vida útil (VU) das edificações.

Considerando a extensão territorial e o clima tropical brasileiro, extrapolar os limites de da cidade de Cuiabá-MT com novas pesquisas torna-se uma necessidade para a construção civil brasileira.

E ainda assim, mesmo que seja razoável que as pesquisas apontem

para a necessidade de direcionamento dos esforços para desenvolvimento de estudos de estratégias bioclimáticas inovadoras, tais como resfriamento evaporativo indireto, ventilação seletiva, resfriamento radiativo noturno, tubos enterrados, dentre outras, que representam um desafio para os projetos arquitetônicos das próximas décadas na mitigação dos efeitos do fenômeno de aquecimento global nas condições ambientais internas das edificações (GUARDA et al., 2019, p.822).

faltam subsídios que apontem as melhores decisões em termos de projetos e de estratégias a serem utilizadas para o enfrentamento do futuro climático no âmbito das edificações.

Considerando a relevância dada à ventilação natural, apresentada como uma das mais importantes estratégias passivas junto ao sombreamento e ao isolamento térmico da envoltória, e como promotora do conforto térmico passivo, (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014; LAN et al., 2017; TUCK et al., 2019), faz-se necessário atentar para os desafios que se apresentam com o processo de mudanças climáticas, em relação à utilização dessa estratégia.

Para análise do impacto energético futuro das edificações no Brasil são considerados diversos aspectos. A Zona Bioclimática (ZB), o entorno construído e o planejamento urbano, são aspectos locais. Os padrões de hábitos de consumo de energia, os equipamentos instalados e a eficiência energética destes equipamentos estão relacionados à cultura e nível socioeconômico, assim como a própria arquitetura dos edifícios (EPE, 2016).

A criação de cenários climáticos futuros a partir de modelos matemáticos mais robustos, e o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais trazem resultados alternativos e animadores nas análises aplicadas à construção civil, colaborando em análises sobre viabilidade futura e a permanência da utilização de estratégias passivas para melhoria do conforto ambiental dentro do ambiente construído, recursos importantes na redução da demanda energética dos edifícios.

A escolha adequada de sistemas e componentes construtivos interfere na capacidade da edificação de reduzir o ganho de calor em climas quentes, sobretudo através das coberturas, uma das principais responsáveis pelos ganhos de carga térmica em edificações de menor porte, ou térreas (LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES et al., 2010; SASSO-FERRÃO; NICO-RODRIGUES, 2022).

Estudos em países de clima quente como Omã tem apresentado resultados importantes quanto à utilização de ventilação no espaço do ático das coberturas com economia de energia significativa quando associado a novos materiais e técnicas (KUMAR; RAUT; AKEEL, 2021). Mesmo nos casos de coberturas de pequeno espaçamento na câmara de ar, a ocorrência da ventilação laminar pode resultar em economia de energia superior a 30% no verão quando comparado a um modelo sem a ventilação do ático (CIAMPI; LECCESE; TUONI, 2005). Em estudo de Yew et al. (2018) sobre edifícios industriais com a utilização de ventilação passiva e ativa do ático associado à barreira de calor radiante – tinta térmica de alto desempenho – demonstrou-se por medição que o modelo com ventilação mecânica apresentou temperatura máxima do ar no ático 15°C mais baixo que o modelo de cobertura do tipo trapezoidal sem barreira radiante e sem quaisquer ventilações do ático.

No estado do Espírito Santo é possível observar a presença dos Terraços Capixabas (TC), como solução popular de sistema de cobertura (SC) de pele dupla normalmente composta por laje de concreto armado, recinto amplamente aberto à ventilação, com pé-direito habitável, e telhamento cerâmico, ou metálico (FERRÃO-SASSO; NICO-RODRIGUES, 2021, 2022).

Entretanto, foram encontradas poucas citações sobre este sistema construtivo. Algumas das poucas referências encontradas estão na publicação de Leite e Montezuma, (2008), e em trabalhos de pesquisa com análises sobre morfologia urbana como nos estudos de Mendonça, França e Maciel (2015), em que os terraços capixabas surgem como solução em último pavimento, para funções diversas (SASSO-FERRÃO; NICO-RODRIGUES, 2022).

Todavia, o terraço capixaba se mostra uma tecnologia construtiva bastante adaptada às condições ambientais e de grande aceitação junto à população da região, sobretudo nas edificações residenciais que contam com menos pavimentos, permitindo o aproveitamento do espaço entre telhamento e piso, para os mais diversos usos, tais como: serviços, recreação, lavanderia, lazer, entre outros (SASSO-FERRÃO; NICO-RODRIGUES, 2021).

Neste tipo de terraço os beirais permanecem abertos na maioria das vezes, sem forração, e não existe a interseção com as vedações verticais. Somente os peitoris e a estrutura de sustentação da cobertura são edificados assemelhando-se aos telhados flutuantes (FERRÃO-SASSO; NICO-RODRIGUES, 2021, 2022), como apresentado pela Figura 2 e pela Figura 3. Na literatura internacional o termo mais aproximado para esta tipologia de cobertura, é “*doble-skin roof*”, ou teto de pele dupla (TPD).



Figura 2: Terraço capixaba. Vista da R. Vieira da Cunha, Bairro de Vila Isabel, Castelo-ES.

Fonte: Autora

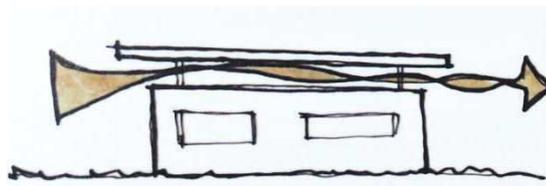


Figura 3: Telhado flutuante.

Fonte: GURGEL, 2012.

1.1. Problema:

Diante da abordagem apresentada em relação aos desafios climáticos e energéticos impostos à arquitetura em clima tropical foram levantados os seguintes questionamentos na problematização da pesquisa:

- 1- Qual o nível de desempenho térmico proporcionado por diferentes tipos de cobertura utilizados em regiões quente e úmidas, de maior estresse climático do Espírito Santo, diante dos cenários de mudanças climáticas?
- 2- Considerando a popularidade da tipologia terraço capixaba (TC), sua utilização é capaz de garantir vantagens quanto ao desempenho térmico de edifícios, em relação a outras coberturas utilizadas, haja vista sua condição de técnica popular?
- 3- A geometria do terraço capixaba e sua relação com a incidência solar sobre a superfície secundária (piso) podem suplantam vantagens quanto à transmissão de calor para os ambientes internos?
- 4- O terraço capixaba continuará sendo "uma descoberta genial para o nosso clima quente e chuvoso" (ALJEUS; HASSE; KOGURE, 2016) diante dos cenários previstos de mudanças climáticas?

1.1.1. Problema principal:

Qual o desempenho térmico dos sistemas de coberturas mais utilizados em unidades habitacionais unifamiliares da cidade de Castelo, ES, cuja condição de clima e relevo não favorece a ventilação natural, durante as horas mais quentes do dia, no clima atual?

Qual o desempenho térmico dos sistemas de coberturas, sobretudo do tipo terraço capixaba, diante dos cenários futuros de mudanças climáticas?

1.1.2. Problema secundário:

A Vida Útil (VU) dos edifícios indicada por normas regulamentadoras recentemente revisadas condiz com os resultados de desempenho térmico obtidos em cenários climáticos previsto para os próximos 50 anos?

1.2. Hipótese

Considerando que:

- Os terraços capixabas são tipologias frequentes e consolidadas no território capixaba, com relevante importância, dada sua característica de construção popular, com reprodução expressiva especialmente nas regiões quentes e úmidas do Espírito Santo;
- Um grande número de pesquisas aponta os benefícios da utilização de ventilação das câmaras de ar, criada entre o telhamento e a superfície de forração dos ambientes de permanência prolongada das edificações, destacando a efetiva redução das trocas de calor pelas coberturas e a melhoria do desempenho e do conforto térmicos alcançados;
- As evidências científicas mais atuais reforçam os estudos anteriores e já observam o aumento da temperatura global, ratificando e alertando sobre os prejuízos ocasionados pelo fenômeno das mudanças climáticas e aumento da temperatura sobre as condições de vida humana, dentre elas, condições intrínsecas às habitações;

É possível levantar como hipótese que a implementação de terraços capixabas em edificações novas e existentes poderá resultar em melhorias de desempenho térmico em edificações de climas quentes, ainda que submetidas às condições de aumento de temperatura previstas por modelos matemáticos de circulação geral de oceanos e atmosfera.

1.3. Objetivo Geral

Analisar diferentes tipos de cobertura em relação ao desempenho térmico, em região quente e úmida, sob estresse climático ocasionado pela ausência de ventilação, nos cenários atual (2020) e futuros (2050 e 2080) de mudanças climáticas, considerando a utilização do Terraço Capixaba como estratégia passiva para melhoria do desempenho térmico (DT) durante a vida útil (VU) prevista para edifícios brasileiro.

1.4. Objetivos Específicos

- 1-Entender como os edifícios, sobretudo os que se utilizam de terraço capixaba responderão aos critérios normativos de desempenho térmico, atualizados em 2021, ao longo de sua vida útil.
- 2- Observar e identificar os principais tipos de sistema de cobertura utilizados, dentro do recorte amostral da cidade de Castelo, Sul do Espírito Santo.
- 3- Analisar o potencial do terraço capixaba como estratégia bioclimática passiva, a ser aplicada em edificações novas e já existentes, para melhoria do desempenho térmico no clima atual e futuro.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentadas temáticas referentes aos impactos das mudanças climáticas, a partir dos documentos científicos que irão compor o *Sixth Assessment Report (AR6)*, assim como as implicações das mudanças climáticas, e os resultados alcançados por meio da implementação de normas de construções europeias, na tentativa de responder às necessidades planetárias de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Posteriormente, são abordados a eficiência energética em edificações no Brasil, a Norma de Desempenho em Edificações Habitacionais, que passou a considerar aspectos relacionados à capacidade de adaptação humana ao clima local, a utilização da ventilação natural para a melhorias das condições ambientais, e aspectos sobre a vida útil (VU) dos edifícios habitacionais, com a complementação sobre a capacidade de adaptação humana às mudanças climáticas, como contraponto ao novo método normativo.

Sobre sistemas construtivos são apresentadas referências que abordam a importância dos sistemas de cobertura no contexto do desempenho de edificações e breve histórico sobre o sistema terraço capixaba (TC), objeto principal da pesquisa.

2.1. Fatos Inequívocos – Assessment Report Fifth & Sixth (AR5 e AR6):

Os impactos das mudanças climáticas são discutidos desde a década de 1960 (MANABE, e WETHERALD, 1967). E, ainda antes, os cientistas já indicavam que a crescente emissão de gases seria uma das principais causas do aumento da temperatura global (Figura 4).



Figura 4: Folha de São Paulo, 10/04/1957.

Fonte: IBPSA-BRASIL E ASHRAE SOUTH BRAZIL, 2022.

Alguns dos principais fatores para o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) estão relacionados à grande mudança no padrão de conforto da sociedade contemporânea, que demanda cada vez mais energia para a manutenção do novo estilo de vida, levando o aumento progressivo do consumo energético.

Nas primeiras décadas do século XXI, os relatórios do *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* ratificam a importância do setor da construção civil, especialmente quanto à necessidade de adoção de estratégias de mitigação, haja vista a incapacidade planetária de continuar produzindo e ofertando energia de forma proporcional ao crescimento progressivo da demanda de energia dos padrões atuais de consumo.

A relação circular entre produção de energia, emissão de gases de efeito estufa (GEE), mudanças climáticas (NOBRE; SOARES; QUEIROZ, 2020) aliada à grande demanda energética da indústria da construção civil definem a sua importância estratégica deste setor.

Para o IPCC as principais medidas de mitigação de emissões no setor de construção (Figura 5) estão categorizadas por estratégias e associadas à redução da intensidade de emissões de GEE; redução da intensidade energética por meio da melhoria da eficiência técnica; eficiência da produção e dos recursos; eficiência estrutural e dos sistemas; e alteração do indicador de atividade (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2017).

ESTRATÉGIAS	INDICADORES	MEDIDAS
Redução da intensidade de emissões de GEE	Emissões/energia final (CO _{2eq} /MJ)	Tecnologias de energias renováveis integradas em edificações; mudança de combustível para combustíveis de baixo carbono (p. ex.: energia elétrica).
Redução da intensidade energética através da melhoria da eficiência técnica	Energia final/energia útil	Eficiência do dispositivo de aquecimento/resfriamento (caldeiras de alto desempenho, ventilação, ar-condicionado, bombas de calor), de aquecimento de água, de iluminação e dos eletrodomésticos.
Melhoria da eficiência da produção e dos recursos	Energia incorporada na construção/energia usada na operação	Vida da edificação; durabilidade de cada componente, equipamento e aparelho; escolha de materiais para construção de menor energia e emissões.
Melhoria da eficiência estrutural e dos sistemas	Energia útil/serviço de energia	Eficiência sistêmica: processo de projeto integrado, edifícios de baixa/zero energia, automação e controles de edifícios, planejamento urbano, aquecimento/resfriamento distrital, cogeração, medidores/redes inteligentes.
Alteração do indicador de atividade	Demanda de serviços energéticos	Mudança de comportamento (definição do termostato, utilização dos aparelhos, etc.), mudança de estilo de vida (tamanho da habitação <i>per capita</i> , conforto adaptativo, etc.).

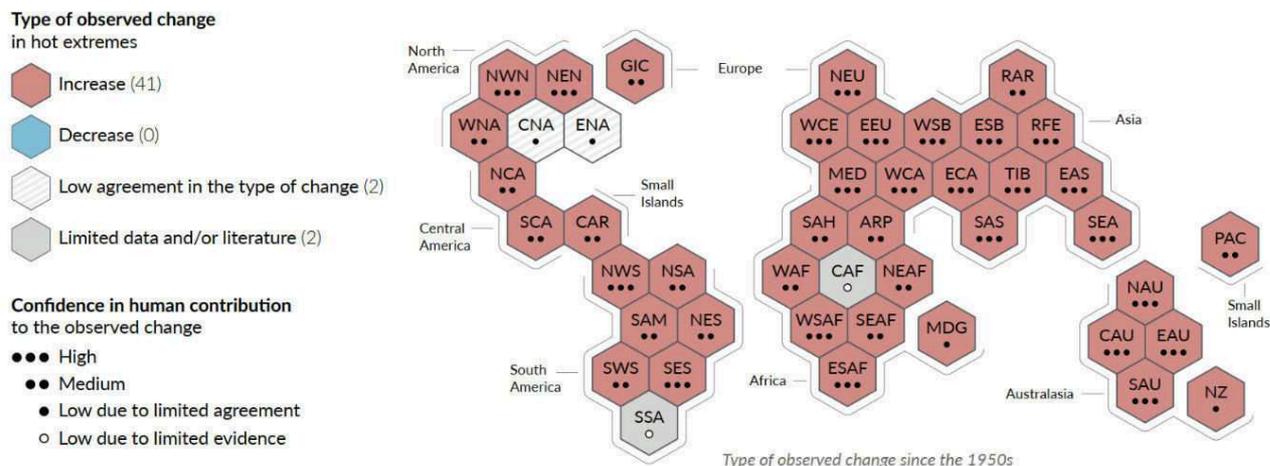
Figura 5: Medidas de mitigação no setor de construção - estratégias.

Fonte: IPCC, 2015 apud CBIC, 2017.

Múltiplas linhas de evidência indicam que as recentes mudanças climáticas em larga escala são sem precedentes em um contexto multimilênar, sendo necessário um compromisso em escala milênar para os elementos de resposta lenta do sistema climático e que inevitavelmente resultará em contínua perda mundial de gelo, acúmulo de calor do oceano, aumento do nível do mar e acidificação do oceano profundo (ARIAS et al., 2019).

As mudanças são observadas em todas as regiões habitadas do mundo. Eventos relacionados ao calor extremo têm sido observados em todos os continentes (Figura 5). As discussões e dúvidas que persistem, em poucas áreas do planeta, ocorrem por falta de dados, ou por falta de acordo sobre o tipo de mudanças por parte dos cientistas (IBPSA-BRASIL E ASHRAE SOUTH BRAZIL, 2022). Como observado, no esquema síntese de representação global do relatório, a América do Sul (NWS, NSA, SAM, NES, SWS, SES e SSA – Figura 6 e Figura 7), vem apresentando aumento nas mudanças do clima relacionadas ao calor extremo. O grau de confiança no fator humano como

responsáveis pelas mudanças é apresentado em níveis entre médio e alto, principalmente nas regiões dos países que formam o cone sul do continente¹.



Onde:

North America: NWN (North-Western North America), NEN (North-Eastern North America), WNA (Western North America), CNA (Central North America), ENA (Eastern North America), Central America: NCA (Northern Central America), SCA (Southern Central America), CAR (Caribbean), South America: NWS (North-Western South America), NSA (Northern South America), NES (North-Eastern South America), SAM (South American Monsoon), SWS (South-Western South America), SES (South-Eastern South America), SSA (Southern South America), Europe: GIC (Greenland/Iceland), NEU (Northern Europe), WCE (Western and Central Europe), EEU (Eastern Europe), MED (Mediterranean), Africa: MED (Mediterranean), SAH (Sahara), WAF (Western Africa), CAF (Central Africa), NEAF (North Eastern Africa), SEAF (South Eastern Africa), WSAF (West Southern Africa), ECAF (East Southern Africa), MDG (Madagascar), Asia: RAR (Russian Arctic), WSB (West Siberia), ESB (East Siberia), RFE (Russian Far East), WCA (West Central Asia), ECA (East Central Asia), TIB (Tibetan Plateau), EAS (East Asia), ARP (Arabian Peninsula), SAS (South Asia), SEA (South East Asia), Australasia: NAU (Northern Australia), CAU (Central Australia), EAU (Eastern Australia), SAU (Southern Australia), NZ (New Zealand), Small Islands: CAR (Caribbean), PAC (Pacific Small Islands)

Figura 6: Síntese das mudanças extremas relacionadas ao calor extremos observada e confiança na contribuição humana para as mudanças observadas.

Fonte: MASSON-DELMOTTE et al., 2021 p. 10.

Entende-se que as massas de terra aquecem mais rapidamente do que os oceanos devido aos diferentes equilíbrios radiativos da terra e da água e, portanto, espera-se que qualquer país individual, especialmente os de dimensões continentais - como o Brasil - se aqueça mais do que a média global. Os modelos de simulação indicam que as mudanças não serão uniformes em todo o globo, com padrões de circulação modificados levando a condições simuladas mais úmidas em algumas áreas e mais secas em outras (MARENGO et al., 2011).

Na região SES, que engloba considerável área do sudeste brasileiro, é alto o índice de confiança na interferência antropogênica no processo de mudanças climáticas, tendo como resultante o aumento do calor extremo na região (Figura 6, anterior e Figura 7).

¹ Exceção do extremo sul que não apresenta dados suficientes para análises.

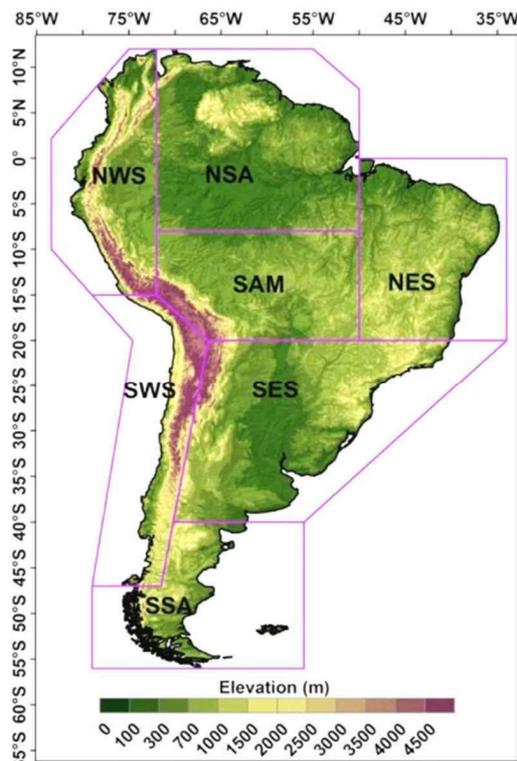


Figura 7: Representação poligonal utilizada em análises de tendências históricas e futuras mudanças de clima em *Assessment Reports* – América do Sul.

Fonte: IBPSA-BRASIL E ASHRAE SOUTH BRAZIL, 2022.

Os estudos sobre as mudanças climáticas, cada dia mais consolidados e confirmados pelas observações, há muito acionaram um alerta aos pesquisadores que trabalham sobre a temática das edificações, sendo considerada significativa a quantidade de trabalhos científicos que relacionam edificações ao consumo energético e mudanças climáticas (AHMED; KUMAR; MOTTET, 2021; ALVES; GONÇALVES; DUARTE, 2021; CASAGRANDE; ALVAREZ, 2013; MACHADO et al., 2022; MICHELS et al., 2018; STONE et al., 2021; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2021; YANG; JAVANROODI; NIK, 2021). A temática abrange materiais de construção, técnicas construtivas, desempenho térmico, desempenho lumínico e sua interface com o processo de mudanças climáticas.

Em diversos estudos e variedade de pesquisas sobre o tema, o crescimento da demanda energética é atribuído a melhorias na saúde, mudança dos estilos de vida, acesso aos serviços modernos de energia, tais como eletricidade e gás para cocção, melhoria nas condições de moradia e urbanização. No *Fifth Assessment Report* (AR5), o IPCC (2015) destacou que o setor de edificações respondia, em 2010, por 32% do uso final de energia e 8.8 GtCO₂ de emissões, incluindo emissões diretas e indiretas, o que representa 18,4% das emissões globais (Figura 8). O relatório de 2015 já projetava que a demanda de energia devia quase dobrar; e as emissões de CO₂, aumentar entre 50 e 150% por volta do meio deste século. Dados que vêm sendo confirmados pelos grupos de estudos que preparam o relatório de 2022.

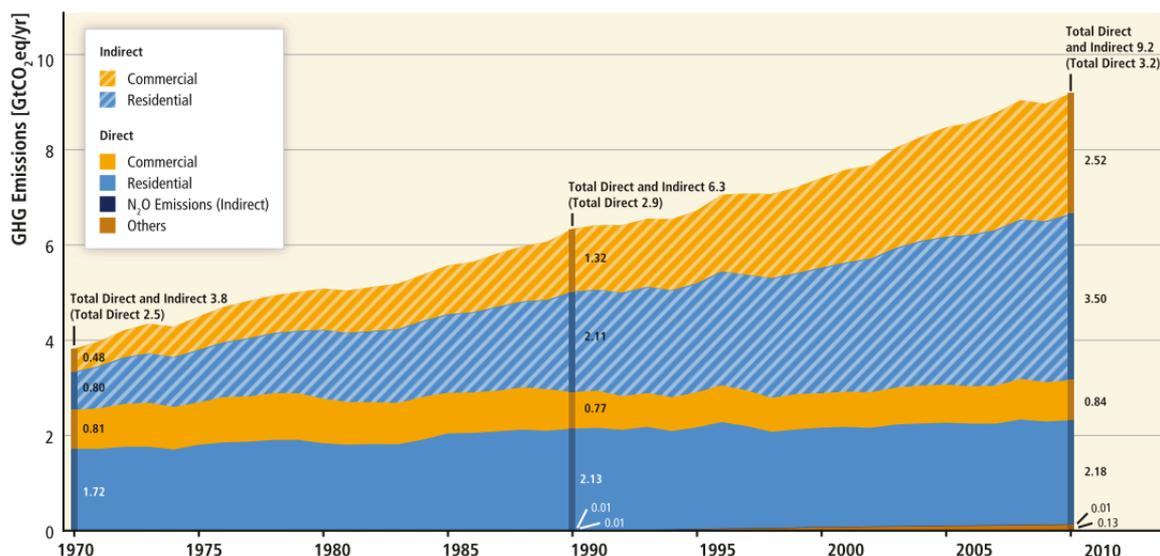


Figura 8: Emissões globais direta e indireta a partir da energia e produção de calor em subsectores das construções.

Fonte: ÜRGE-VORSATZ et al., 2014.

Em 2020 a expectativa de crescimento é de aproximadamente 150% em 2050, podendo variar entre 300% e 600% em países em desenvolvimento (AL-YASIRI; SZABÓ, 2021).

As edificações demandavam 32% de energia a nível mundial e várias iniciativas têm sido adotadas para redução deste consumo (IEA, 2012; EPE, 2016). Segundo Wassouf (2014) a energia necessária para construção, manutenção e uso de edificações na União Europeia, em 2014, representava 40% do consumo de energia no continente e o consumo de energia proveniente de edificações era responsável pela maior parte das emissões de CO₂ do setor.

Dados mais recentes indicam que globalmente, a energia consumida para aquecimento e resfriamento é de 40% e 61% da demanda total de energia em edifícios comerciais e residenciais, respectivamente (IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018; AL-YASIRI; SZABÓ, 2021).

No contexto internacional, a União Europeia apresentou a iniciativa de reduzir em até 90% a emissão de GEE (CO₂ equivalente²) até 2050, tendo sido definidas uma série de leis europeias para melhoria da eficiência energética, como o Acordo 20-20-20 de 12/2008, do Parlamento Europeu, que previa 20% de redução de consumo de energia primária até 2020, e Agenda Energia 2050 da Comissão Europeia de 15/12/2011 (WASSOUF, 2014).

As diretrizes europeias “*Energy Performance of Buildings Directive*” estão sendo incorporadas em documentos e normas de economia de energia nacionais, e todos os membros da União Europeia tem se submetido a atualizações trienais de suas normativas de edificações, visando a melhoria do desempenho energético dos edifícios (WASSOUF, 2014).

Nesta perspectiva, normas como Passivhaus (Alemanha), Effinergie (França), CasaClima (Itália), Minergie-ECO (Suíça), que vêm sendo desenvolvidas desde a década de 1980, tentam reduzir a demanda energética relacionada à climatização dos ambientes construídos, tendo como enfoque principal, o consumo de energia para calefação. As normativas associam técnicas passivas e ativas na busca da redução de energia primária a níveis superiores, porém próximos, aos alcançados por edifícios de balanço energético próximo a zero (NZEBs) (WASSOUF, 2014).

² Conjunto de gases que causam efeito estufa, cujos efeitos podem ser comparados em equivalência aos efeitos do CO₂.

Normativas como a Passivhaus (*Passive House*) alinham-se aos anseios da União Europeia para a redução de emissões de GEE e eficiência energética, e vem sendo aprimoradas ao longo dos anos, incluindo questões relacionadas ao resfriamento dos ambientes com consideração de arquivos climáticos em suas ferramentas de análise, servindo de referência para o desenvolvimento de outras normas relacionada à eficiência energética e influenciando outras normativas, tanto na Europa como em outras regiões.

Assim, seu conceito vem sendo usado como referência também para aplicação em regiões de climas quentes, uma vez que se propõe a realizar a verificação com base no arquivo climático local, e considera a ventilação natural como primeiro critério a ser atendido, anterior ao resfriamento passivo, quando possível, e ao resfriamento artificial.

Na proposta para verão da *Passive House* a ventilação constante pode definir o atendimento ao critério de resfriamento para verão, desde que não haja superaquecimento maior que 10% do período de ocupação. Entretanto, o resfriamento artificial é entendido como uma possível necessidade, tendo critérios específicos definidos, permitindo que haja atendimento à norma mesmo que não ocorra pela utilização da ventilação constante.

Em países de clima quente e úmido é necessário que seja evitado o superaquecimento e o excesso de umidade internos. Sendo necessário alinhamento entre sistema ventilação e desumidificação e utilização de isolamento, envidraçamento e sombreamento. Cuidando para que a super especificação do isolamento não comprometa o processo de resfriamento dos edifícios (AUSTRALIAN PASSIVE HOUSE ASSOCIATION, 2018).

Na América Latina o setor da construção mantém tendências similares ao restante do planeta (Figura 9) em relação a emissões de GEE. Como agravante observou-se que na América Latina as emissões diretas do setor residencial têm apresentado tendência mais acentuada que no panorama global, até os anos 2010. Enquanto globalmente esta tendência de crescimento das emissões apontaram para 1,26% de 1970 a 2010, na América Latina e Caribe a tendência se aproximou-se de 1,9% no mesmo período.

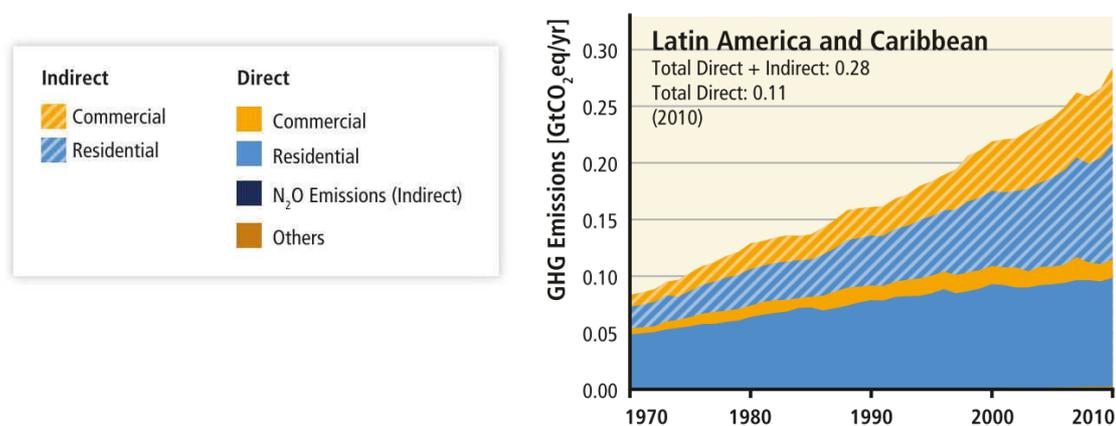


Figura 9: Emissões latino-americanas direta e indireta a partir da energia e produção de calor em subsectores das construções.

Fonte: ÜRGE-VORSATZ et al., 2014.

O reconhecimento da necessidade de resfriamento artificial pela metodologia *Passive House* vai ao encontro dos resultados de estudos como os de Guarda et al. (2019), que apontaram perspectivas futuras no clima brasileiro com redução da utilização de estratégia de ventilação natural constante no ambiente construído e aumento do resfriamento artificial considerando o processo de mudanças climáticas.

No Brasil a primeira casa *Passive House* foi construída de acordo com as recomendações do *Passive House Institute* (PHI), tendo sido financiada pelo Ministério Federal da Educação e Pesquisa - BMBF (Ministério Alemão de Educação e Pesquisa) em parceria com o SENAI – RN (Figura 10)

com o projeto piloto. A edificação modelo foi construída no SENAI de São Gonçalo do Amarante-RN, de clima tropical seco, em 2017 (PASSIVE HOUSE INSTITUTE, 2017).

Com área de 56 m², a casa atende os critérios de tensão do ar, ou estanqueidade do ar³, necessidade de refrigeração/desumidificação de 69 kWh/(m²a). (PASSIVE HOUSE INSTITUTE, 2017).

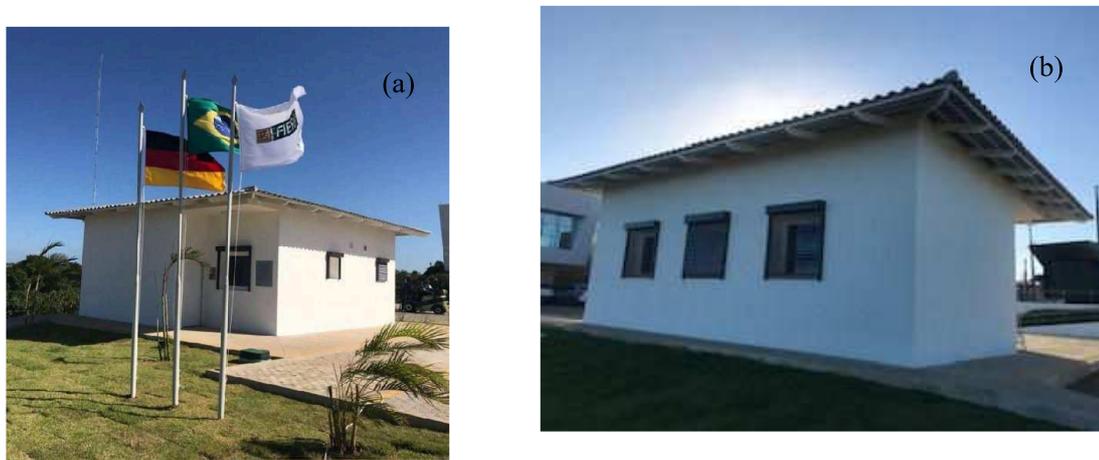


Figura 10 (a e b): Primeira casa *Passive House* Brasileira.

Fonte: PHI, 2017

O consumo de energia primária da edificação pode ser entendido como a soma das energias elétrica e térmica, que devem ser devidamente transformadas a partir de seus fatores de conversão, descontando-se a parcela de energia primária referente à geração local de energia renovável, quando existente (LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES; CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES; ELETROBRAS, 2022).

A energia primária necessária para refrigeração de 69kWh/(m²a) seria convertida no Brasil para 43kWh/(m²a) de energia elétrica para consumo anual, o que equivaleria a média de 201 kWh mensais (PBE EDIFICA, 2020b).

A inovação da metodologia *Passive House* consistiu em admitir que a ventilação poderá não ser realizada de forma constante, e sim controlada associada a mecanismo de recuperação de calor, garantindo a qualidade interna do ar seja mantida por meio do controle de infiltrações e do uso da ventilação constante nos períodos mais confortáveis termicamente.

A ventilação controlada com recuperação de calor consiste em um sistema de ventilação predial de fluxo duplo (entrada e saída), análogo ao sistema de ventilação pulmonar, em que a troca de calor e de moléculas presentes no fluido aéreo ocorre de forma parcial. Seja por filtragem realizada na célula higroscópica do recuperador de calor (Figura 11 – a e b), ou por difusão celular realizada nos alvéolos pulmonares (WASSOUF, 2014).

A célula hidrosfópica, ou célula Lossnay, é o elemento do sistema de ventilação com recuperação de calor responsável pela filtragem e qualidade do ar no ambiente construído, fica localizada no recuperador de calor (destaque em vermelho da Figura 11 – b), e possui grande área de superfície devido ao grande número de camadas e dobraduras do papel especial que a compõe (Figura 11 e Figura 12).

³ Referente à infiltração indesejada por frestas.

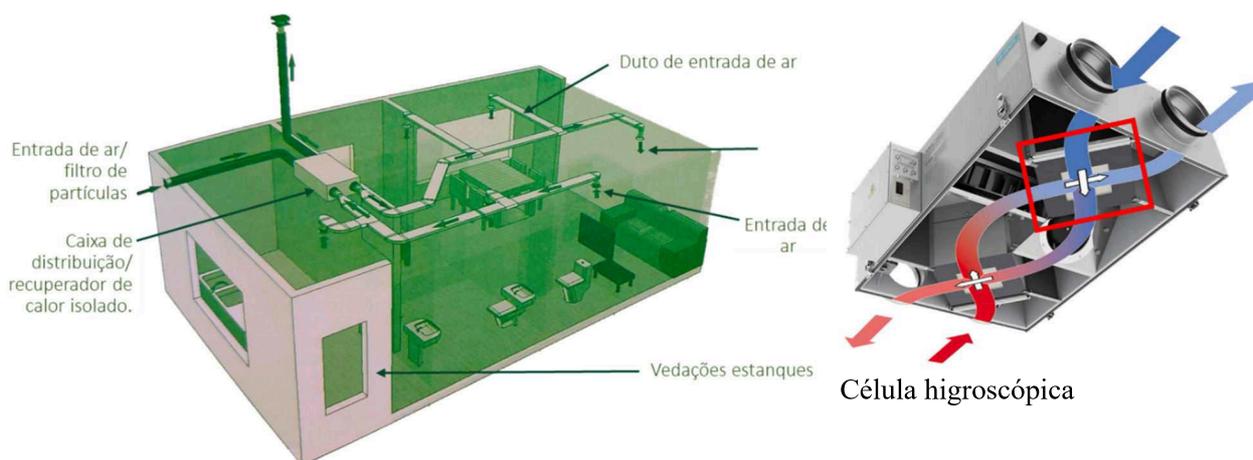


Figura 11 (a e b): Princípio da ventilação de fluxo duplo: analogia entre sistema de ventilação controlada com recuperação de calor e sistema respiratório humano.

Fonte: (a) Autora adaptado de WASSOUF, 2014; (b) STENERI, 2014.

Ventiladores auxiliares determinam o fluxo de entrada e saída do ar conforme a posição das canaletas formadas pelas dobraduras da célula higroscópica (Figura 12).

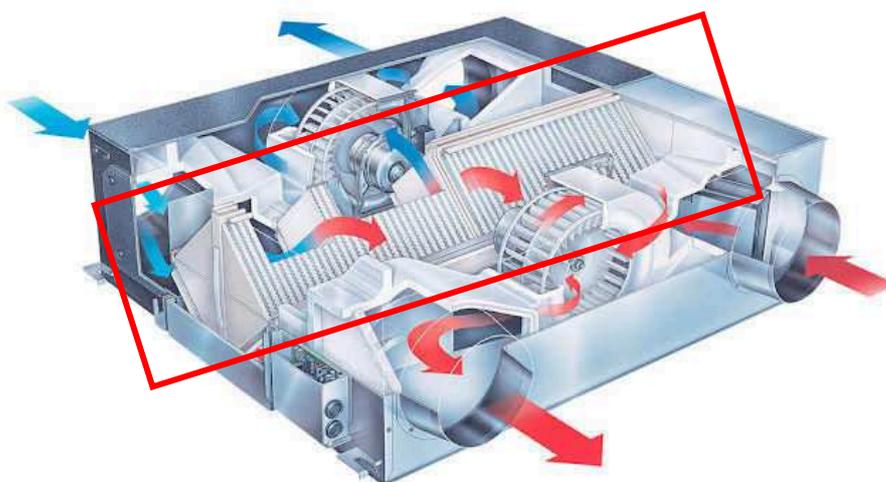


Figura 12: Recuperador de calor e célula higroscópica.

Fonte: Autora adaptado de MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION, 2008; STENERI, 2014.

Formado por diversidade de compostos químicos com moléculas de variados tamanhos o ar apresenta em sua composição gases como N_2 (78%) e O_2 (21%) e material particulado. Os compostos químicos mais identificados pela literatura na composição do ar foram os Pb, Cd, Mn, Cr, Cu e Fe, NH_4^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- (BRITO; ARAÚJO; MARINHO, 2018). Moléculas grandes como CO_2 , NH_3 (Amônia), CH_4 (Metano) são retidas em canaletas direcionadas para o fluxo de saída, enquanto moléculas pequenas como O_2 e H_2O passam e alcançam as canaletas que recebem o fluxo de entrada.

O fato de não ocorrer a troca total da massa de ar que preenche o volume dos ambientes internos permitiu que a demanda de energia para aquecimento das edificações fosse reduzida, implicando na redução de energia primária necessária para o atendimento do consumo residencial.

Na metodologia original parte da massa de ar formada por moléculas grandes saía do sistema com calor ganho no ambiente interno, enquanto parte semelhante de massa de ar entrava no sistema. Apenas esta segunda porção de moléculas, que entraram, teria necessidade de ganhar calor em

totalidade. A parte que permaneceu no ambiente interno ajudaria a manter a temperatura e o conforto interno com menor necessidade de ganho de calor.

Para regiões quentes, no entanto, permaneceriam no ambiente as moléculas que perderam calor para resfriar o ar interno, e seria expulsa parte menor do volume de ar, a qual seria substituída por volume de ar equivalente aquecido, que necessitaria de resfriamento total.

A principal vantagem da normativa é a efetiva redução de demanda de energia primária durante o tempo de uso das edificações do setor residencial para aquecimento e resfriamento, e o desenvolvimento de uma estratégia que permite a manutenção da qualidade do ar dos ambientes em termos de material particulado, que pode colaborar no controle da umidade em países de clima úmido. Não impossibilitando a utilização de ventilação constante se desejada.

Quando associada ao resfriamento artificial com controle de ventilação se apresentou como estratégia entre o processo de ventilação natural constante, frequentemente defendido e utilizado em países de climas quentes, e os processos artificiais de resfriamento em que, tradicionalmente, não ocorre a renovação do ar ou ocorre troca total do volume de ar a ser resfriado o que incorre em desperdício de energia diante do conceito *Passive House*.

2.2. A eficiência energética no Brasil e a Norma de Desempenho

Assim como ocorrido no contexto internacional, no Brasil as crises do petróleo da década de 70 do século passado e posteriormente a crise energética dos anos 2000, desnudaram a emergência para ações efetivas quanto à produção, distribuição e uso consciente da energia.

Em um país continental a base hidrelétrica da matriz energética precisava vencer os desafios da transmissão em longas distâncias ao mesmo tempo em que os limites ambientais do país tornam cada vez mais complexo o processo de criação de novas hidrelétricas.

Os dados do relatório síntese do balanço energético nacional (BEN) de 2021, indicaram que em 2020 as residências foram responsáveis pelo uso de 10,8% de toda energia produzida no país, o que corresponde a 29,2% da energia não destinada aos setores industrial e de transporte de passageiros (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021), considerados setores produtivos.

O setor residencial brasileiro ainda apresentava como principal fonte de energia a eletricidade, (Figura 13), cuja principal fonte no país é a hidrelétrica. A energia solar ainda não é listada como fonte de energia para o setor (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021).



Figura 13: Uso de energia no Brasil pelo setor residencial em 2020.

Fonte: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021.

Neste contexto, uma das primeiras ações governamentais sobre energia no Brasil foi a criação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL). Inicialmente coordenado pelo Ministério de Minas e Energia – MME e executado pela Eletrobras, foi instituído em 30 de dezembro de 1985, pela Portaria Interministerial nº 1.877, para promover o uso eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício (PROCEL INFO, 2006).

Contemporaneamente, em 1984 o INMETRO iniciou discussões sobre a criação de programas de avaliação da conformidade focados no desempenho, de forma a contribuir com a racionalização do uso de energia no Brasil, prestando informações sobre a eficiência energética dos equipamentos disponíveis no mercado nacional (INMETRO, 2022). Inicialmente, pensado para o setor automotivo em função das crises da década de 70, o projeto foi redirecionado e ampliado, ganhando então o nome de Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE EDIFICA, 2020a).

O PBE é composto por 38 Programas de Avaliação da Conformidade, que contemplam desde a etiquetagem de produtos como fogões, refrigeradores e condicionadores de ar, até veículos e edificações (PBE EDIFICA, 2020a).

Como a deflagração da crise do início dos anos 2000, que obrigou à racionalização de energia em residências em todo país, foi criado em 2001 o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética e, especificamente para edificações, o Grupo Técnico para Eficientização de Energia nas Edificações no País, visando regulamentar e elaborar procedimentos para avaliação da eficiência energética de edificações construídas no Brasil, além do uso racional da energia elétrica. (PBE EDIFICA, 2020a).

Em 2003 foi instituído o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações - PROCEL EDIFICA - pela ELETROBRAS/PROCEL com atuação conjunta com o Ministério de Minas e Energia, Ministério das Cidades, Universidades, Centros de Pesquisa, Entidades das áreas Governamental, Tecnológica, Econômica e de Desenvolvimento, além do setor de Construção Civil (PBE EDIFICA, 2020a).

Da junção de esforços entre o PROCEL EDIFICA da Eletrobras e o PBE do INMETRO, surgiu o PBE Edifica a partir do qual foi desenvolvido a primeira versão de regulamentos técnicos da qualidade para edificações comerciais, de serviços e públicas (RTQ-C) e para residenciais (RTQ-R) em 2009.

No mesmo período da década de 2000

(...) foram desenvolvidos, os textos da normalização brasileira de desempenho de habitações. Previsto para entrar em vigor em março de 2010, o texto original (...) apresentava algumas exigências aquém das expectativas da sociedade, e outras com certa dissonância em relação à atual capacidade econômica do país. Assim sendo (...), e em consenso com órgãos governamentais, associações de profissionais, universidades, instituições técnicas e setor produtivo, a Câmara Brasileira da Indústria da Construção - CBIC solicitou à Associação Brasileira de Normas Técnicas a revisão de tão importante conjunto normativo (...) (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2013, 6 p.).

Após quase dois anos de trabalhos de revisão, em 19 de fevereiro de 2013 entrou em vigor a ABNT NBR 15.575 Edificações Habitacionais – Desempenho, em suas partes de 1 a 6 (BRITO; MARTINS, 2015).

A partir da NBR 15575 é preciso compreender a evolução da eficiência energética e do desempenho térmico de edificações no Brasil de forma paralela devido ao processo de aproximação de suas metodologias.

A versão 2013 da ABNT NBR 15.575 trazia metodologias de análises para desempenho térmico não alinhados com a metodologia de eficiência energética nos aspectos que tangem os critérios relacionado com a envoltória das edificações.

Em 2017 o PROCEL Edifica, juntamente com o Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E), lançou uma nova proposta de método para a avaliação do desempenho energético das edificações com base no consumo de energia primária, a qual passa por consulta pública atualmente (PBE EDIFICA, 2020a).

Para o novo método de avaliação de eficiência energética residencial brasileira, Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-

R), em consulta pública, foi desenvolvida interface simplificada para análise da envoltória das edificações (Anexo 1), que admite a produção e análise da energia primária renovável.

Na interface brasileira poder-se-á definir os parâmetros gerais da Unidade Habitacional (UH), como o posicionamento geográfico, regional, indicação da cidade de análise, e parâmetros referentes aos ambientes de permanência prolongada (APP), como o tipo de uso, eficiência de equipamentos de refrigeração, as áreas de piso e de ventilação efetiva, propriedades térmicas dos elementos de vedação, entre outros.

Além disso, é considerada a possibilidade de geração de energia a partir de fontes renováveis como a radiação solar (LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES; CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES; ELETROBRAS, 2022).

A emenda 2021 da ABNT NBR 15.575 atualizou as partes 1, 4 e 5 da norma no que diz respeito ao desempenho térmico das edificações buscando aproximar as metodologias de eficiência energética e desempenho.

É importante destacar que o método simplificado do Metamodelo da INI-R, na versão em consulta pública, é derivado do método de simulação contido na Parte 1 da NBR 15575/2021, que entrou em vigor em março de 2021. E que o método Prescritivo da INI-R corresponde ao método Simplificado contido nas Partes 4 e 5 da NBR 15575/2021.

Assim, a partir da entrada em vigor da INI-R, prevista para 2022, as metodologias de avaliação da eficiência energética de edificações e de desempenho térmico de edificações brasileiras passarão a apresentar correspondência, pelo menos no que diz respeito à análise das envoltórias das edificações edifícios (LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES; CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES; ELETROBRAS, 2022).

Desta forma, o atendimento mínimo ao desempenho térmico das edificações residenciais automaticamente representará classificação com nível C de eficiência energética. E os níveis A e B serão definidos pela redução de cargas térmicas totais (LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES; CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES; ELETROBRAS, 2022). O alinhamento entre as metodologias de eficiência energética e de desempenho térmico no Brasil representa um grande avanço.

2.2.1. Metodologia de avaliação de desempenho térmico de edifícios – NBR 15575/2021 – Método de simulação computacional

A metodologia aprovada por meio da emenda 2021 da NBR15.575, para análise de desempenho térmico de edifícios residenciais, trouxe indicadores de eficiência energética relacionados à avaliação da envoltória, compatíveis com a avaliação de envoltória que será realizada pela metodologia de etiquetagem para eficiência energética, e ampliou a importância de estratégias bioclimáticas ao introduzir e basear a análise na ventilação natural, registrada no arquivo climático local e a análise do percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT).

A proposta para o novo método foi apresentada por Krelling et al. (2020) visando a comparação de dois modelos de simulação considerados real e de referência. O modelo real considera todas as soluções construtivas determinadas no projeto, enquanto o modelo de referência, por sua vez, preserva a volumetria da edificação real, adotando características padronizadas, que levarão à obtenção de um desempenho referencial a ser superado pelo modelo real (KRELLING et al., 2020). Segundo Krelling et al. (2020), as simulações seriam realizadas em período anual e por análise horária, considerando duas condições: 1) com o uso de ventilação natural; e 2) sem o uso de ventilação natural. Para a primeira condição, foi previsto o desenvolvimento dos modelos (real e de referência) controlados de forma a utilizar somente a ventilação natural como estratégia de

resfriamento dos ambientes internos, substituindo a infiltração constante. Desta forma, o novo método propõe considerar a abertura de janelas como promotor da ventilação a partir de parâmetros de velocidade e direção do vento presentes no arquivo climático (KRELLING et al., 2020).

Krelling *et al.* (2020) consideram o PHFT dos ambientes de permanência prolongada, e resultados de temperatura operativa máxima (Tomáx), para todas as Zonas Bioclimáticas (ZB), e mínima (Tomín) entre para ZB 1 e 7 em função da média anual de temperatura externa, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1: Compêndio de tabelas do método de simulação da NBR 15575-1/2021 – Tabela 2, Tabela 3.

Tabela 2		Tabela 3	
Intervalo de temperatura externa	Média anual da TBS (°C)	Intervalo de temperatura externa	FT a ser considerada na análise (°C)
1	TBSm < 25,0	1	18,0 < ToAPP < 26,0
2	25,0 ≤ TBSm < 27,0	2	ToAPP < 28,0
3	TBSm ≥ 27,0	3	ToAPP < 30,0

Nota: ToAPP é a temperatura operativa do APP, que atende aos limites estabelecidos na Tabela 3 da NBR 15575-1/2021.

Fonte: Autora adaptado de ABNT, 2021a.

A proposta para escalas dos níveis de desempenho térmico foi apresentada por VEIGA *et al.* (2020) visando diferenciar os níveis de desempenho alcançados com base em critérios predefinidos.

Além do desempenho térmico, a NBR 15575 em suas partes, aborda outras questões importantes relacionadas às exigências do usuário em segurança, habitabilidade e durabilidade em relação aos edifícios (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a), requisitos do usuário, que esboçam as expectativas qualitativas sobre o produto a ser adquirido (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a).

Requisitos de desempenho:
condições que **expressam qualitativamente** os atributos que a edificação habitacional e seus sistemas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a, 13 p.).

E, apesar da NBR 15575 ser considerada “apenas uma norma técnica a ser seguida, embora se deva reconhecer sua maior complexidade em relação às normas prescritivas tradicionais”, por focar em qualidades técnicas da construção habitacional (BRITO; MARTINS, 2015) deve-se atentar para a obrigatoriedade legal da NBR 15575, dada pelo Código de Defesa do consumidor quando diz que “é vedado ao fornecedor de produtos ou serviços colocar, no mercado de consumo, qualquer produto ou serviço em desacordo com as normas expedidas pelos órgãos oficiais competentes ou, se normas específicas não existirem, pela ABNT” (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2016).

Mas o texto mantido da Parte 1 da NBR 15575 indica que “o foco desta Norma está nas exigências dos usuários para o edifício habitacional e seus sistemas, quanto ao seu comportamento em uso e não na prescrição de como os sistemas são construídos” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a).

Além disso, a compreensão mais profunda da interrelação entre as exigências de segurança, habitabilidade e durabilidade, apontam para uma normativa que, embora não tenha como objetivo e função de ser uma certificação ambiental, pode-se apresentar como um entreposto para normas de construção, e de sustentabilidade aplicada em norma vigente (WASSOUF, 2014).

Com a entrada em vigor da INI-R, que terá o caráter de contribuir para a sustentabilidade aplicada em norma vigente, na forma de instrução normativa para energia, definir-se-á a ligação entre a metodologia da Norma de Desempenho, no que tange o desempenho térmico, e os Objetivos Gerais da ONU para o Desenvolvimento Sustentável (ODS) por meio da ODS 7 – Energia limpa e acessível.

A NBR 15575 definiu critérios que respondem também a outros ODS quando trata do ciclo de vida dos edifícios nos requisitos de desempenho estrutural e manutenção, durabilidade de sistemas e materiais, desempenho térmico e lumínico, entre outros.

A Vida Útil da edificação (VU) é definida na NBR 15575 como:

período de tempo em que um edifício e/ou seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos, com atendimento dos níveis de desempenho previstos nesta Norma, considerando a periodicidade e a correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo manual de uso, operação e manutenção (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a, 15 p.).

O que indica a necessidade de atendimento aos critérios durante o tempo de vida útil do edifício.

A vida útil é determinada pela Vida Útil de Projeto (VUP), “período estimado de tempo para o qual um sistema é projetado” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a), a qual é composta pela previsão do tempo de vida de todos os sistemas envolvidos no projeto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a). Sendo a VUP mínima para sistemas estruturais de 50 anos, a VU mínima para os edifícios brasileiros corresponde, no mínimo, a 50 anos.

Considerando a previsão de vida útil dos edifícios brasileiros, a qual os requisitos e critérios de desempenho térmico devem responder e os dados estudados e observados sobre as mudanças do clima no planeta, torna-se inevitável ponderar sobre as respostas de desempenho atuais, e aprofundar os estudos dos edifícios diante dos possíveis cenários de altas emissões de GEE.

2.3. Os estudos de edifícios em cenários de clima com aumento de emissões de gases de efeito estufa (GEE)

Embora os estudos sobre as mudanças do clima da Terra se mostrem cada vez mais consolidados, permanece a dificuldade de alinhar o produto dos estudos já realizados às necessidades de outras áreas do conhecimento das Engenharias e das Ciências Sociais Aplicadas.

Os estudos envolvem a elaboração de modelos matemáticos, por meio de uma rede cartesiana, tanto na superfície e proximidades, quanto em diversos níveis verticais e horizontais como ilustrado na Figura 14, destacando-se o modelo de circulação geral (MCG) que aborda processos físicos da atmosfera, considerando o processo de circulação em todo planeta e oceanos e suas influências significativas sobre o clima (MACHADO, 2019; SAMPAIO; DIAS, 2014).

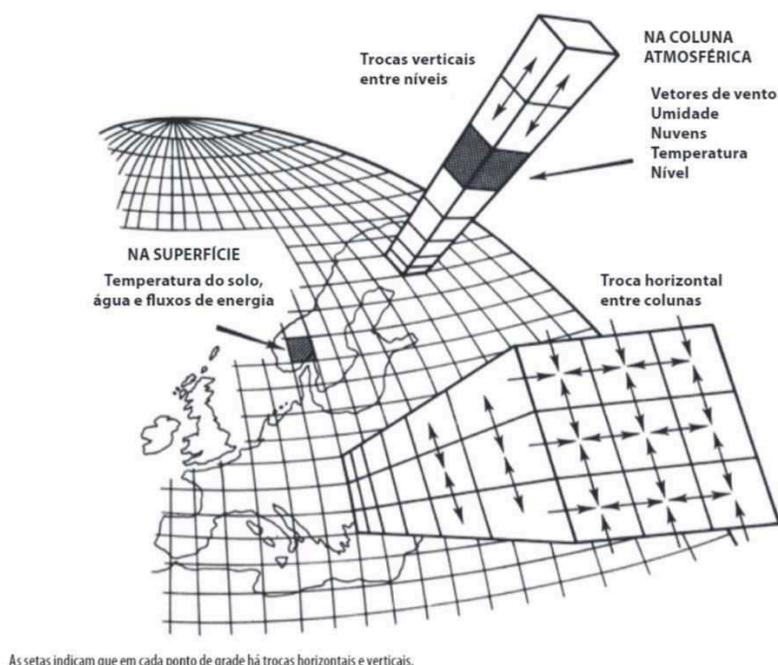


Figura 14: Representação esquemática da rede cartesiana dos modelos climáticos de circulação geral.

Fonte: SAMPAIO; DIAS, 2014.

Com essa perspectiva Belcher, Hacker e Powell (2005) desenvolveram um método prático voltado especificamente para análises térmicas aplicável a edifícios, que consiste na “morfagem”, ou metamorfose do arquivo EPW local.

Belcher, Hacker e Powell (2005) desenvolveram o método com base nos cenários SSP do AR4.

O relatório AR5 do IPCC de 2013 introduziu os novos cenários RCPs (*Representative Concentration Pathways*), que possuem relativa correspondência com os SSP do AR4, e já estão sendo atualizados para SSPs (Shared Socio-Economic Pathways).

Cenários futuros de mudanças Climáticas são representações plausíveis das emissões futuras de Gases de Efeito Estufa (GEE) baseados em um conjunto de suposições coerentes e fisicamente consistentes sobre suas forçantes radioativas, tais como demografia, desenvolvimento socioeconômico e mudanças tecnológicas.

A metamorfose combina dados meteorológicos observados com resultados de modelos climáticos. O procedimento produz séries de tempo que encapsulam as condições meteorológicas médias de cenários climáticos futuros, preservando sequências meteorológicas realistas (BELCHER; HACKER; POWELL, 2005).

Diferente do método chamado cenários analógicos⁴, o método de metamorfose obtém o clima futuro a partir de modelos de circulação global de atmosfera e oceanos. Este método, embora de resolução reduzida (escala reduzida), ajusta os dados meteorológicos de projeto, para mudanças na previsão do clima, por modelos de circulação global e modelos climáticos regionais.

O método tem várias vantagens práticas. Em primeiro lugar a referência (EPW) válida, porque é o clima de série histórica. Em segundo lugar a sequência climática resultante provavelmente será meteorologicamente consistente. Terceiro a redução da escala espacial é alcançada porque a série meteorológica histórica é obtida a partir de observações em um local real.

⁴ Método em que se usa um clima projetado futuro distinto do local de estudo.

Uma limitação do método é que os dados meteorológicos do projeto transformados para o clima futuro têm o caráter e a variabilidade do clima histórico. Mas o clima futuro pode ter um caráter ou uma variável influenciadora diferente (BELCHER; HACKER; POWELL, 2005).

A recomendação da Organização Meteorológica Mundial (OMM) é que o clima base – da série histórica – abranja período de 30 anos, usando o período 1961/1990, sempre que houver essa disponibilidade (BELCHER; HACKER; POWELL, 2005).

Para o procedimento de metamorfose de Belcher, Hacker, & Powell (2005) são usados algoritmos que fazem a leitura dos arquivos históricos com vistas às variáveis e suas médias mensais, com cálculos que consideram anos, meses, dias e as horas, conforme Equações 1 a 4.

Equação 1: Modelo genérico da equação de leitura do EPW histórico.

$$\langle x_0 \rangle_m = \frac{1}{24 \times d_m \times N} \sum_N \sum_{years} \sum_{month} \sum_m x_0$$

E, posteriormente, na transformação são envolvidas três operações genéricas: 1) uma mudança; 2) um trecho linear (fator de escala); e 3) uma mudança e um alongamento (BELCHER; HACKER; POWELL, 2005).

Equação 2: Modelo genérico da equação de mudança para variável.

$$x = x_0 + \Delta x_m \quad (1)$$

Onde:

x_0 é a variável atual;

Δx_m é o valor absoluto de mudança da média mensal aplicado;

x é o resultado de mudança.

Mudança para cada mês m , onde Δx_m é a variação absoluta no valor médio mensal da variável para o mês m .

Equação 3: Modelo genérico da equação de alongamento para variável.

$$x = \alpha_m x_0 \quad (2)$$

Onde:

x_0 é a variável atual;

α_m é o valor absoluto de alongamento da média mensal aplicado;

x é o resultado de alongamento.

No mês α_m é a variação fracionária no valor médio mensal para o mês m .

Equação 4: Modelo genérico da equação de combinação entre mudança e alongamento para variável.

$$\begin{aligned} x &= x_0 + \Delta x_m + \alpha_m \times (x_0 - \langle x_0 \rangle_m) \\ &= \langle x_0 \rangle_m + \Delta x_m + (1 + \alpha_m) (x_0 - \langle x_0 \rangle_m) \end{aligned} \quad (3)$$

Onde:

x_0 é a variável atual;

Δx_m é o valor absoluto de mudança da média mensal aplicado;

α_m é o valor absoluto de alongamento da média mensal aplicado;

x é o resultado para a variável para a combinação

A metamorfose transforma 10 variáveis das possíveis 14 variáveis inscritas nos arquivos EPW. Direção de ventos, duração de precipitação, código meteorológico atual (pwc) e altitude solar não são alterados. A notação para variáveis segue o guia J da Instituição Credenciada de Engenheiros de Serviços de Construção (CIBSE)⁵ para variáveis de dados meteorológicos e UKCIP02⁶ para variáveis de mudança climática.

A partir do método de Belcher, Hacker e Powell foram desenvolvidas duas ferramentas para geração de arquivos climáticos futuros: Climate Change World Weather File Generator for World-Wide Weather Data (CCWorldWeatherGen) e a WeatherShift. Moazami, Carlucci e Geving (2017) identificam a semelhança entre as ferramentas para a aplicação em simulação de desempenho de edificações (MACHADO, 2019).

A ferramenta CCWorldWeatherGen possibilita a geração de arquivos climáticos em qualquer lugar do mundo (JENTSCH et al., 2013; JENTSCH; BAHAJ; JAMES, 2008) e está disponibilizada gratuitamente com abordagem integrada entre EPW e MCG HadCM3, elaborado pelo *Meteorological Office Hadley Centre* do Reino Unido para o Terceiro e Quarto Relatórios do IPCC, AR3-2001 e AR4-2007, (MACHADO, 2019).

A CCWorldWeatherGen atua na transformação do arquivo EPW lançando-o para três horizontes típicos a partir do período climático 1961-1990: a) 2020's, que corresponde ao período climático de 2011 a 2030; b) 2050's, que corresponde ao período climático de 2041-2060; c) 2080's, que corresponde ao período climático 2071-2090. Os períodos climáticos são fatias de tempo ou *slice times* de 30 anos que permitem o estudo do estado médio e o comportamento estatístico das variáveis climáticas (NOBRE; SOARES; QUEIROZ, 2020).

Deve-se destacar, no entanto, as condições de registro dos dados climáticos brasileiros que estão disponíveis e são acessíveis para pesquisas e avaliações termo-energéticas.

A maior parte das simulações termo-energéticas de edifícios realizadas no Brasil em 2022 se utiliza de arquivos climáticos da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que passou a fornecer dados atualizados em 2018, cujos registros datam da década 2001-2010. Os dados anteriores passaram por correções em irradiâncias e iluminâncias em 2012 (RORIZ, 2012).

Assim, os arquivos da base de dados brasileira não retomam o período climático 1961-1990, como preconiza a metodologia desenvolvida a partir de Belcher, Hacker e Powell (2005), e como recomenda a OMM. Tampouco abarcam o período climático de 30 anos, que melhor representaria estatisticamente o clima. Todavia, diante da insurgência climática, faz-se necessário vislumbrar o que estaria por vir com as mudanças do clima, e incentivar o desenvolvimento de novos métodos de estudos para edificações.

Analisar o desempenho termo energético de edifícios por simulação computacional com olhar sobre climas futuros deve ser considerado, haja vista que estudos apontam que a vida útil das edificações varia entre 35 e 70 anos (GUARDA; DURANTE; CALLEJAS, 2018; NUNES; GIGLIO, 2020). No Brasil, a VU mínima é de 50 anos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a).

Considerando-se que a resposta termo-energética do edifício está estreitamente relacionada ao clima em que se insere (NUNES; GIGLIO, 2020), Olonscheck, Holsten e Kropp (2011), Nakicenovic e Swart (2000) e Williams et al. (2012) apontam que mudanças no clima influenciam no conforto ambiental do dos ambientes das edificações, bem como no seu consumo energético (NUNES; GIGLIO, 2020).

⁵ Chartered Institution of Building Services Engineers - Instituição credenciada de engenheiros de serviços de construção.

⁶ Climate change scenarios para o UK (Reino Unido).

Em estudos já realizados, observou-se que juntamente com a progressão climática, progride o aumento das temperaturas de bulbo seco e das temperaturas operativas em ambientes de permanência prolongada com aumento de horas de desconforto por calor, e consumo de energia (CASAGRANDE; ALVAREZ, 2013; GUARDA et al., 2019; NUNES; GIGLIO, 2020).

2.4. A saúde, a mudança do clima, e o desempenho térmico atual de edifícios brasileiros

Com o aquecimento global, a probabilidade de ocorrência de ondas de calor e sua intensidade e duração têm aumentado em diversas partes do mundo (PERKINS-KIRKPATRICK; LEWIS, 2020; WANG et al., 2022). Diversos estudos mostraram que variáveis, como temperatura, umidade e radiação solar, afetam a saúde por meio de doenças e mortalidade relacionadas ao calor (RAYMOND; MATTHEWS; HORTON, 2020; WANG et al., 2022). Assim, os efeitos combinados de mudança de temperatura e umidade representa ameaça à saúde humana (MORA et al., 2017).

A onda de calor europeia de 2003 acendeu o alerta para a periculosidade destes efeitos combinados. Mitchell et al. (2018) realizaram análise quantitativa do risco de mortalidade por calor com extremos de temperatura projetados para o futuro em cenários consistentes com as metas do Acordo de Paris, comparando os dados com o evento de mortalidade relacionadas ao calor de 2003, com apoio de estudos sob projeção de cenários futuros, com temperatura global de superfícies estabilizada entre 1,5°C e 2°C acima da temperatura registrada historicamente.

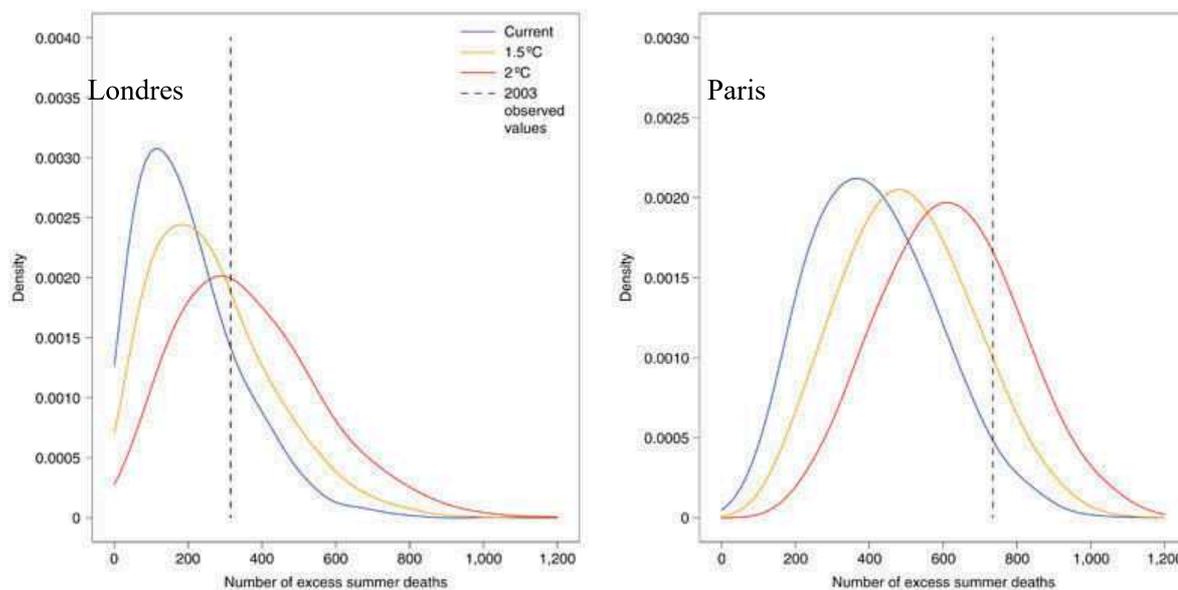
Os dados de projeção foram retirados de projeto *Half a degree Additional warming, Prognosis and Projected Impacts* (MITCHELL et al., 2018), e, baseando-se em números de Bacchini et al. (2008), que apontaram para aumento da mortalidade em estudo com 15 cidades europeias relacionando aumento de calor e aumento de mortes por causas respiratórias em idosos, e Mitchell et al. (2016), que associaram aumento de mortes com a redução da precipitação; Mitchell et al. (2018) estimaram que o evento de 2003 resultou em 735 mortes extras por calor extremo em Paris, população de 2.126.000 de habitantes, e 313 mortes extras em Londres, população de 7.154.000 de habitantes, quando considerados os dados da década 2010.

Os experimentos com estabilização da temperatura em 1,5°C (laranja) e 2°C (vermelho) apontaram para aumento da mortalidade em de 22% e 15%, acima do limite de 2003, se o aumento da temperatura para o clima do estudo for estabilizado em 2°C em vez de 1,5°C para as cidades de Londres e Paris, respectivamente (Gráfico 1).

Na Londres da década 2010, aproximadamente 10% dos verões resultavam em zero mortes relacionadas ao calor (Gráfico 1, esquerda, linha azul). Essa porcentagem caiu para ~4% e ~2% dos verões para os experimentos de 1,5°C e 2°C, respectivamente. A mudança no número médio de mortes foi de 75 ± 7 entre os dados de clima estabilizado em +2°C e +1,5°C (Gráfico 1, linhas esquerda, laranja e vermelha).

Em Paris da década 2010, verões sem nenhuma morte relacionada ao calor foram raros (<1%, Gráfico 1, direita, linha azul), e a mudança média na mortalidade entre os dados de clima estabilizado em +2°C e +1,5°C foi de 87 ± 9 mortes (Gráfico 1, direita, laranja e linhas vermelhas).

Gráfico 1: Distribuições de mortalidade de verão relacionada ao calor em experimentos década 2010, e em climas com temperaturas estabilizadas em +1,5 °C e +2 °C do registro para a década.



Fonte: MITCHELL et al., 2018.

Mitchell et al. (2018), destacaram que foram realizadas contagens conservadoras para mortes extras por calor no evento de 2003.

As edificações europeias são construídas com significativa camada de isolamento, necessária durante o inverno rigoroso. Entretanto, a transmissão de calor tratada para o período frio permanece tratada no período de verão, quando as trocas de calor poderiam favorecer o conforto térmico nos ambientes construídos.

Em circunstâncias de eventos extremos de calor este agravante deve ser considerado, juntamente com o costume dos usuários e uso das edificações quanto à permissividade de ventilação natural em grande parte do território, pois interferem diretamente no balanço energético corporal⁷ e na capacidade de manter o corpo com temperatura interna segura para o funcionamento dos órgãos internos e do cérebro (BŁAZEJCZYK et al., 2013).

Em países quentes como o Brasil não se observa a prática da utilização de isolamentos nos edifícios na mesma proporção que em países frios, a utilização da ventilação constante é habitual, assim como a existência de infiltrações indesejadas por coberturas e esquadrias.

Todavia, outras investigações sobre a periculosidade do aumento da temperatura global para a saúde humana vêm sendo desenvolvidas, com abordagens que analisam principalmente temperatura (WANG, 2019, SHI et al., 2020; WANG et al., 2022; ZHANG;) e poluição do ar, em análises predominantemente sobre danos cardiovasculares e cerebrais. Em menor proporção são observados estudos que tratam da temperatura corporal interna ótima (MORA et al., 2017) e dos efeitos combinados de altas temperaturas e alta umidade sobre o organismo humano relacionados ao estresse térmico.

Para essas análises existem várias abordagens que caracterizam o estresse térmico (condições ambientais) e a tensão térmica (respostas fisiológicas dos organismos vivos). Mais de 100 índices

⁷ Capacidade do corpo humano realizar trocas de calor com o ambiente (BŁAZEJCZYK et al., 2013).

foram propostos para descrever o estresse térmico e a tensão em humanos. E, ainda assim, esses índices não vislumbram o acúmulo de carga de calor ao longo do tempo (ASSENG et al., 2021).

A partir dos resultados de cinco modelos de clima global participantes da 6ª fase do Projeto de Intercomparação de Modelo Acoplado (CMIP6), estudo realizado por Wang et al. (2022), caracterizou o estresse térmico do período histórico 1981-2014, e os cenários futuros 2015-2100, considerando outros aspectos além da temperatura e poluição do ar. Para avaliar o risco térmico futuro o estudo considerou um dos principais indicadores de estresse por calor: a temperatura do globo de bulbo úmido (TBU).

A partir da análise sobre a exposição da população ao estresse térmico de diferentes regiões do planeta, o estudo constatou que o crescimento mais forte no estresse por calor extremo ocorrerá em baixas latitudes, de forma que as pessoas que vivem em latitudes médias e baixas correm o risco de serem severamente ameaçadas por um estresse térmico perigoso (WANG et al., 2022).

Nas comparações entre os resultados, Wang et al. (2022) verificaram que o aumento da umidade aumenta notavelmente o estresse térmico em baixas latitudes. Possivelmente pelo fato de a TBU não aumentar linearmente com temperatura e umidade relativa. Assim, um leve aumento na temperatura ou umidade relativa pode levar a um aumento substancial na TBU, especialmente quando a temperatura está alta (LUO; LAU, 2019; WANG et al., 2022).

Um grupo internacional de especialistas desenvolveu o Índice de Clima Térmico Universal (UTCI) por iniciativa da Sociedade Internacional de Biometeorologia (SIB) para fornecer uma possibilidade de avaliação facilitada para o uso da tensão térmica em humanos, com medidas de temperatura, umidade, vento e radiação como entrada ambiental (ASSENG et al., 2021).

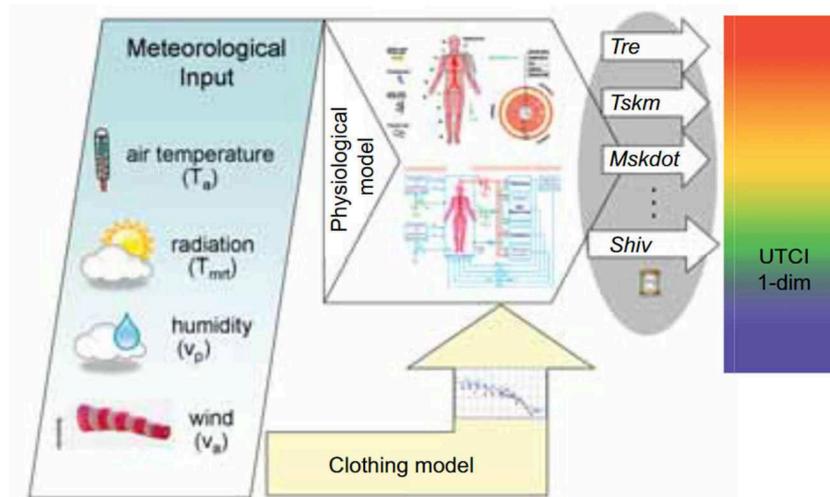
Segundo Błazejczyk et al. (2013) o UTCI é definido como a temperatura do ar (T_a) em condição de referência capaz de causar mesma resposta que as condições reais. O desvio do UTCI da temperatura do ar depende dos valores reais da temperatura do ar e da temperatura radiante média (T_{rm}), da velocidade do vento (v) e da humidade, expressa em pressão de vapor de água (vp) ou humidade relativa (RH) (Fig. 1). Isto pode ser escrito em termos matemáticos como:

Equação 5: Definição matemática para UTCI

$$\begin{aligned} UTCI &= f(T_a; T_{rm}; v; vp) \\ &= T_a + desvio(T_a; T_{rm}; v; vp) \end{aligned} \quad (1)$$

Para converter o impacto climático num valor único e para facilitar a interpretação e compreensão do UTCI, as condições de referência devem ser: (1) definidas em conforme a experiências da maioria das pessoas, e (2) relevantes em todo o espectro de zonas climáticas às quais o UTCI vai ser aplicado. Assim, a taxa metabólica das variáveis não meteorológicas MET e as propriedades térmicas do vestuário são de grande importância.

Em 2000, a Comissão da SIB sobre o UTCI definiu como atividade representativa ao ar livre uma pessoa que caminha a 4 km por hora ($1,1 \text{ m/s}^2$), taxa de produção de calor metabólico de 2,3 MET (135 W/m^2), velocidade do vento (v_a) de 0,5 m/s a 10 m de altura (aproximadamente 0,3 m/s a 1,1 m), temperatura radiante média (T_{mr}) igual à temperatura do ar, pressão de vapor (vp) que representasse uma umidade relativa de 50%, constante a 20hPa e sob condição temperaturas do ar maior que 29°C.



Onde são considerados dados de saída: T_{re} – Temperatura retal ($^{\circ}\text{C}$); T_{skm} - Temperatura média da pele ($^{\circ}\text{C}$); T_{skfc} – Temperatura da pele facial ($^{\circ}\text{C}$); $Mskdot$ – Produção de suor (g/min); $wetA$ – Umidificação da pele (% de área corporal); $VblSk$ – Fluxo sanguíneo na pele (% do valor basal); $Shiv$ – Calor gerado por tremor (W).

Figura 15: Conceito do UTCI como temperatura equivalente da resposta dinâmica multivariada do modelo termo fisiológico UTCI-Fiala (Fiala et al. 2012), acoplado a um modelo de vestuário (Havenith et al. 2012). Fonte: BLAZEJCZYK et al., 2013.

Mora et al, (2017) apresentaram análise de eventos de calor letal documentados em diversas regiões, apontando que período prolongado de exposição a temperaturas acima de 32°C com alta umidade e acima de 50°C com baixa umidade poderá ser letal para os seres humanos (MORA et al., 2017; ASSENG et al., 2021). Diante dos cenários de mudanças climáticas previstos pelos cientistas, a tendência é de crescimento para o número de dias acima do limite fisiológico mortal, principalmente em regiões de baixas latitudes, como observado de **a** para **d** na Figura 16.

Os modelos em cenários projetados para climas futuros o *Fourth Assessment Report* (AR4) já indicavam em 2007 significativas mudanças, e o crescimento do número de dias acima dos limites fisiológicos mortais, principalmente na região de baixas latitudes. Nas análises sobre o clima histórico, o número de dias acima do limite se mostrava pontual e circundava entre 50 e 175 dias, em regiões pulverizadas no mapa. Entretanto, à medida que os cenários RPC propunham maior emissão de GEE, maiores as áreas afetadas com temperaturas acima do limite fisiológico, e maior a quantidade de dias no período de um ano com ocorrência da anomalia.

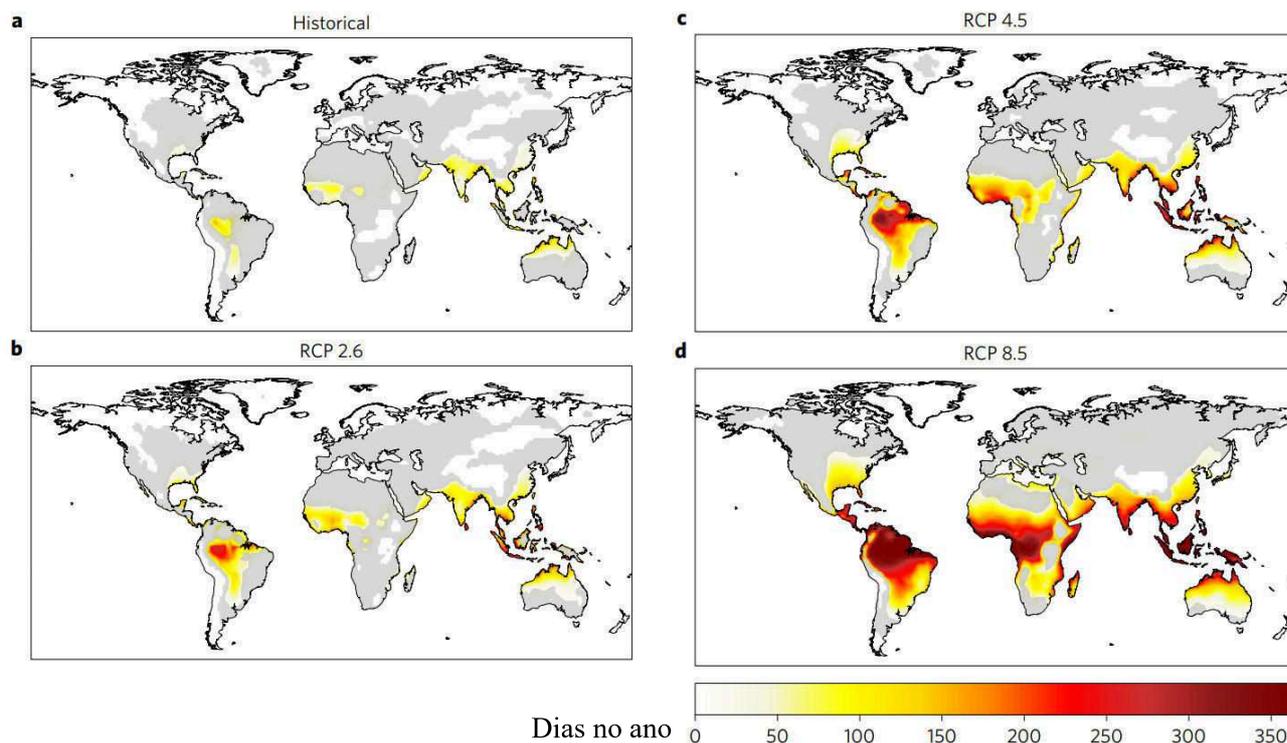


Figura 16: Número de dias acima do limite fisiológico mortal.

Fonte: MORA et al., 2017.

Mantidos os atuais padrões de emissão de GEE, sem novas medidas mitigadoras, estima-se que a temperatura média do ar seja 4,8 °C maior em 2100 do que no período pré-industrial (MACHADO et al., 2022; PACHAURI et al., 2008). Em cenário RPC 8.5, que discute o aumento de temperatura global de até 6°C, os estudos indicam que em regiões cujas latitudes se aproximam de zero tornar-se-ão inabitáveis.

Considera-se que as ocorrências de desconforto ao calor possam ser evitadas em algumas regiões do Brasil com movimento do ar porque as temperaturas do ar são inferiores à temperatura da pele, possibilitando a remoção do calor desde que protegidas diretamente e indiretamente do sol (EEDUS, 2020). Entretanto, a falta de vento, a exposição a insolação e as superfícies aquecidas pelo sol podem causar sensação de desconforto térmico (JENDRITZKY; DE DEAR; HAVENITH, 2012).

Em ambientes abertos a influência da radiação térmica no desconforto térmico é maior que a temperatura do ar e pode definir a sensação de conforto, fazendo-o variar de “sem estresse” para “estresse térmico extremo” se considerado o UTCI como índice térmico.

Em ambientes fechados e ventilados naturalmente o parâmetro mais adequado para avaliar o conforto térmico é a Temperatura Operativa (TO), correspondente à média da temperatura do ar e da temperatura radiante média dependente das temperaturas superficiais, pois quanto maior a temperatura da superfície, maior a irradiação de calor (EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA O DESENVOLVIMENTO URBANO SUSTENTÁVEL et al., 2020).

Diante disso, destaca-se que, apesar da NBR 15575/2021 ser uma Norma com foco nas exigências dos usuários para o edifício habitacional e seus sistemas, quanto ao seu comportamento em uso (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a), o desempenho térmico, inserido dentro da exigência de habitabilidade, considera, a temperatura de bulbo seco (TBS) como parâmetro de base para a definição de faixas de temperatura operativas (FT), como apresentado no Quadro 1.

A definição das FT não apresenta relação com nenhum outro parâmetro como umidade, disponibilidade de ventilação ou radiação do local onde será implantado o edifício.

2.5. Desempenho Térmico dos Sistemas de Cobertura (SC)

Para Santamouris e Asimakopulos (1996) estratégias de resfriamento passivo consistem em todas as medidas preventivas contra o superaquecimento no interior dos edifícios (apud AL-OBAIDI; ISMAIL; ABDUL RAHMAN, 2014a).

O resfriamento passivo de edificações tem sido há muito estudado em climas quentes, e a aplicação em coberturas deve seguir as premissas já conhecidas, ou seja: (1) evitar ganhos de calor dentro dos edifícios considerando o isolamento da envoltória e seu sombreamento, para isso as propriedades superficiais externas devem ser tratadas; (2) modular os ganhos de calor com controle da radiação solar, equilibrando ganho de calor e contribuição da luz natural sobre o design, e assim como modular temperaturas para atendimento do conforto térmico e uso do espaço; e (3) dissipar calor interno ou por dissipadores, ou por trocas de ar (AL-OBAIDI; ISMAIL; ABDUL RAHMAN, 2014b).

Considerando o desempenho nas unidades habitacionais (UH), o sistema de coberturas (SC) é entendido, no Brasil, como conjunto de elementos ou componentes dispostos no topo da construção, com a função de assegurar estanqueidade às águas pluviais e salubridade, bem como auxiliar na proteção dos demais sistemas da edificação habitacional ou dos elementos e componentes da deterioração por agentes naturais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a).

Para coberturas a NBR 15575 prevê que o SC dê respostas para desempenho em sete aspectos qualitativos: desempenho estrutural (1); segurança contra incêndio (2); segurança no uso e na operação (3); estanqueidade (4); desempenho térmico (5); desempenho acústico (6); e que não prejudique o desempenho lumínico (7) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a, 2013b, 2021a, 2021b).

As coberturas possuem a função de escudo contra a radiação solar direta, haja vista sua função de fechamento superior da edificação, cujas superfícies devem refletir parte da radiação solar incidente, impedindo que a superfície interna se transforme em fonte de calor indesejável em climas quentes (CORBELLA; CORNER, 2011)

A cobertura protege a edificação (...) da radiação solar. Para qualidade do ambiente interno, é fundamental o bom desempenho térmico da cobertura. (...). Em uma casa, ou em construções com poucos pavimentos – partidos essencialmente horizontais, a cobertura é a principal responsável pelo aumento da carga térmica decorrente da energia solar (CORBELLA; CORNER, 2011, p.56).

Em coberturas de telhados sem separação com o ambiente (sem ático), a transferência de calor para o interior se dá por condução, convecção e irradiação ocorrendo transferência direta de energia térmica para o ambiente interno. Na existência de forro ou laje, o ático se torna um acumulador de ar quente, cuja energia térmica é transferida para os ambientes internos após a acumulação (CORBELLA; CORNER, 2011) ou seja, de forma retardada, podendo ser amortecida.

A ventilação do ático por meio de aberturas laterais ou zenitais dissipa boa parte do calor, o qual deixa de ser transferido para o ambiente interno, reduzindo seu aquecimento. Mesmo não havendo vento, o fenômeno do efeito chaminé⁸ e da exfiltração de ar quente colaboram para a dissipação do calor.

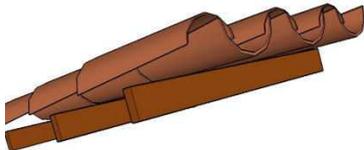
⁸ O ar quente sobe e sai através de aberturas existentes na parte superior do recinto, sendo substituído por ar de temperatura inferior que entra por aberturas inferiores. A movimentação ocasionada por este fenômeno é uma função entre a distância vertical entre a tomada e a saída de ar, os tamanhos dessas aberturas e as temperaturas externas médias na parte mais alta do recinto (BROWN; DEKAY, 2004).

As coberturas formadas por lajes planas e sem telhamento, apesar de possuírem menor custo em relação as coberturas feitas exclusivamente com telhas, apresentam dois problemas, segundo Corbella e Corner (2011):

- O rebaixamento ou inexistência da proeminência da cumeeira reduz o volume de ar do ambiente interno. De forma que um mesmo fluxo de calor será transmitido pela cobertura para um menor volume de ar, e o pé-direito mais baixo reduz a capacidade de convecção do ambiente, o que ocasiona aumento da temperatura, em relação aos ambientes que possuem telhados inclinados;
- Maior massa do material da laje em relação às telhas, o que resulta em maior armazenamento de energia térmica, tornando a cobertura mais efusiva, prolongando o tempo de irradiação devido à maior inércia térmica, retardando o resfriamento do ambiente.

Entretanto a combinação de propriedades térmicas de cada uma das composições desses tipos de coberturas (Quadro 2) evidencia as vantagens e desvantagens em cada um dos componentes.

Quadro 2: Comparação entre propriedades térmicas de tipos de cobertura.

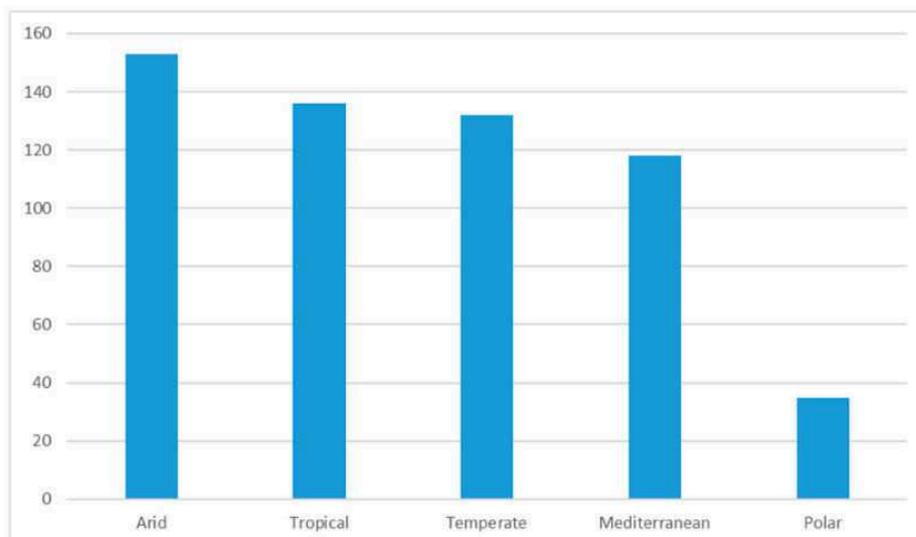
Cobertura com laje maciça, 10 cm		Cobertura de telha cerâmica, 1 cm	
			
Resistência Térmica	0,27 m ² K/W	Resistência Térmica	0,22 m ² K/W
Transmitância Térmica	3,74 W/m ² .K	Transmitância Térmica	4,5 W/m ² .K
Atraso Térmico	2,3 h	Atraso Térmico	0,1 h
Capacidade Térmica	220 kJ/m ² K	Capacidade Térmica	18,4 kJ/m ² K

Fonte: BRASIL (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA); LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, 2022.

Assim, se por um lado a cobertura plana prejudica o processo de troca de calor a partir dos fenômenos da mecânica dos fluidos, por outro lado ela apresenta menor transmitância térmica (U) quando comparada ao telhado de telhas cerâmicas; e capacidade térmica mais de 10 vezes maior que o telhado com telhas cerâmica, e quase 48 vezes maior se comparado ao telhado com telhas de fibrocimento que possui a transmitância térmica de 4,6 W/m².K (BRASIL (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA); LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, 2022), demandando muito mais energia para variar em 1° a temperatura do sistema. Em contrapartida os sistemas de cobertura compostos apenas por telhamento, pode sofrer resfriamento noturno mais rápido devido ao baixo atraso térmico, ou seja, menor tempo de efusão, como indicado por Corbella e Corner (2011).

Abouseif e Gou (2018) apresentaram dados bibliométricos de pesquisas sobre a atuação das coberturas na eficiência energética e no desempenho térmico de edificações. Essas pesquisas foram desenvolvidas em diferentes condições climáticas (Gráfico 2), sendo a maioria dos estudos desenvolvidos sob condições de climas quentes (árido e tropical).

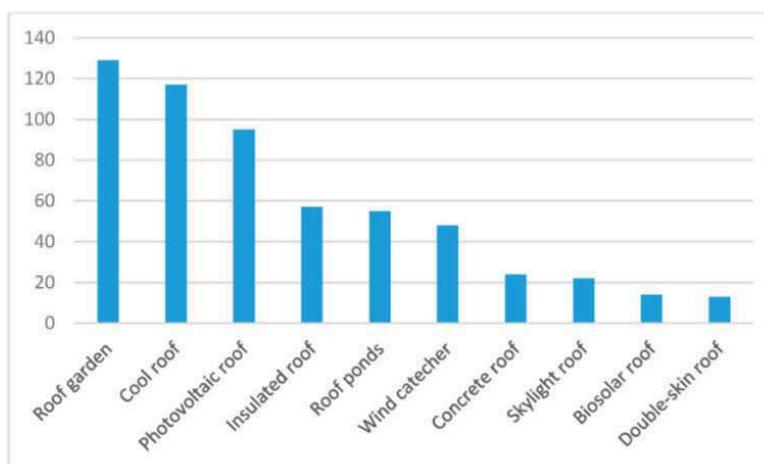
Gráfico 2: Número de artigos por clima.



Fonte: ABUSEIF; GOU, 2018.

Mostrou-se grande a atividade em pesquisas sobre coberturas, com destaque para estudos sobre coberturas verdes (*roof garden*), coberturas frias (*cool roof*), coberturas refletivas (*reflective roof*), coberturas ventiladas e coletores de vento (*wind catecher*), lajes ocas (*hollow concrete*), a implantação de placas solares sobre coberturas (*photovoltaic panel*), lagoas de telhados (*roof ponds*), e aplicação de outros métodos considerados passivos associados, como a utilização de camadas internas de materiais que acumulam ou desprendem energia térmica no processo de mudança de fase, sobretudo nas mudanças com fase sólida (Gráfico 3, Figura 18 e Figura 19).

Gráfico 3: Quantitativo de publicações para cada sistema de cobertura.



Fonte: ABUSEIF; GOU, 2018.

Em climas tropicais observou-se o grande desenvolvimento de pesquisas sobre coberturas verdes, ou telhados/terraços jardins (ABUSEIF; GOU, 2018), que associa as capacidades de inércia a atraso térmico das camadas terrosas ao processo de mudança de fase da evapotranspiração dos vegetais, combinados com sombreamento ocasionado pelas folhagens sobre as camadas terrosas.

Menos recorrentes, porém incisivas e adequadas aos climas quentes, têm sido as pesquisas sobre tetos de pele dupla (TPD), as quais foram observadas sobretudo em países de clima tropical (Figura 18 – g), marcadamente quente e úmido como Malásia e Singapura (AL-OBAIDI; ISMAIL;

ABDUL RAHMAN, 2014; ZINGRE et al., 2015; TOE; KUBOTA, 2015; ZINGRE; YANG; WAN, 2017; ABUSEIF; GOU, 2018).

O estudo trouxe pesquisa de todos os continentes, como apresentado na Figura 17.

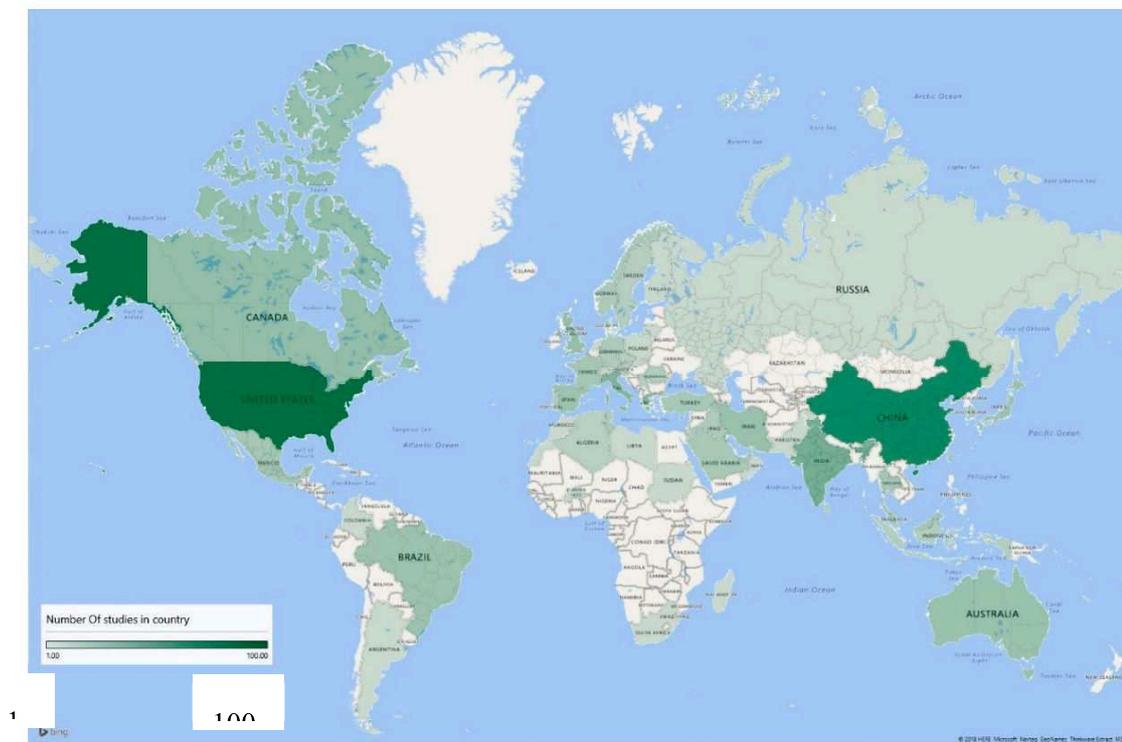


Figura 17: Número de artigos por país.

Fonte: ABUSEIF; GOU, 2018.

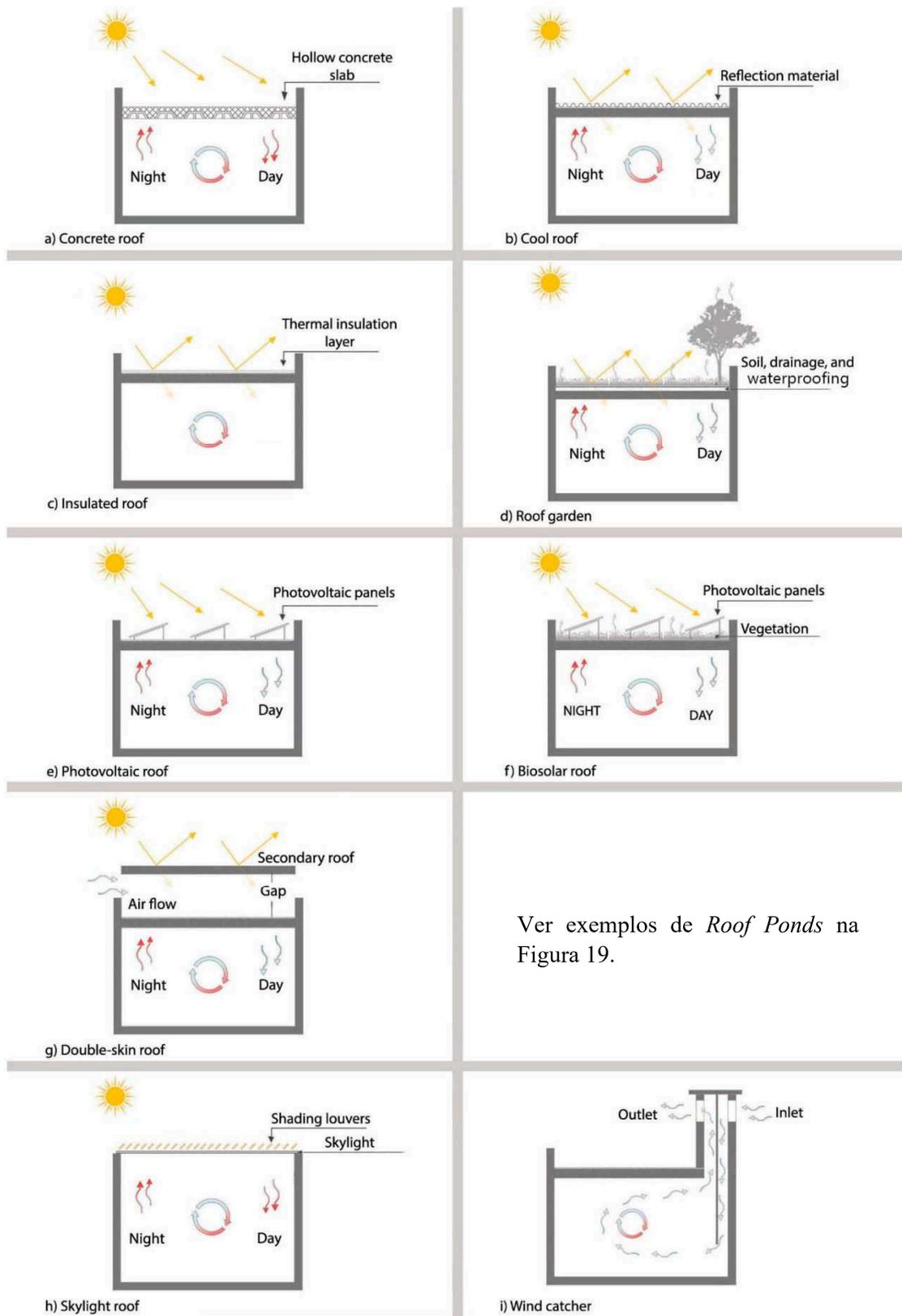


Figura 18: Principais características dos sistemas de cobertura encontrados por Abuseif e Gou (2018) – sem utilização de água.

Fonte: ABUSEIF; GOU, 2018.

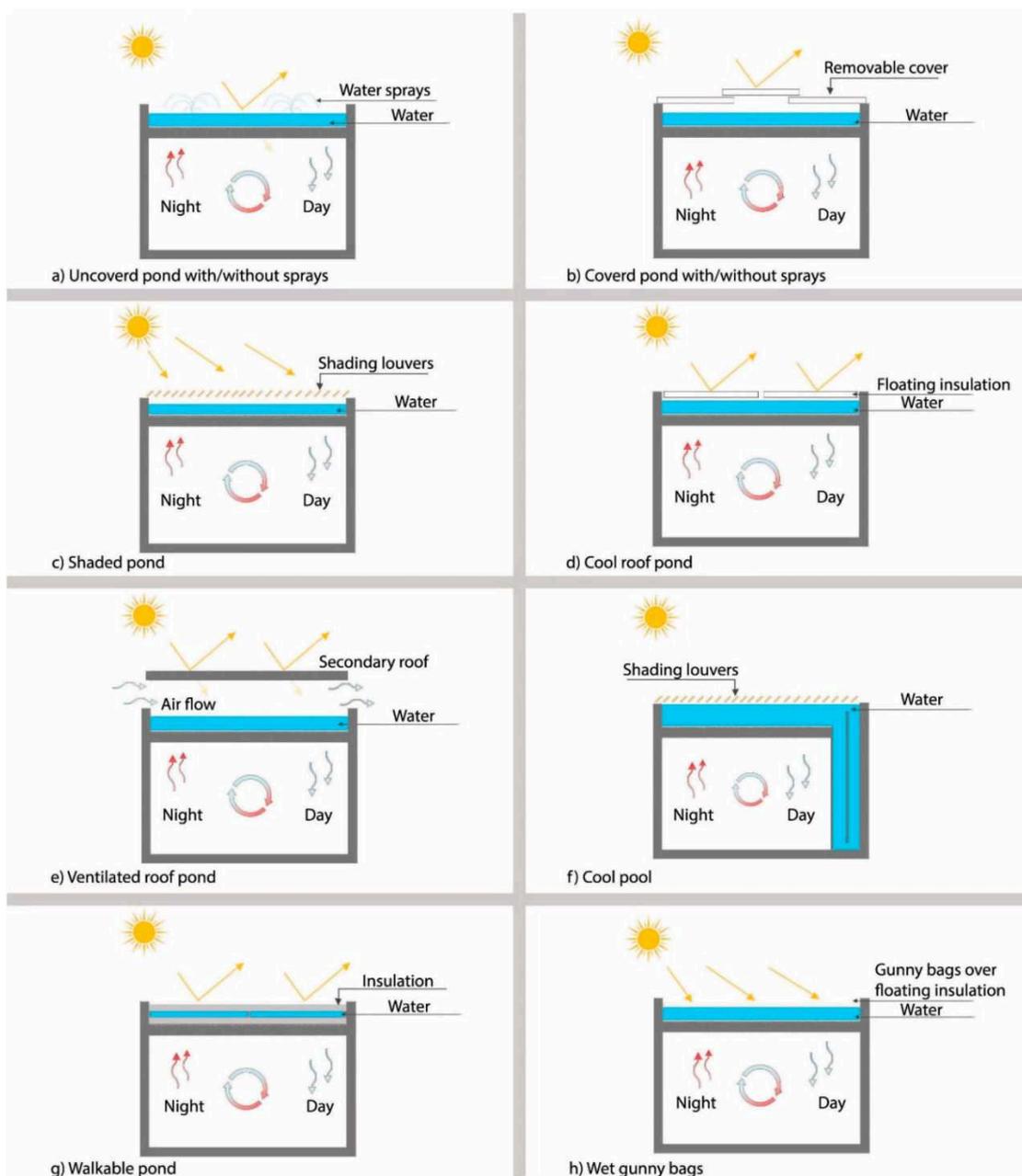


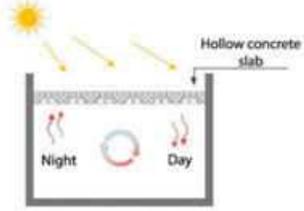
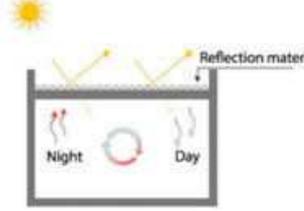
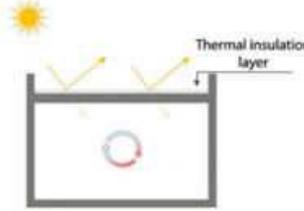
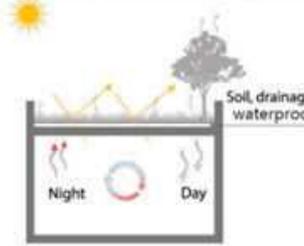
Figura 19: Principais características dos sistemas de cobertura encontrados por Abuseif e Gou (2018) – com utilização de água (*Roof Ponds*).

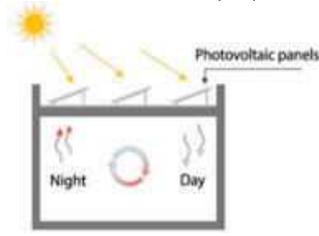
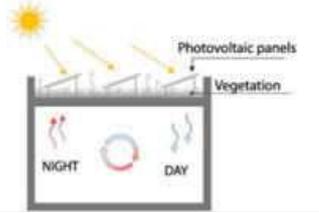
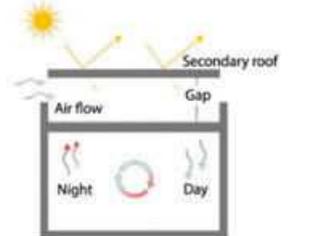
Fonte: ABUSEIF; GOU, 2018.

Essa constatação indicou o interesse científico em investigar as possibilidades de melhoria de desempenho de edifícios por meio da melhoria do desempenho térmico dos diversos tipos de cobertura.

Abuseif e Gou (2018) apresentaram números detalhados sobre as capacidades de melhoria de desempenho de diversas tipologias de coberturas a partir de revisão bibliográfica sobre o tema (Quadro 3).

Quadro 3: Resumo das capacidades de melhoria de desempenho térmico de diferentes tipos de cobertura.

Tipo de cobertura	Melhorias observadas	Destques
<p>Coberturas do concreto oco/cavernoso</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Absorvem o calor externo no verão, enquanto as perdas térmicas podem ocorrer no inverno, o que torna a ocupação sob esses tetos termicamente instável (YESILATA; ISIKER; TURGUT, 2009). • Telhados de concreto oco podem reduzir a condutividade térmica em 13,65% a 40,42% (SHI et al., 2016). Além disso, adicionar camadas reflexivas de revestimento e isolamento a essas lajes pode reduzir significativamente sua condutividade térmica (XAMÁN et al., 2017); • A introdução do uso de material de mudança de fase (MMF) que pode absorver o aquecimento por um processo de fusão antes de chegar aos espaços internos, reduzindo assim o calor até 40% (ALAWADHI; ALQALLAF, 2011). 	<ul style="list-style-type: none"> • Pesquisadores têm tentado melhorar as lajes de concreto aplicando diferentes tratamentos a essas estruturas. A adição de resíduos plásticos e pneus na mistura de concreto pode reduzir o ganho de calor de concreto em 10% a 19% sem afetar seu desempenho (NAJIM; FADHIL, 2015); • Os resultados com MMF ainda são inconstantes (ABUSEIF e GOU (2018).
<p>Cobertura fria ou cobertura refletiva</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Parte da radiação solar pode ser refletida com camadas claras; • Usado para resfriamento passivo, sendo mais eficiente em climas quentes, como climas áridos e tropicais. • Reduz o fluxo de calor em até 33% (OLESON; BONAN; FEDDEMA, 2010); • Tempo de retorno de investimento curto (ZHANG; TONG; YU, 2016). 	<ul style="list-style-type: none"> • Pesquisadores têm discutido o fato de que as cores escuras ainda podem ser eficazes se tiverem um alto desempenho de reflexividade (OLESON; BONAN; FEDDEMA, 2010); • Prejuízo energético em dias frios ou na temporada de inverno, pois bloqueia o aquecimento passivo no telhado do edifício e não é capaz de bloquear a perda de calor dos espaços internos por meio da laje do telhado, a menos que seja combinado com isolamento térmico (OLESON; BONAN; FEDDEMA, 2010);.
<p>Coberturas isoladas</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema muito utilizado e obrigatório em alguns países; • Sistema de isolamento pode atingir uma redução de calor de até 75% em um clima tropical (KUMAR; SUMAN, 2013); • Se o isolamento for integrado a outras técnicas como ventilação ou camada reflexiva, poderá aumentar sua eficiência em até 84% e 88%, respectivamente (ALVARADO; TERRELL; JOHNSON, 2009; TONG et al., 2014). 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependem da condutividade térmica do material de isolamento; • Tempo de retorno pode variar de 3,11 a 5,55 anos (DAOUAS; HASSEN; AISSIA, 2010; KADRI AKYÜZ; ALTUNTA; ZIYA SÖ, 2017)
<p>Coberturas verdes</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Resfriamento passivo no verão e aquecimento passivo no inverno, absorção de CO₂ do ambiente circundante durante o dia, melhorando a qualidade do ar produzindo O₂ e filtragem do ar. Além disso, fornece mitigação de ilhas de calor urbano (HE; ZHU, 2018); • Em climas quentes podem reduzir o fluxo de calor de 31% a 37% (BEVILACQUA et al., 2016; D'ORAZIO; DI PERNA; DI GIUSEPPE, 2012; YANG et al., 2018); • Os telhados jardins podem melhorar o desempenho da ventilação em 20%, e podem ser facilmente adaptados se a estrutura do edifício puder recebê-los (RAN; TANG, 2017). 	<ul style="list-style-type: none"> • Destacam-se em preço e eficiência em relação a outros materiais de isolamento (BEVILACQUA et al., 2016; D'ORAZIO; DI PERNA; DI GIUSEPPE, 2012; YANG et al., 2018); • Quando associado a outros sistemas pode funcionar como camada de isolamento, material reflexivo e ventilação a um telhado jardim, o fluxo de calor pode ser reduzido em até 80% (LIANG; HUANG, 2011); • Para sistemas simples, tempo de retorno de 10 anos, podendo ser ampliado por manutenções e equipamentos especiais para 25 a 57

		anos, o que poderia inviabilizar a utilização com base na economia de energia (CHAN; CHOW, 2013; REFAHI; TALKHABI, 2015).
<p>Painéis fotovoltaicos (PV)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Produção distribuída de energia fornecendo sombreamento sob painéis e absorvendo radiação solar que contribuem para a redução dos ganhos de calor nos telhados. A redução das cargas de resfriamento devido ao sombreamento de painéis fotovoltaicos difere dependendo do tipo de isolamento do telhado. O fluxo de calor pode ser reduzido de 60% a 63% (BAN-WEISS et al., 2013; DOMINGUEZ; KLEISSL; LUVALL, 2011). 	<ul style="list-style-type: none"> • Penalidade energética se o prédio estivesse em climas frios ou em uma temporada fria de inverno.
<p>Coberturas Biossolar (combinação entre cobertura verde e PV)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • As plantas geram uma leve melhora no desempenho das placas fotovoltaicas pois ajudam a reduzir a temperatura sob o PV, o que melhora sua produção de 1,2% a 5,3% (ALSHAYEB; CHANG, 2018; CHEMISANA; LAMNATOU, 2014; LAMNATOU; CHEMISANA, 2014). 	<ul style="list-style-type: none"> • A melhoria ocasionada pela combinação torna-se insignificante se a temperatura for superior a 25°C (NAGENGAST; HENDRICKSON; SCOTT MATTHEWS, 2013).
<p>Tetos de pele dupla (TPD)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • A primeira camada funciona como um refletor/absorvente para calor, e a segunda camada cobre os espaços internos. A lacuna funciona como uma camada de isolamento para evitar a transferência de calor entre as camadas endereçadas. A resistência térmica para um telhado de pele dupla é dinâmica, devido à natureza dinâmica do ar na abertura (ZINGRE; YANG; WAN, 2017); • Um teto de pele dupla pode ser definido como um método de resfriamento passivo e é adequado para climas quentes. Este método pode reduzir os ganhos de calor até 71% como registrado em climas tropicais (ZINGRE et al., 2015); • A eficiência pode ser aumentada em até 85% se uma camada reflexiva for usada na laje superior (LAI; HUANG; CHIOU, 2008; OMAR et al., 2017; ZINGRE et al., 2015). 	<ul style="list-style-type: none"> • Pesquisadores sugerem a aplicação de um material reflexivo na primeira camada e a adição de materiais de isolamento mais eficientes entre as camadas para melhorar sua eficiência; • Pode ser menos eficiente se a camada superior tiver menos capacidade de absorver ou refletir calor e sua eficiência nesta situação cairia para 25% (KRARTI, 2014); • Nenhum artigo discutiu o período de retorno para este método, no entanto, é provável que seja longo, dependendo das características de construção da camada inferior.

Fonte: autora adaptado de ABUSEIF; GOU, 2018.

Registros científicos sobre os tetos de pele dupla (TPD) remontam ao início dos anos 2000, e a compilação dos dados disponíveis até 2018 indicaram que essas tipologias apresentam boas características quanto ao desempenho térmico para climas áridos, mediterrâneos, e tropicais, não sendo indicado para climas de montanha, temperados e polares (ABUSEIF; GOU, 2018).

Os valores obtidos a partir de simulação e de experimentação indicaram reduções expressivas nas porcentagens de ganho de calor dentro de edifícios (Quadro 4), mas faltam dados sobre a redução da temperatura sob o teto (medição).

Quadro 4: Porcentagem de redução do ganho de calor e a redução da temperatura dentro do edifício.

Tipo de cobertura	Redução percentual de ganho de calor (%)	Clima	Estudo de referência	Método e detalhe
Teto de pele dupla com cobertura fria	85	Tropical	(OMAR et al., 2017)	• Simulação – casa em Djibouti (Jibuti), África Oriental.
Isolado com ventilação	84	Tropical	(TONG et al., 2014)	• Experiência Física – prédio residencial de 12 andares.
Telhado isolado	75	Tropical	(NANDAPALA; HALWATURA, 2016)	• Simulação e experimento físico – uso de modelo físico.
Teto de pele dupla	71	Tropical	(ZINGRE et al., 2015)	• Experimento físico – Prédio residencial naturalmente ventilado de 12 andares.

Fonte: ABUSEIF; GOU, 2018.

O estudo de Abuseif e Gou (2018) é validado por outras pesquisas, nas quais foram observadas vantagens e resultados positivos na utilização dessas diversas estratégias em sistema de cobertura como meios para obtenção de melhorias em relação a trocas térmicas, controle de temperatura interna de ambientes e melhoria do conforto no ambiente construído (AKBARI; MATTHEWS, 2012; AL-OBAIDI; ISMAIL; ABDUL RAHMAN, 2014b, 2014a; ANDROUTSOPOULOS; STAVRAKAKIS; DAMASIOTIS, 2017; ASCIONE, 2017; CIAMPI; LECCESE; TUONI, 2005; DIMOUDI; ANDROUTSOPOULOS, 2006; DIMOUDI; ANDROUTSOPOULOS; LYKOUDIS, 2006; KOLOKOTRONI et al., 2018; MORAN et al., 2021; ROELS; LANGMANS, 2016; SCHREIBER; JANDAGHIAN; BASKARAN, 2021; TUCK et al., 2019, 2020; WANG et al., 2021; XU et al., 2014; YU et al., 2020a, 2020b).

Entre 2015 e 2020, foram publicados mais de 52.000 artigos sobre a utilização de materiais em mudança de fase em coberturas ou paredes externas. A temática obteve crescimento anual de 13% a 19% entre os anos de 2015 a 2019 (AL-YASIRI; SZABÓ, 2021), destacando o interesse pela temática inovadora aplicável a envoltórias, sobretudo em sistemas de coberturas.

Observou-se nas investigações sobre tetos de pele dupla grande influência dos fatores climáticos locais como velocidade de ventos, devido aos processos de convecção entre as superfícies da cobertura. Esse aspecto se diferencia de outros tipos de cobertura com materiais isolantes, que não sofrem essa influência externa da mesma forma (OMAR et al., 2017) e há incerteza sobre o processo convectivo no que diz respeito às variações entre os diferentes modelos de teto de pele dupla.

Os materiais que podem ser utilizados na caracterização de coberturas frias apresentam alta refletância solar e altos valores de emissividade térmica. Vários materiais brancos ou de cores claras estão atualmente disponíveis comercialmente para telhados com altos valores de refletância solar variando de 0,4 a 0,85 (SYNNEFA; SANTAMOURIS; AKBARI, 2007).

A preocupação com o desempenho dos sistemas de coberturas é justificada devido à alta contribuição das coberturas no ganho de calor nas unidades habitacionais, podendo chegar a 70% do ganho total da unidade, sendo o maior responsável pelas demandas energéticas para resfriamento em residências nos trópicos (AL-OBAIDI; ISMAIL; ABDUL RAHMAN, 2014a)

O projeto “Análise de custo/benefício de parâmetros de eficiência energética em Habitações de Interesse Social” desenvolvido a partir de parceria entre a Secretaria Nacional de Habitação/ Ministério do Desenvolvimento Regional e *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) GmbH entregou em janeiro de 2022 como produtos cinco volumes, um anexo e uma cartilha, que registraram o processo que foi desenvolvido que culminou na publicação da portaria nº 532, de 23 de fevereiro de 2022 do Ministério do Desenvolvimento Regional,

orientando para melhoria da eficiência energética em habitações de interesse social no Brasil (LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, 2022).

A cartilha, Análise de custo/benefício de parâmetros de eficiência energética em Habitações de Interesse Social, traz o resumo com as indicações de diretrizes construtivas para cada zona bioclimática do país. Para as zonas mais quentes as diretrizes para o sistema de cobertura são indicadas na Figura 20.



Figura 20: Comparação entre propriedades térmicas de tipos de cobertura.

Fonte: LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES et al., 2022

Nela os sistemas de cobertura indicados no estudo para ZB7 e ZB8 deveriam apresentar transmitância térmica (U) abaixo de $2,02 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, para isso as sugestões são da utilização dos sistemas de cobertura com laje de concreto e isolante EPS ($U=0,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), telhamento com telha cerâmica, camada de lâ de rocha de cinco centímetros, câmara de ar e forro de madeira ($U=0,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), ou telhamento de barro, câmara de ar e forro de madeira ($U=2,02 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), todos com indicação de absortância menor, ou igual a 0,4. O telhamento com telhas de fibrocimento, mesmo com camada de ar, não foi indicado para as zonas mais quentes, e não houve menção nos produtos do projeto a coberturas do tipo teto de pele dupla ou similar.

2.6. Terraço Capixaba (TC)

No estado do Espírito Santo é amplamente utilizada uma tipologia de cobertura em que o telhado se descola da laje que encerra o fechamento superior dos ambientes, permitindo que o espaço entre piso e telhado seja utilizado.

Popularmente, a tipologia de cobertura é chamada de terraço, e é uma tipologia muito comum, surgindo como alternativa para as lajes desprotegidas, que sofriam com infiltrações e outros problemas ocasionados pela exposição a intempéries.

A tipologia passou a ser conhecida após Maria de Jesus Britto Leite publicar sobre o Terraço Capixaba, como tipologia da arquitetura popular capixaba, no livro “500 anos da arquitetura brasileira”, organizado por Roberto Montezuma e publicado em 2 volumes, em 2002 (COSTA, 2015).

Esta tipologia de cobertura forma um colchão de ar sobre a laje, o que proporciona maior arrefecimento do edifício. Frequente também em outros estados, é possível que paranaenses e capixabas tenham trazido a influência do Norte do Brasil, durante as viagens para busca de madeira (COSTA, 2015).

Há indícios de que o processo de disseminação, utilização e popularização deste tipo de cobertura e sua abrangência no estado do Espírito Santo, tenha sido iniciado a partir do centro de Vitória, sobre edificações multifamiliares que datam da década de 1930, uma vez que estes edifícios já possuíam lajes planas no fechamento superior em ações posteriores a obra acabada. Os terraços capixabas serviam principalmente como área de lazer, no intuito de suprir a falta destes espaços e dos quintais nos edifícios.

Não há evidências cientificamente registrada sobre a autoria, nem a origem dos terraços (SASSO-FERRÃO; NICO-RODRIGUES, 2021). Entretanto, acredita-se que seja uma criação coletiva da população, cuja amplificação da produção teria ocorrido em torno dos anos 1960, devido aos materiais utilizados, como lajes pré-moldadas e telhas de fibrocimento. Seu surgimento pode ter sido uma resposta à necessidade do quintal, tipicamente rural, suprimindo uma necessidade das famílias que migraram de áreas rurais para áreas urbanas com a crise do café na década de 60 do século passado (COSTA, 2015).

Há registros de terraços semelhantes na Península Ibérica, sobretudo em região que esteve sob domínio mouro (Figura 21 a Figura 23), em Sevilha (Figura 24 e Figura 25). E em países do Oriente Médio, o que pode sugerir influências históricas anteriores relacionadas à colonização do solo espírito-santense, justificando a existência desse tipo de cobertura também em outras regiões, ainda que com menor amplitude.



Figura 21: Acequia Real do El Generalife, Granada, Andaluzia, Espanha.
Fonte: OLIGRAF, 2017



Figura 22: Edificações com terraços cobertos do bairro de Albaicín, Granada, Andaluzia, Espanha.
Fonte: Google Maps, 2021.



Figura 23: Edificações com terraços cobertos do bairro de Albaicín, Granada, Andaluzia, Espanha.
Fonte: Google Maps, 2021.



Figura 24: Edificações com terraço coberto. Rua Europa, Sevilla, Andaluzia, Espanha.
Fonte: Google Maps, 2021.



Figura 25: Edificações com terraços cobertos. Rua Dos de Mayo, Sevilla, Andaluzia, Espanha.
Fonte: Google Maps, 2021.

Ao mesmo tempo, há pesquisas recentes sobre tetos de pele dupla em países asiáticos de baixa latitude (Sudeste asiático), com características semelhantes às ibéricas, quanto à montagem das

camadas e fluxo de ar livre. Entretanto, há significativa diferença entre as tipologias ibéricas, mais semelhantes às capixabas e as asiáticas quanto à altura da camada de ar e uso do recinto criado entre o teto duplo.

Diante do acelerado processo de mudanças climáticas, diretamente relacionado à interferência humana nas relações físico-química de mares e atmosfera, e a crescente demanda por maior geração de energia em escala global, este referencial teórico apresentou itens e subitens que apresentaram um panorama geral entre as necessidades planetárias e as edificações, seja por meio da melhoria da eficiência energética de edificações, seja pelo desempenho térmicos.

Como bens imóveis construídos para serem duráveis por considerável período de tempo, mostrou-se a relevância de analisar as respostas dos edifícios ao longo do tempo de uso, com previsões de cenários de climas futuros, haja vista que as mudanças nas condições de clima interferirão não apenas na capacidade de resposta dos edifícios, mas também dos organismos humanos.

Com isso apresentou-se a importância dos sistemas de coberturas no âmbito do desempenho termo-energético de edificações, assim como a possibilidade de outras tipologias de sistemas de coberturas, como as coberturas de pele duplas e os TC, representarem uma opção pouco explorada para melhoria do desempenho térmico em regiões quentes.

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

A pesquisa foi realizada em 5 etapas, como apresentado na Figura 22. A **Etapa 1**: trata da justificativa para escolha e caracterização da área de estudo;

A **Etapa 2**: levantamento de observação; que consistiu na observação e identificação, de forma quantitativa, da ocorrência e frequência das tipologias de sistemas de coberturas na área do recorte amostral.

Etapa 3: modelagem, na qual ocorreu a definição dos modelos Reais de Referência, tendo sido realizada análise sobre modelos geométricos realizados em trabalhos anteriores de referência na temática, e o entendimento sobre os parâmetros a serem adotados na definição da geometria das áreas de elementos transparentes e das áreas de abertura a serem utilizadas para a região da pesquisa; e na qual foram analisados os parâmetros normativos e definidas as características e propriedades térmicas dos modelos.

Etapa 4: avaliação termo-energética conforme proposição da NBR 15575/2021, para simulação com arquivo climático (EPW).

A **Etapa 5**: avaliação termo-energética em cenários futuros, na qual ocorre a produção de arquivos climáticos para cenários de altas emissões de gases de efeito estufa e avalia-se a capacidade de resistência dos modelos às mudanças previstas para o clima.

O fluxograma das cinco primeiras etapas está representado na Figura 26.

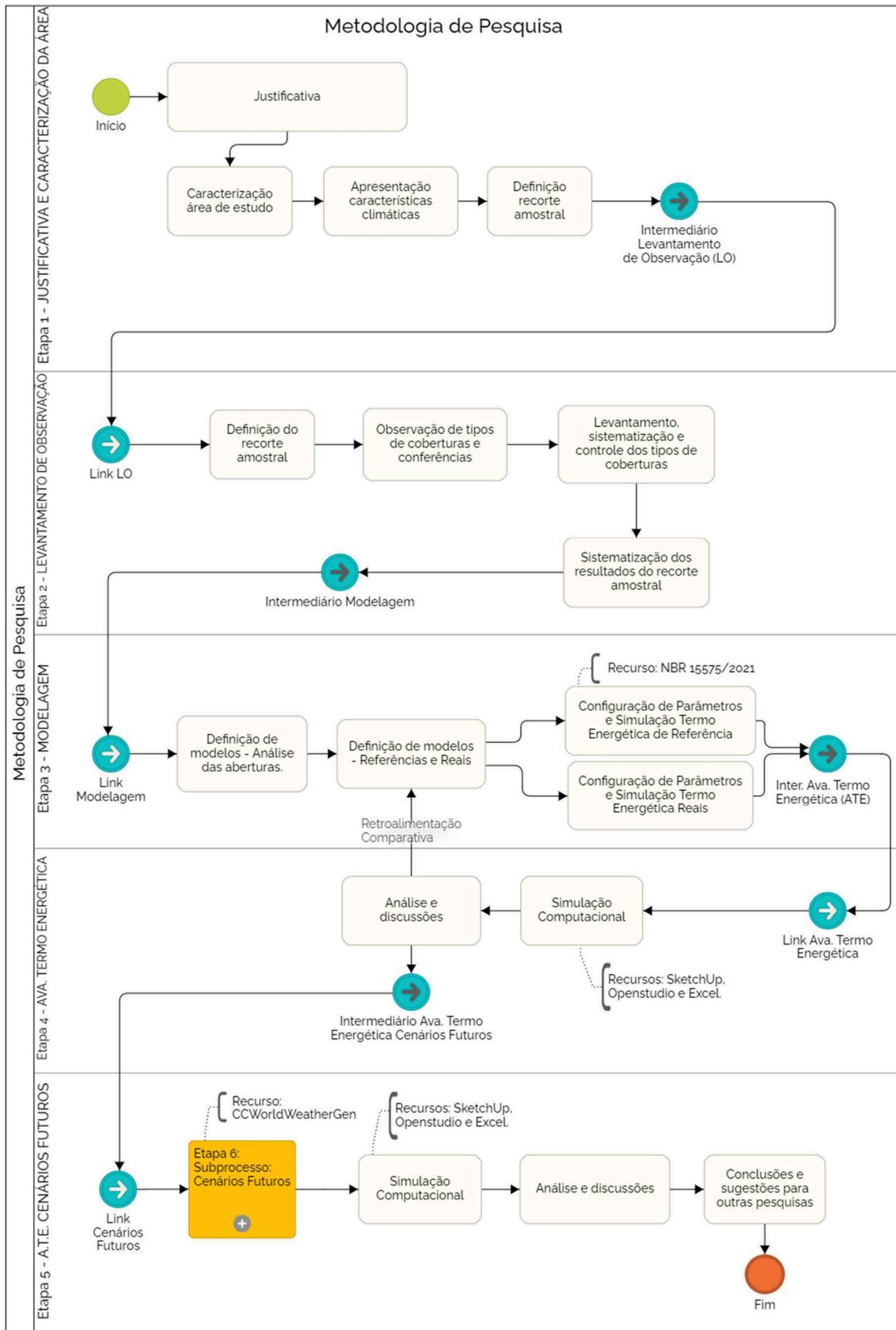


Figura 26: Fluxograma da Metodologia de Pesquisa.

Fonte: Autora com aplicativo Heflo.

Na **Etapa 6** foi realizada a avaliação termo-energética em Cenários de Alta Emissão de Gases de Efeito Estufa (Figura 27), tratados nesta pesquisa como cenários futuros de mudanças climáticas, um subprocesso da avaliação termo-energética.

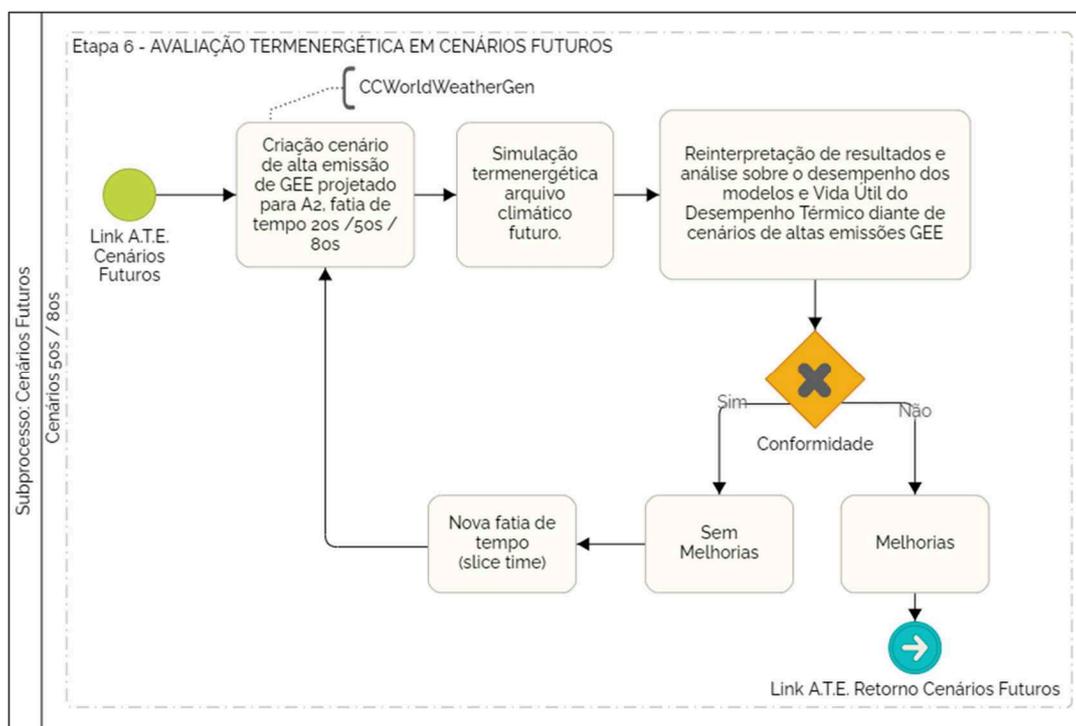


Figura 27: Fluxograma Subprocesso da Metodologia de Pesquisa – Avaliação Termo-energética em Cenários Futuros de altas emissões de GEE.

Fonte: Autora com aplicativo Heflo.

Com a realização do subprocesso de criação dos arquivos climáticos de cenários futuros, pôde-se interpretar os resultados e retornar ao conjunto de análises anteriores da Etapa 5: avaliação termo-energética e finalizar o processo com as conclusões.

3.1. Justificativa para escolha da área de estudo

Pela classificação climática proposta por Köppen (1936) o território brasileiro está subdividido em 12 regiões climáticas (Figura 28-a), das quais pelo menos cinco abrangeriam regiões que compõem o estado do Espírito Santo (Figura 28-b).

Embora prevaleça a característica de Zona Tropical com Inverno Seco (Aw), regiões litorâneas apresentam clima de Monções (Am), e a região das montanhas capixabas apresentam climas Subtropicais Úmidos (Cfa e Cfb).

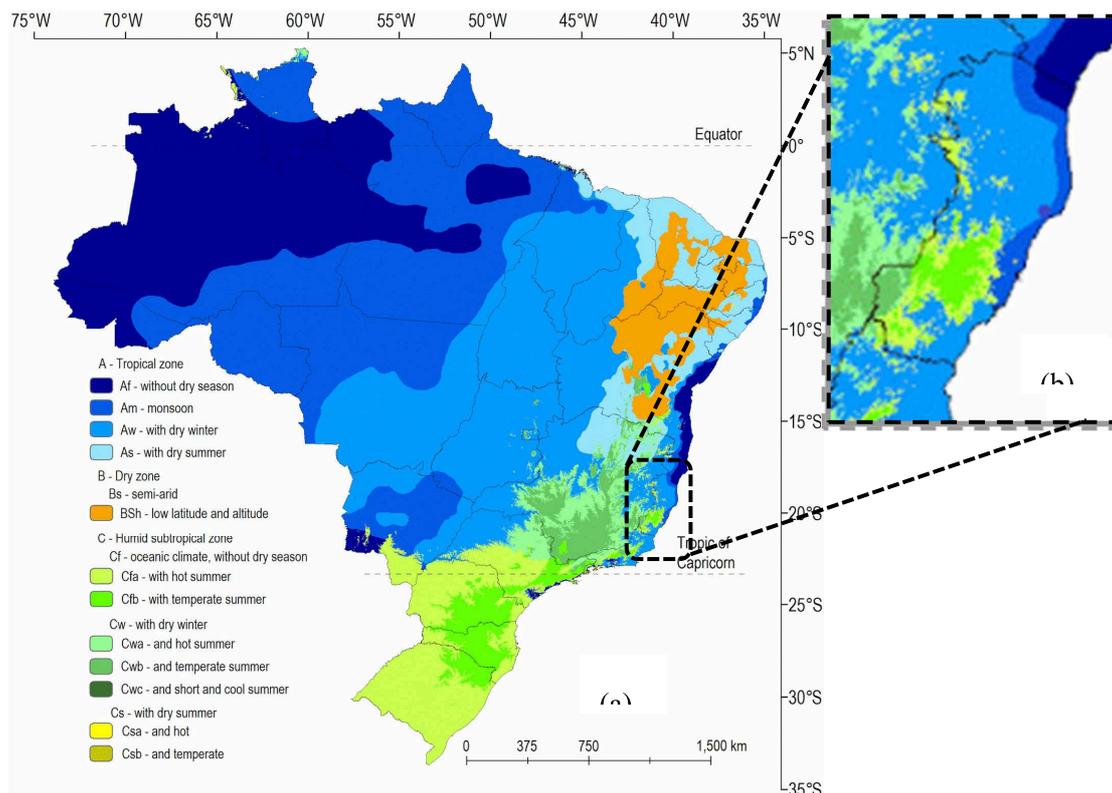


Figura 28 (a e b): Classificação do Clima Brasileiro de acordo com Köppen (1936) e recorte da classificação para o estado do Espírito Santo.

Fonte: ALVARES; GONÇALVES; SPAROVEK, 2014.

Pelo Zoneamento Bioclimático Brasileiro atual, o estado do Espírito Santo é caracterizado em duas Zonas Bioclimáticas (ZB), sendo a região de montanhas inserida na ZB5 e a região baixa-litorânea do estado na ZB8.

A ZB8, no entanto, apresenta variedade de combinações geográficas e climáticas ao longo de sua extensão dentro do ES. Regiões litorâneas e planas do Norte do ES possuem maior disponibilidade de vento em direção Nordeste. Cidades como Cachoeiro de Itapemirim e Colatina estão entre vales de montanhas com influência dos grandes corpos d'água que as transpassam, Rio Itapemirim e Rio Doce, respectivamente, sofrendo influência direta da condição de rugosidade do terreno e alta umidade.

Entretanto, no Sul do ES chama atenção a condição de cidades como Alegre e Castelo. Cidades de menor porte, com área urbana concentrada, em baixa altitude, porém, cercadas por montanhas que formam a Cadeia do Caparaó, as quais constituem a região de montanha do ES.

Nos mapas do Instituto Jones dos Santos Neves é possível observar os registros do INCAPER⁹ para temperatura no período 1977-2006; e a representação do relevo no entorno das duas cidades (Figura 29 a Figura 31). As regiões onde se localizam as cidades foram destacadas em fúcsia no primeiro mapa, e nos seguintes foi possível observar as diferenças entre o relevo dos municípios de Alegre e Castelo.

⁹ Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural, antiga EMATER-ES.

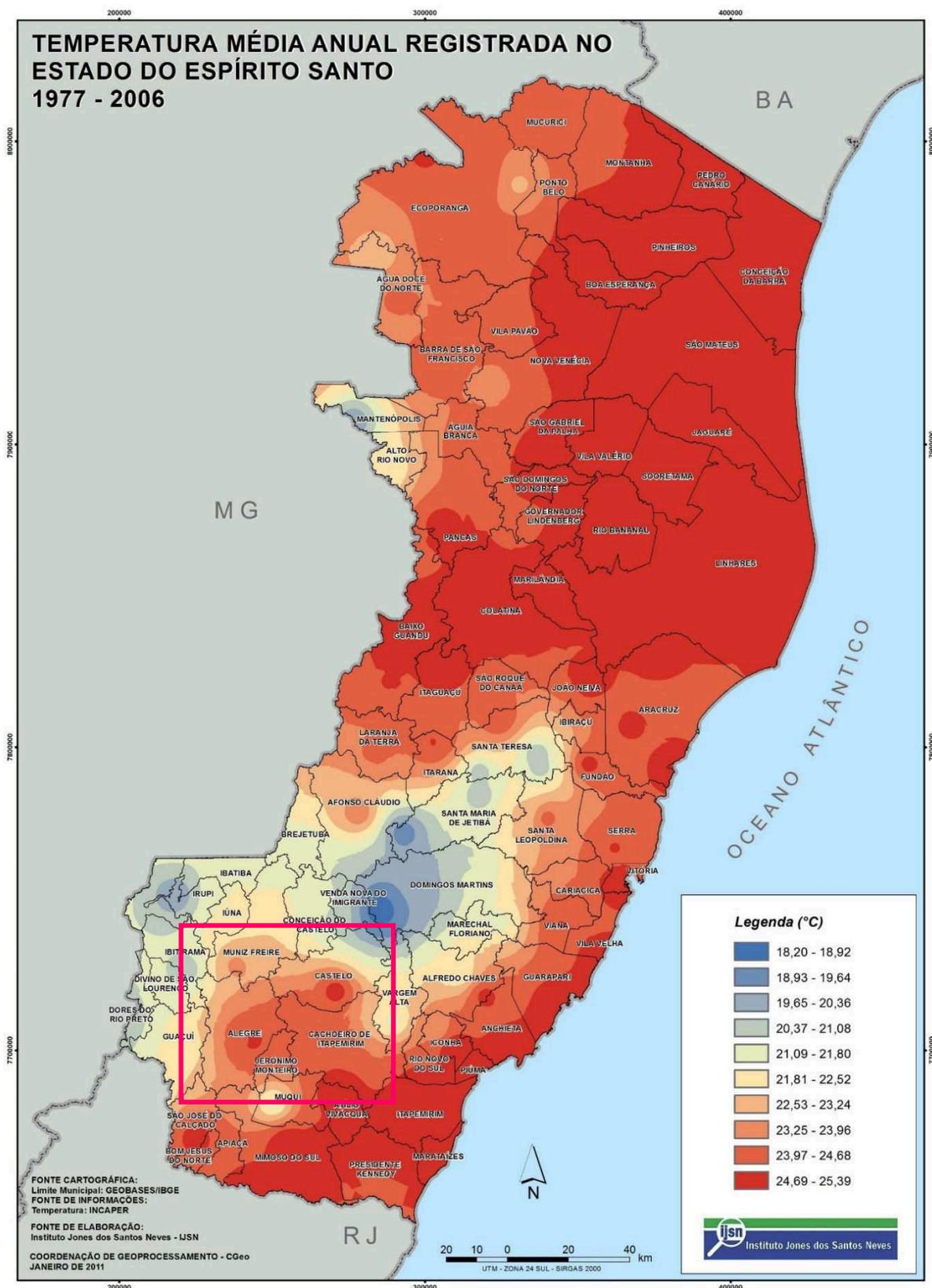


Figura 29: Temperaturas médias anuais registradas pelo INCAPER (1977-2006).

Fonte: ESPÍRITO SANTO (ESTADO), 2022.

Destaca-se que a cidade de Alegre possui relevo menos elevado a Leste, na orientação Rive-Jerônimo Monteiro (Figura 33 – área verde). Já na cidade de Castelo, o relevo menos elevado se apresenta na orientação Sul/Sudeste, no sentido Cachoeiro de Itapemirim (Figura 34 – áreas verdes), mas ainda assim, com a presença dos paredões rochosos da região de Vargem Alta.

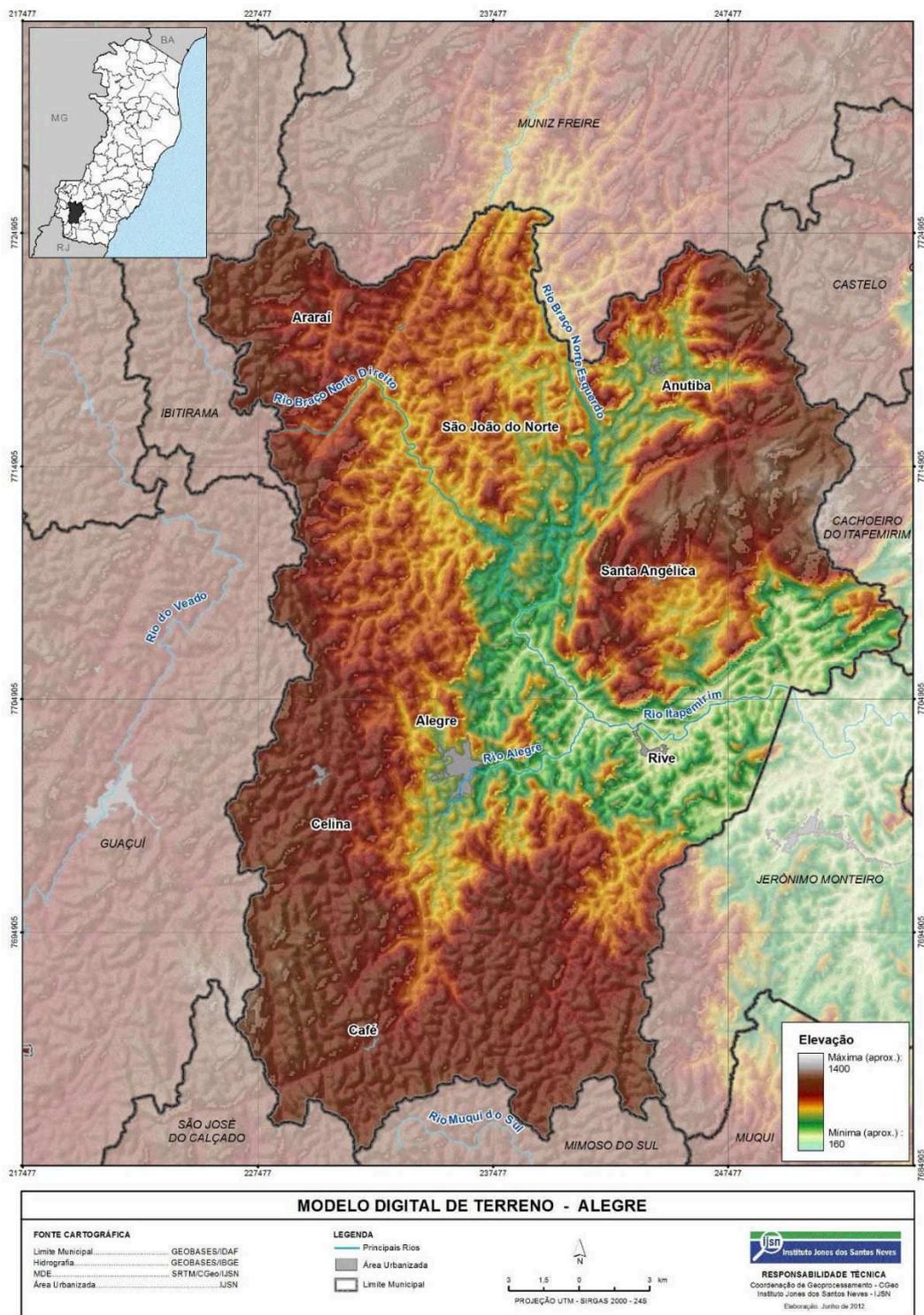


Figura 30: Modelo digital de Terreno – Alegre, ES.
Fonte: ESPÍRITO SANTO (ESTADO), 2022.

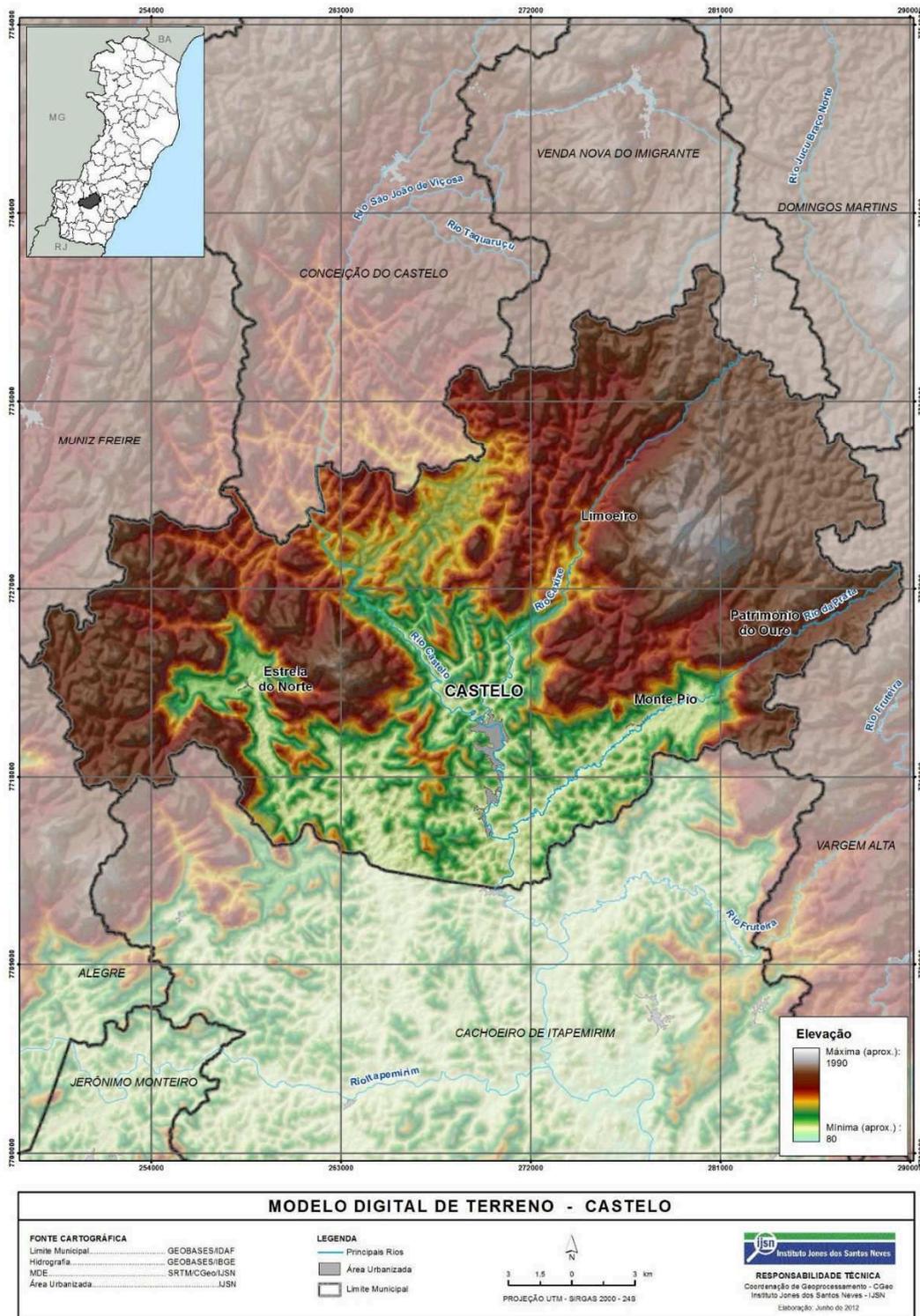


Figura 31: Modelo digital de Terreno – Castelo, ES.

Fonte: ESPÍRITO SANTO (ESTADO), 2022.

Pelas informações do Atlas Eólico do Espírito Santo (Figura 32) foi possível identificar a direção de ventos predominantes na região, com base em modelos atmosféricos resultantes de *MesoMap* (a) e com velocidades normalizadas em relação médias anuais locais (b), considerando a sobreposição ao relevo sombreado ilustrando a influências orográficas.

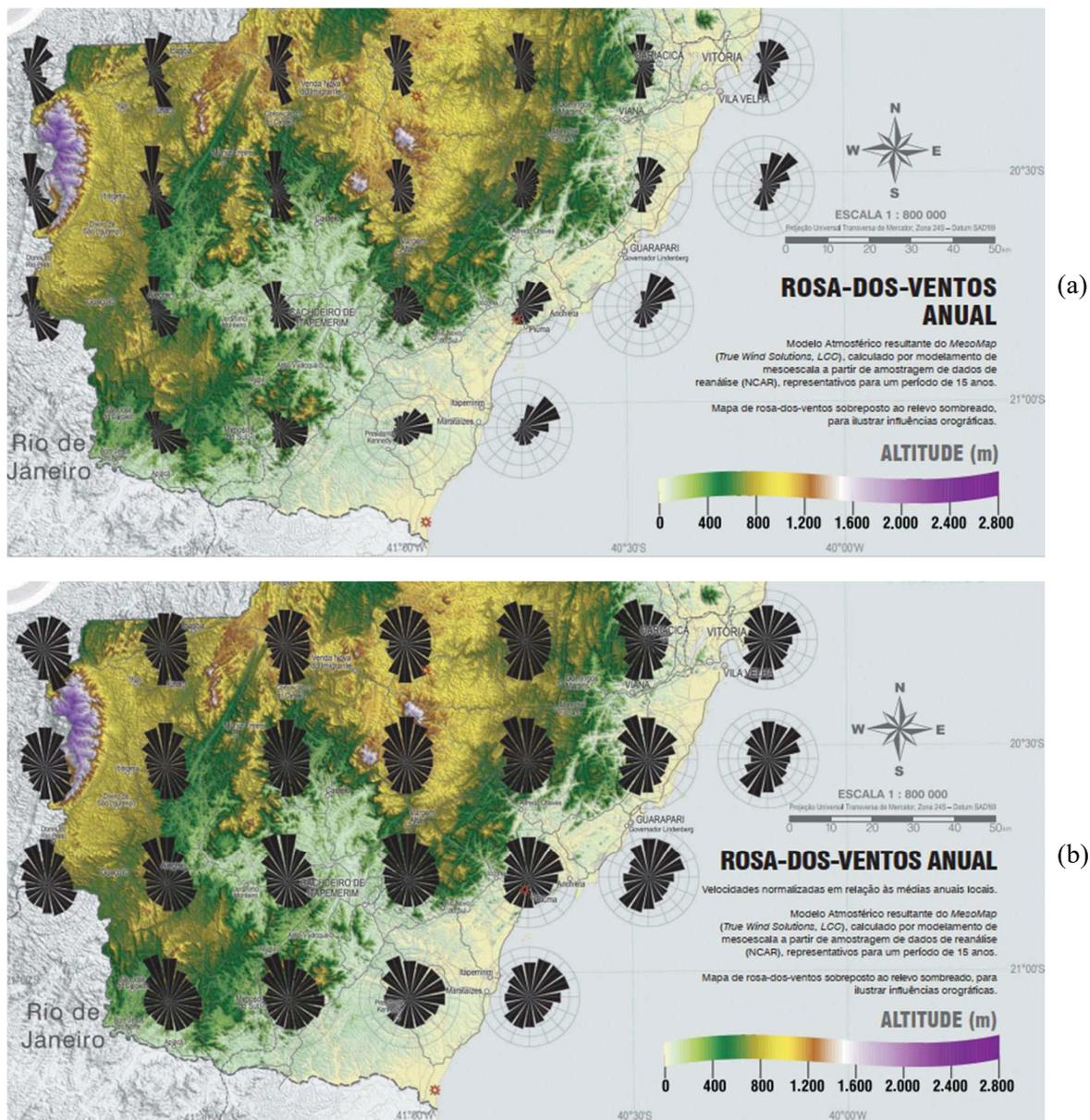


Figura 32: Ventos predominantes região Sul do Espírito Santo.

Fonte: AMARANTE, 2009.

Para as cidades de Alegre e de Castelo a cadeia de montanhas limita e define a ação dos ventos predominantes na região (Figura 33) incorrendo na dispersão da predominância e redução da velocidade.

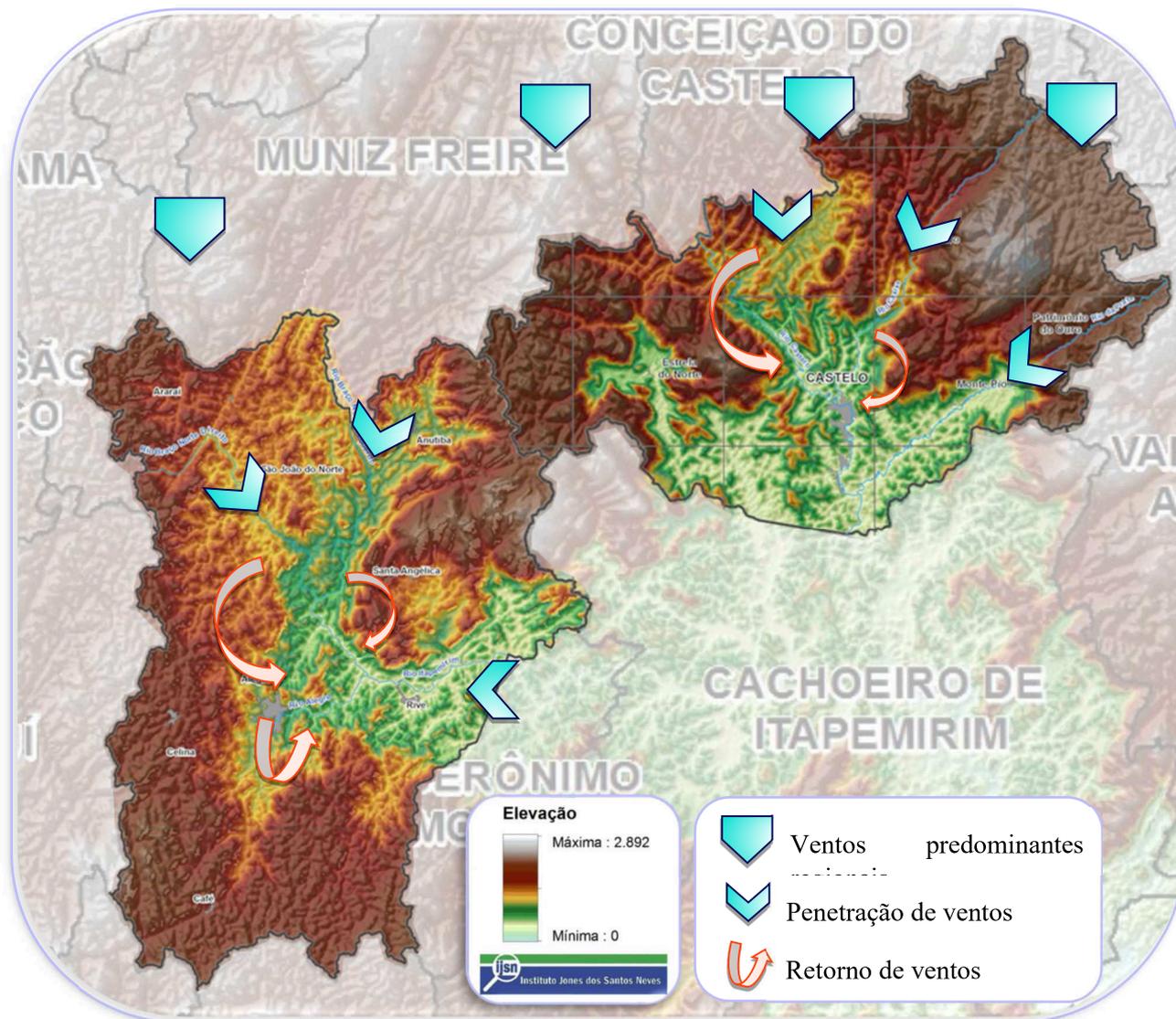
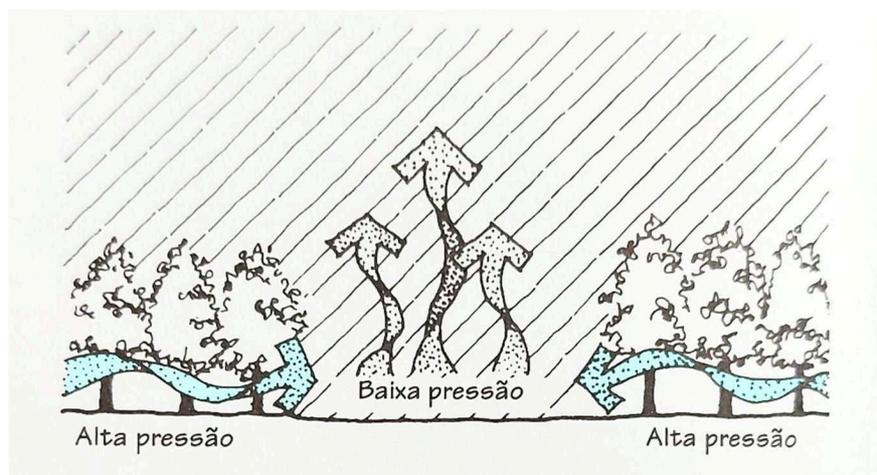


Figura 33: Relação geomorfológica entre Alegre e Castelo (ES) e ventos.

Fonte: Autora, adaptado de ESPÍRITO SANTO (ESTADO), (2022).

Importante, neste contexto, fazer memória dos princípios do movimento do ar: 1) o contato entre a superfície e as massas de ar em movimento reduz a velocidade do vento devido à fricção entre os ambos, e quanto maior a rugosidade da superfície maior a área de contato entre superfície e massa de ar, o que ocasiona aumento da fricção. 2) A massa de ar tende a manter o movimento inicial quando em presença de obstáculo devido à inércia. 3) As massas de ar fluem de regiões de alta pressão para regiões de baixa pressão (BROWN; DEKAY, 2004).

Desta forma o ar mais aquecido, com menor pressão, é a massa que cede espaço para que o ar menos aquecido ocupe o espaço, gerando a movimentação destas massas de ar, ocasionando o surgimento dos ventos (Figura 34).



➡ Ventos originados em região de alta pressão.

Figura 34: Fluxo de ventos de zonas de alta pressão para zonas de baixa pressão.

Fonte: BROWN; DEKAY, 2004.

A frequência e predominância difusas de vento na região encontram-se em consonância com os princípios de movimento de massas de ar, haja vista, a existência da situação de relevo favorece ocorrência de variação de direção de ventos ao longo de um ciclo diário (Figura 35).

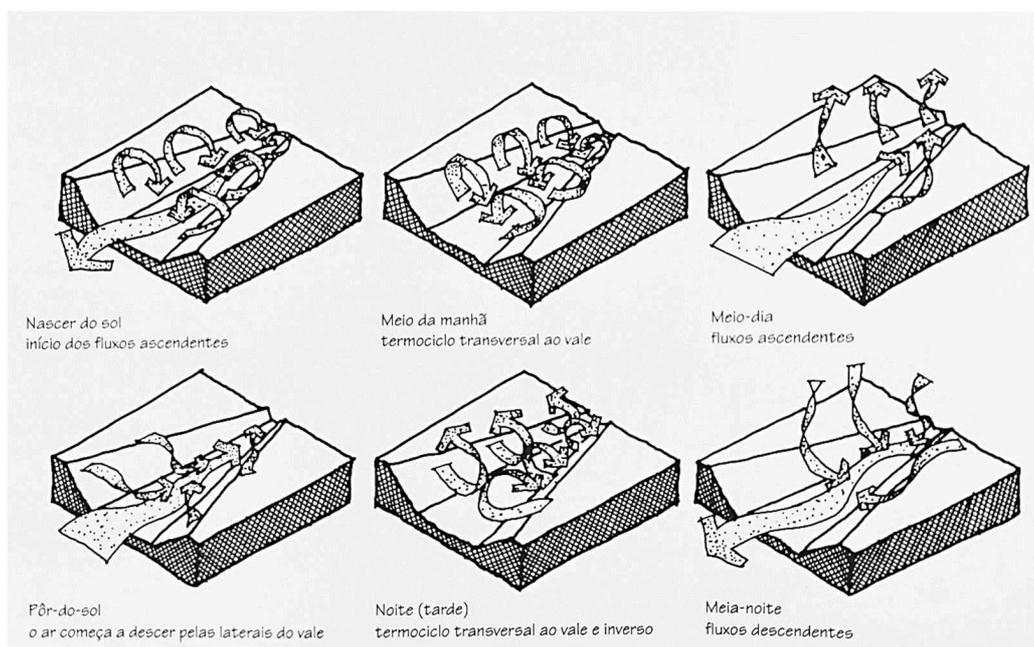


Figura 35: Ventilação em vale ao longo do ciclo diário.

Fonte: BROWN; DEKAY, 2004.

A movimentação do ar na região ocorre a partir dos ventos predominantes e sofre grande influência do relevo local tanto na cidade de Alegre, quanto na cidade de Castelo. Considerando as informações da estação WMO *Station* 868280, é possível indicar as características e direções dos fluxos de ar nas proximidades da superfície para as cidades como apresentado no Quadro 5.

Quadro 5: Considerações sobre fluxos atmosféricos sobre relevo em Alegre e Castelo (ES).

	Nascer do Sol	Meio da Manhã	Meio Dia	Pôr do Sol	Noite	Meia Noite
Alegre¹⁰	NO, N, SO, S Início dos fluxos ascendentes no vale	L, NE, N Termociclo transversal de vales, fluxo do leito do rio para áreas aquecidas do solo	Fluxo ascendente, ocorrência de térmicas ¹¹	L Com fluxo ascendente.	NO, N, SO, S Termociclo transversal inversos de vales, fluxo do solo para o leito dos rios.	Fluxos descendentes de escoamento lento
Castelo	NO, N, NE, Início dos fluxos ascendentes no vale	NO, N, NE, Termociclo transversal de vales, fluxo do leito do rio para áreas aquecidas do solo	Fluxo ascendente, ocorrência de térmicas	NE/NO Com fluxo ascendente.	NE, NO, SE Termociclo transversal inversos de vales, fluxo do solo para o leito dos rios.	Fluxos descendentes de escoamento lento.

Fonte: Autora a partir SOL-AR (LabEEE), BRASIL (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA), 2022; BROWN; DEKAY, 2004.

Com os dados estatísticos da estação meteorológica (Tabela 1)) é possível compreender que o relevo impõe à região barreira de grande capacidade de estagnação da movimentação do ar, especialmente durante o período da madrugada, quando a velocidade de ventos se aproxima da calmaria (vermelho). No fim da tarde observa-se a ocorrência de aumento da velocidade (azul) e com o pôr do sol retorna-se à condição de proximidade da calmaria a partir das 19 h.

¹⁰ Dados de análise comparados com dados de ProjetEEE, in: <http://projeteee.mma.gov.br/dados-climaticos/?cidade=ES+-+Alegre&id_cidade=bra_es_alegre.868280_inmet>. Acesso em 07/06/2021.

¹¹ Térmica: Ou vento térmico, ou termal, é um conceito físico para o cisalhamento vertical do vento geostrófico (vento horizontal não acelerado, que sopra em de direção retilínea), cuja equação pode ser expressa como uma relação linear entre o cisalhamento vertical do vento geostrófico e o gradiente de temperatura horizontal (WALLACE; HOBBS, 2006).

Tabela 1: Mapa de cor de velocidades de vento média horária para o mês em m/s de Alegre-ES.

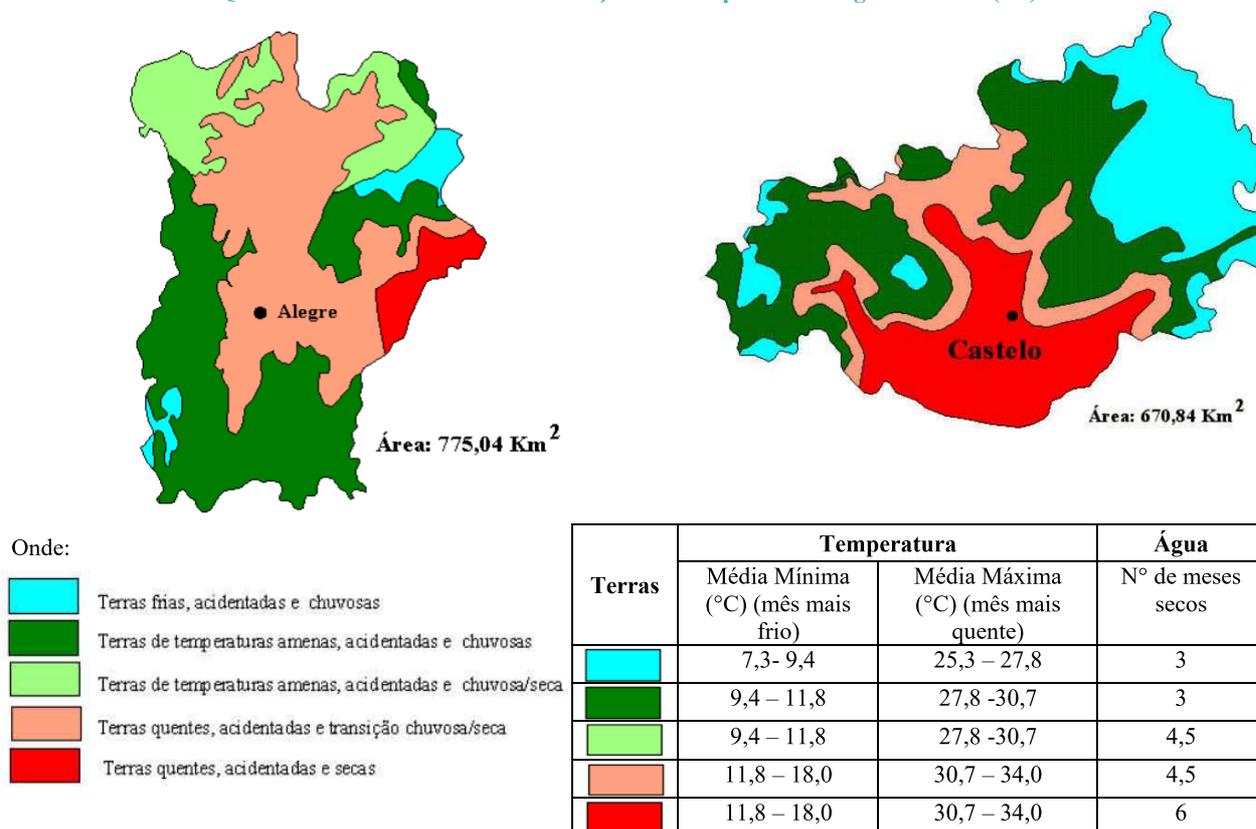
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0:01- 1:00	0.8	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9
1:01- 2:00	0.7	0.6	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.9	0.9
2:01- 3:00	0.8	0.6	0.6	0.6	0.9	0.9	0.6	0.7	0.8	0.7	1.0	0.9
3:01- 4:00	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.9	0.7	0.7	0.7	0.7	0.9	0.7
4:01- 5:00	0.9	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.6	0.9	0.8	0.9	0.8
5:01- 6:00	0.8	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.9	0.8
6:01- 7:00	0.7	0.8	0.9	0.7	0.7	0.7	0.8	0.6	0.8	0.8	1.2	0.9
7:01- 8:00	1.1	1.2	1.5	1.2	1.0	1.2	0.9	1.1	1.6	1.1	2.0	1.2
8:01- 9:00	1.5	1.5	2.0	1.5	1.2	1.3	1.7	1.6	2.3	1.7	2.3	1.8
9:01-10:00	1.9	1.9	2.0	1.9	1.5	1.7	2.2	2.2	2.3	2.0	2.5	2.3
10:01-11:00	2.1	2.2	2.2	2.1	2.0	1.9	2.4	2.5	2.7	2.2	2.6	2.6
11:01-12:00	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.5	2.9	2.8	2.7	2.2	2.7	2.3
12:01-13:00	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.5	2.8	2.5	2.8	2.3	2.5	2.7
13:01-14:00	2.1	2.2	2.5	2.4	2.4	2.6	2.9	2.7	2.6	2.2	2.7	2.6
14:01-15:00	1.8	2.1	2.4	2.6	2.2	2.6	2.7	3.0	2.7	2.4	2.3	2.4
15:01-16:00	1.9	2.0	2.9	2.5	2.1	2.3	2.7	3.0	3.5	2.3	2.4	2.4
16:01-17:00	1.6	2.0	2.4	2.5	1.5	1.5	2.3	3.2	3.1	2.2	2.3	2.4
17:01-18:00	1.3	1.7	2.0	1.7	1.2	1.3	1.6	2.5	3.0	1.9	1.8	2.1
18:01-19:00	1.2	1.6	1.4	1.5	1.1	1.3	1.4	1.9	2.2	1.7	1.2	1.5
19:01-20:00	1.0	1.1	1.1	1.1	0.9	1.1	1.2	1.4	1.5	1.3	1.1	1.2
20:01-21:00	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.0	1.2
21:01-22:00	0.8	0.7	0.7	0.9	0.8	0.8	1.0	1.0	1.1	1.1	0.9	1.1
22:01-23:00	0.9	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
23:01-24:00	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.7	1.1
Max Hour	13	13	16	15	13	15	12	17	16	15	14	13
Min Hour	2	4	1	2	4	24	3	5	2	3	24	4

Fonte: Autora a partir do arquivo de estatística climáticas da estação meteorológica WMO Station 868280.

Todos os horários de velocidades médias máximas ocorrem no período vespertino, e todos os horários de velocidades médias mínimas ocorrem entre as 24 h e às 5 h da manhã.

Quanto às temperaturas, as duas cidades (Alegre e Castelo) possuem características semelhantes. Dados do INCAPER indicaram que a cidade de Alegre apresenta condição ligeiramente melhor em temperatura e condição de chuva que a cidade de Castelo, a qual apresenta maior porção de terras frias acidentadas e chuvosas, na região do Forno Grande e do Alto Chapéu, regiões de altitude, longe do centro urbano. Enquanto a sede do município de Alegre se encontra na região de transição das terras quentes, a cidade de Castelo se localiza na região de terras quentes, acidentadas e secas, a qual representa maior porção do território em Castelo (Quadro 6).

Quadro 6: Zonas Naturais e Informações de Temperatura Alegre e Castelo (ES).



Fonte: Autora adaptado de ESPÍRITO SANTO (ESTADO), 1999.

Pelo arquivo de estatísticas climáticas é possível observar a severidade das temperaturas nas estações da primavera e do verão por meio das médias horárias das TBS para os meses (Tabela 2), e o que se pode observar é a prevalência das temperaturas máximas entre às 13 h e às 15 h, e das mínimas entre 5h e 6h. Além disso, destacam-se os meses de março e novembro com maiores temperaturas (vermelho) acompanhados pelos meses de fevereiro e dezembro. Enquanto o mês de janeiro apresenta altas temperaturas pulverizadas ao longo das 8h01 às 17h, os meses de abril, setembro e outubro, encerram e iniciam o período mais quente do ano, concentrando as maiores temperaturas na região próxima das 12h, deixando perceptível um pequeno amortecimento nas temperaturas ao longo do dia.

Tabela 2: Mapa de cor de velocidades de vento média horária para o mês em m/s de Alegre-ES.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0:01- 1:00	23.1	22.3	22.2	22.0	18.1	17.0	17.3	17.5	18.7	21.6	22.8	23.0
1:01- 2:00	22.7	22.0	21.9	21.7	18.0	16.6	17.2	17.1	18.4	21.3	22.6	22.9
2:01- 3:00	22.6	21.7	21.7	21.4	17.6	16.3	16.9	16.7	18.0	21.1	22.5	22.7
3:01- 4:00	22.6	21.5	21.7	21.1	17.3	16.2	16.7	16.5	17.6	21.0	22.2	22.4
4:01- 5:00	22.6	21.4	21.4	21.1	17.2	15.9	16.4	16.3	17.5	20.8	22.0	22.3
5:01- 6:00	22.8	21.3	21.3	21.0	17.0	15.6	16.1	16.1	17.5	21.0	23.4	23.0
6:01- 7:00	24.2	23.3	23.5	21.8	17.6	15.7	16.2	16.8	19.3	22.4	25.6	24.8
7:01- 8:00	25.8	25.3	26.3	23.4	19.3	18.2	18.4	19.2	21.5	23.9	27.4	26.4
8:01- 9:00	27.1	27.3	28.1	25.4	21.4	21.0	21.1	22.1	23.5	25.3	28.7	28.1
9:01-10:00	28.1	28.6	29.9	26.9	23.6	23.8	23.5	24.3	25.3	26.4	30.1	29.1
10:01-11:00	28.9	29.3	31.3	28.3	25.3	25.8	25.1	26.0	26.8	27.3	31.0	29.9
11:01-12:00	29.4	30.0	32.4	29.4	26.2	27.2	26.4	27.0	28.0	27.8	31.7	30.5
12:01-13:00	29.6	30.6	32.8	30.0	26.9	28.3	27.2	28.0	28.7	28.2	32.3	30.9
13:01-14:00	29.4	30.4	33.5	30.2	27.2	28.6	27.4	28.5	29.4	28.3	32.2	30.9
14:01-15:00	28.7	29.7	33.2	30.0	27.1	28.5	27.7	28.6	29.4	28.1	32.1	30.5
15:01-16:00	28.2	29.1	32.2	29.0	26.5	27.7	27.1	28.2	28.6	27.3	31.4	29.4
16:01-17:00	27.0	28.2	30.7	27.3	24.2	25.0	25.4	26.3	26.9	26.3	29.8	28.1
17:01-18:00	25.8	26.6	28.8	25.9	22.5	22.5	23.2	24.5	25.2	25.0	28.0	26.9
18:01-19:00	24.9	25.4	26.9	25.0	21.3	21.4	21.9	23.2	24.0	24.1	26.5	25.7
19:01-20:00	24.2	24.5	25.9	24.1	20.4	20.2	20.3	21.7	22.8	23.6	25.5	25.0
20:01-21:00	24.0	23.7	24.8	23.4	19.6	19.2	19.4	20.4	21.6	23.1	24.6	24.3
21:01-22:00	23.6	23.0	23.9	22.9	19.1	18.5	18.6	19.5	20.7	22.7	23.9	24.0
22:01-23:00	23.4	22.7	23.2	22.5	18.6	17.8	18.1	18.8	20.2	22.3	23.5	23.7
23:01-24:00	23.4	22.5	22.6	22.2	18.2	17.4	17.5	18.2	19.4	21.9	23.1	23.2
Max Hour	13	13	14	14	14	14	15	15	14	14	13	14
Min Hour	5	6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5

Fonte: Autora a partir do arquivo de estatística climáticas da estação meteorológica WMO Station 868280.

Estas especificidades encontradas nas duas cidades, a combinação resultante da junção das variáveis de clima e condição de relevo, singular dentro da ZB8 no ES e o fato da cidade de Alegre possuir estação meteorológica, justificam o interesse pela área de estudo.

Assim as análises realizadas nesta pesquisa foram desenvolvidas utilizando-se do arquivo EPW da cidade de Alegre, enquanto a etapa de levantamento de observação dos tipos de coberturas (Etapa 2) foi realizada na cidade de Castelo, domicílio da autora, a fim de garantir sua realização com segurança durante o período de isolamento social ocasionado pela Covid-19.

3.2. Etapa 1 – Caracterização da área de estudo

A morfologia da região que compreende as cidades de Alegre e de Castelo apresenta todas as características do domínio morfológico dos Mares de Morros Florestados definido por Aziz Ab'Sáber (AB' SABER, 2012), as quais ocasionam, além da redução da velocidade dos ventos por alta rugosidade do relevo, o não estabelecimento de predominância de ventos por ocasião dos obstáculos, dos retornos em anteparos, influência de ventos advindos da região litorânea, e surgimento de térmicas locais no período mais quente do dia ao longo do ano, como apresentado por meio do Quadro 5 e confirmado pelas informações de arquivos climáticos representados nas Figura 36 e Gráfico 4.

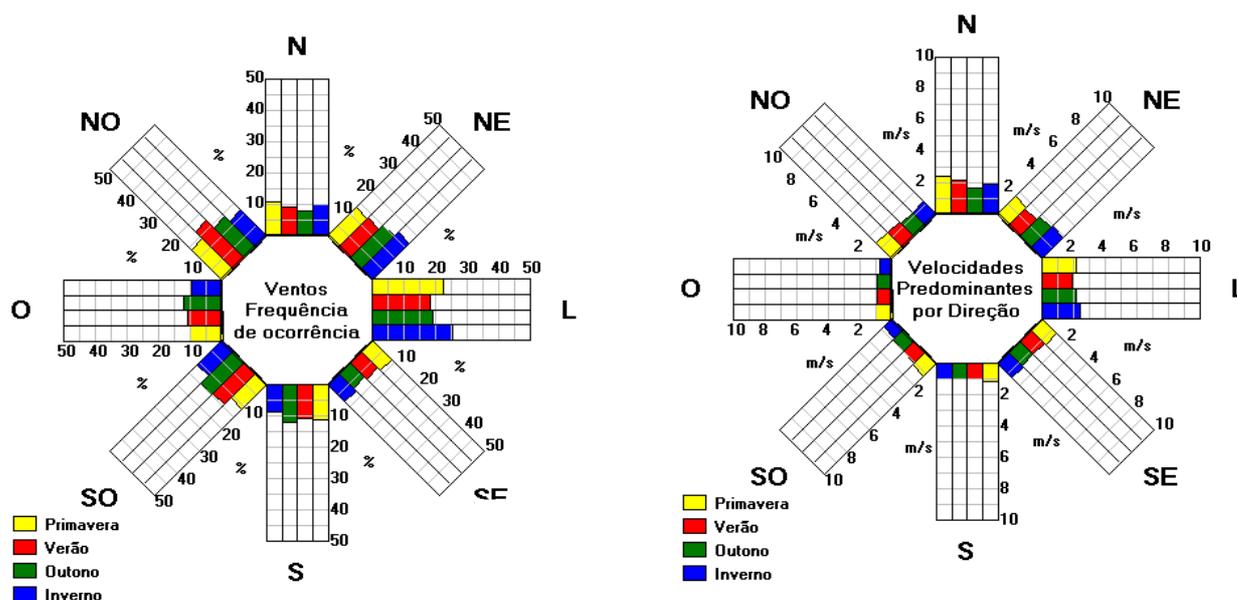


Figura 36: Freqüência e Velocidades Predominantes de ventos na cidade de Alegre (ES).

Fonte: Autora a partir do arquivo climático com o programa SOL-AR (LabEEE).

3.2.1. Dados de clima - Alegre

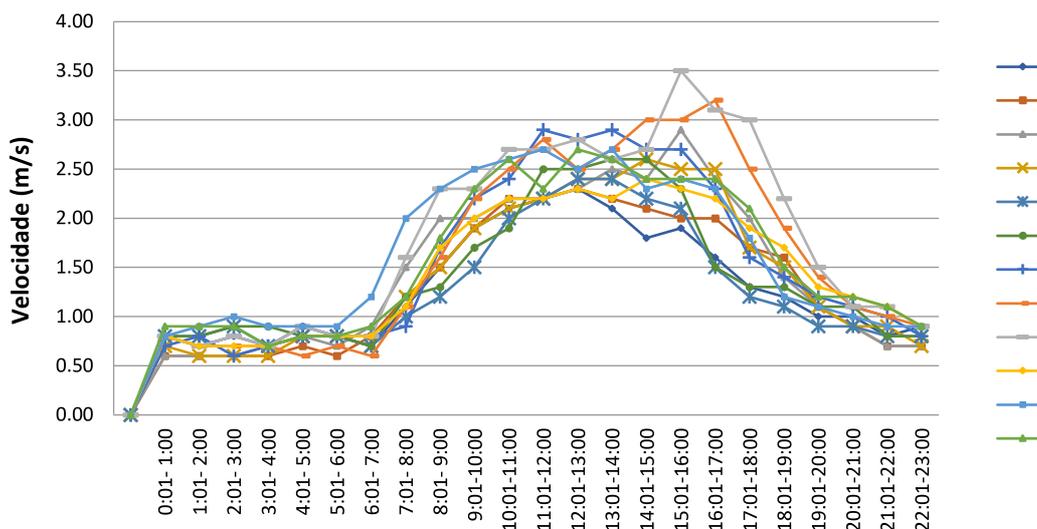
Os dados climáticos horários de referência apontam 1.216 h/ano com temperaturas de bulbo seco acima de 28,9°C; e 3.315 h/ano com temperaturas acima de 23,5°C, com médias de umidade relativa abaixo de 70% apenas em 4 meses do ano.

A média de velocidade de ventos mais alta ocorre entre 15 e 16 h, horários de maiores temperaturas, alcançando 3,5 m/s. Enquanto nos horários da madrugada não ultrapassa 1 m/s, indicado pelo Quadro 6 do capítulo de referencial teórico, ou seja, nos horários noturnos ocorre fluxo descendentes de escoamento lento, com velocidades muito próximas à velocidade de calmaria.

O Gráfico 4 apresenta o registro das velocidades de vento da estação meteorológica, obtidos a partir do arquivo BRA_ES_Alegre.868280_INMET.stat. Os dados foram registrados a partir das medições do ano de 2007 para os meses de janeiro a setembro e de 2009 para os meses de outubro a dezembro.

Sendo os ventos majoritariamente de direção Leste, evidenciando que a morfologia do território se impõe como barreira natural para a ventilação natural Nordeste predominante no ES (N/NE), e permitindo inferir a ocorrência de térmicas nos períodos mais quentes dos dias.

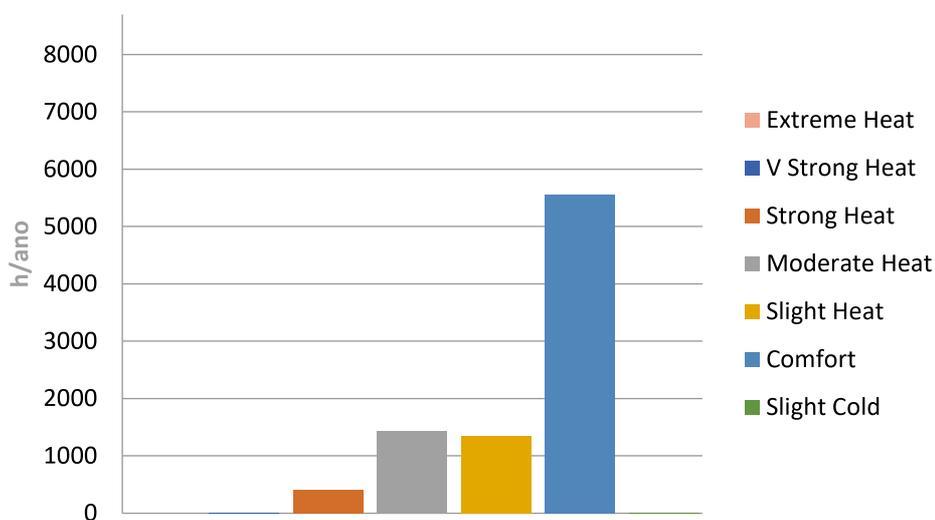
Gráfico 4: Estatística mensais de velocidades horárias de ventos.



Fonte: Autora a partir do arquivo de estatísticas climáticas WMO Station 868280.

Reforçando as condições de austeridade do período de verão local, os dados registrados em 2007 e 2009 indicaram mais de 5000 horas de conforto das quais 4083 ocorrem no período entre abril e outubro. Na sequência somam-se 1344 horas de calor leve, 1440 horas de calor moderado e nos períodos de novembro a março podem ser contadas 348 horas de forte calor (Gráfico 5).

Gráfico 5: Estatística anual de estresse térmico por UTCI para o período 2001-2010.



Fonte: Autora a partir do arquivo de estatísticas climáticas WMO Station 868280.

A combinação entre as variáveis climáticas citadas e alta radiação solar horizontal que alcança a superfície territorial durante o ano expõem a necessidade de proteção solar para edificações desta região (Figura 37).

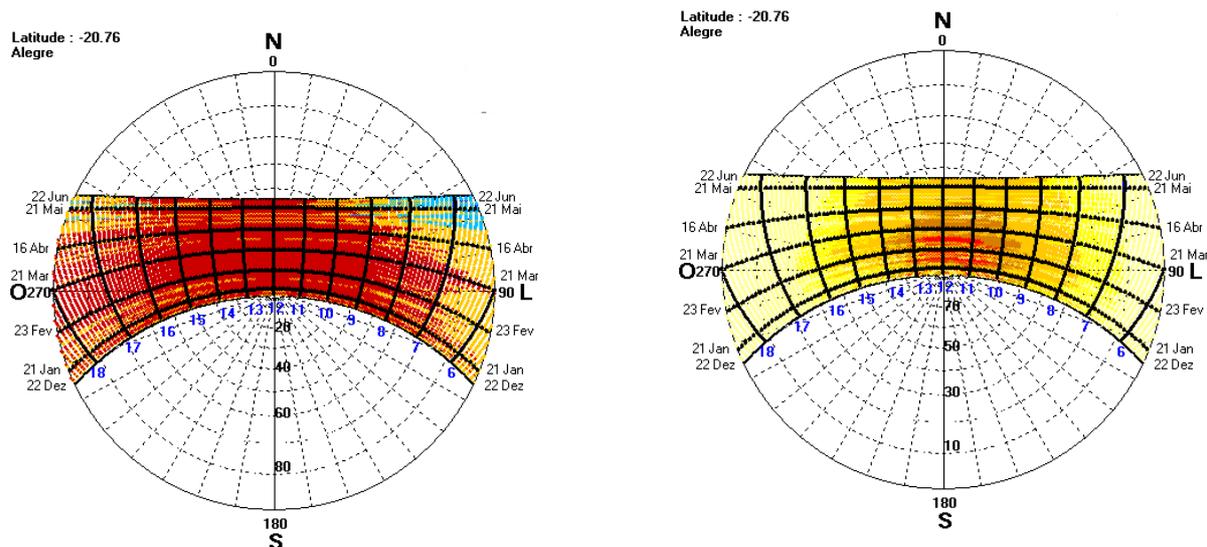
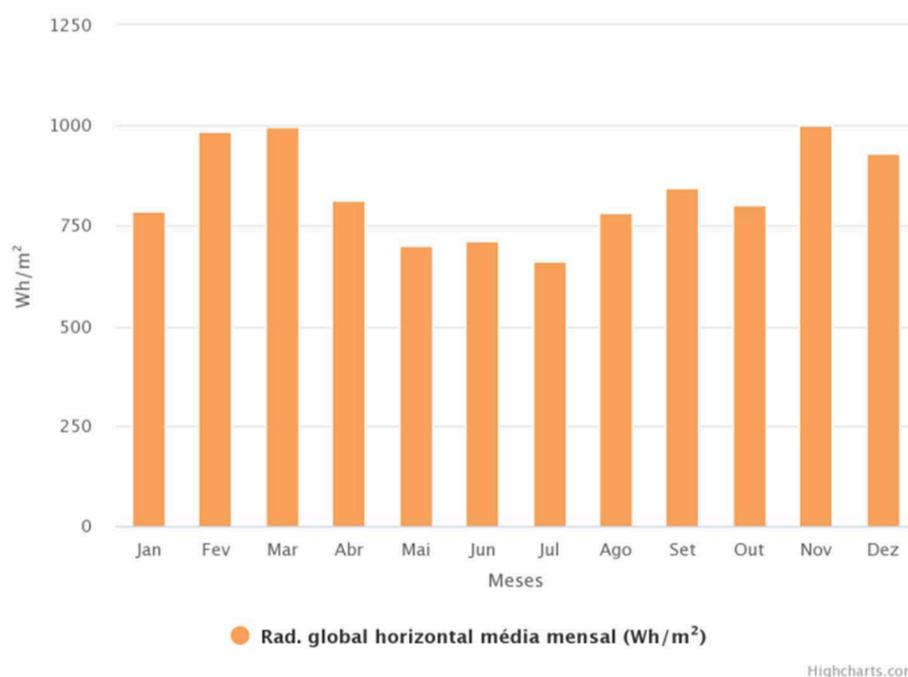


Figura 37: Diagrama solar Alegre (ES) com temperaturas e radiação global média.

Fonte: Autora a partir do arquivo climático com o programa SOL-AR (LabEEE).

O Gráfico 6 apresenta o fluxo de energia por meio da irradiação global horizontal que alcança a superfície do território com valores médios próximos a 1.000 W/m² nos meses de fevereiro, março e novembro.

Gráfico 6: Gráfico Global Horizontal Média Mensal.



Fonte: BRASIL (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA), 2022.

3.2.2. Dados de relevo e recorte para observação - Castelo

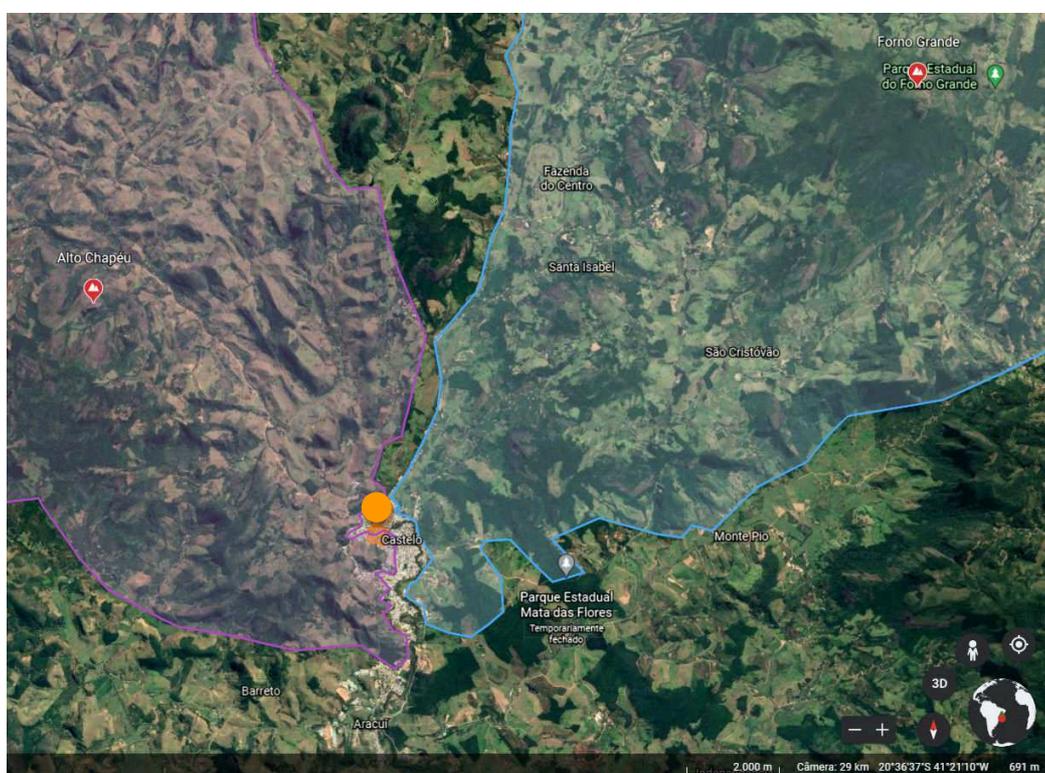
Castelo iniciou-se fora do que hoje é a sede do município, na região da Fazenda do Centro. Entretanto a cidade de Castelo surgiu do povoado que se aglomerou próximo à estação Leopoldina,

construída na planície anterior ao Rio Castelo. Sem perspectiva de subir a serra para chegar à região da Fazenda do Centro, o povoado e o comércio se deslocaram para a região mais baixa do município (CASAGRANDE; BARBIEIRO, 2012; VIEIRA, 2004).

O povoado se desenvolveu pela planície do rio à medida que a cidade foi ocupando áreas de fazenda, dentre elas a área que ficou conhecida como Vila Isabel, por onde se fazia a ligação entre Castelo e Conceição de Castelo, município do qual Castelo se emancipou, e Muniz Freire.

A região de Vila Isabel guarda importantes registros da história e da evolução da cidade, e tem significativa área territorial, representando aproximadamente um sétimo do território da cidade, se desconsideradas as áreas à margem Leste do Rio Castelo, e os bairros mais recentes que contornam o maciço central e avançam ao Sul em direção a Cachoeiro de Itapemirim.

A região de Vila Isabel é caracterizada pela região plana próxima ao Rio Castelo (destaques em laranja) ou de terreno pouco íngreme, até as vizinhanças da escola Madalena Pisa, onde se inicia a região do Morro do Caparaó, a qual se une à região do maciço central do município, pertencentes à cadeia de montanhas do Alto Chapéu. Esse ponto de intercessão ficou conhecido como Grota e apelidou a Rua Moura como Rua da Grota (Figura 38 a Figura 40).



Polígonos: Bairro Vila Isabel¹²

Cadeia do Alto Chapéu¹³

Cadeia do Forno Grande¹⁴

Figura 38: Cadeias de montanhas de Castelo.

Fonte: Autora adaptado de Google Earth, 2021.

¹² O município não possui legislação sobre limite de bairros, a consideração dos limites de bairro é dada pelo reconhecimento da população local.

¹³ A demarcação das regiões das cadeias de montanhas do Alto Chapéu e do Forno Grande não é oficial. É dado pela presença do Rio Castelo, que vem do Vale do Caxixe (Forno Grande) e é barrado pela cadeia do Alto Chapéu na margem oposta. A demarcação é resultado do conhecimento do território.

¹⁴ Para Cadeia do Forno Grande idem 11.

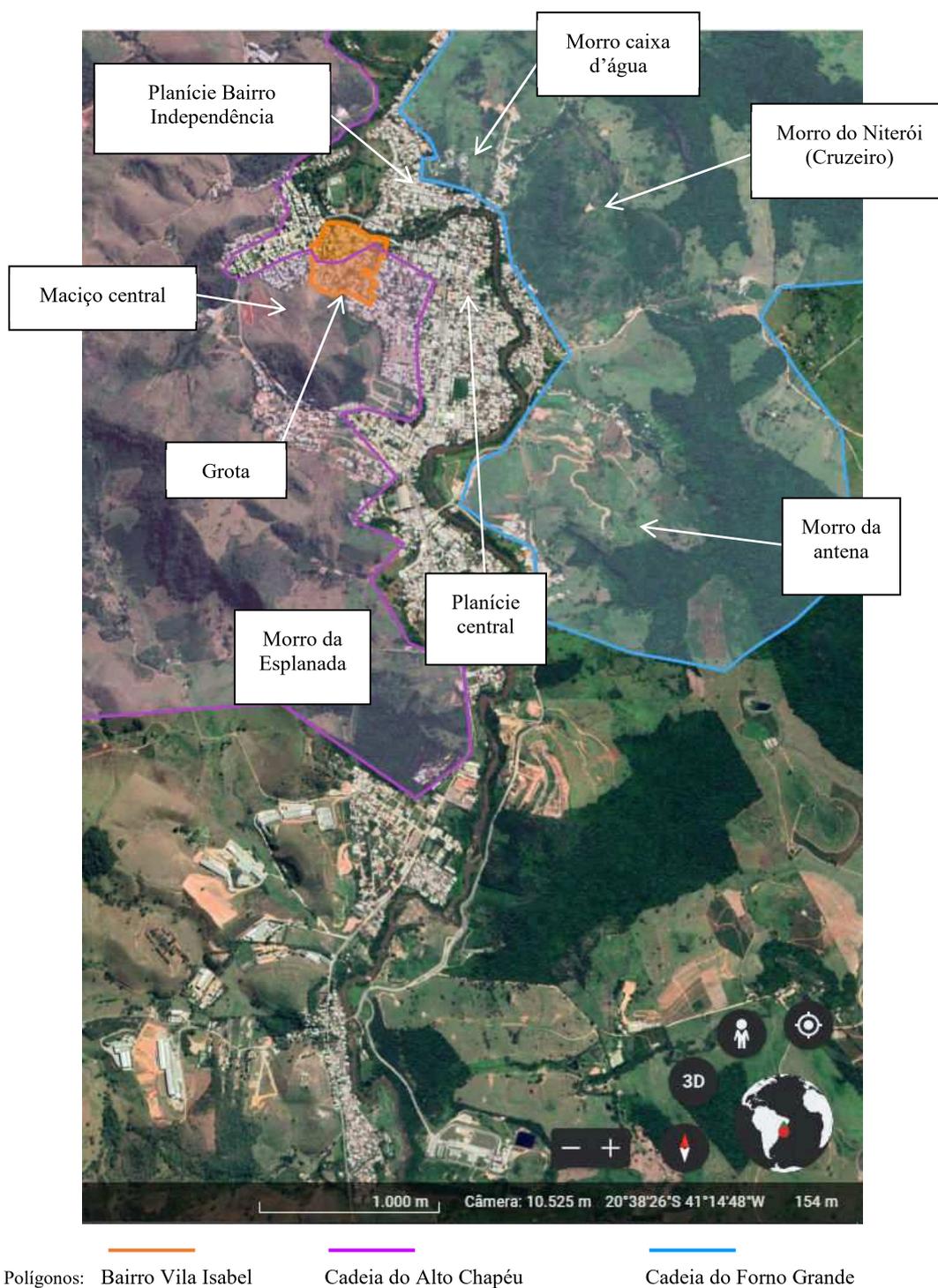
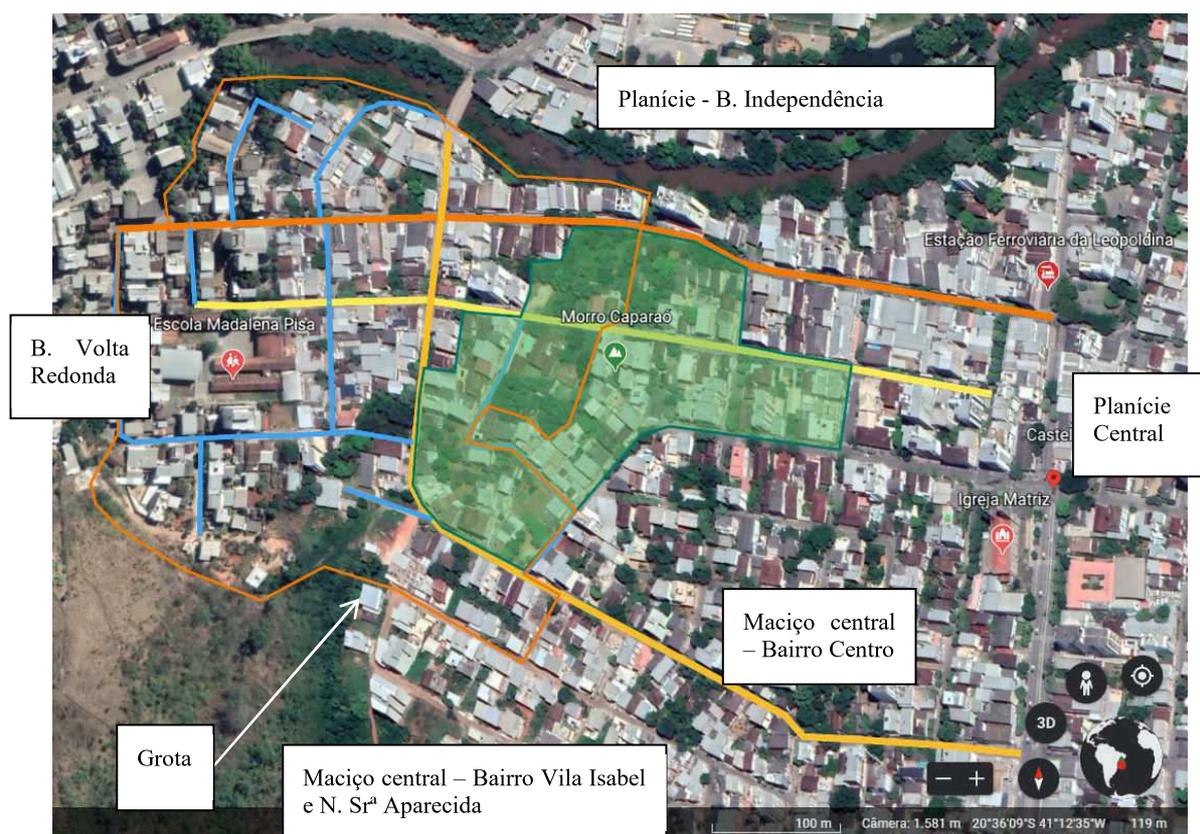


Figura 39: Situação Bairro Vila Isabel.

Fonte: Autora adaptado de Google Earth, 2021.



Polígonos:

Bairro Vila Isabel

Morro Caparaó

Legenda:

Via Arterial

Via Principal

Via Coletora

Bairro

Figura 40: Aproximação do recorte amostral.

Fonte: Autora com Google Earth 2021.

A construção e inauguração do “Gymnasio” Municipal – Colégio João Bley (atual escola Madalena Pisa) – em 1938, consolidou a importância do bairro no desenvolvimento do município com ocupação residencial e estrutura bem organizada. As unidades habitacionais inicialmente implantadas seguiam os padrões das construções europeias de imigração, sem influência, ou interferência de programas habitacionais nacionais ou regionais.

Considerando a importância do Bairro de Vila Isabel e os desafios da pesquisa científica durante o período de isolamento da Covid-19, o bairro foi escolhido como recorte para a realização da Etapa 2 – Levantamento de Observação, que ocorreu entre os dias 28/05 e 07/06 de 2021.

3.3. Etapa 2 – Levantamento de observação

Nesta etapa foram observadas a tipologia e a frequência da ocorrência dos sistemas de coberturas no Bairro de Vila Isabel. Para isso foi produzido um formulário para o Levantamento de Rua, com mapa da base Google tendo a representação do bairro, no qual foram anotadas o logradouro, as tipologias, e o lado da rua onde se localizavam as edificações. A observação foi realizada por meio de caminhadas pelas ruas do bairro, e os formulários estão contidos no Anexo 2 deste volume.

Os logradouros que serviram de pontos de observação foram: Av. Ministro Ararípe (1); R. Maria Ortiz (2); R. Vieira da Cunha (3); Pç. Mário Lima (4); R. Moura (5); R. Cel. João Freitas (6); R. Carlos Silva (7); R. Nice Rangel Soares (8); R. Domingos Martins (9); Travessa Pires Martins (10);

R. Antônio Rangel (11). O recorte amostral compreende, portanto, área representativa do bairro, e das configurações de ruas que podem nele ser encontradas (Figura 41).



Figura 41: Recorte amostral.

Fonte: Autora adaptado de Google Earth e Google MyMaps, 2021.

Para registro das informações obtidas visualmente foram realizadas capturas de imagens por meio de fotografias, as quais estão contidas ao longo do volume.

Devido à grande disseminação dos terraços capixabas em edificações de diferentes tipos e usos, e as peculiaridades do mercado da construção civil na cidade, foram definidos critérios para selecionar as unidades habitacionais (UH) que mantivessem características de posse e manutenção de uma única família, independente da situação de propriedade registrada. Assim, para que fossem consideradas como Unidade Habitacional Única UH de interesse para o estudo as edificações deveriam possuir as seguintes características:

- 1) Edificações individualizadas e exclusivas em lote;
- 2) Mais de uma edificação, **não conjugada**, em mesmo lote, porém completamente independentes em acesso e em liberdade de intervenção por parte dos proprietários, contendo sistema de cobertura caracterizado por contato direto com o ambiente externo; e
- 3) Mais de uma edificação, **conjugadas**, em mesmo lote, completamente independentes em acesso e em liberdade de intervenção por parte dos proprietários, contendo sistema de cobertura caracterizado por contato direto com o ambiente externo.

A configuração de ocupação dos lotes ocorre de diversas formas, e foram amplamente consideradas conforme o atendimento aos critérios estabelecidos. Algumas das variações de ocupação foram ilustradas pelas Figura 42 a Figura 45.

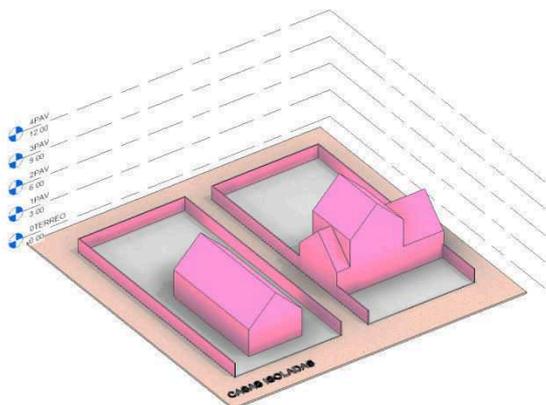


Figura 42: Exemplos de casas isoladas em lote.
Fonte: Autora.

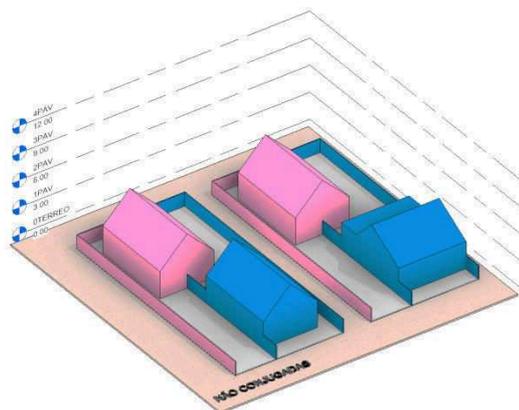


Figura 43: Exemplos de casas não conjugadas em mesmo lote.
Fonte: Autora.

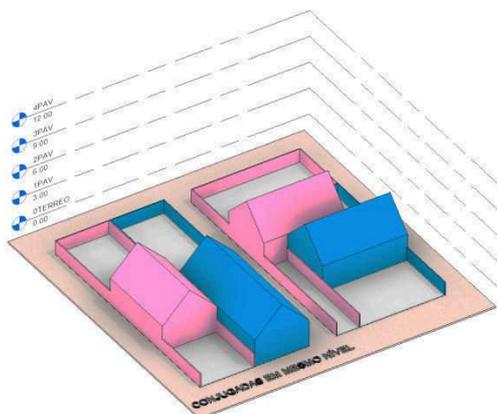


Figura 44: Exemplo de casas conjugadas em mesmo lote – mesmo nível.
Fonte: Autora.

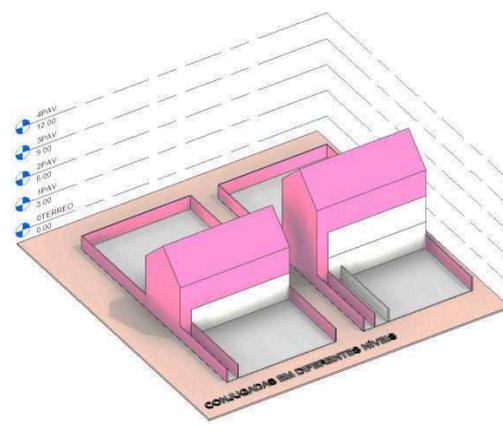


Figura 45: Exemplo de casas conjugadas em mesmo lote – diferentes níveis, 2021.
Fonte: Autora.

Onde: ● ● Tipologias de UH individualizadas que interessam ao estudo.
○ Tipologias de UH individualizadas que não interessam ao estudo.

Definido o critério de seleção das UH, o levantamento foi realizado por meio de dois procedimentos. O primeiro a observação dos tipos de cobertura, para o qual foram consideradas cinco possibilidades de coberturas (Figura 46 a Figura 50):

- UH com cobertura de telhas à vista. Com beirais em pelo menos duas das bordas da cobertura (1).
- UH com cobertura de telhas à vista e abertura de ventilação. Cobertura com beirais em pelo menos duas das bordas e orifícios para ventilação do ático (2).
- UH com platibandas. Cobertura com telhado não visível, ou parcialmente visível, sem beirais visíveis (3).
- UH com terraço capixaba. Cobertura com terraço e cobertura elevada, possibilitando uso do espaço entre cobertura e piso (4).
- UH com laje. Na qual a laje é a face superior da edificação, exposta ao Sol (5).

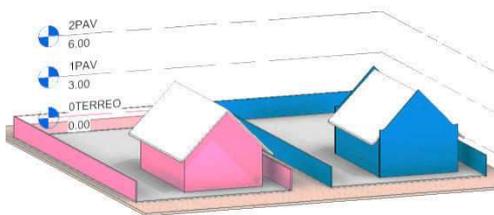


Figura 46: Tipo de cobertura 1 - UH com cobertura de telhas à vista.

Fonte: Autora.

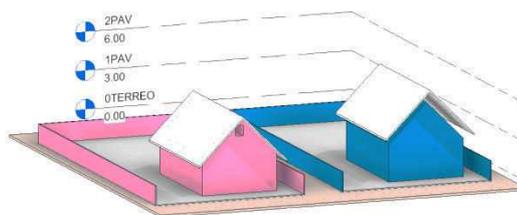


Figura 47: Tipo de cobertura 2 - UH com cobertura de telhas à vista e abertura de ventilação.

Fonte: Autora.

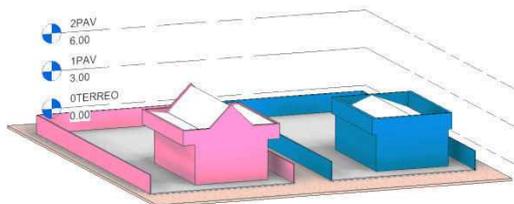


Figura 48: Tipo de cobertura 3 - UH com platibandas.

Fonte: Autora.

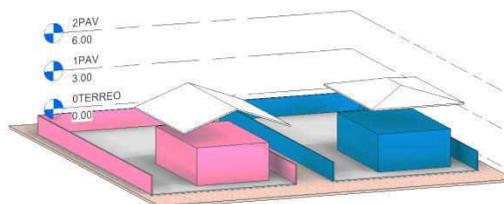


Figura 49: Tipo de cobertura 4 - UH com terraço capixaba.

Fonte: Autora.

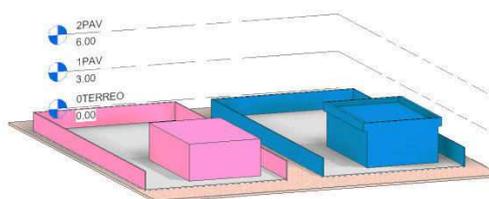
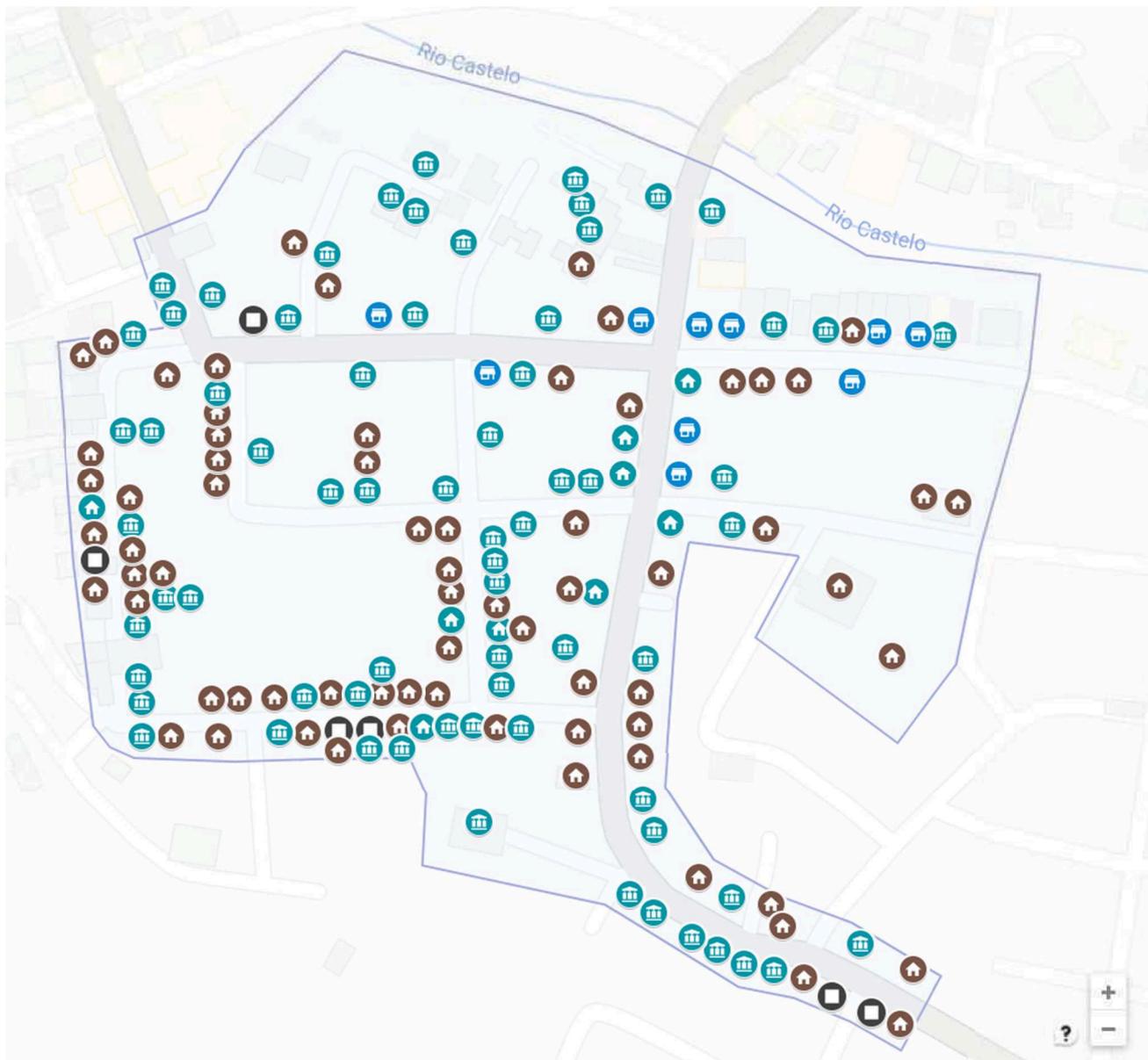


Figura 50: Tipo de cobertura 5 - UH com laje de concreto exposta.

Fonte: Autora.

- Onde: ● Tipologias de UH, algumas das possibilidades de coberturas.
○ Tipologias de coberturas com presença de telhamento.

O segundo consistiu na conferência a partir do Google Maps, para dirimir dúvidas quando não era possível obter todas as informações a partir da rua, como no caso das unidades habitacionais com platibanda e telhado, ou lajes em concreto armado. Assim, emergiu a catalogação dos sistemas de coberturas das UH das principais ruas do bairro de Vila Isabel. Em todas as condições, quando houve ocorrência de mais de um tipo de cobertura foi considerada a maior proporcionalidade. Em proporcionalidades aproximadas foi considerada a pior situação. No total foram anotadas 162 UH de interesse para o estudo das coberturas, conforme demonstrado na Figura 51 e na Tabela 3. A representação dos tipos observados está no



Onde:

-  UH com cobertura de telhas visíveis.
-  UH com coberturas de telhas visíveis, com ático ventilado por meio de aberturas.
-  UH com cobertura ventilada por meio de terraço capixaba.
-  UH com visibilidade de cobertura encoberta por platibandas
-  UH com laje de concreto

Figura 51: Levantamento dos tipos de coberturas.

Fonte: Autora a partir de Google My Maps.

Tabela 3: Tabulação de características construtivas das unidades habitacionais - Sistemas de Cobertura

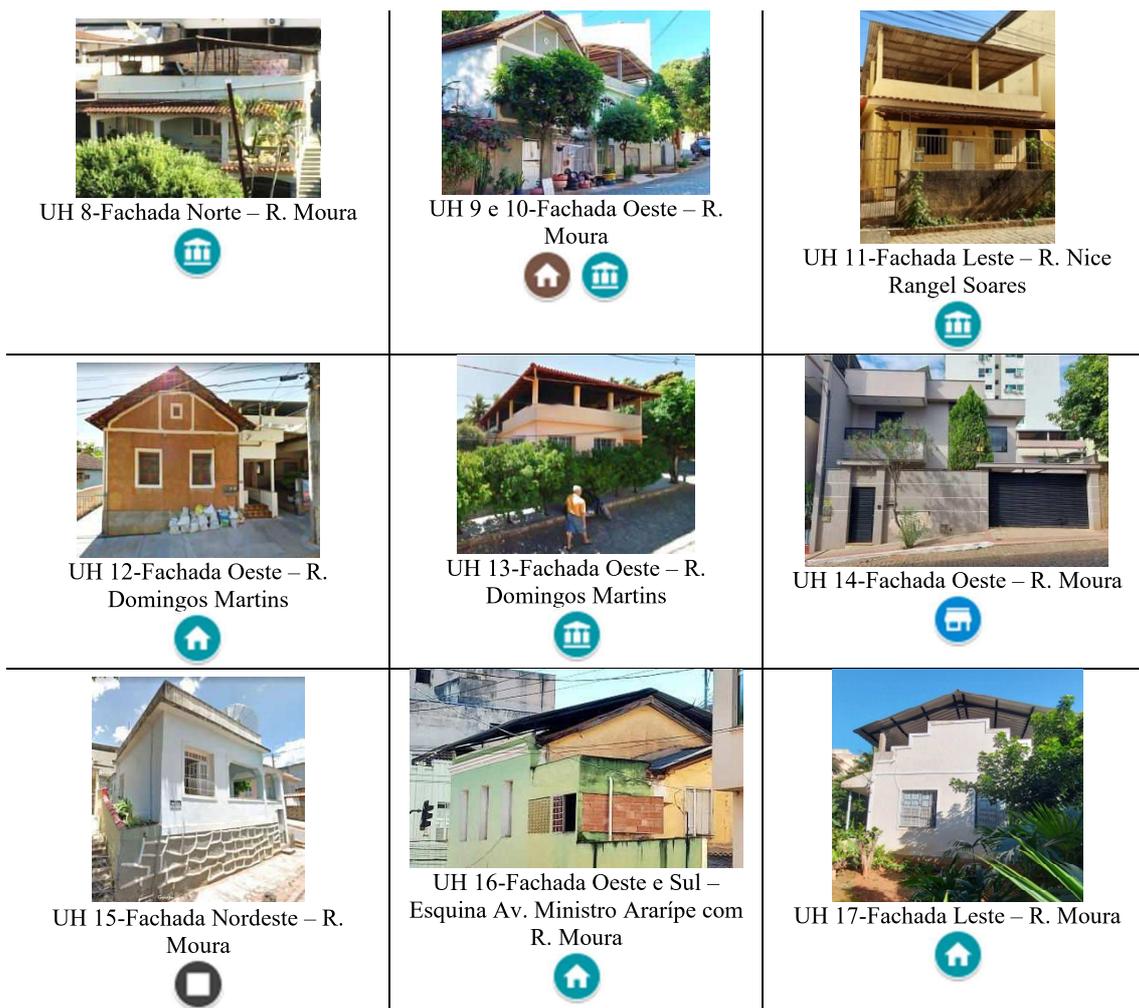
Logradouro	Tipo de Cobertura				
	 UH com cobertura de telhas visíveis	 UH com coberturas de telhas visíveis, com ático ventilado por meio de aberturas	 UH com cobertura ventilada por meio de terraço capixaba.	 UH com visibilidade de cobertura encoberta por platibandas	 UH com laje de concreto
Av. Ministro Ararípe	4	1	3	3	0
R. Maria Ortiz	3	0	6	2	1
R. Vieira da Cunha	12	0	8	0	0
Pç. Mário Lima	2	0	2	1	0
R. Moura	14	4	14	4	2
R. Cel. João Freitas	13	1	10	0	2
R. Carlos Silva	12	1	8	0	1
R. Nice Rangel Soares	2	0	4	0	0
R. Domingos Martins	4	2	6	0	0
Travessa Pires Martins	1	0	4	0	0
R. Antônio Rangel	0	0	3	0	0
Total:	69	9	68	10	6

Fonte: Autora.

Algumas das UH do recorte amostral estão apresentadas na Quadro 7.

Quadro 7: Unidades Habitacionais Unifamiliares (UH) existentes no recorte amostral, demonstrando com indicação dos tipos de cobertura considerado.

 UH 1-Esquina Leste/Sul – Pç. Mário Lima 	 UH 2-Fachada Oeste – Pç. Mário Lima 	 UH 3-Esquina Leste/Sul – R. Moura 
 UH 4-Fachada Norte – R. Maria Ortiz 	 UH 5 e 6-Fachada Norte – R. Cel. João Freitas  	 UH 7-Fachada Sul – R. Vieira da Cunha 



- Onde:
-  UH com cobertura de telhas visíveis.
 -  UH com coberturas de telhas visíveis, com ático ventilado por meio de aberturas.
 -  UH com cobertura ventilada por meio de terraço capixaba.
 -  UH com visibilidade de cobertura encoberta por platibandas
 -  UH com laje de concreto

Fonte: Autora e Google Maps.

Dada a extensão territorial da sede do município e do bairro de Vila Isabel (Figura 40, anterior), a não uniformidade de sistemas construtivos utilizados por profissionais e empresas de construção civil na cidade, pode-se, por analogia, apontar os dados encontrados como muito próximos da realidade da cidade de Castelo.

3.4. Etapa 3 – Modelagem

Para o estudo optou-se por trabalhar sobre modelos já experimentados e analisados anteriormente em outras pesquisas. Assim, como geometria da unidade habitacional foi utilizada adaptação do modelo estudado por Triana (2016), Figura 52 e Figura 53.

Além da tipologia adotada ter representação nos conjuntos habitacionais que foram edificados ao longo da história da cidade de Castelo, a escolha é representativa também quanto ao sistema de cobertura, condizente com o modelo que obteve maior ocorrência no levantamento.

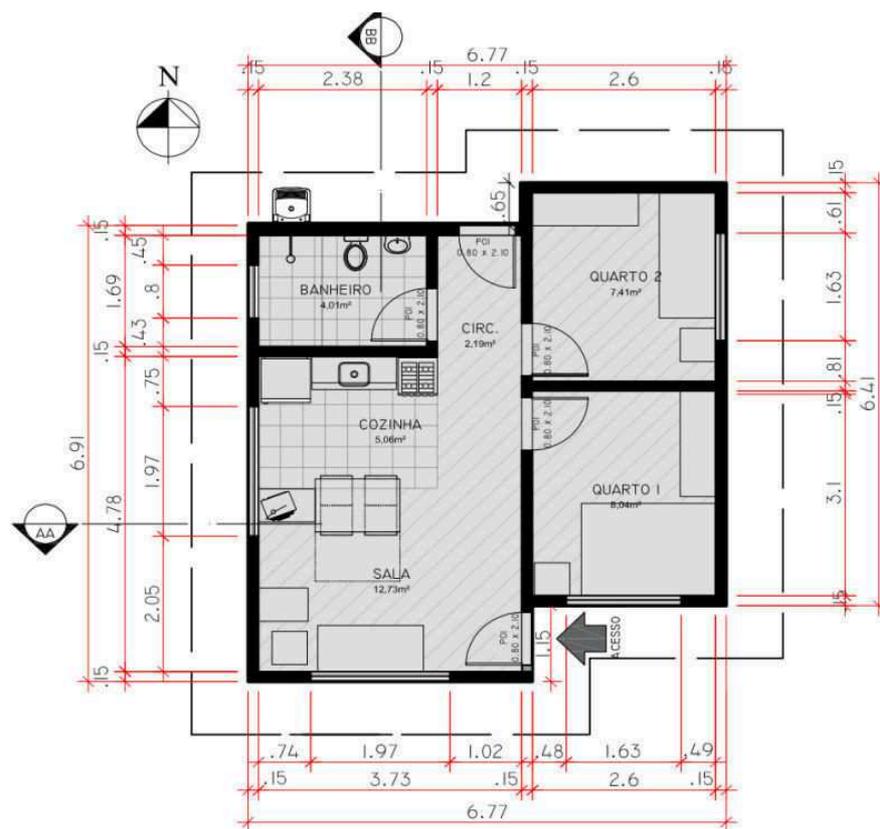


Figura 52: Informação da Construção: Modelo Unifamiliar.

Fonte: Autora adaptado de TRIANA, 2016.

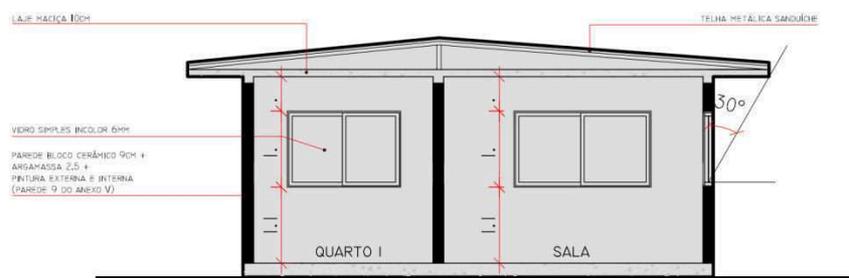


Figura 53: Informação da Construção: Modelo Unifamiliar.

Fonte: Autora adaptado de TRIANA, 2016.

As adaptações foram realizadas principalmente para definir a geometria das aberturas. Para isso considerou-se orientações normativas e legislativas do município de Castelo, a fim de verificar qual seria a melhor abordagem para o estudo.

As áreas de piso foram adaptadas para as dimensões apresentadas na Tabela 4, e a partir delas foram analisadas as indicações normativas da 15575/2021, e do Código de Obras do Município de Castelo. Os parâmetros de elementos transparentes e áreas de ventilação foram analisados a partir da necessidade de ventilação da metodologia de simulação computacional para avaliação do desempenho térmico e do que é praticado regionalmente na construção habitacional.

Assumiu-se que o modelo de Triana (2016) seria tratado como Modelo Referência (Mref), com base na NBR 15575/2021, que o modelo legislativo de Castelo seria tratado como Modelo Real (Mreal), e o modelo baseado na parte 4 da NBR 15575/2021 seria tratado por Modelo Normativo (Mnor).

Assim, a Tabela 4 lista as áreas de piso dos ambientes do modelo e a partir delas os valores referentes aos elementos transparentes a partir das orientações da NBR 15575/2021 e da legislação edilícia da cidade de Castelo.

Para modelos de referência a NBR 15575/2021 estabelece o valor de elementos transparentes como o correspondente a 17% do piso do ambiente (destaque em vermelho em Mref).

A legislação da cidade de Castelo não faz separação entre área de iluminação e de ventilação, de forma que o tratamento dado a áreas de aberturas corresponde a áreas de transparências (1/6 – destaque em vermelho em Mreal). Neste caso os percentuais de abertura para ventilação seguiram a indicação normativa para o modelo de referência de 7,65%.

As relações matemáticas obtidas por meio da legislação demonstraram a aproximação entre os valores de referência da NBR 15575/2021 com os valores que são praticados na cidade de Castelo e em outras cidades da região para elementos transparentes.

Na análise para o modelo normativo foram consideradas duas indicações normativas contidas nas tabelas 15 e 16 da parte 4 da NBR 15575/2021, o percentual de abertura de referência para ventilação (destaque em vermelho em Mnor) e a proporção de referência dos elementos transparentes para ambientes com menos de 20 m de área de piso.

Nesta análise foram considerados além dos dois indicadores a razão entre a área de ventilação (v) e a área de transparência (t), o que indicou que a utilização da área de ventilação de 8% ficaria aquém da relação do 45% adotado para os modelos de referência e, considerando a condição climática do recorte amostral quanto à ventilação, optou-se por utilizar o valor máximo de 20% da área do piso (destaque em azul em Mnor), pois permitiria maior área de ventilação sem extrapolar as indicações limites para área de transparência.

Tabela 4: Análise dos parâmetros normativos e legislativos para áreas de elementos transparentes e ventilação.

Modelo		Transparência (t)			Ventilação (v)		v/t
APP	Área (m ²)	Fração	%	Dimensões de aberturas	Fração	%	Razão
Mref {TRIANA}		1/5,88	17,00		1/13,07	7,65	44,98/100
Q1	8,10	1,37		1,52x0,90	0,62		44,98/100
Q2	7,56	1,28		1,41x0,90	0,58		44,98/100
Estar + Coz	19,97	3,39		2,40x0,90 + 1,39x0,9	1,52		44,98/100
Mreal {CASTELO-ES}		1/6	16,66		-	-	-
Q1	8,10	1,35			0,60		-
Q2	7,56	1,26			0,56		-
Estar + Coz	19,97	3,32			1,49		-
Mnor 15575-4/2021	≤ 20 m ²	1/5	20,00		1/12,50	8,00 ¹⁵	40/100
Q1	8,10	1,62		1,62x1,00	0,648		40/100
Q2	7,56	1,51		1,51x1,00	0,604		40/100
Estar + Coz	19,97	3,99		2,5x1,00 + 1,49x1,00	1,597		40/100

Fonte: Autora.

Desta forma, admitiu-se como modelo real da pesquisa o modelo normativo Mnor 15575-4/2021, doravante Mnor, com as áreas de abertura definidas pelas áreas de transparências com percentual de 20% de área do piso. E manteve-se o modelo Triana, (2016) (Figura 54 e Figura 55) como modelo de referência (Mref).

¹⁵ Para Zona Bioclimática 8, regiões Nordeste e Sudeste. Para região Norte 12%.

Ambos os modelos assumiram os dimensionamentos de aberturas indicados na Tabela 4, anterior (coluna **Dimensões de Aberturas**), correspondente aos modelos com destaque amarelo e para áreas de ventilação efetiva por percentual de 45% da área de elementos transparentes.

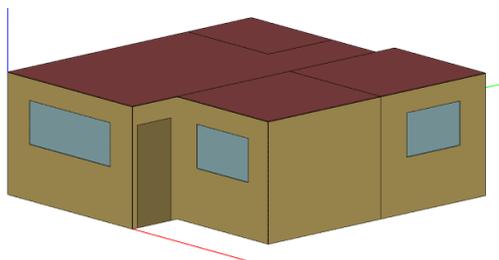


Figura 54: Mref, vista sudeste, OpenStudio.

Fonte:Autora.

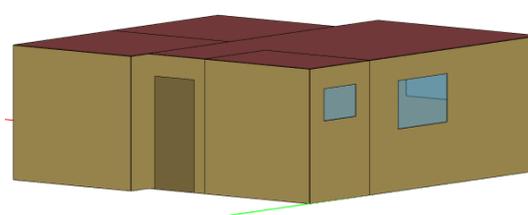


Figura 55: Mref, vista noroeste, OpenStudio.

Fonte:Autora.

Mref e os modelos considerados reais adotaram as mesmas propriedades térmicas internas dos componentes de Sistemas Verticais de Vedação Externa e Interna (SVVE e SVVI), assim como no Sistema de Pisos (SP). As propriedades utilizadas são as descritas pela NBR 15575/2021, conforme a indicação das Tabelas 7, 8 e 9 da NBR 15575-1/2021 para o modelo de referência (Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7).

Tabela 5: Propriedades térmicas de paredes e pisos para o modelo de referência (Tabela 7 – NBR 15575-1/2021)

Elemento	Condutividade Térmica W/(m.K)	Calor específico J/(kg.K)	Absortância à radiação solar	Emissividade de onda longa	Densidade kg/m ³
Paredes externas	1,75	1000	0,58	0,90	2200
Paredes internas	1,75	1000	Adotar do modelo real	Adotar do modelo real	2200
Pisos	1,75	1000	Adotar do modelo real	Adotar do modelo real	2200

O modelo de referência deve adotar a cobertura externa composta por telha com 6 mm de espessura, câmara de ar com resistência térmica de 0,21 (m².K)/W e laje com 100 mm de espessura, conforme as propriedades térmicas descritas na Tabela 8. Quando avaliada uma edificação localizada na zona bioclimática 8, deve-se considerar sobre a laje o uso de isolamento com resistência térmica igual a 0,67 (m².K)/W, conforme a Tabela 9 da NBR 15575-1/2021.

Fonte: ABNT, 2021a

Tabela 6: Propriedades térmicas da cobertura para o modelo de referência (Tabela 8 – NBR 15575-1/2021)

Elemento	Condutividade Térmica W/(m.K)	Calor específico J/(kg.K)	Absortância à radiação solar	Emissividade de onda longa	Densidade kg/m ³
Telha 6 mm de espessura	0,65	840	0,65	0,90	1700
Laje com 100mm de espessura	1,75	1000	Adotar do modelo real	Adotar do modelo real	2200

Fonte: ABNT, 2021a

Tabela 7: Propriedades térmicas do material de isolamento da cobertura para o modelo de referência na zona bioclimática 8 (Tabela 9 – NBR 15575-1/2021)

Elemento	Resistência térmica (m ² .K)/W	Absortância à radiação solar	Emissividade de onda longa
Isolamento térmico	0,67	0,70	0,90

Fonte: NBR 15575-1/2021

A partir de Mref derivou-se um modelo com terraço capixaba (TC), a fim de realizar comparações específicas sobre a atuação do TC sobre o modelo analisado. Este modelo é analisado na condição de modelo real, apesar de ser identificado como Mref_T (Tabela 8).

Para este modelo foi utilizado como material de telhamento a telha trapezoidal 0,48 mm de aço galvanizado, elevado 2,50 m sobre laje de concreto de 10 cm.

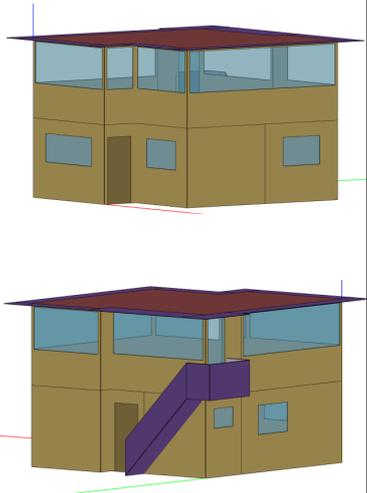
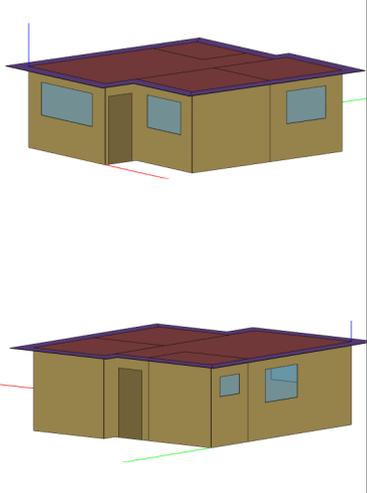
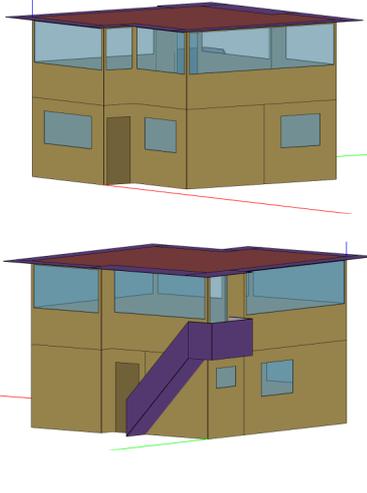
Tabela 8: Propriedades térmicas da cobertura para o Mref T

Elemento	Condutividade Térmica W/(m.K)	Calor específico J/(kg.K)	Absortância à radiação solar	Emissividade de onda longa	Densidade kg/m ³
Telha 0,48 mm de aço galvanizado	0,65	840	0,65	0,90	1700
Laje com 100mm de espessura	1,75	1000	Adotar do modelo real	Adotar do modelo real	2200

Fonte: Autora

A partir de Mnor derivaram outros modelos, também considerados reais, a fim de aumentar o repertório da análise, com base no resultado da Etapa 2 desta pesquisa. Estas derivações de Mnor assumiram todas as características geométricas de Mnor, a exceção do SC (Quadro 8).

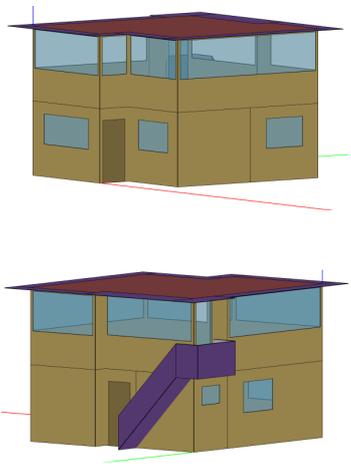
Quadro 8: Representação dos modelos reais analisadas

Mref_T (Figura 56)	Mnor (Figuras Figura 57)	Mnor_T; Mnor_Tisopiso Mnor_Tisotelha; Mnor_Tisopisotelha; Mnor_Tcastelo; Mnor_T_N270 (Figura 58)
		
Figura 56: Mref_T, vistas sudeste e noroeste, OpenStudio.	Figura 57: Mnor, vistas sudeste e noroeste, OpenStudio.	Figura 58: Modelos de Mnor, vistas sudeste e noroeste, OpenStudio.

Fonte: Autora.

As modificações realizadas nas derivações de Mnor estão descritas no Quadro 9:

Quadro 9: Representação dos modelos reais analisadas

Representação	Nome	Modificação
 <p>Figura 59: Modelos derivados de Mnor, vistas sudeste e noroeste, OpenStudio.</p>	Mnor_T	Mnor com acréscimo do TC com mesmo SC de Mref_T.
	Mnor_Tisopiso	Mnor com acréscimo do TC com mesmo SC de Mref_T e camada de isolamento junto ao piso.
	Mnor_Tisotelha	Mnor com acréscimo do TC com mesmo SC de Mref_T e camada de isolamento junto ao telhamento.
	Mnor_Tisopisotelha	Mnor com acréscimo do TC com mesmo SC de Mref_T e camada de isolamento junto ao piso e junto ao telhamento.
	Mnor_T_N270	Mnor com acréscimo do TC com mesmo SC de Mref_T e rotação da orientação norte em 270 graus.

Fonte: Autora.

A criação do modelo Mnor_T_N270, objetivou retirar os elementos transparentes dos APP da orientação Oeste, a fim de analisar a ação do TC sobre o modelo quando da redução da radiação solar no período vespertino. As características de absorvância de ondas curtas (superficial externa) para os modelos considerados reais (Mnor, e derivados) leva em conta as características mais frequentes encontradas por (SASSO-FERRÃO; NICO-RODRIGUES, 2021), em estudo local, adotando valores diferentes do modelo de referência (Tabela 9).

Tabela 9: Propriedades térmicas para Modelos Energéticos Reais sem TC.

Elementos SVVEI e SP	Condutividade Térmica W/(m.K)	Calor Específico J/(kg.K)	Absortância à radiação solar de onda curta (relação inteiro)	Emissividade de onda longa	Densidade (kg/m ³)
Paredes externas	1,75	1.000,00	0,30	0,90	2.200
Laje 100 mm de espessura	1,75	1.000,00	0,25	0,90	2.200
Composição elementos transparentes.					
Elemento	Fator Solar	Transmitância Térmica (U) W/(m ² .K)		Percentual de elementos transparentes (Pt,APP) %	
Transparentes	0,87	5,70		20	
Percentual de aberturas para ventilação					
Elemento	Percentual de Abertura para Ventilação (Pv,app)				
Abertura de ventilação	45% da área de elementos transparentes por ambiente				

Fonte: ABNT, 2021a.

Na composição das propriedades térmicas do sistema de cobertura dos modelos reais procurou-se maximizar a aproximação com o que é praticado na realidade. Assim, foi considerado na composição do telhado de telhas cerâmicas de Mnor a resistência da camada de ar maior do que cinco centímetros, com fluxo de calor descendente, mas não a camada de material de isolamento prevista para ZB8, uma vez que esta não é uma prática local.

As definições da Etapa 3 foram retroalimentadas por resultados obtidos na Etapa 4 - Avaliação Termo-energética, tendo em vista que foi necessário realizar a avaliação e analisar os resultados obtidos sobre Mref e Mnor para definir intervenções com novas definições para os modelos derivados. Desta forma a Etapa 3 se interligou a Etapa 4.

Para o recinto TC foram realizados alguns testes de modelagem e simulação. Inicialmente foram modeladas superfícies para promover o sombreamento do piso do recinto, mas os resultados não se mostraram confiáveis no ambiente banheiro. Desta forma foi realizada consulta ao LabEEE visando a utilização da melhor prática.

A orientação foi para que se utilizasse a modelagem por zona térmica, por se tratar de formato amplamente utilizado em simulações gerando resultados similares à modelagem por ambiente, o que é importante de ser considerado diante da utilização do recinto para diversos usos e variados períodos de tempo¹⁶. Foi considerada a utilização de vãos totalmente abertos.

Assim, o recinto TC foi modelado como zona térmica, e as aberturas foram configuradas para permanecerem abertas em 100% dos vãos, em 100% das horas do ano.

O procedimento de modelagem foi realizado por meio do programa SketchUp 2019 com plugin OpenStudio versão 3.1.0 que opera com processamento EnergyPlus 9.4.0. Toda configuração de materiais, uso, equipamentos, termostatos foi realizada no OpenStudio.

Finalizada a etapa de modelagem e simulação, elencaram-se os critérios para os quais os resultados das simulações deveriam responder para organizar a Etapa 4 – Avaliação Termo-energética.

3.5. Etapa 4 – Avaliação Termo-energética

Para a avaliação termo-energética por meio de simulação computacional alguns dados foram configurados diretamente no EnergyPlus como a ventilação natural por meio do *Air Flow Network*, e a transferência de calor pelo solo por meio do *Ground Domain*, ambos configurados conforme Manual de Simulação Computacional de Edifícios Naturalmente Ventilados no Programa Energyplus – Versão 9.0.1 (KIRCH et al., 2020), e Manual de Simulação Computacional de Edifícios com o Uso do Objeto Ground Domain no Programa Energyplus – versão 9.0.1 Xing (ELI et al., 2019) com configuração Xing.

A avaliação termo-energética considerou os limites e os critérios estabelecidos em norma, considerando os critérios definidos para ZB8 descritos no capítulo de referencial teórico. Assim, a análise baseou-se na compreensão de qual faixa de temperatura operativa (FT) seria definida a partir da TBS média anual (TBSm) do arquivo climático, conforme descrito anteriormente por meio do Quadro 1, do

¹⁶ Orientação dada por Leticia Gabriela Eli via e-mail.

REFERENCIAL TEÓRICO.

Por média aritmética simples, obteve-se o valor da TBSm do arquivo climático como descrito na Equação 6.

Equação 6: Média aritmética simples para obtenção da TBSm do arquivo epw.

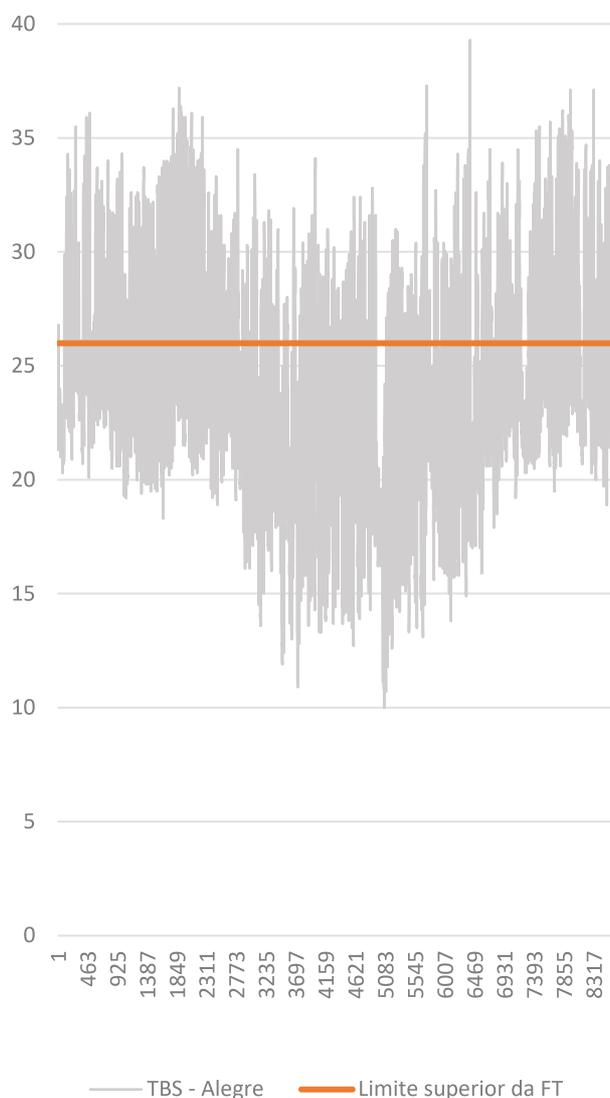
$$TBSm = \frac{TBS_1 + TBS_2 + TBS_3 + \dots + TBS_{8760}}{8760} \quad (1)$$

Fonte: Autora.

A temperatura de referência do arquivo climático encontrada para TBSm foi de 23,95°C, temperatura que definiu o intervalo 1 da faixa a ser utilizada no estudo, sendo o limite superior de referência da temperatura operativa (TO), de 26°C.

O Gráfico 7 apresenta as TBS anuais em marcações horárias em cinza, e em laranja o limite superior da faixa de temperatura da análise.

Gráfico 7: Temperaturas anuais horárias de Alegre a partir do arquivo climático e Limite Superior da Faixa de Temperatura Operativa.



Fonte: Autora a partir do arquivo climático da WMO Station 868280.

As TO dos APP cujos resultados retornaram valores acima do limite superior, não computaram no PHFT.

Não houve retorno de resultados de TO abaixo do limite inferior da FT, logo, os resultados que não computaram no PHFT correspondem ao percentual de horas superior à faixa de temperatura operativa (PHsFT).

Posteriormente, foram iniciadas as interpretações dos resultados para a simulação com ventilação natural. Os critérios mínimos, aos quais os modelos deveriam responder em situação de ZB8 era o limite de TO máxima, cuja resposta do modelo real deve ser inferior à resposta do modelo de referência mais 2°C, considerando todos os APP da UH; e o $PHFT_{UH}$ real deveria apresentar resposta maior que 90% do $PHFT_{UH}$ de referência, como já indicado pelo Quadro 12, em anexo.

E para obtenção de níveis Intermediário e Superior há necessidade de incremento dos percentuais dentro da faixa de temperatura operativa ($\Delta PHFT$) conforme a tipologia e conforme o $PHFT_{UH}$ de referência ($PHFT_{UH,ref}$). A junção das Tabelas 20 e 21 da NBR 15575-1/2021, apresentada no Anexo 2 (Figura 76), é apresentada na Figura 60, com destaques em vermelho, indicando o caminho metodológico seguido no estudo, considerando os resultados obtidos pelo Mref da pesquisa.

Tabela 20 – Incremento mínimo do $PHFT_{UH,real}$ e redução mínima da $CgTT_{UH,real}$ para o atendimento ao nível de desempenho térmico intermediário

Critério		Tipologia			
		Unifamiliar	Multifamiliar		
		-	Pavimento térreo	Pavimento tipo	Pavimento cobertura
$PHFT_{UH,ref}$ %	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH}$ kWh / (ano.m ²)	$\Delta PHFT_{min}$ %			
$PHFT_{UH,ref} < 70\%$	Todos os valores	Obtido a partir do ábaco ou das equações da Figura 4			
$PHFT_{UH,ref} \geq 70\%$	Todos os valores	0	0	0	0
$PHFT_{UH,ref}$ %	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH}$ kWh / (ano.m ²)	RedCgTT _{min} %			
$PHFT_{UH,ref} < 70\%$	Todos os valores		0	0	0
$PHFT_{UH,ref} \geq 70\%$	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH} < 100$	17	15	22	15
	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH} \geq 100$	27	20	25	20

Tabela 21 – Incremento mínimo do $PHFT_{UH,real}$ e redução mínima da $CgTT_{UH,real}$ para o atendimento ao nível de desempenho térmico superior

Critério		Tipologia			
		Unifamiliar	Multifamiliar		
		-	Pavimento térreo	Pavimento tipo	Pavimento cobertura
$PHFT_{UH,ref}$ %	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH}$ kWh / (ano.m ²)	$\Delta PHFT_{min}$ %			
$PHFT_{UH,ref} < 70\%$	Todos os valores	Obtido a partir do ábaco ou das equações da Figura 4			
$PHFT_{UH,ref} \geq 70\%$	Todos os valores	0	0	0	0
$PHFT_{UH,ref}$ %	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH}$ kWh / (ano.m ²)	RedCgTT _{min} %			
Todos os valores	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH} < 100$	35	30	45	30
	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH} \geq 100$	55	40	50	40

NOTA O nível superior também pode ser obtido se o $PHFT_{UH,real}$ do modelo real for maior ou igual a 95 %, juntamente com o atendimento ao critério de temperaturas anuais máxima e mínima ($Tomá_{UH}$ e $Tomín_{UH}$).

Figura 60: Tabelas 20 e 21 da NBR 15575-1/2021 com o fluxo de trabalho para modelos com $PHFT_{UH,ref}$ abaixo de 70%.

Fonte: ABNT, 2021a.

As tabelas 20 e 21 da NBR 15575-1/2021 referenciam o ábaco contido na Figura 61, também contido no Anexo 1, o qual determinou, por meio de equação destacada em vermelho, o $\Delta PHFT_{min}$ uma vez que o $PHFT_{UH,ref}$ foi inferior a 70%.

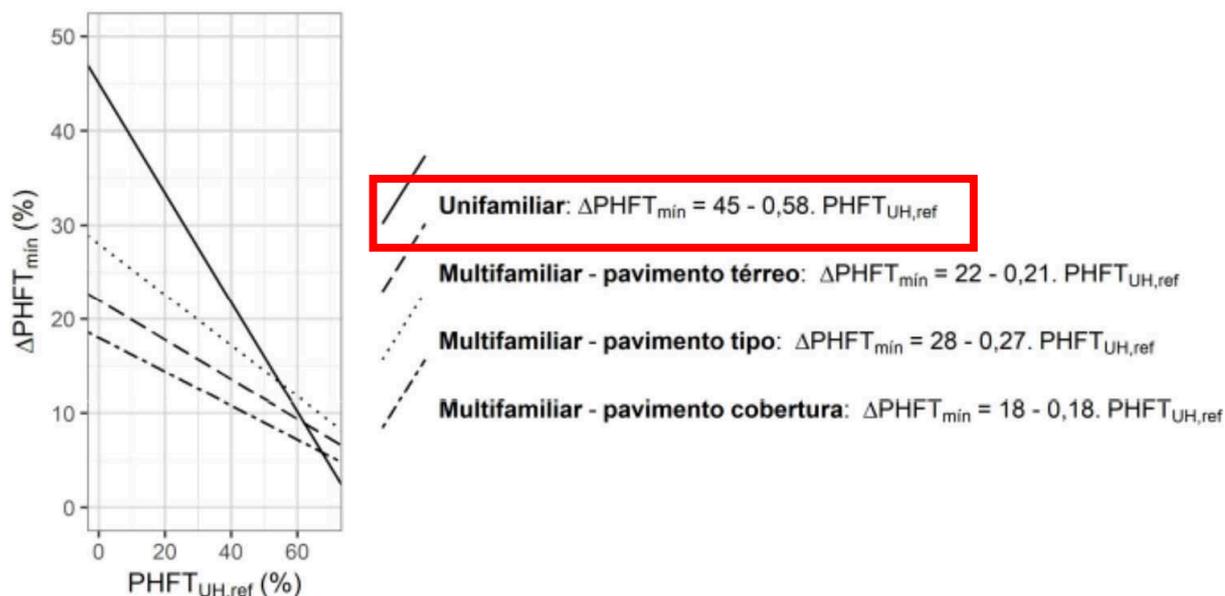


Figura 61: Ábaco e equações para obtenção do $\Delta PHFT_{\min}$ quando o $PHFT_{UH,ref}$ for inferior a 70%.

Fonte: ABNT, 2021a.

Foram avaliados três ambientes: Cozinha e Sala (Sala), Quarto 1 (Q1) e Quarto 2 (Q2), e as análises desenvolvidas foram horárias, considerando a ocupação e as temperaturas operativas (TO) dos ambiente de permanência prolongadas (APP), no cômputo do percentual de horas de ocupação dos APP ($PHFT_{APP}$) e cargas térmicas conforme indica a Figura 62, que ilustra o método de análise realizado.

Hora do ano	Horário	Ocupação do APP	Modelo com o uso da ventilação natural		Modelo sem o uso da ventilação natural	
			To APP	PHFT _{APP}	CgTR _{APP}	CgTA _{APP}
1	00:00 – 00:59	Sim	18°C < To < 26°C	Sim	Não	Não
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
6	05:00 – 05:59	Sim	To ≥ 26°C	Não	Sim	Não
7	06:00 – 06:59	Sim	To ≥ 26°C	Não	Sim	Não
8	07:00 – 07:59	Não	To ≥ 26°C	Não	Não	Não
9	08:00 – 08:59	Não	To ≥ 26°C	Não	Não	Não
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
4345	00:00 – 00:59	Sim	To ≤ 18°C	Não	Não	Sim
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
8760	23:00 – 23:59	Sim	18°C < To < 26°C	Sim	Não	Não

Figura 62: Critério Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa ($PHFT_{UH}$).

Fonte: ABNT, 2021a.

Nesta análise foi desenvolvida planilha em formato Microsoft Excel para o cômputo da combinação entre o tipo de ambiente, horas de ocupação do APP, temperatura operativa (TO) de cada APP individualmente, a fim de levantar o percentual de horas de ocupação com necessidade de resfriamento durante a ocupação.

Esta planilha abarca as 8760 horas do ano e seu cabeçalho pode ser observado no Apêndice 3. Sua configuração identifica as horas em que os critérios foram atendidos por APP gerando o $PHFT_{APP}$. E posteriormente retorna o resultado da UH ($PHFT_{UH}$) base no número de APP da UH.

Estes critérios possibilitaram verificar se existiam e quais eram os limites de utilização do terraço capixaba considerando a utilização da ventilação natural, e se este sistema se manteria como uma boa estratégia passiva para edificações em climas tropicais, diante das austeridades dos cenários climáticos atual do recorte amostral e futuros de altas emissões avaliados na pesquisa.

Os resultados da avaliação termo-energética foram apresentados no

RESULTADOS E DISCUSSÕES, da seguinte forma:

- A) Análise anual dos Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa das UH (PHFT_{UH}) para o cenário de clima atual;
- B) Análise das temperaturas operativas (TO) dos modelos de referência (Mref), modelo com aberturas de ventilação normativas (Mnor) e modelo com aberturas de ventilação normativas combinado com TC (Mnor_T) por UH e por APP para o cenário de clima atual;
- C) Análises sazonais para o período entre janeiro e março (JanMar) e entre setembro e dezembro (SetDez) para o cenário de clima atual; e
- D) Análise do desempenho térmico durante a vida útil: considerações sobre resiliência de edifícios com TC.

O Quadro 10 apresenta as comparações que puderam ser estabelecidas e analisadas entre os modelos de referência (Mref), referência com terraço (Mref_T), aberturas de ventilação normativa (Mnor), abertura de ventilação normativa com terraço (Mnor_T), referência com terraço no *slice time* 50 (Mref_T_50), abertura de ventilação normativa com terraço no *slice time* 50 (Mnor_T_50), referência com terraço no *slice time* 80 (Mref_T_80) e abertura de ventilação normativa com terraço no *slice time* 80 (Mnor_T_80); destacando:

- i) Substituição do sistema de cobertura normativa para ZB8 pelo modelo terraço capixaba (TC);
- ii) Aumento da ventilação nos APP, para condição normativa ZB8 - Sudeste, em clima com desfavorável condição de vento;
- iii) Associação entre TC e aumento da ventilação nos APP; e
- iv) Rotação de eixo Norte em 270°: similaridade entre resultados com e sem elementos transparente (ET) em orientação Norte.

Também as relações que foram observadas entre Mnor_T e outros modelos listados:

- v) Associação entre TC e aumento da ventilação nos APP: influência dos elementos transparentes em edificação de pequeno porte, em clima com desfavorável condição de vento;
- vi e vii) O peso da ventilação natural no método de simulação da NBR 15575/2021, em contraponto à realidade climática local atual e futura;
- viii) Similaridade entre resultados de modelo com exposição de elementos transparentes ao sol da tarde (Mnor_T) e modelo com exposição de elementos transparentes ao sol de orientação Norte (Mnor_T_N270); e
- ix) Similaridade entre resultados obtidos por utilização de TC e de TC com algum tipo de isolamento nas camadas componentes.

E ainda as relações observadas entre os modelos de referência para cenários futuros (Mref_50 e Mref_80) e seus modelos reais (Mnor_T_50 e Mnor_T_80) sendo:

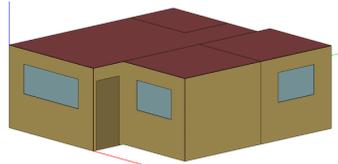
- x) Aumento de temperatura de bulbo seco (TBS) e TO sem alteração da faixa de temperatura operativa (FT); aumento na proporção de horas na FT com a utilização do TC em relação ao modelo de referência; e
- xi) Aumento de TBS e TO com alteração da FT operativa; redução substancial na proporção de horas na FT com a utilização do TC em relação ao modelo de referência

Quadro 10: Interações e relações entre os modelos simulados

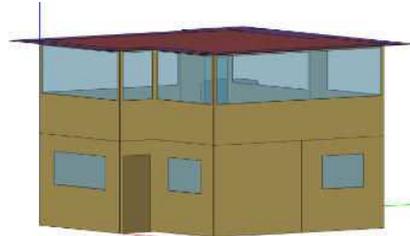
	Mref_T	Mnor	Mnor_T	Mnor_T_50	Mnor_T_80	Mref_N270	Mnor_T_N270	Mnor_Tiso (isopiso; isotelha; isopisotelha)
Mref	i	ii	iii			iv		
Mnor_T	v			vi	vii		viii	ix
Mref_50				x				
Mref_80					xi			

Onde:

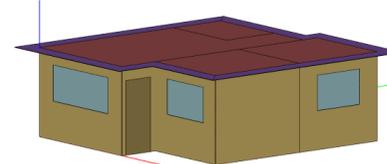
Mref e Mref_N270



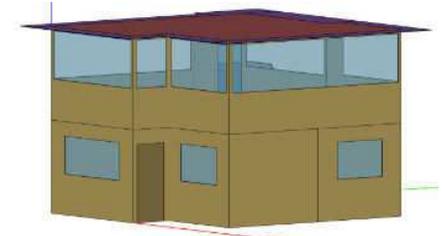
Mref_T



Mnor



Mnor_T e derivados T_iso (modelos com T)



Fonte: Autora.

Com a leitura dos indicadores, e interpretação dos seus resultados foi possível eleger o modelo Mnor_T como referência para as análises em cenários de clima futuro de alta emissão de GEE, considerando principalmente a semelhança com os resultados dos outros modelos e a aproximação de suas características às características dos sistemas construtivos reais implementados no recorte amostral. Com isso, passou-se a Etapa 5 - Cenários de Alta Emissão de Gases de Efeito Estufa, com o desenvolvimento do subprocesso da Etapa 6, necessário para a geração dos cenários futuros de mudanças climáticas, antes da apresentação dos resultados das avaliações, com as análises que puderam ser estabelecidas e as discussões desta pesquisa, os quais são apresentados no capítulo de resultados.

3.6. Etapas 5 e 6 – Avaliação Termo-energética em Cenários Futuros e Geração Cenários de Alta Emissão de Gases de Efeito Estufa

A etapa 5 - Avaliação Termo-energética em Cenários Futuros encerra o processo metodológico desta pesquisa analisando os dados de cenários de altas emissões de gases de efeito estufa (GEE) e comparando-os com os resultados em clima atual, apresentando as análises e as discussões pertinentes aos objetivos da pesquisa.

Para isso foi necessário a realização da etapa 6 - Geração Cenários de Alta Emissão de Gases de Efeito Estufa, que consistiu em um subprocesso metodológico para criação dos arquivos climáticos em situação de altas emissões de GEE, a partir do arquivo climático EPW da estação WMO *Station* 868280, com a utilização a ferramenta CCWorldWeatherGen, procedimento necessário para a finalização da etapa anterior.

A ferramenta *Climate Change World Weather File Generator for World-Wide Weather Data* (CCWorldWeatherGen), é um gerador mundial de arquivos meteorológicos de mudanças climáticas, que transforma arquivos EPW em arquivos meteorológicos (UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON, 2022), que se baseiam em metodologia de “morfagem”, desenvolvida por Belcher, Hacker e Powell (BELCHER; HACKER; POWELL, 2005).

Ela consiste em uma ferramenta eletrônica, cuja interface é uma planilha, válida e funcional junto ao Microsoft Excel, versão de 2010 ou anterior (Figura 63), que traz dados resumidos das previsões do modelo de mudança do clima HadCM3 para o cenário A2, ou SSP 8.5, disponibilizados pelo IPCC (JENTSCH et al., 2013; JENTSCH; BAHAJ; JAMES, 2008; UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON, 2022).

CCWorldWeatherGen climate change weather file generator V1.9

[manual](#)

For transforming EPW weather files into climate change TMY2/EPW files. (Acknowledgements & disclaimer of warranties below)

Specify the HadCM3 data file path:

Summary of combined HadCM3 A2 ensemble climate change predictions for the selected weather site

Selected scenario: A2 scenario ensemble for the 2020's

		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
Daily mean temperature	TEMP (°C)	0.44	0.51	0.64	0.53	0.82	1.01	1.05	0.83	0.92	0.90	0.66	0.48	0.73
Maximum temperature	TMAX (°C)	0.37	0.47	0.68	0.49	0.98	1.38	1.31	0.96	0.74	0.86	0.52	0.46	0.77
Minimum temperature	TMIN (°C)	0.49	0.52	0.62	0.55	0.70	0.72	0.80	0.61	0.91	0.91	0.83	0.49	0.68
Horizontal solar irradiation	DSWF W/m²	-6.40	-3.79	1.53	-1.37	3.98	8.10	6.61	3.77	-4.60	-3.91	-14.92	-5.92	-1.41
Total cloud cover	TCLW % points	-1.63	0.25	-2.50	-1.75	-5.25	-9.50	-9.75	-6.50	0.75	1.00	3.25	1.88	-2.48
Total precipitation rate	PREC %	4.94	2.35	-2.25	0.19	-12.41	-20.39	-18.84	-10.77	18.10	15.85	22.84	-1.24	-0.14
Relative humidity	RHUM % points	0.27	-0.28	-0.32	-0.45	-0.50	-1.60	-2.22	-2.05	-0.33	0.15	1.25	-0.37	-0.54
Mean sea level pressure	MSLP hpa	-0.68	0.44	-0.55	0.06	0.12	-0.29	-0.36	0.13	-0.51	-0.54	-0.75	0.50	-0.20
Wind speed*	WIND %	0.50	2.00	0.85	2.50	2.00	3.22	6.65	5.03	1.24	0.21	2.69	-1.14	2.15

* Please note that wind speed resides on a 96x72 grid whilst all the other data is on a 96x73 grid

EPW weather file selection

(1) Please specify the EPW file you want to transform

Select EPW File for Morphing

Current EPW baseline weather file for morphing:

Vitoria Aguiar Salles AP, BRA Latitude: -20.26 S
Longitude: -40.29 W
Elevation: 3.4 m

HadCM3 scenario timeframe selection

(2) Please select a HadCM3 A2 scenario ensemble timeframe

2020's 2050's 2080's Load Scenario

Closest four HadCM3 96x73 grid points to Vitoria Aguiar Salles AP, BRA

	Latitude:	Longitude:
A	-20.00 S	-41.25 W
B	-17.50 S	-41.25 W
C	-20.00 S	-37.50 W
D	-22.50 S	-41.25 W

A2 scenario for the 2020's

EPW weather file morphing

(3) Click button to start morphing procedure

Start Morphing Procedure

Current morphed EPW weather file:

Morphed EPW file for: Vitoria Aguiar Salles AP, BRA
HadCM3 A2 emissions senario ensemble for the 2020's

EPW/TMY2 weather file generation

(4) Click the appropriate button for EPW / TMY2 file generation

Generate Climate Change EPW Weather File

Generate Climate Change TMY2 Weather File

To create a TMY2 file of the original EPW file click the button below:

Generate Present-Day TMY2 Weather File form EPW data

Figura 63: Interface Ferramenta CCWorldWeatherGen.

Fonte: JENTSCH; BAHAJ; JAMES, 2017.

O EPW “morfado”, ou a metamorfose do EPW, é produzido a partir de 4 etapas (MACHADO, 2019). Na primeira etapa seleciona-se o arquivo EPW atual (arquivos climáticos EPW da estação WMO *Station* 868280); na segunda etapa escolhe-se entre os cenários de altas emissões entre as opções 2020’s, 2050’s, ou 2080’s. Na terceira solicita-se a produção do arquivo “morfado”. Na quarta e última indica-se o formato do arquivo a ser utilizado. Podendo-se optar por EPW, ou TMY2.

O método de metamorfose (*morphing*) de arquivos climáticos epw, embora prático e embasado em arquivo climático existente, apresenta limites próprios. O primeiro deles é a recomendação de que sejam utilizados arquivos cuja medição e registro sejam da série histórica 1961-1990, o que retorna a um período passado de mais de 60 anos, quando as mudanças climáticas ainda não eram consideradas uma urgência global. Neste período poucas cidades brasileiras possuíam estações de medição, limitando-se às capitais de estados e cidades com aeroportos.

A implantação de novas estações meteorológicas foi importante e continua sendo fundamental, pois ampliou a base de dados, entretanto, os dados gerados além de não representarem o período climatológico de 30 anos já retratam as mudanças climáticas ocorridas.

Desta forma, o arquivo climático EPW da estação WMO *Station* 868280, assim como grande parte dos arquivos climáticos da base de dados INMET, corresponde a arquivos do grupo de cidades para as quais foi possível montar poucos anos inteiros, muitos deles a partir de 2007 ou 2008. “Por este

motivo, os arquivos resultantes apresentam baixa representatividade estatística das ocorrências climáticas históricas e deverão ser aperfeiçoados, na medida em que se disponha de períodos mais longos de registro” (RORIZ, 2012).

A morfagem do arquivo epw WMO Station 868280 foi realizada três vezes com base no arquivo BRA_ES_Alegre.868280_INMET.epw, registro histórico entre 2001-2010, obtido por meio do site do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE), no conjunto de arquivos disponibilizados na atualização 2018.

Embora não registre um período climático de 30 anos e já registre parte das mudanças climáticas atualmente observadas, compreendeu-se a importância de analisar a projeção de clima para cenários de altas emissões de GEE na condição de estresse climático do recorte amostral, ainda que seja possível que ocorra superestimativa das mudanças climáticas projetadas pela ferramenta, uma vez que os dados não correspondem ao período climático 1961-1990 indicado.

Desta forma foi desconsiderado na pesquisa a análise em cenário em *slice time* 2020's, remanescendo as metamorfoses para *slices time* 2050's e 2080's, e os dados do período 2050's e 2080's podem conter superestimativas.

Assim, o aumento médio mensal das variáveis obtidas para os *slices times* analisados nesta pesquisa estão indicados nas Figuras Figura 64 e Figura 65.

Selected scenario: A2 scenario ensemble for the 2050's

		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
Daily mean temperature	TEMP (°C)	1,10	1,17	1,46	1,57	1,98	2,11	2,13	1,97	1,98	1,85	1,64	1,23	1,68
Maximum temperature	TMAX (°C)	1,19	1,12	1,46	1,60	2,27	2,50	2,45	2,22	2,19	2,01	1,56	1,26	1,82
Minimum temperature	TMIN (°C)	1,18	1,19	1,39	1,50	1,71	1,75	1,62	1,54	1,84	1,90	1,69	1,31	1,55
Horizontal solar irradiation	DSWF W/m ²	-6,69	-4,02	4,12	3,92	10,71	12,44	14,13	9,06	2,86	-1,24	-11,84	-11,49	1,83
Total cloud cover	TCLW % points	-2,25	-1,50	-2,50	-3,00	-7,25	-12,25	-13,13	-8,25	-2,25	0,88	5,13	2,75	-3,64
Total precipitation rate	PREC %	-0,37	2,35	-6,13	-2,10	-27,22	-29,42	-37,04	-35,47	0,80	12,68	15,74	1,72	-8,71
Relative humidity	RHUM % points	-0,84	-0,69	-1,17	-1,60	-1,69	-3,07	-3,96	-3,96	-2,22	-0,70	0,09	-0,14	-1,66
Mean sea level pressure	MSLP hpa	-0,55	-0,51	-0,46	-0,36	-0,36	-0,74	-0,42	-0,40	-0,62	-0,79	-1,03	0,20	-0,50
Wind speed*	WIND %	0,66	2,70	1,51	2,22	3,03	7,01	9,29	6,42	3,83	2,00	3,08	-1,41	3,36

Figura 64: Variação média mensal e para variáveis climáticas em cenários 2050's.

Fonte: Autora a partir de CCWorldWeatherGen V1.9

Selected scenario: A2 scenario ensemble for the 2080's

		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
Daily mean temperature	TEMP (°C)	2,85	2,87	2,90	3,36	4,27	4,67	4,78	4,52	4,31	4,44	4,03	3,17	3,85
Maximum temperature	TMAX (°C)	3,01	3,08	3,00	3,55	4,85	5,56	5,58	4,98	4,33	5,03	4,48	3,46	4,24
Minimum temperature	TMIN (°C)	2,67	2,59	2,78	3,11	3,65	3,81	3,90	3,70	3,83	3,83	3,75	2,93	3,38
Horizontal solar irradiation	DSWF W/m ²	4,24	7,55	5,46	12,12	24,31	28,11	26,91	20,50	10,62	20,21	7,47	4,77	14,36
Total cloud cover	TCLW % points	-4,88	-6,75	-5,00	-8,13	-16,88	-22,00	-22,38	-15,00	-7,00	-6,75	-0,75	-1,50	-9,75
Total precipitation rate	PREC %	0,59	-7,45	-6,39	-20,14	-36,00	-49,12	-36,66	-36,18	-3,78	-6,27	8,05	-2,67	-16,34
Relative humidity	RHUM % points	-3,70	-4,89	-3,98	-5,56	-7,47	-9,28	-10,32	-10,20	-6,91	-7,31	-4,16	-4,40	-6,51
Mean sea level pressure	MSLP hpa	-0,91	-0,55	-1,13	-0,77	-1,38	-1,18	-1,43	-1,58	-1,17	-1,04	-1,61	-0,32	-1,09
Wind speed*	WIND %	6,64	10,38	11,25	10,79	10,01	13,70	15,14	11,68	7,65	5,67	4,02	4,33	9,27

Figura 65: Variação média mensal e para variáveis climáticas em cenários 2080's.

Fonte: Autora a partir de CCWorldWeatherGen V1.9

Estes resultados indicaram as alterações médias mensais a que as variáveis climáticas dos arquivos EPW “morfados” foram submetidas nos cálculos dos algoritmos de mudança, alongamento e da combinação entre mudança e alongamento no processo de metamorfose para cenários futuros, a partir do EPW da WMO Station 868280, da cidade de Alegre-ES.

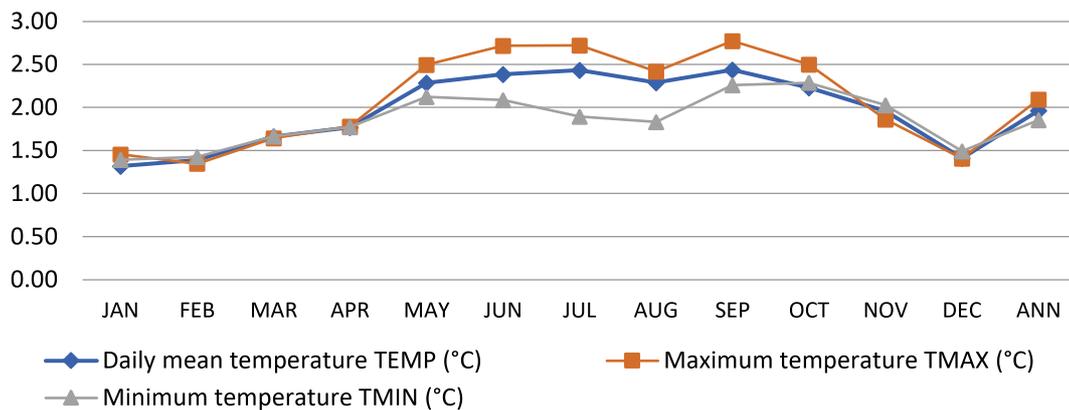
O aumento médio mensal das variáveis obtidas para os *slices times*, 2050's e 2080's estão indicados dos dados do Gráfico 8 ao Gráfico 13.

Para o cenário 2050's observou-se aumento das temperaturas médias diárias, máximas e mínimas nas variações médias mensais (Gráfico 8). Nas variações mensais as temperaturas máximas apresentaram aumento mínimo de 1,12°C (fevereiro), e as médias diárias apresentaram aumento mínimo de 1,10°C (janeiro), meses quentes do ano. Os números indicaram que os meses que

habitualmente amenizam o estresse térmico local sofrerão os maiores aumentos de temperatura em todos os indicadores de temperatura.

No período entre setembro e dezembro, período de altas das temperaturas na região, os números indicaram o aumento percentual da precipitação. Quando à umidade do ar (Gráfico 9) o aumento percentual observado no período de maior e menor estresse térmico podem indicar que o aumento maior no inverno está relacionado ao aumento da temperatura do período, e o aumento menor com a saturação do ar habitual do período de verão.

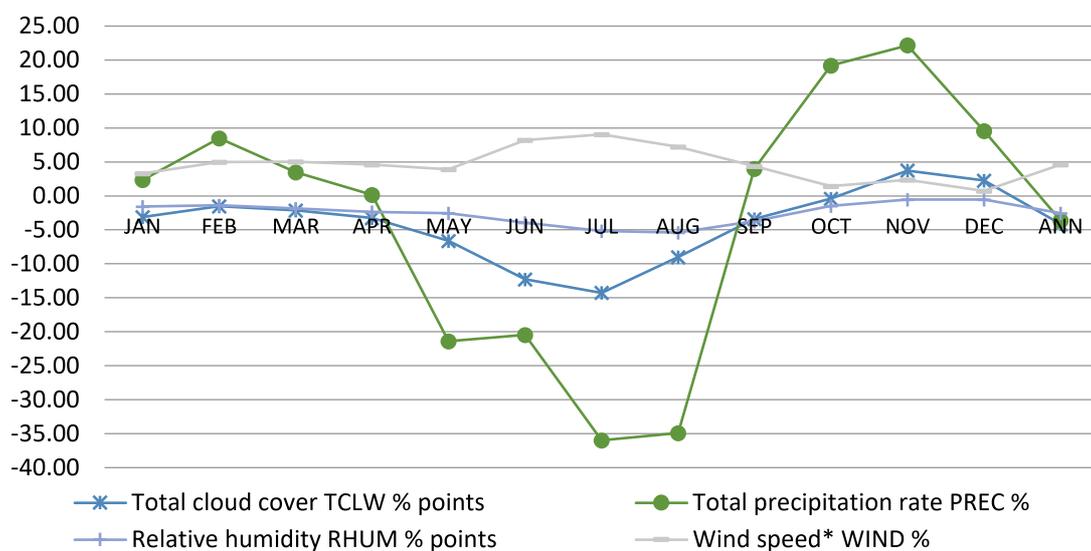
Gráfico 8: Variação média mensal e para temperaturas em cenários 2050's.



Fonte: Autora a partir de CCWorldWeatherGen V1.9

O aumento da velocidade de ventos (Gráfico 9) tendeu a acompanhar o aumento das temperaturas, o que pode interferir na sensação de conforto, especialmente por ocorrer em períodos secos do ano. A ampliação do período com redução da umidade relativa do ar, da precipitação e cobertura por nuvens também ficou evidenciada no gráfico.

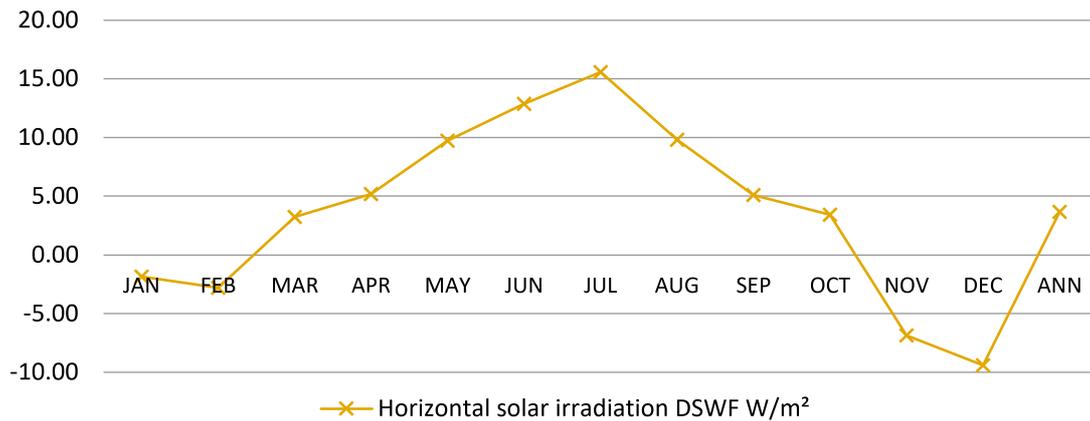
Gráfico 9: Variação média mensal de variáveis climáticas cobertura de nuvens, precipitação umidade relativa e velocidade de ventos em cenários 2050's.



Fonte: Autora a partir de CCWorldWeatherGen V1.9

O aumento, ou redução da radiação global horizontal (Gráfico 10) acompanhou inversamente a mudança de cobertura de nuvens.

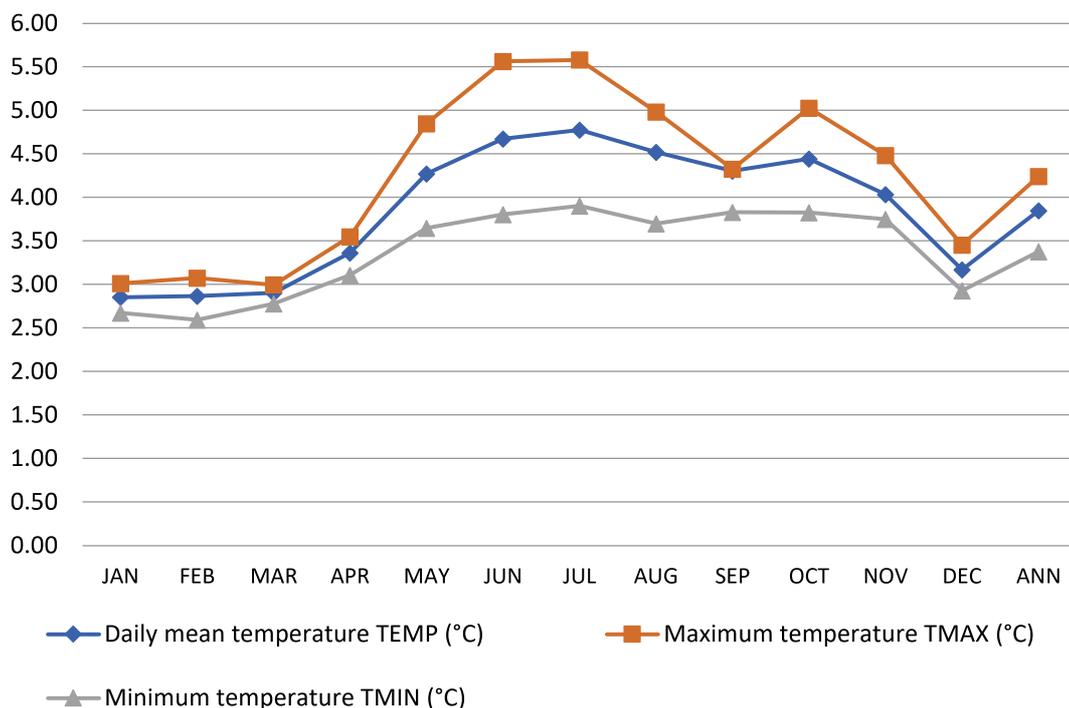
Gráfico 10: Variação média mensal de radiação solar horizontal em cenários 2050's.



Fonte: Autora a partir de CCWorldWeatherGen V1.9

Para o cenário 2080's observou-se que o mês de novembro apresentou aumento para temperatura máxima de 4,48°C, podendo ser um mês de combinação de altas temperatura e alta umidade relativa do ar, podendo ser necessária atenção às temperaturas de bulbo úmido neste período (Gráfico 11). O aumento das temperaturas se estendeu aos outros meses do ano. Nas variações mensais, as temperaturas máximas apresentaram aumento mínimo de 3,00°C (março), e as médias diárias apresentaram aumento mínimo de 2,85°C (janeiro), meses quentes do ano (Gráfico 11).

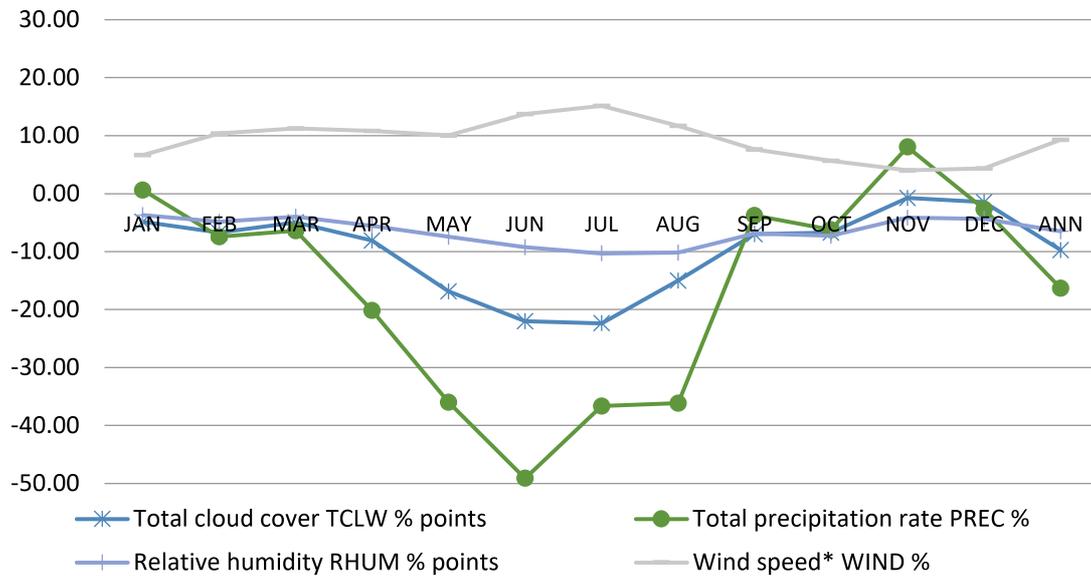
Gráfico 11: Variação média mensal e para temperaturas em cenários 2080's.



Fonte: Autora a partir de CCWorldWeatherGen V1.9

Observou-se ainda, grande aumento do período com redução da precipitação, ficando caracterizado apenas o mês de novembro como o período em que há aumento da precipitação (Gráfico 12). Consequentemente, redução de umidade relativa do ar e da cobertura de nuvens que se alongou para um período de 11 meses do ano, enquanto novembro tendeu a se tornar mês de eventos extremos de clima.

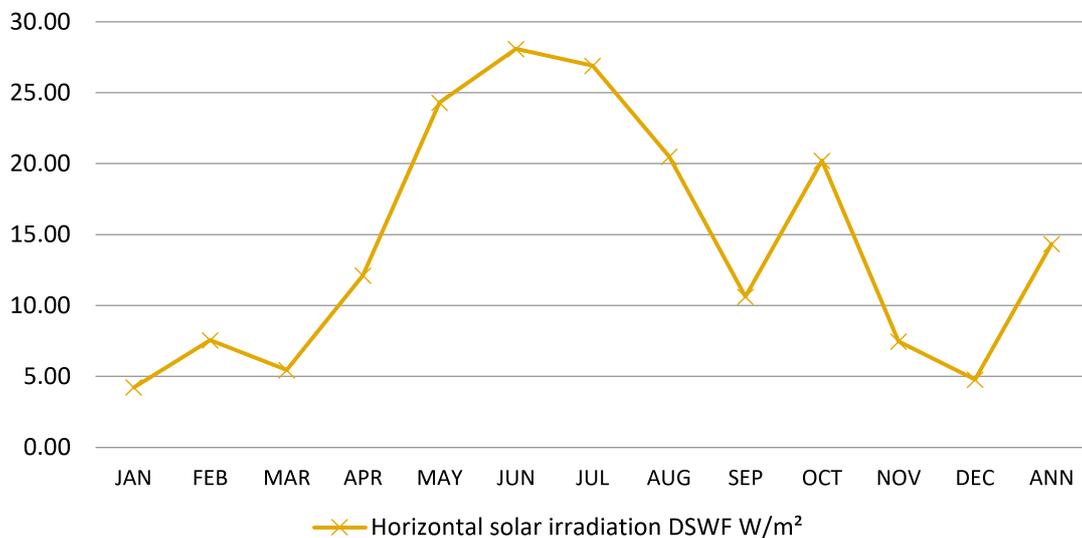
Gráfico 12: Variação média mensal de variáveis climáticas cobertura de nuvens, precipitação umidade relativa e velocidade de ventos em cenários 2080's.



Fonte: Autora a partir de CCWorldWeatherGen V1.9

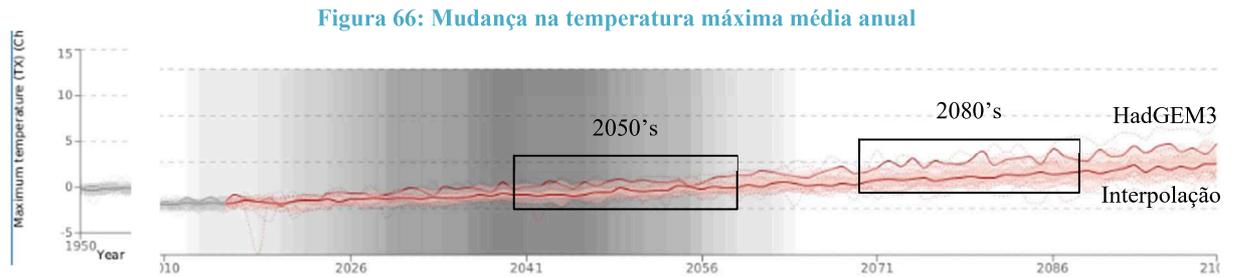
Também foi observado para o cenário 2080's que aumento ou redução da radiação global horizontal (Gráfico 13) acompanhou inversamente a curva de cobertura de nuvens.

Gráfico 13: Variação média mensal de radiação solar horizontal em cenários 2080's.



Fonte: Autora a partir de CCWorldWeatherGen V1.9

Embora os resultados das metamorfoses sejam obtidos a partir de dados de arquivo climático de baixa confiabilidade estatística os dados de temperatura máxima média anual para a região SES – Sudeste da América do Sul – se mostraram condizentes com os dados interpolados dos modelos matemáticos, e com os dados do modelo HadGEM3 disponibilizados pelo IPCC WGI *Interactive Atlas* para os *slices times* 2050's e 2080's, quando considerada como referência o período 1986-2005, mais próximo do período de registro do arquivo climático.



Fonte: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, (2022).

Estes resultados indicaram as alterações médias mensais a que as variáveis climáticas dos arquivos EPW “morfados” foram submetidas nos cálculos dos algoritmos de mudança, alongamento e da combinação entre mudança e alongamento no processo de transformação para cenários futuros de mudanças climáticas, a partir do EPW da WMO *Station* 868280, da cidade de Alegre-ES. Essas alterações foram utilizadas nas simulações de cenários de clima futuro, aos quais foram submetidos os modelos de referência e os modelos reais em estudo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de analisar o desempenho térmico de edificações em clima quente e úmido no Sul do Espírito Santo, foram realizadas comparações entre modelos de referência e modelos reais com base na metodologia da NBR 15575/2021, por meio da qual são consideradas as horas de ocupação de ambientes de permanência prolongada (APP), dentro da faixa de temperatura operativa (FT) definida normativamente, a partir da média anual da temperatura de bulbo seco (TBSm) do arquivo climático local.

Para isso foram considerados os indicadores normativos da temperatura operativa máxima (TOM_{ax}) e a sua variação admissível (Δ TOM_{ax}) e o percentual de horas dentro da faixa de temperatura operativa de APP (PHFT) e das unidades habitacionais (PHFT_{UH}).

Os modelos foram desenvolvidos com dois diferentes tipos de cobertura, sem ventilação no caso dos modelos sem TC, e com ventilação, a partir dos sistemas de cobertura mais observados no recorte amostral durante a Etapa 2 – Levantamento de Observação. E as análises se basearam em cenários atuais de clima e em projeções para climas futuros de altas emissões de GEE, de forma a compreender o potencial de utilização dos terraços capixabas (TC) como estratégia bioclimática passiva a ser aplicada em edificações novas e existentes.

Os resultados desta pesquisa foram acompanhados por análises no intuito de compreender como a utilização dos TC poderia influenciar no desempenho de edifícios em clima sob estresse térmico, no cenário atual e futuros, considerando a vida útil (VU) mínima de edifícios prevista para 50 anos. Os resultados expressaram os dados de simulação de 8 modelos geométricos, e as relações que foram observadas a partir das simulações comparativas entre modelos de referência e seus modelos reais, e entre os modelos reais que possuíam o mesmo modelo de referência a fim de perceber a nuances ocasionadas pelas variações implementadas de um para o outro.

A partir dos resultados obtidos em cenários de clima atual o modelo M_{nor}_T foi escolhido para as análises em cenários de clima futuro de altas emissões de GEE.

As comparações realizadas buscaram entender como os edifícios com TC se comportariam diante da consolidação das mudanças climáticas no decorrer de suas VU.

Os resultados foram apresentados em forma de gráficos, tabelas e quadros, expressando análises, anuais e sazonais para cenários de clima atual, inicialmente por UH e posteriormente, por APP para os quais foram utilizadas também imagens *heat maps*; e em forma de gráficos, tabelas e quadros para os cenários de clima futuro de altas emissões de GEE em análises anuais.

4.1. Desempenho térmico das UH em clima atual - anual.

A TBSm do arquivo climático foi 23,95°C, o que resultou na FT do Intervalo 1 (ver Quadro 1) como referência para a análise dos PHFT dos APP. Assim, com base na análise dos APP, foi calculado o percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa das unidades habitacionais (PHFT_{UH}).

Os resultados de simulação para desempenho dos modelos UH indicaram que o PHFT_{UH,ref} foi de 16,06%, e que dos 6 modelos tratados como reais ao longo da investigação, apenas o modelo M_{ref}_T não alcançou o nível de desempenho mínimo em relação ao seu modelo de referência devido ao não atendimento do critério do PHFT_{UH} maior que 0,9 do PHFT_{UH,ref} (Quadro 12).

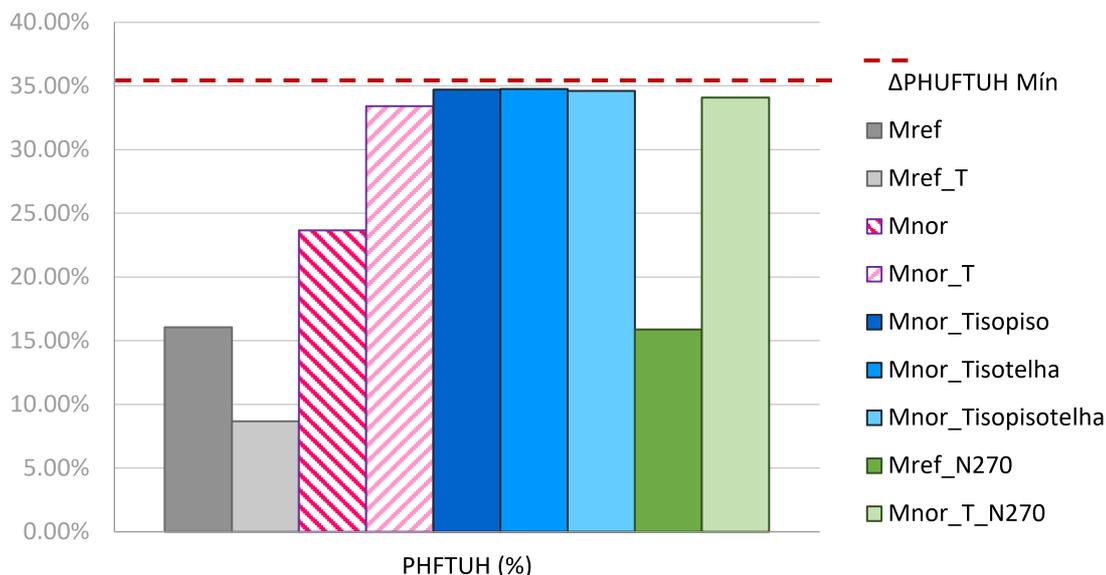
4.1.1. Análise anual do percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa entre unidades habitacionais (PHFT_{UH})

O modelo M_{nor}, sem terraço capixaba, e todos os demais modelos com terraço capixaba comparados ao M_{ref} atenderam aos critérios de variação de temperatura operativa máxima (Δ TOM_{ax}) admissível de 2°C, e de PHFT_{UH}.

Dentre os modelos que alcançaram o desempenho mínimo, nenhum alcançou o incremento mínimo do $PHFT_{UH}$, de 35,69%, definido pelo ábaco contido no Anexo 2, não obtendo assim, o desempenho intermediário sob condição de clima atual.

O Gráfico 14 apresenta os $PHFT_{UH}$ alcançados pelos modelos de referência, e pelos modelos reais, em comparação com o incremento mínimo (destaque tracejado vermelho) que deveria ser alcançado para o atendimento aos critérios em nível intermediário.

Gráfico 14: Percentual de horas dentro da faixa de temperatura operativa dos modelos de UH ($PHFT_{UH}$).



Os melhores resultados de $PHFT_{UH}$ foram alcançados pelos modelos que apresentavam camada de material isolante na composição do sistema de cobertura. O melhor resultado foi obtido pelo modelo com isolamento imediatamente abaixo da telha (34,76%). Entretanto, existe grande aproximação entre os resultados dos modelos com isolamento e dos modelos Mnor_T (33,41%) e Mnor_T_N270 (34,09%).

Duas considerações sobre esses resultados. A primeira entre os resultados de Mref e os modelos com terraço capixaba (Mnor_T; Mnor_Tisopiso; Mnor_Tisotelha; Mnor_Tisopisotelha; Mnor_T_N270). Todos os modelos com TC apresentaram $PHFT_{UH}$ acima do dobro do percentual do modelo com cobertura isolada não ventilada.

A segunda refere-se aos resultados obtidos pelos modelos com terraço capixaba. Dentre os 5 modelos com maiores percentuais todos apresentaram TC, sendo que a diferença entre o de maior e o de menor percentual é menor que 2% do $PHFT_{UH}$. Esta aproximação dos resultados permitiu inferir, que para o clima local, a capacidade de interferência e melhoria nos resultados de desempenho térmico da Unidade Habitacional (UH) destes sistemas de coberturas está próxima ao limite. E que o terraço capixaba sem isolamento respondeu à altura dos modelos com TC e camadas de isolamento.

Também ficou evidenciado pelos valores próximos entre Mref e Mref_N270 que para o modelo de referência, no clima local, a rotação do eixo do Norte Verdadeiro em 270° na tentativa de retirar as aberturas da orientação Oeste não obteve êxito com melhoria substancial do desempenho térmico da UH.

Este resultado pode estar relacionado com a compacidade do edifício associada ao reduzido potencial de resfriamento por meio da ventilação de conforto, higiênica e noturna. No clima local, deficiente em ventilação natural. Edifícios de menor porte com APP em quantidade e tamanhos reduzidos podem não sofrer grande benefício por parte da geometria solar, dada a natureza dos fenômenos de transferência de calor no ambiente construído na ausência de protetores solares.

Se durante o dia a temperatura externa do ar é elevada, e a abertura para a ventilação natural expõem o ambiente construído às condições externas, à noite as baixas velocidades de vento, como indicado pela Figura 35, pelo Quadro 5 e pela

Tabela 1, não imputam condições de trocas térmicas suficientes ao ambiente construído como um todo. Embora possa ter ocorrido melhoria no desempenho de APP específico, o resultado final da UH não expressou grande variação.

O desempenho térmico de Mnor_T alcançou mais que o dobro em PHFT que Mref; que possui a camada de isolamento na cobertura. O que também ocorreu entre Mnor_T_N270 e Mref_N270, modelos de referência e real na comparação com o Norte Verdadeiro rotacionado em 270°.

O menor desempenho térmico no Mref_T, com a mesma área de elementos transparentes (ET) e mesma área para ventilação do Mref, indicou que o terraço capixaba não foi capaz de proporcionar melhorias no desempenho térmico por si só no clima local.

O aumento no PHFT_{UH} no Mnor, em decorrência do aumento das aberturas de ventilação, reforça a ideia da necessidade de exfiltração de ar quente e realização da troca de calor por meio da ventilação nos ambientes construídos, independente do sistema de cobertura. Entretanto, a associação entre o aumento de área de ventilação e o uso do TC melhora em aproximadamente 10 pontos percentuais o resultado de desempenho térmico da UH no Mnor_T, incrementando o PHFT com o uso da estratégia terraço capixaba, mesmo na condição deficiente do clima local quanto à ventilação.

Assim o TC foi capaz de melhorar o resultado alcançado com o aumento da área de ventilação.

Com esses resultados, considerando a correlação entre desempenho térmico e a eficiência energética da envoltória estabelecida entre a NBR 15575/2021 e INI-R, os modelos considerados reais alcançariam no máximo classificação energética em nível C, pois atendem ao nível mínimo de desempenho. Única exceção seria o modelo Mref_T, que ficaria com classificação E.

A fim de analisar de forma mais minuciosa este incremento, ocasionado pela combinação do aumento das aberturas de ventilação e da utilização dos terraços capixabas, foram recortadas e apresentadas graficamente as TO dos APP Sala, Q1 e Q2 dos modelos Mref, Mnor e Mnor_T de forma paralela, em análises anuais.

4.1.2. Análise anual das TO dos APP de Mref, Mnor e Mnor-T

Para a análise anual das temperaturas operativas (TO) foram configurados 3 gráficos com os dados anuais dos modelos. O Gráfico 15 apresenta as TO dos APP em Mref; o Gráfico 16 as TO dos APP em Mnor; e o Gráfico 17 as TO dos APP em Mnor_T.

A partir do Gráfico 15 foi possível observar a progressiva redução das temperaturas operativas mais elevadas nos períodos de maior estresse climático, na comparação com Mnor e, posteriormente, de Mnor para Mnor_T.

As TO mais elevadas, em destaque vermelho, sofreram reduções que puderam ser observadas do gráfico de Mref para o gráfico de Mnor, indicando a atuação da ventilação nos APP, especialmente observadas nas reduções das temperaturas acima de 29°C.

As reduções das temperaturas operativas menos elevadas do mesmo período, em destaque tracejado vermelho, também foram percebidas no gráfico de Mref para Mnor, mas sofreram redução mais perceptíveis de Mnor para Mnor_T, indicando que o TC pode atuar com maior eficiência em resultados de TO acima de 26,5°C e abaixo de 29°C do modelo de referência. Além disso, o TC colaborou para que as TO máximas e mínimas do período de maior estresse climático fossem reduzidas e se aproximassem do limite superior da FT (26°C), em períodos mais quentes do ano.

Os destaques em vermelho foram posicionados na posição semelhantes em relação as temperaturas supracitadas a fim de facilitar a comparação.

Gráfico 15: Temperaturas operativas de APP em Mref com sobreposição da TBS do arquivo climático

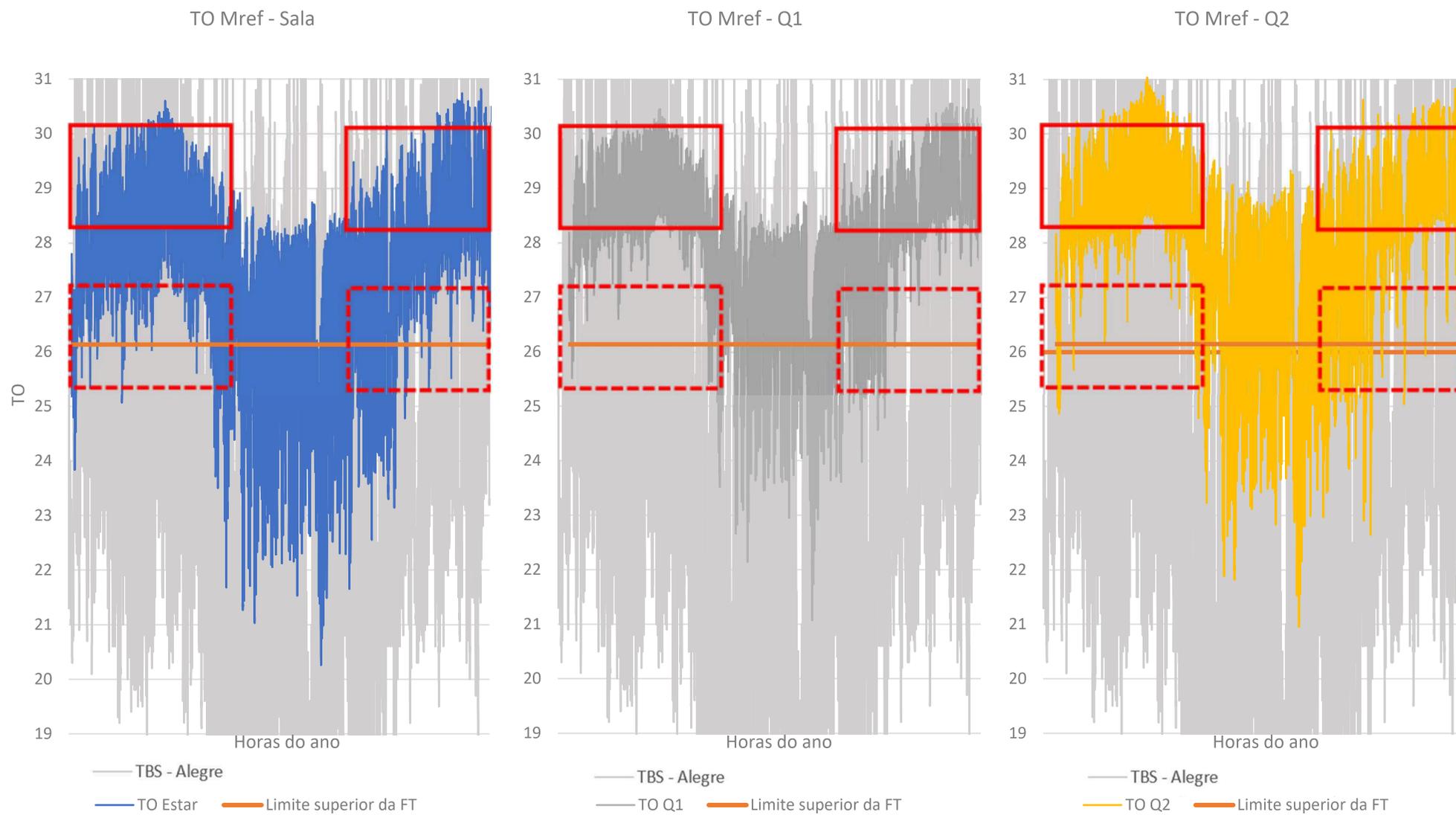


Gráfico 16: Temperaturas operativas de APP em Mnor com sobreposição da TBS do arquivo climático

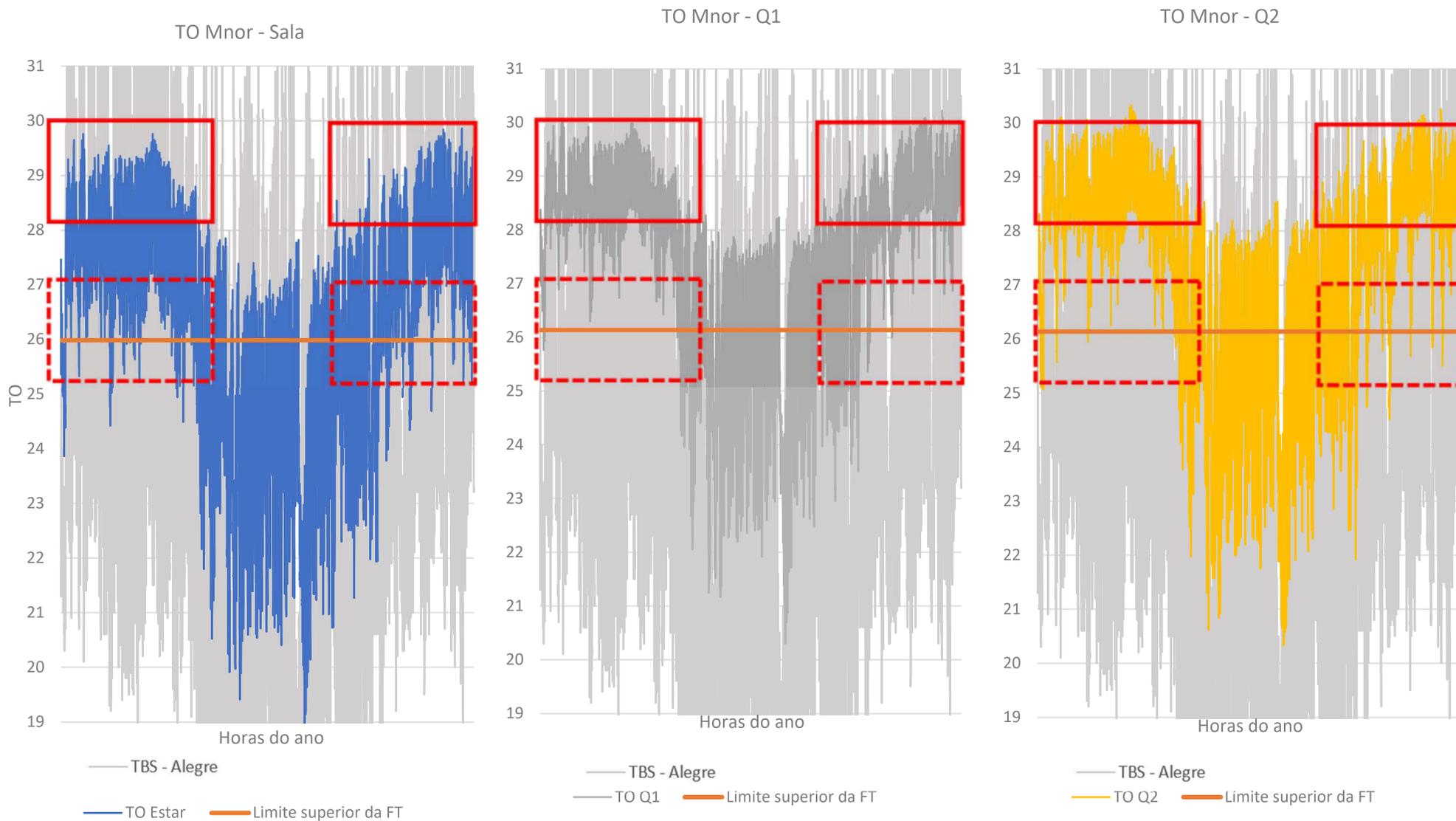
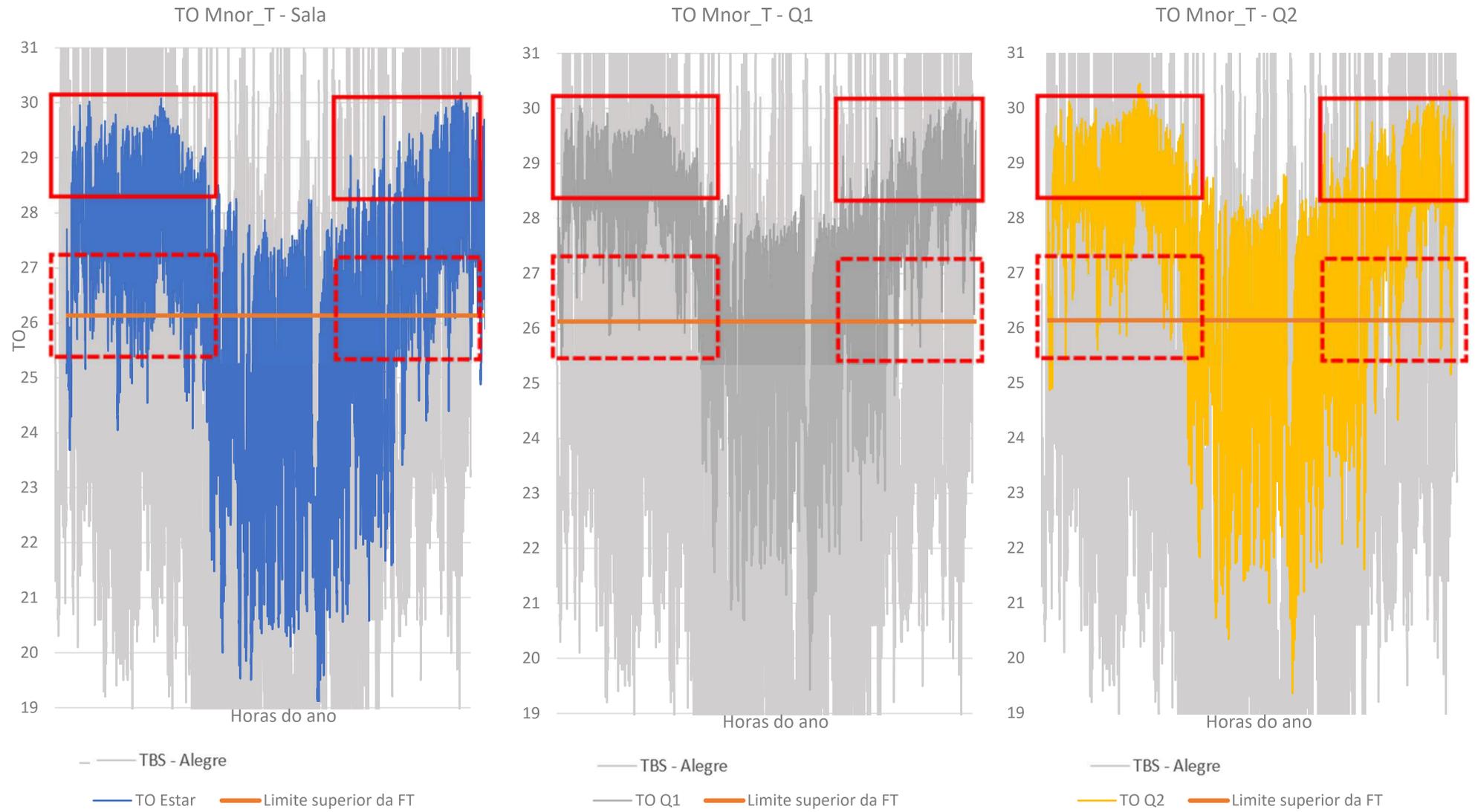


Gráfico 17: Temperaturas operativas de APP em Mnor_T com sobreposição da TBS do arquivo climático.



No gráfico de Mnor foram observadas melhorias, atribuídas ao aumento das áreas de ventilação, tanto nas reduções das TO mais elevadas, como na redução das TO menos elevada do período de maior estresse climático, e esta tendência é mantida em Mnor_T, com visível aumento das horas com TO pouco acima de 27°C nos APP, sobretudo no início do ano e na região do mês de setembro, especialmente em Q1 e Q2, que são dormitórios, usados em horário de menor velocidade de vento na região do estudo.

Nos períodos do ano de maior significância para o estudo, houve maior número de horas com TO cujos valores se posicionavam abaixo de 25°C, especialmente nos ambientes Sala e Q2, que receberam sol sobre as superfícies externas no período vespertino.

Para comparar de forma mais expressiva as nuances observadas os dados de TO foram pareados por APP. Desta forma foram analisados de forma paralela os APP Sala, Q1 e Q2 e os seus resultados dos três modelos.

Pareamento do APP Sala:

O APP Sala, exposto ao sol em orientação Oeste, apresentou redução das TO mais elevadas de Mref para Mnor, e, embora a simulação tenha apresentado pequeno aumento nessas temperaturas de Mnor para Mnor_T, ocorreu a redução das TO menos elevadas principalmente no período inicial do ano, aproximando essas TO do limite superior de 26°C (Gráfico 18). Ou seja, o terraço capixaba tratou as temperaturas que estavam abaixo de 27,5°C, indicando que a estratégia pode possuir limite de resposta e funcionalidade definido por temperatura no clima local.

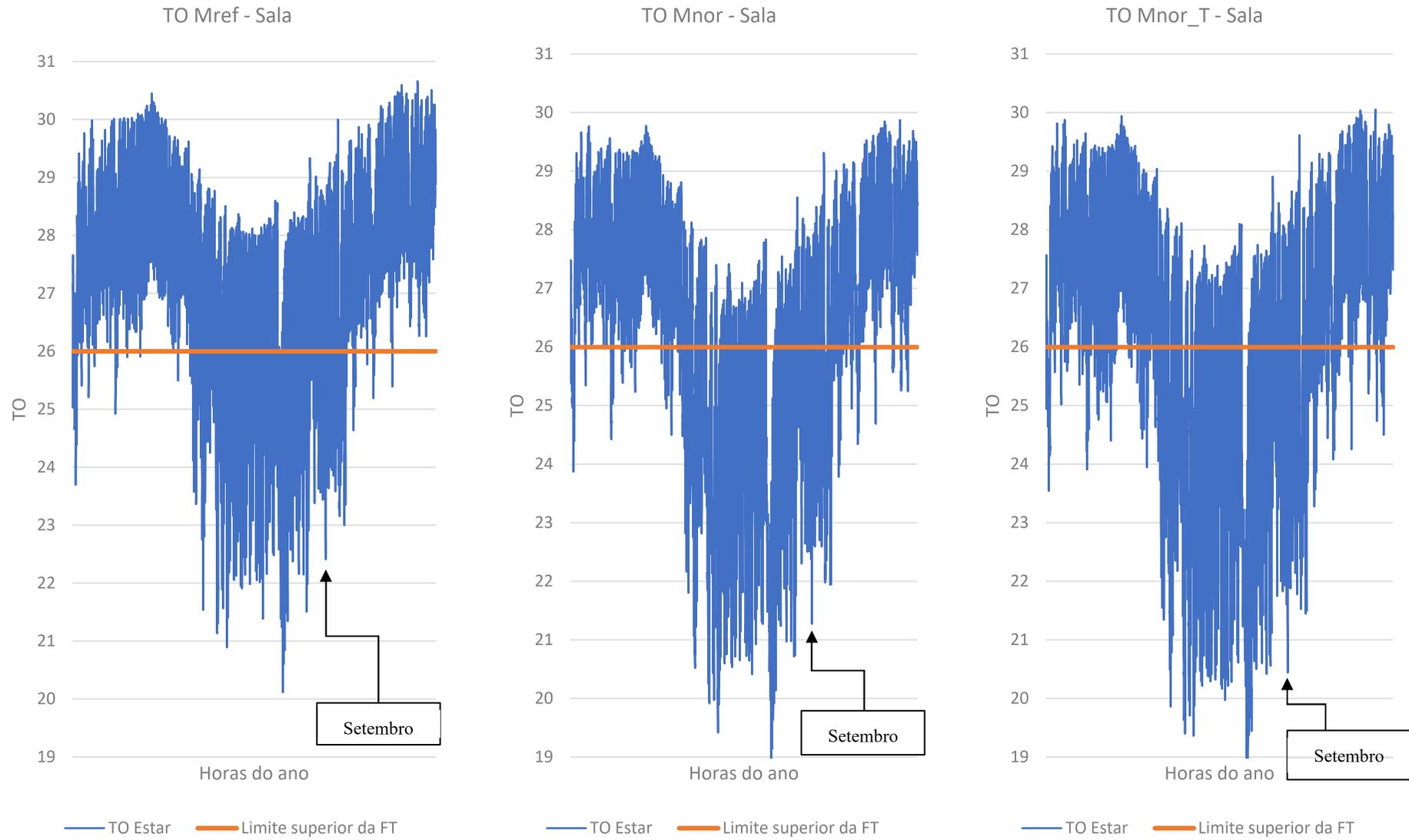
Embora seja um APP desfavorecido pela orientação e pelo aumento da área de vidro em orientação Oeste no modelo Mnor, o APP Sala é o ambiente com melhor condição de ventilação cruzada, e os meses de março e o bimestre novembro-dezembro, períodos estatisticamente mais chuvosos, apresentaram as maiores reduções das TO menos elevadas, o que pode ser considerado positivo, uma vez que a estratégia aproximou os resultados do limite superior de pontuação para o PHFT.

Com maior aproximação do limite superior da FT em Mnor_T obteve-se indicação da melhoria progressiva do desempenho com a utilização da estratégia terraço capixaba, mesmo nos períodos quentes de maior umidade.

Este gráfico também apresentou a progressiva redução das TO mais elevadas no APP Sala, entretanto, observou-se que para temperaturas acima de 29°C em Mref houve estagnação da redução da temperatura, ou pequeno aumento de Mnor para Mnor_T, reafirmando um possível limite de atuação dado pela temperatura.

Mostrou-se necessário o destaque sobre a situação do período anual de melhor ventilação natural no clima local indicado no gráfico. A informação referenciada no gráfico com o apontamento da hora 6102, 5 h da manhã do dia 12 de setembro (setembro no gráfico) indicou a possibilidade redução das temperaturas ocasionada pela melhor condição climática de ventos também no modelo com TC. Ou seja, a especificidade do recorte amostral e da pesquisa quanto ao clima instigaram que estudos semelhantes sejam realizados em outras condições climáticas a fim de verificar as respostas sob melhores condições de ventilação.

Gráfico 18: Temperaturas operativas do APP Sala em Mref, Mnor e em Mnor_T



A expressão da temperatura em leitura horária para o APP Sala também foi apresentada nos *heat maps* da Figura 67 até a Figura 69, por meio do qual foi possível observar que para esse APP os horários entre 15 h e 24 h são desafiadores em todos os modelos, mesmo em Mref, no qual se observou a continuidade das temperaturas entre 29°C e 30°C até o fim das horas do dia, não havendo horas com TO dentro da FT em nenhum dos modelos; embora tenha ocorrido progressivo amortecimento das temperaturas até Mnor_T, isto ocorreu principalmente fora do horário de uso deste APP, nos períodos da madrugada, quando a velocidade de vento é menor.

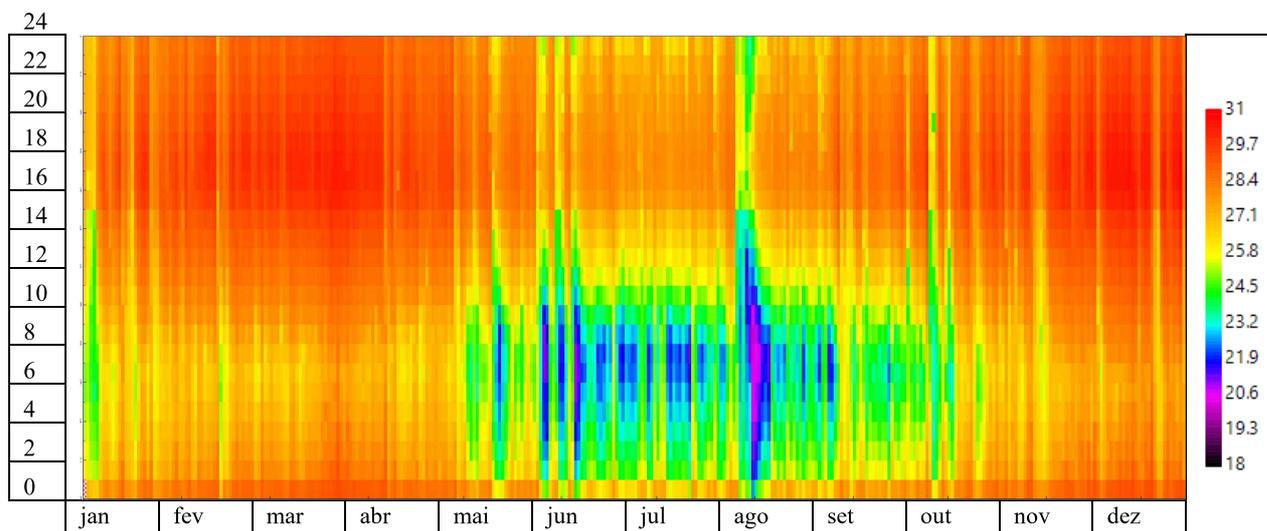


Figura 67: Heat map anual APP Sala em Mref – relação hora-temperatura.

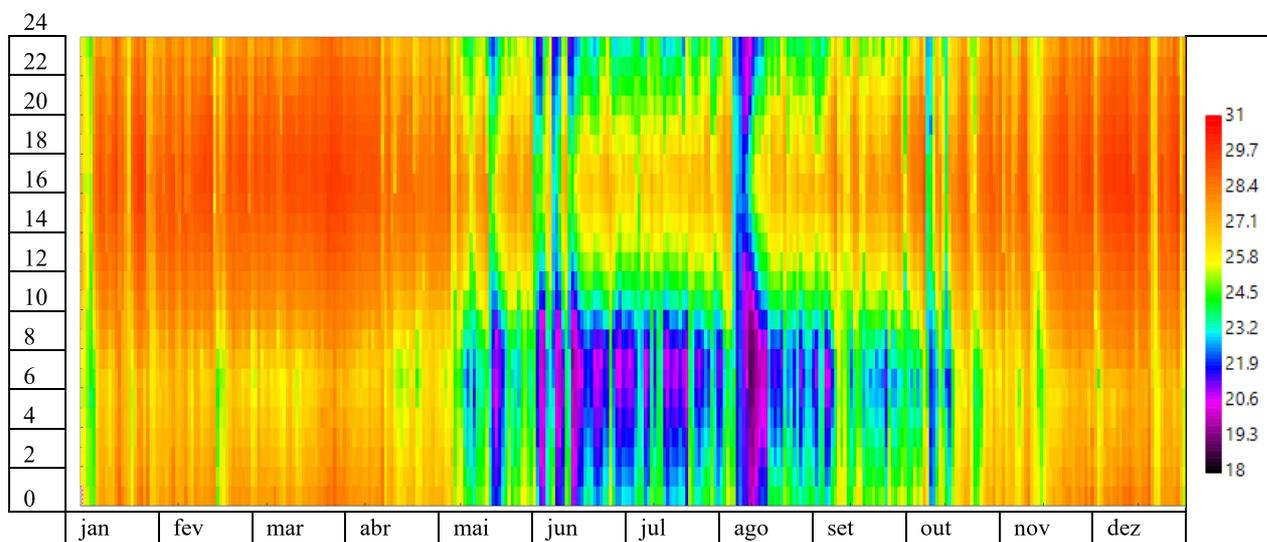


Figura 68: Heat map anual APP Sala em Mnor – relação hora-temperatura.

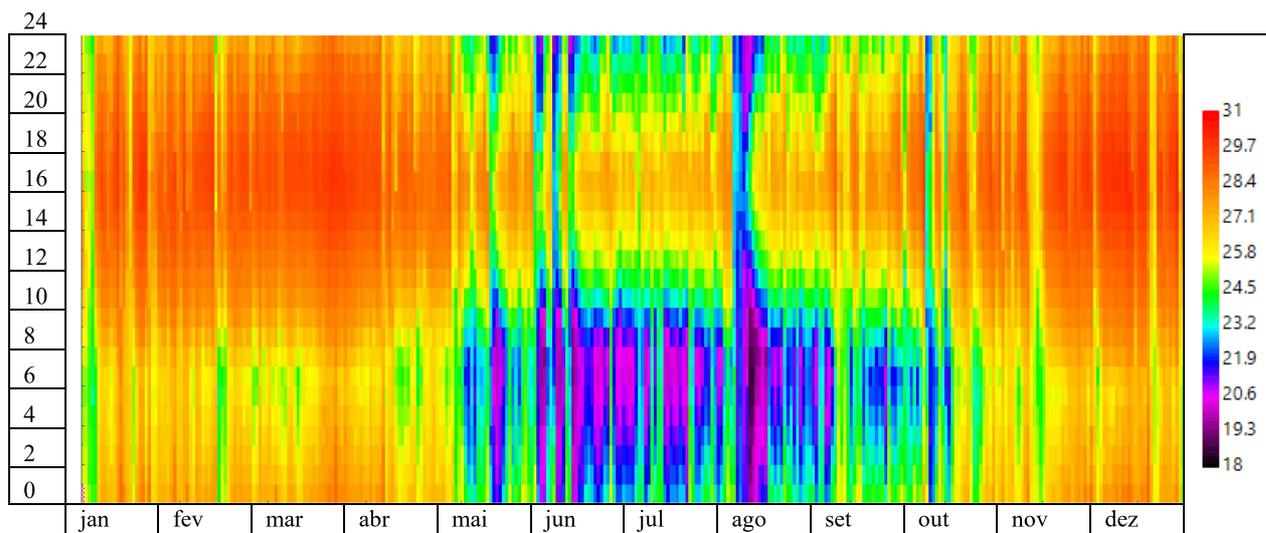


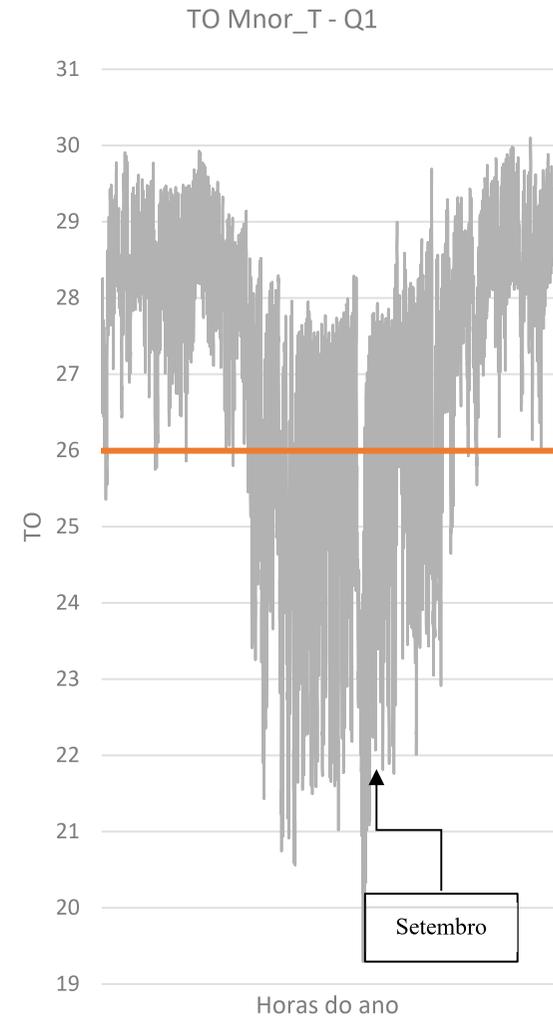
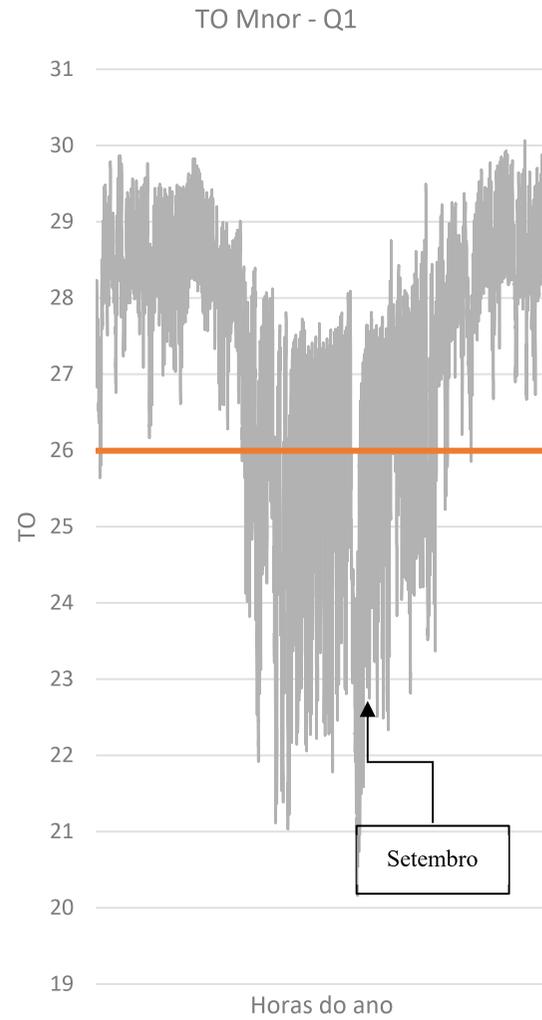
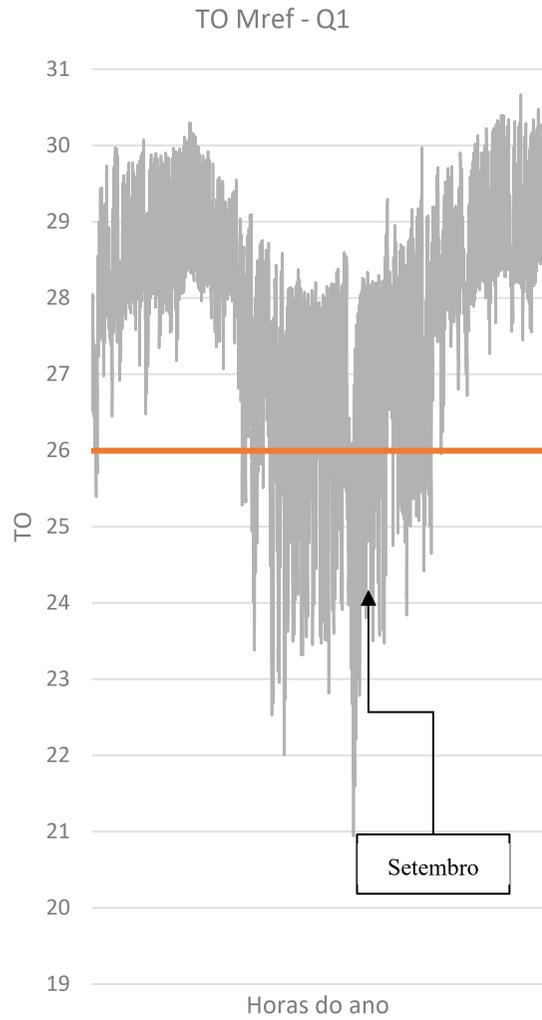
Figura 69: Heat map anual APP Sala em Mnor_T- relação hora-temperatura.

Pareamento do APP Q1

No APP Q1, cuja abertura está voltada para o sul, com auto-sombreamento a Oeste, a comparação foi realizada por meio do Gráfico 19. O APP Q1 não apresenta superfícies expostas em orientação Norte, e apresenta melhor condição em relação à direção do vento deste estudo.

Mesmo assim, as temperaturas mais elevadas continuaram altas do modelo Mnor para Mnor_T, e novamente a redução mais significativa das TO ocorreu nas TO menos elevadas do período mais quente do ano, com valores entre 26°C e 29°C. Mais uma vez foi possível observar que, no mês de setembro ocorre um pequeno decaimento das TO menos elevadas.

Gráfico 19: Temperaturas operativas do APP Q1 em Mref, Mnor e em Mnor_T



— TO Q1 — Limite superior da FT

— TO Q1 — Limite superior da FT

— TO Q1 — Limite superior da FT

Para o APP Q1 a expressão da temperatura em leitura horária foi apresentada nos *heat maps* da Figura 70 até a Figura 72, sendo possível observar que para esse APP os horários entre 20h e 22h são os mais desafiadores dentro do período de ocupação nos três modelos. No período da madrugada as TO variam entre 27°C e 25°C, ocorrendo o progressivo amortecimento das temperaturas até Mnor_T, o que, ao contrário do APP Sala, ocorreu principalmente dentro do horário de uso deste APP, nos períodos da madrugada.

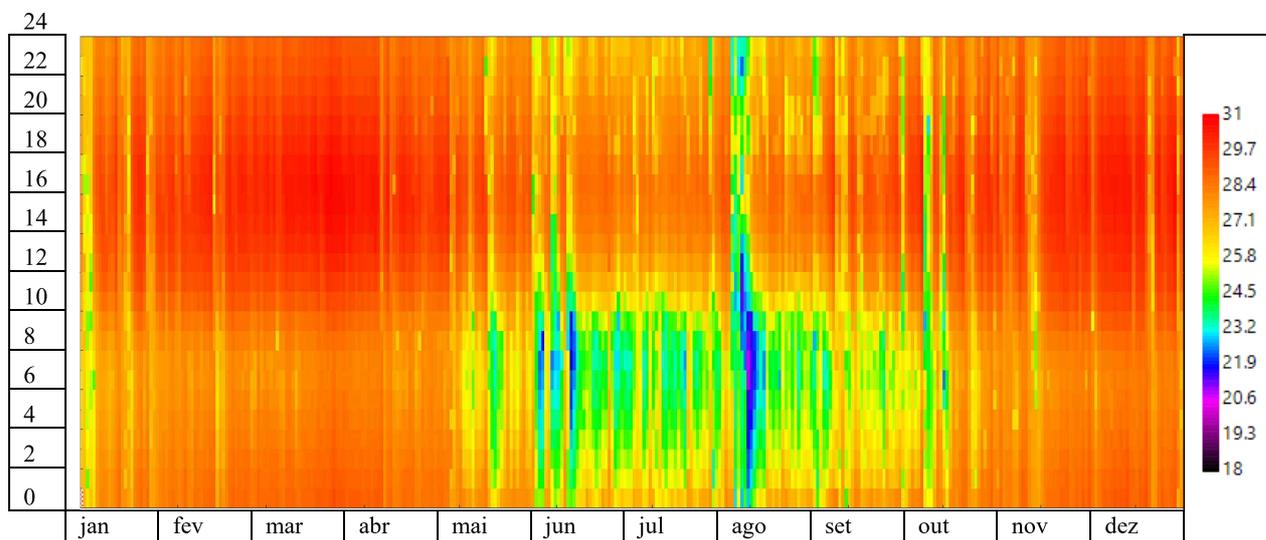


Figura 70: Heat map anual APP Q1 em Mref – relação hora-temperatura.

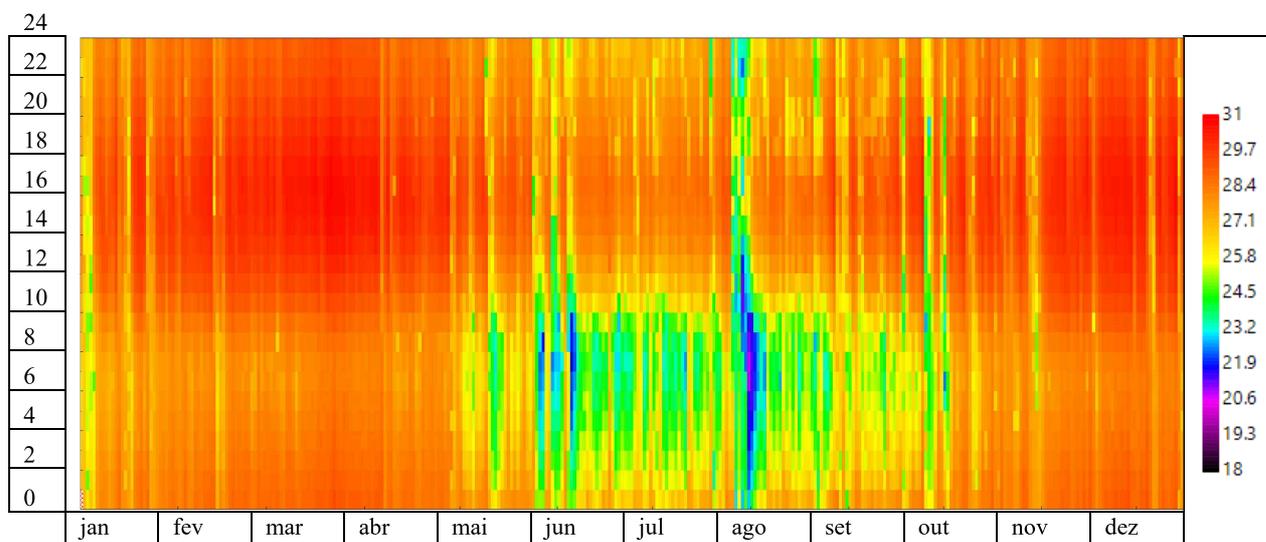


Figura 71: Heat map anual APP Q1 em Mnor – relação hora-temperatura.

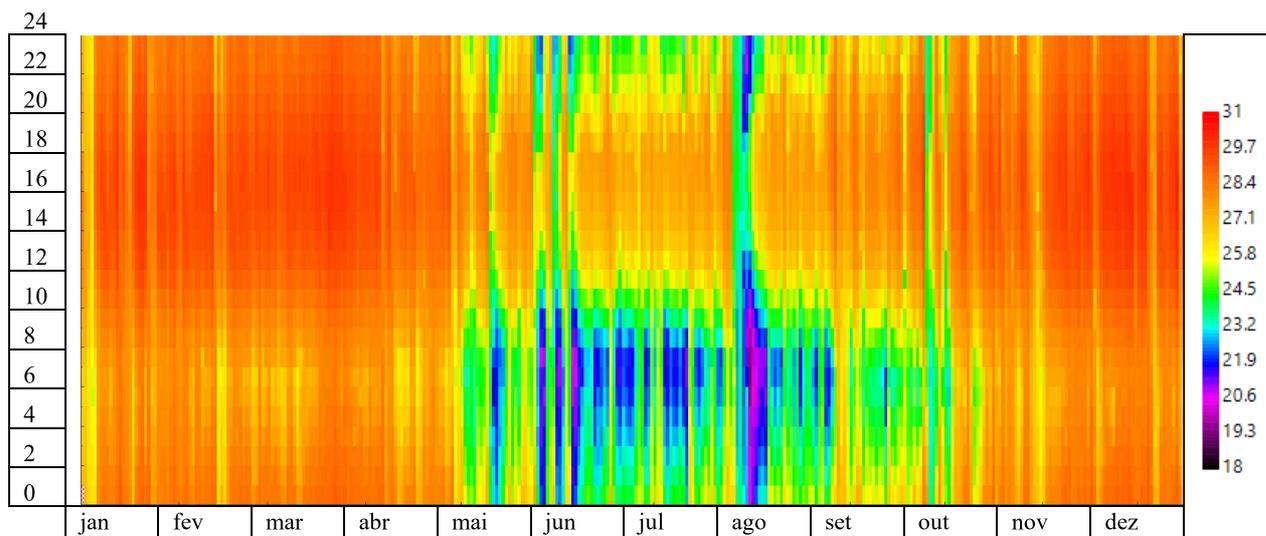


Figura 72: Heat map anual APP Q1 em Mnor_T – relação hora-temperatura.

Embora as reduções de TO no APP Q1 tenham sido mais discretas que a ocorrência no APP Sala, observou-se a mesma tendência percebida anteriormente, com maior redução das TO nos períodos mais significantes do ano, possivelmente ocasionado pela melhor condição de ventilação e pela não exposição das vedações verticais externas ao sol no período vespertino neste APP.

A TO média do APP Q1 no período setembro-dezembro é de 28,45°C no Mref, e 27,94°C no Mnor, e de 27,83°C no mesmo período no Mnor_T, indicando a melhoria progressiva do indicador.

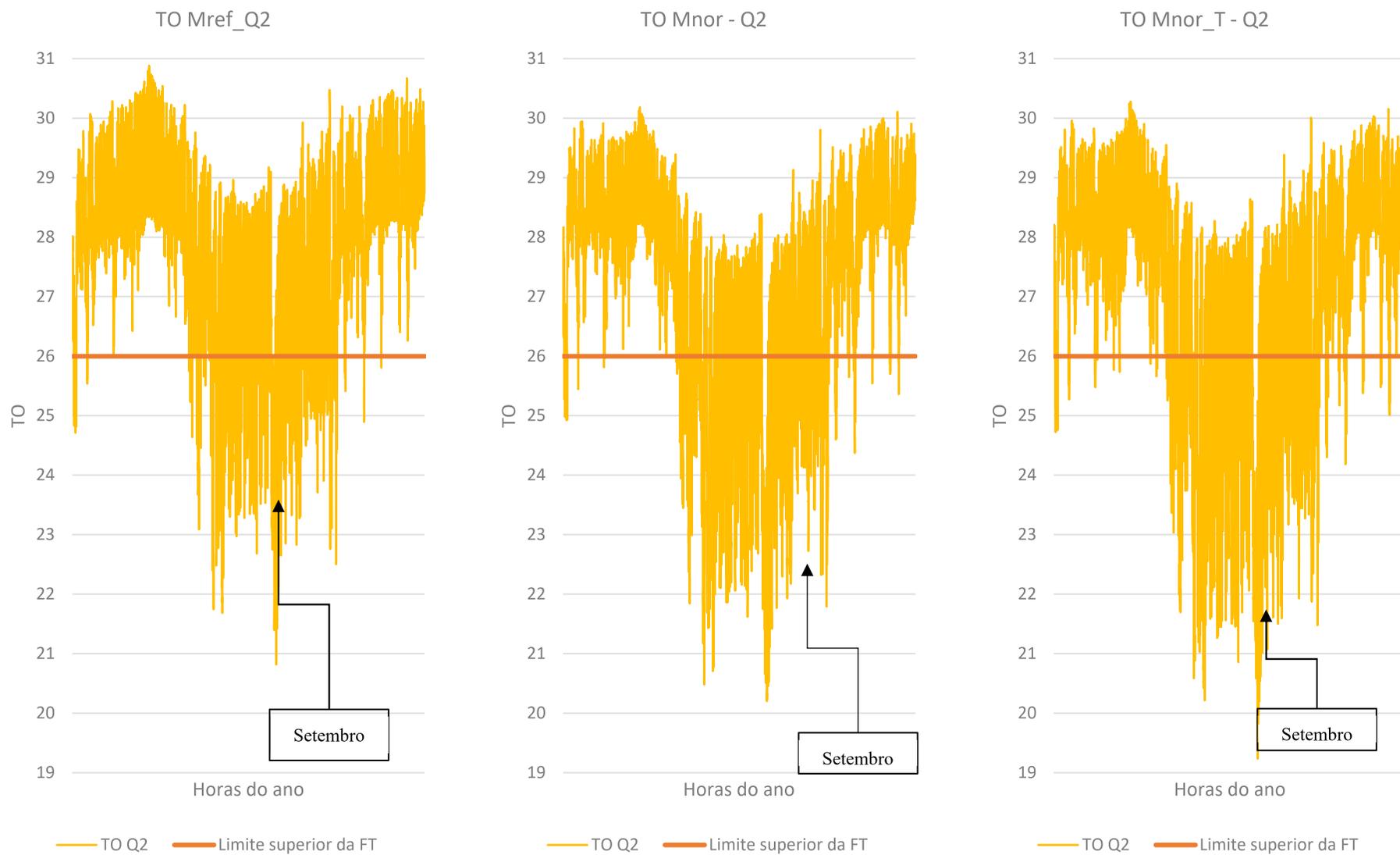
É importante destacar que na situação específica de Q1 e Q2, o horário de ocupação desses ambientes ocorreu no período noturno, estatisticamente o período do dia com a pior condição de vento ao longo de todo o ano. Em ambos os casos, observou-se melhores resultados a partir da primavera, como mostrou o Gráfico 19, do APP Q1, e o Gráfico 20, referente ao APP Q2 na sequência.

Pareamento do APP Q2:

O APP Q2, recebe sol em seu sistema de vedação vertical em orientação Norte, em contrapartida apresenta abertura voltada para o Leste, o que é favorável à ventilação do estudo. Mesmo assim, as TO continuaram altas do modelo Mnor para Mnor_T, com pouca percepção de variação nas TO mais elevadas nesses dois modelos.

Diferentemente do que ocorreu nos APP anteriores, no APP Q2 foi difícil perceber variação entre os gráficos de Mnor e Mnor_T (Gráfico 20), e as poucas variações observadas, ocorreram principalmente na região gráfica referente ao início do ano, até proximidades do mês de março e nas TO menos elevadas do período de inverno (meio do gráfico).

Gráfico 20: Temperaturas operativas do APP Q2 em Mref, Mnor e em Mnor_T



A expressão da temperatura em leitura horária do APP Q2 foi apresentada nos *Heat maps* da Figura 73 e Figura 74, comparando apenas os APP dos modelos Mref e Mnor_T, haja vista a similaridade entre Mnor e Mnor_T. Na comparação foi possível observar que entre as 0h e 6h ocorreu maior redução das temperaturas na região fevereiro-março, confirmando a impressão dos gráficos anteriores.

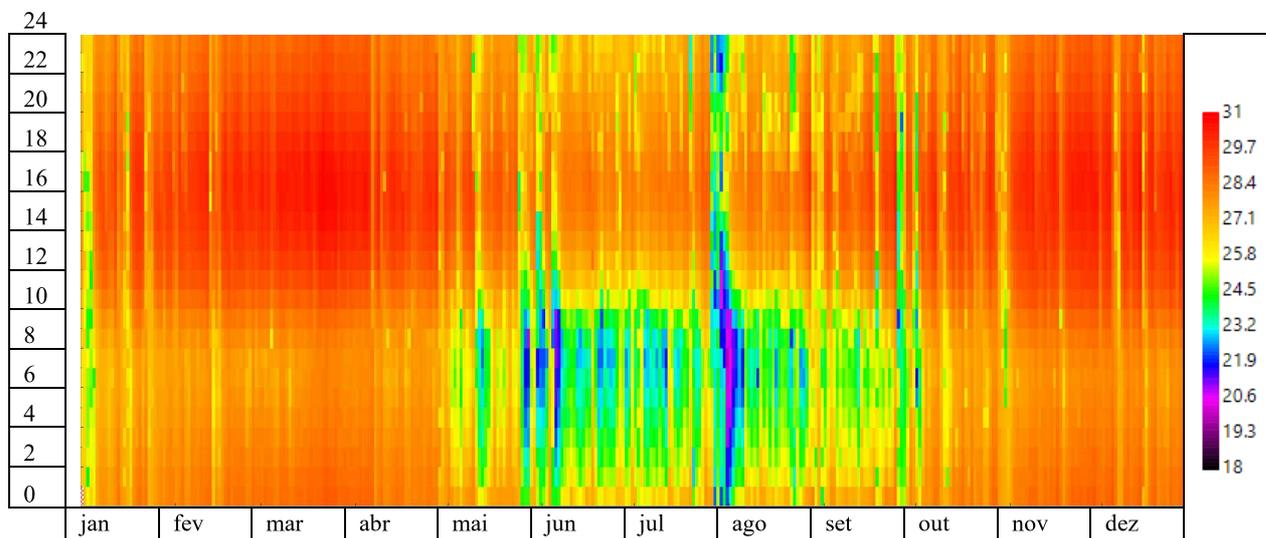


Figura 73: Heat map anual APP Q2 em Mref – relação hora-temperatura.

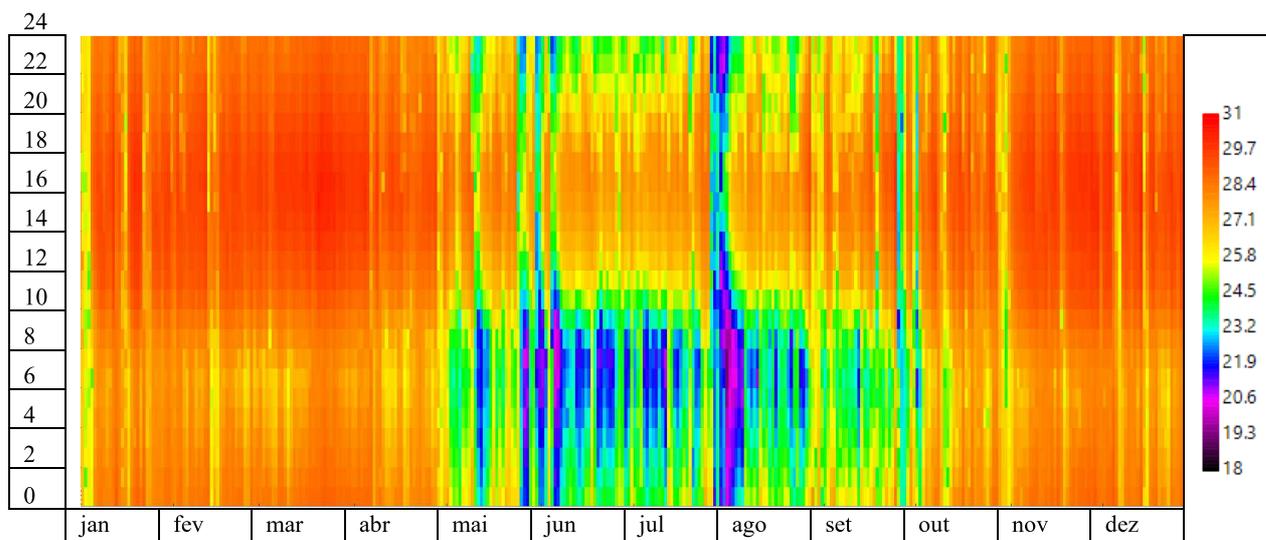


Figura 74: Heat map anual APP Q2 em Mnor_T – relação hora-temperatura.

Sobre a variável vento é importante lembrar que a condição de maior velocidade ocorreu entre às 15h e as 17h, nas proximidades do pôr do sol, o que pode se apresentar como um agravamento à condição local de clima, pois neste horário ocorrem ventos quentes e posteriormente a movimentação do ar é reduzida, o que não contribuiu para a retirada de calor dos APP de imediato. Com o pôr do sol observou-se que a ventilação natural incorreu muito próxima à calmaria. Fazendo menção à Figura 35, o que se espera para o clima local é a descida do ar pelas laterais do vale, fluxo de descida, e o início do termociclo transversal e inverso ao vale com fluxo de subida (mais lento), decorrente das diferenças de pressão das massas de ar das regiões de vales e de cristas das montanhas da região.

Mesmo assim, em todas as simulações o terraço capixaba retornou TO muito altas até à madrugada, o que pode não condizer com a realidade local após o pôr do sol, de forma que o calor

não retirado do terraço capixaba na simulação pode ter interferido nos resultados de todos os APP, especialmente nos períodos mais quentes do ano no turno noturno. No caso de coberturas ventiladas resultados mais confiáveis seriam obtidos por meio de medição *in loco*.

Em análise mais minuciosa dever-se-ia considerar a complexidade dos processos de condução e convecção e as limitações que os processos matemáticos de simulação carregam.

Na tentativa de compreender melhor o desempenho do terraço capixaba nos períodos de maior estresse climático da primavera e do verão e identificar como responderia sob condição de temperaturas mais altas, congruente aos resultados dos processos de mudanças climáticas previstos para região, os resultados de desempenho térmico foram tratados e analisados com base nas TO dentro da FT, como indicado pelo procedimento normativo, em períodos sazonais de setembro-dezembro (SetDez) e de janeiro-março (JanMar).

Foram consideradas para o período JanMar¹⁷ analisado, o total de 2160 horas e para o período SetDez, 2928 horas do ano, totalizando para os dois períodos sazonais 5.088 horas, das 8760 horas do ano, considerando as horas de ocupação relativas aos seus respectivos períodos e tipos de APP.

4.1.3. Análise sazonal do percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa das unidades habitacionais (PHFT_{UH})

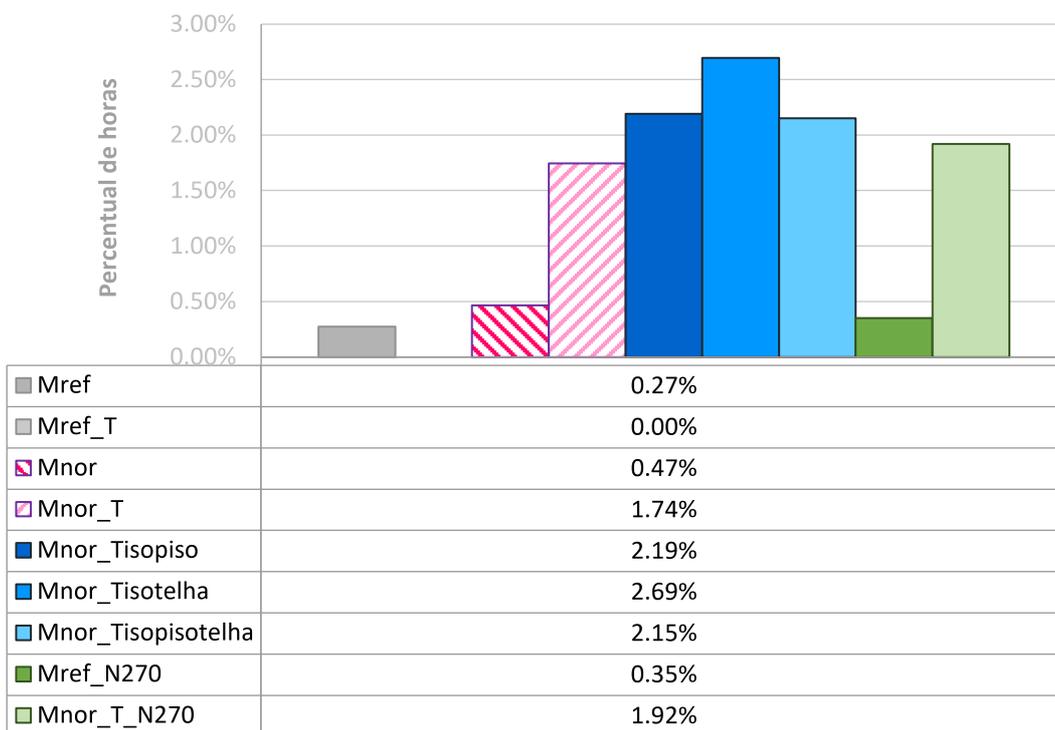
As análises sazonais foram realizadas em etapas, devido, principalmente, a sutil diferença na condição de vento que está registrada no arquivo de estatísticas da estação meteorológica entre o período de primavera e verão (

Tabela 1), e aos resultados percebidos nas análises das TO dos APP em Mref, Mnor e Mnor_T. Inicialmente foi analisado o período sazonal janeiro-março (JanMar), conseguinte o período setembro-dezembro (SetDez) e posteriormente o período sazonal integral de primavera e verão. Para cada porção do período sazonal a análise foi dividida em: 1) Unidade habitacionais (UH); 2) APP das UH.

Ao final foram apresentados os resultados de Mref, Mnor e Mnor_T para o período sazonal integral, considerando, mais uma vez, as melhorias observadas nas análises anuais, e a proximidade entre Mnor_T e o terraço capixaba popularmente construído.

Na análise específica para o período JanMar (Gráfico 21) foi possível observar tendência semelhante à análise do período anual apresentada pelo Gráfico 14. De forma que os modelos que apresentavam maiores áreas de ventilação incrementaram melhor o PHFT_{UH} também no início do ano (Gráfico 21), ou seja, a melhoria do PHFT_{UH} apresentou relação direta com o aumento das áreas de abertura para ventilação também neste período. Nesta análise, Mref respondeu com apenas 0,26% das horas dentro da faixa de temperatura (FT) e Mref_N270 com 0,33%.

¹⁷ Ver sobre inconsistência do arquivo climático para o período sazonal JanMar no Apêndice 4.

Gráfico 21: PHFT_{UH} sazonal JanMar.

O modelo Mref_T, não apresentaram horas dentro da FT no período sazonal, e Mnor apenas 0,44%. Estes resultados também sugeriram que, sem melhoria na condição de ventilação e sob temperaturas mais altas, o terraço capixaba pode piorar, ainda que pouco, as respostas para desempenho térmico da edificação. O que pode estar associado à dinâmica dos fluidos, uma vez que o aumento da altura de obstáculos a serem vencidos por massa de ar de pouca velocidade, ocasionado pela camada dupla da cobertura, pode ampliar o retardo na dissipação de calor principalmente dos APP do tipo dormitório.

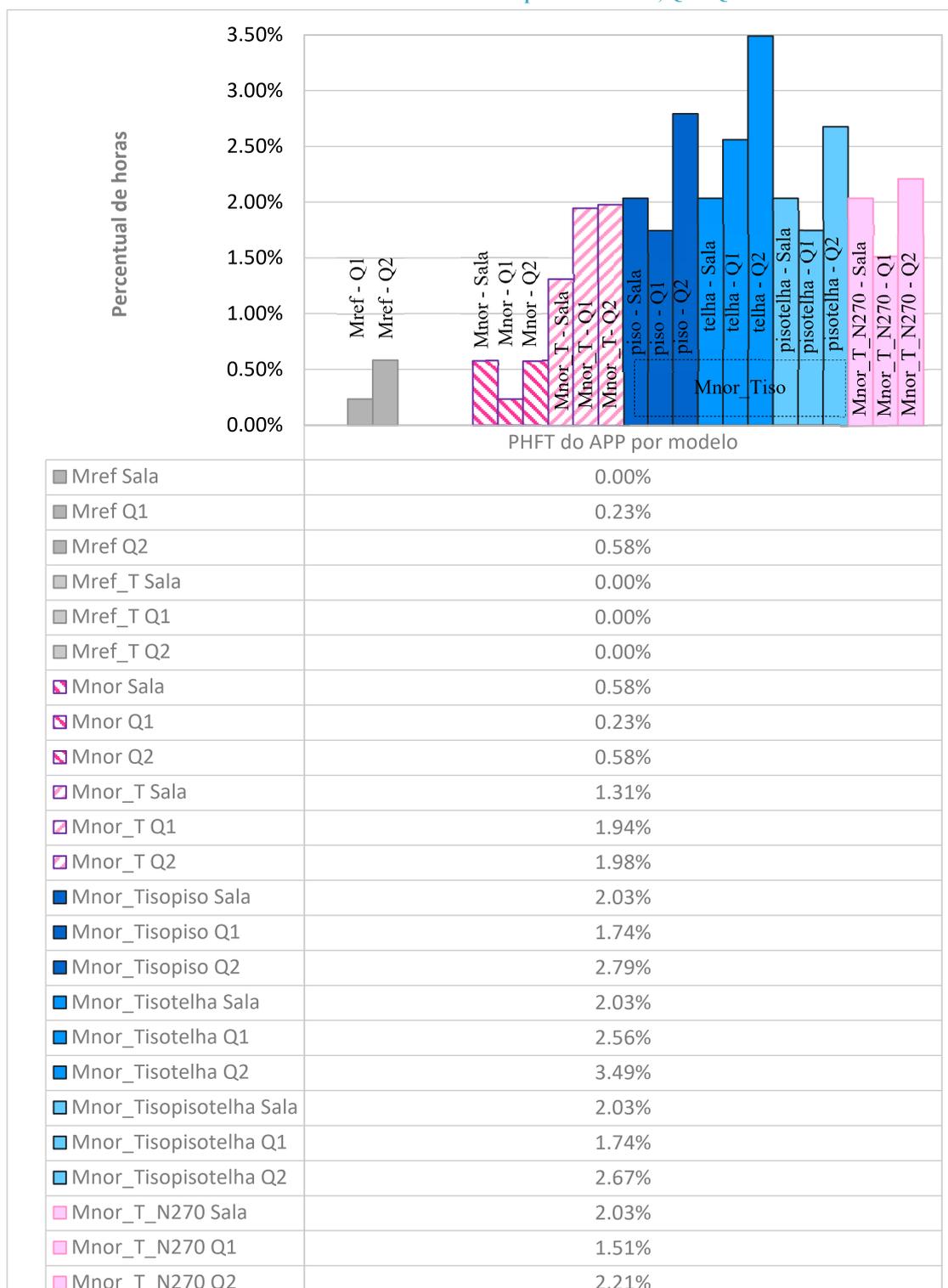
E, assim como na análise sobre o período anual, os modelos com isolamento nas camadas da cobertura se comportaram com melhores respostas para o PHFT_{UH} no período.

Observou-se de forma mais evidenciada, o que coube ao aumento das áreas de abertura para ventilação por meio do percentual de Mnor (0,44%), e o que coube a atuação do terraço capixaba por meio do percentual de Mnor_T (1,69%) em condição de maior estresse térmico.

Esses dados sugeriram a existência de uma relação escalonar entre as duas estratégias relacionadas ao aumento da temperatura, mas limitada, ou regulada pela condição de vento que precisará ser melhor investigada por meio de novos estudos.

No Gráfico 22 foram apresentados os resultados por APP. Separados por cores iguais estão os APP de uma mesma UH, onde as primeiras colunas do grupo correspondem ao APP Sala, a segunda coluna ao APP Q1, e a terceira coluna ao APP Q2. O APP Sala de Mref não respondeu com horas dentro da FT.

Gráfico 22: PHFT sazonal JanMar por APP – Sala, Q1 e Q2



Na análise por APP foi possível perceber que os ambientes ‘Sala’, que possuíam melhor condição para ventilação cruzada, mantiveram os menores percentuais de TO dentro da FT em todos os modelos. E que o ambiente Q2 foi beneficiado com maiores percentuais em todos os modelos que possuíam terraço capixaba.

De forma que na aplicação de terraço capixaba no clima local prevaleceu a relação estabelecida entre área de elemento transparente e a orientação solar definindo as respostas em PHFT, em detrimento da área de ventilação e existência de ventilação cruzada.

Neste sentido é importante a observação do ocorrido no APP Sala no modelo Mnor_T_N270. Houve significativa melhoria do PHFT do APP Sala neste modelo, que não possuía abertura em orientação Oeste. A comparação ao resultado do APP em Mnor_T reforçou esta análise. Os resultados deste APP em Mnor_T_N270 foram muito próximo dos resultados dos modelos com alguma camada de isolamento na composição do terraço capixaba. E os demais APP desta UH obtiveram resultados próximos aos APP relativos em Mnor_T.

A alteração do eixo Norte em 270° impeliu os resultados por APP Sala para os resultados obtidos pelo modelo Mnor_T_isopisotelha, que possui duas camadas de isolamento térmico no sistema de cobertura, e dos demais APP para os resultados de Mnor_T.

O APP Q1, quando comparado aos demais APP de uma mesma UH, é penalizado na presença de materiais isolantes no piso do terraço capixaba. Em Mnor_Tisopiso e Mnor_Tisopisotelha (azuis da esquerda e da direita) o PHFT do APP Q1 não é ampliado na mesma progressão que os demais APP dos modelos, permanecendo com os resultados de PHFT mais próximos dos alcançados pelo APP dos modelos sem isolamento (Mnor_T e Mnor_T_N270).

O isolamento do piso do terraço capixaba não melhorou significativamente as respostas em PHFT do APP Q1, dormitório que apresenta abertura ora em orientação Sul (Mnor_T), ora em orientação Leste (Mnor_T_N270), exposto ao sol da manhã neste período sazonal em ambos os casos, o que pode indicar que o isolamento no piso dificulta a dissipação de calor e que as trocas térmicas internas interferiram negativamente nos resultados deste APP.

Mas conferiu melhorias significativas para os APP que recebem sol em orientação Norte e Oeste por meio do piso, cuja camada é isolada. Em ambos os modelos com isolamento na camada do piso do terraço capixaba os resultados de PHFT foram substancialmente melhores no APP Sala e no APP Q2 quando comparados com o modelo Mnor_T.

Com a análise do Gráfico 21 e do Gráfico 22 para o período JanMar observou-se a progressão de melhorias de Mnor_T para Mnor_Tisotelha (azul central), a melhor configuração de sistema de cobertura para o período do início do ano no clima do recorte amostral. Com isolamento na camada mais externa as trocas de calor por condução e convecção aconteceram no interior da pele dupla sem outra camada isolante em contato com os APP. Importante ressaltar, no entanto, que esta melhoria em PHFT corresponde a apenas 1% para o período JanMar.

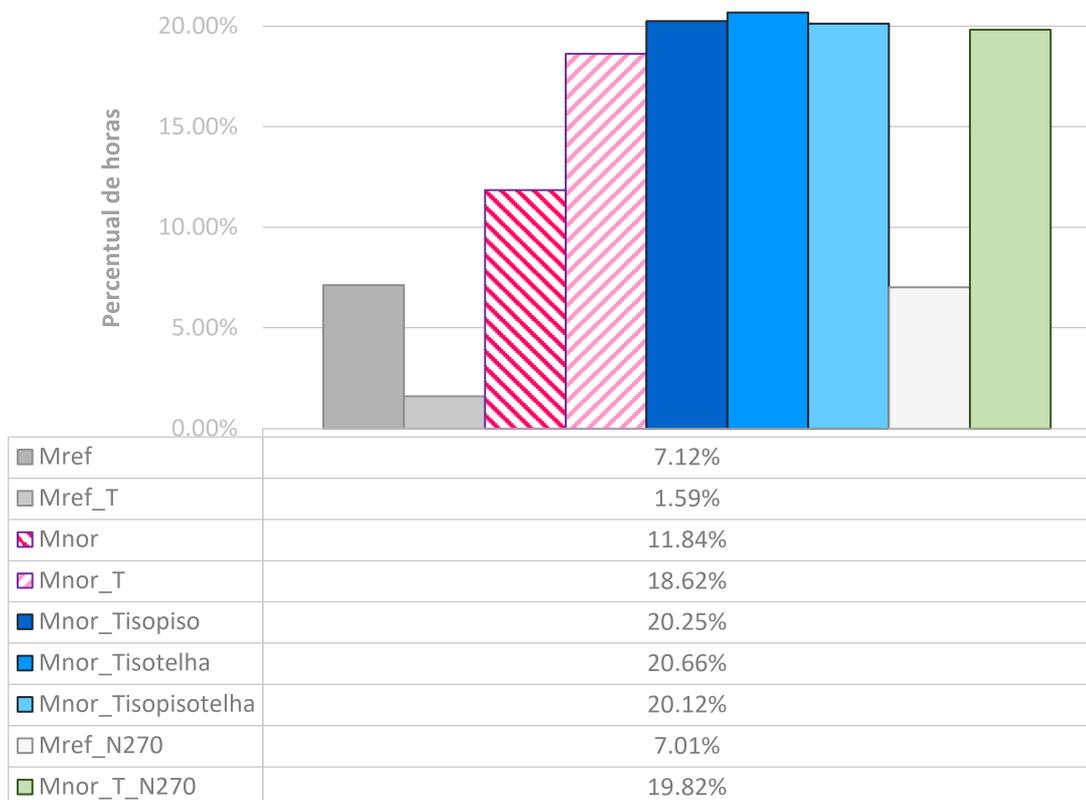
Estes resultados corroboraram o potencial de uso do terraço capixaba no clima de estudo no período de verão, considerando os resultados obtidos pelos modelos de referência (Mref e Mref_270) e Mnor, que não apresentavam TC, apenas camada de isolamento na cobertura.

Já para o período sazonal SetDez, maior que o período JanMar, algumas ponderações são devidas. Os resultados SetDez são melhores que do primeiro período não pela extensão, mas pela característica do mês de setembro, de maior velocidade e frequência de ventos. Cem por cento das horas dentro da FT do APP Sala do modelo Mref estão no mês de setembro. Das 116 horas dentro da FT do período de Q1 e 137 horas de Q2 estão em setembro respectivamente 103 horas e 117 horas. Semelhante ocorre com Mnor_T (Tabela 10), embora tenha observada maior número de horas fora do mês de setembro em Mnor_T.

Tabela 10: Temperaturas operativas do APP Q1 em Mref e em Mnor_T

		N° de horas dentro da FT do mês setembro e do período sazonal.	
		Setembro	SetDez
Mref	Sala	6	6
	Q1	103	116
	Q2	117	137
Mnor_T	Sala	56	86
	Q1	221	272
	Q2	233	302

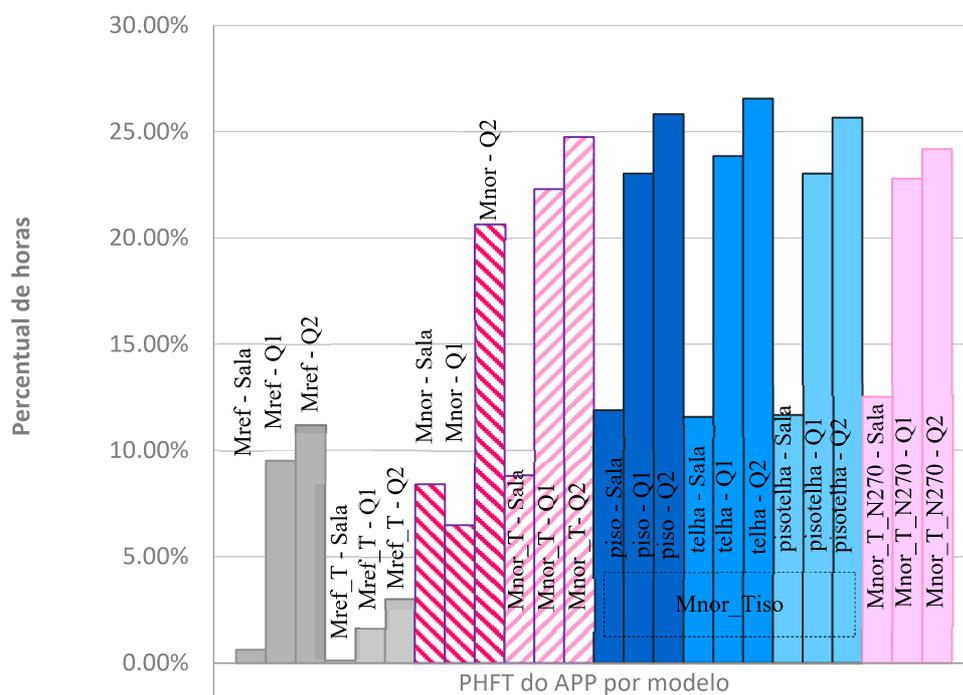
Assim, a melhoria do PHFT_{UH} do período SetDez (Gráfico 23) foi definida pelos resultados do mês de setembro.

Gráfico 23: PHFT_{UH} sazonal SetDez

No período SetDez o APP Q2, dormitório com abertura em orientação Leste, apresentou os melhores resultados, seguido de Q1, também dormitório, o que indicou que os períodos noturnos foram favorecidos pela melhoria da ventilação do período (Gráfico 24). O APP Sala, no entanto, apresentou os piores resultados, em todos os modelos.

Chamou atenção a melhoria de PHFT dos APP do modelo Mnor. Enquanto, no período JanMar seus APP de melhores resultados desempenhavam pouco mais que 0,5% das horas do período dentro da FT (Gráfico 22, anterior), no período SetDez o desempenho é melhor, chegando a 20% no APP Q2 (Gráfico 24). Foi importante esse dado, pois acusou que o terraço capixaba utilizado sobre o modelo que atende às áreas de aberturas e ventilação normativas tende a atuar como complementação da estratégia de ventilação e ventilação cruzada, mas que as estratégias atuam em demandas diferentes.

Gráfico 24: PHFT sazonal SetDez por APP – Sala, Q1 e Q2



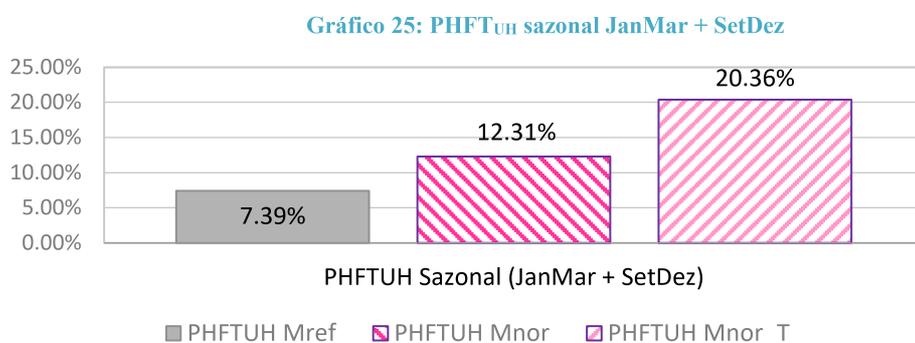
Modelo	Percentual de horas
Mref Sala	0.61%
Mref Q1	9.51%
Mref Q2	11.23%
Mref_T Sala	0.10%
Mref_T Q1	1.64%
Mref_T Q2	3.03%
Mnor Sala	8.40%
Mnor Q1	6.48%
Mnor Q2	20.66%
Mnor_T Sala	8.81%
Mnor_T Q1	22.30%
Mnor_T Q2	24.75%
Mnor_Tisopiso Sala	11.89%
Mnor_Tisopiso Q1	23.03%
Mnor_Tisopiso Q2	25.82%
Mnor_Tisotelha Sala	11.58%
Mnor_Tisotelha Q1	23.85%
Mnor_Tisotelha Q2	26.56%
Mnor_Tisopisotelha Sala	11.68%
Mnor_Tisopisotelha Q1	23.03%
Mnor_Tisopisotelha Q2	25.66%
Mnor_T_N270 Sala	12.50%
Mnor_T_N270 Q1	22.79%

O TC, embora trabalhe também em função da condição de ventos, tem função própria como estratégia de desempenho térmico de edifícios e seus resultados podem ser melhores quando em condição de clima mais favorável.

Assim, se a melhoria dos resultados dos APP de Mnor em SetDez são dadas da melhor condição de vento, com grande influência da ventilação natural nos APP, os resultados dos APP de Mnor_T em JanMar, visivelmente melhores que de Mnor, são dadas da estratégia terraço capixaba, mesmo em condição desfavorável de vento.

4.1.4. Análise do incremento sazonal do PHFT de Mref, Mnor e Mnor-T

Na análise do PHFT_{UH} observou-se, o incremento do percentual entre os modelos Mref, Mnor e Mnor_T, (Gráfico 25). Entretanto, os dados do período mais quente do ano, representados no baixo percentual dentro da FT desde o modelo de referência, mais uma vez ressaltaram como é desafiadora a condição de ventilação natural na situação de clima local, nos períodos primavera e verão.



Na comparação entre os resultados de Mnor e Mnor_T nos períodos sazonais JanMar e SetDez, foi possível estabelecer os percentuais de incremento nos PHFT_{APP} entre os modelos com iguais áreas de abertura para ventilação e com diferentes sistemas de cobertura: Mnor cobertura isolada, e Mnor_T com Tabela 11. Estes dados foram importantes para entender qual a função específica do TC em ambos os períodos sazonais.

No modelo Mnor, sem TC, as relações numéricas entre os PHFT dos ambientes no período JanMar e SetDez apresentaram variações 14,48 a 35,62, do ambiente Sala para o ambiente Q2.

Já no modelo Mnor_T a variação entre as relações numéricas foi pouco maior que 6 pontos, saindo de 6,72 para 12,50 do APP Sala para Q2, o que indicou a capacidade do TC de melhor equilibrar os resultados de PHFT ao longo do ano, característica que não foi tratada pela ventilação, uma vez que varia ao longo do ano na área de estudo.

Tabela 11: Relação entre os PHFT_{APP} de Mnor e Mnor_T em função dos períodos sazonais e da cobertura

		PHFT _{APP} por período sazonal		
		JanMar	SetDez	Razão em função da cobertura
Mnor	Sala	0,58 %	8,40 %	14,48
	Q1	0,23 %	6,48 %	28,17
	Q2	0,58 %	20,66 %	35,62
Mnor_T	Sala	1,31 %	8,81 %	6,72
	Q1	1,94 %	22,30 %	11,49
	Q2	1,98 %	24,75 %	12,50
		Pior ventilação	Melhor ventilação	
Razão entre períodos	Sala	2,23	1,04	
	Q1	8,81	3,44	
	Q2	3,37	1,19	

Os baixos $PHTF_{UH}$ em todos os modelos de análise, desde M_{ref} , evidenciaram que sob condição climática desfavorável quanto à velocidade de vento a melhoria do desempenho térmico de edifícios brasileiros poderá encontrar desafio metodológico normativo, uma vez que a metodologia da NBR 15575/2021 não previu ressalvas para situações similares à de calmaria.

Percebeu-se a pressuposição de que a ventilação natural será capaz de melhorar o desempenho dos edifícios e que o não atendimento mínimo ocorreria em decorrência de escolhas inadequadas de projeto e obra, entretanto o método depende da ventilação natural para o atendimento mínimo. Seria importante considerar que em casos onde não se observa condição climática suficiente para que a ventilação natural seja eficiente na exfiltração do calor as Faixas de Temperatura definidas para as análises de desempenho térmico não fossem limitadas pela TBSm do arquivo EPW sem passar pela consideração da estatística de ventos.

Além disso, para regiões sob estresse climático por calor onde não se observa nenhuma hora do ano abaixo do limite inferior da faixa definida para o primeiro intervalo de TBS, a definição da FT por consideração da TBSm anual parece prejudicar a definição de faixa para os períodos mais quentes do ano. Nas análises dos períodos sazonais JanMar e SetDez ambos os resultados de TBSm sazonal ultrapassaram o valor de 25°C , sendo respectivamente $25,89^{\circ}$ e $25,008^{\circ}\text{C}$.

Seria também importante considerar que a ventilação natural não fosse a única estratégia para alcançar níveis mínimos de desempenho térmico de edificações brasileiras em climas nessas condições, e que estratégias de ventilação controlada com recuperação de calor tivesse critérios mínimos a serem atendidos estabelecidos em Normas, ou Notas Técnicas, para regiões onde seja inevitável a utilização de refrigeração para o atendimento mínimo do conforto dos usuários.

Além disso, estudo como os de Guarda et al. (2019) vêm apontando que também em outras regiões do país o processo de mudanças climáticas poderá reduzir o potencial de utilização da estratégia de ventilação natural para a melhoria das condições de conforto térmico dos ambientes construídos, função que recaíra sob a climatização artificial, energeticamente custosa.

Após as análises sobre o clima atual foram apresentados os resultados de simulação para cenários projetados de clima futuro de mudanças climáticas, visando a reflexão sobre o desempenho térmico com olhar sobre a vida útil (VU) dos edifícios, previstas para no mínimo 50 anos.

Para estas análises foram considerados os modelos M_{ref} e M_{nor_T} , com as mesmas características geométricas e propriedades de materiais das análises anteriores. A escolha de M_{nor_T} para a análise do modelo com terraço capixaba baseou-se na similaridade dos resultados obtidos por este modelo em relação aos modelos com isolamento, cujos resultados de desempenho térmico das análises anteriores são superiores.

Considerou-se para a escolha o fato de M_{nor_T} ser o modelo mais semelhante aos construídos de forma popular no recorte amostral, ou seja, sem a utilização de materiais isolantes na composição dos sistemas de coberturas.

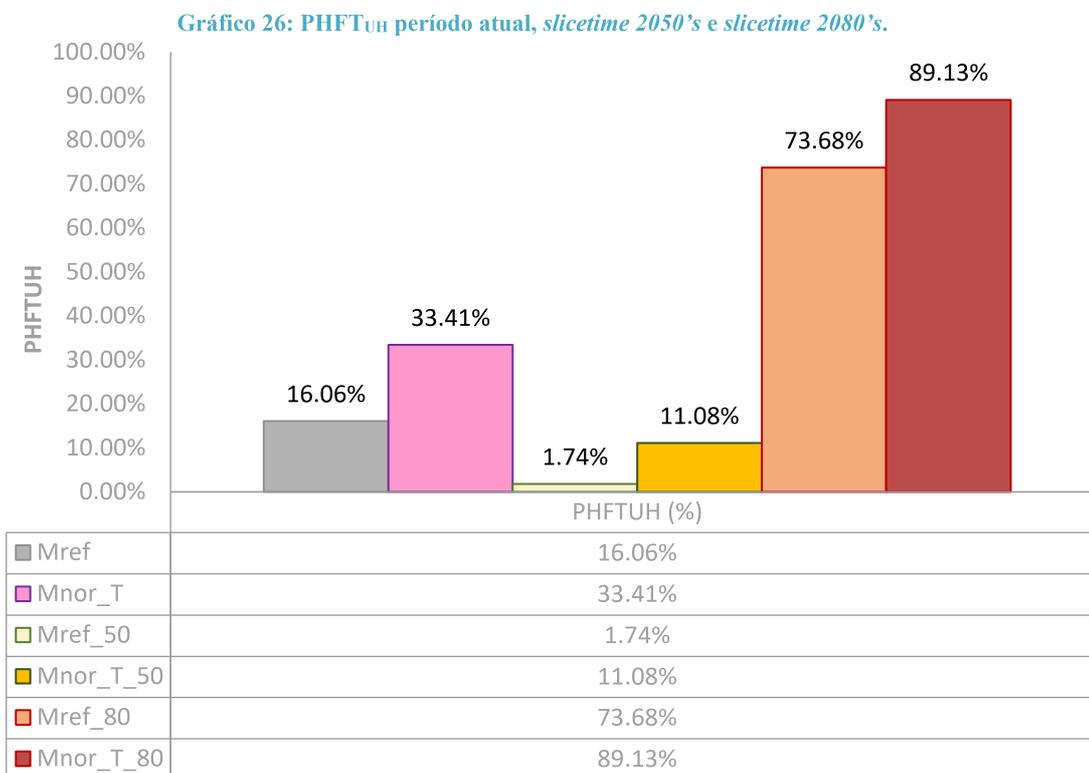
4.2. Desempenho térmico da UH em clima atual – clima futuro – 50's e 80's.

As análises em clima futuro objetivaram entender como os edifícios, sobretudo os que se utilizam de terraço capixaba, responderiam futuramente aos critérios normativos de desempenho térmico atualizados em 2021, sob a perspectiva de uma VU mínima de 50 anos, uma vez que os dados que vem sendo consolidados tem projetado aumento das temperaturas médias na região em processo não estático para os próximos 50 anos.

As comparações foram realizadas entre M_{ref} e M_{nor_T} do período climático atual, com base no arquivo climático disponível, M_{ref_50} e $M_{nor_T_50}$, para o período climático 2041-2060, *slicetime 50*, e M_{ref_80} e $M_{nor_T_80}$, para o período climático 2061-2090, *slicetime 80*.

Os dados de desempenho térmico anuais foram apresentados por meio do Gráfico 26, e salta aos olhos a contradição do gráfico. Enquanto as respostas de desempenho térmico sofreram redução brusca do período atual para o *slicetime 50*, de modo esperado, haja vista o aumento das temperaturas externas de bulbo seco, os resultados para o *slicetime 80* melhoram.

Enquanto Mnor_T e Mnor_T_50 alcançaram nível mínimo, Mnor_T_80 alcançou nível intermediário.



Esta pesquisa não realizou comparação entre modelos de diferentes *slicetimes*. E os resultados apresentados foram decorrentes da própria metodologia normativa prevista na NBR 15575/2021 para desempenho térmico de edifícios, que estabelece FT exclusivamente a partir das médias anuais de TBS dos arquivos climáticos.

Enquanto Mnor_T e Mnor_T_50 são avaliados com base no intervalo 1 de temperatura externa de bulbo seco, entre 18°C e 26°C, Mnor_T_80 é avaliado com base no intervalo 3, uma vez que a TBS média anual do arquivo climático para este período vai a 27,8°C. Conforme descrito no Quadro 1 do Capítulo 2.

Assim, o limite superior para FT aumenta em 4°C, saindo de 26°C no intervalo 1, indo para 30°C no intervalo 3. Ambos intervalos estão definidos pela Tabela 2 da NBR15575/2021-1.

É um resultado que não advém de melhoria do edifício, mas sim de condições climáticas mais adversas. A característica dinâmica do processo de mudanças climáticas ainda não foi contemplada pela atualização normativa.

A VU mínima de 50 anos estabelecida pela NBR 15575 se baseia na VUP do sistema de estruturas, e não na exigência do usuário de habitabilidade que está atrelada à capacidade adaptativa dos organismos. Capacidade esta que poderá ser estagnada pelo limite fisiológico humano de adaptação ao aumento de temperatura.

De volta à análise dos dados, o edifício analisado no recorte da pesquisa em 2022 com terraço capixaba, apresentou pouco mais que o dobro (2,08 vezes) de horas dentro da FT que seu modelo de referência. Em meia vida útil, aproximadamente 25 anos – *slicetime 2050's*, o edifício apresentaria mais que 6 vezes (6,36) o número de horas dentro da FT do seu modelo de referência.

De forma que neste período o terraço capixaba ainda se mostraria útil ao edifício, considerando a metodologia normativa atual.

Já nas proximidades dos 2080, VU praticamente completa do edifício, o número de horas dentro da FT cai para 1,21 vezes em relação ao seu modelo de referência.

O terraço capixaba de 2022, que no recorte amostral em cenário atual se apresenta como um recurso válido para o desempenho térmico dos SC continuará sendo um bom recurso por volta dos anos 2050 se o processo de mudanças climáticas não for combatido, entretanto, poderá perder sua capacidade de contribuição para o desempenho térmico de edifícios em proximidades de 2080, considerando o método da emenda 2021 da NBR 15575, e as características construtivas atualmente utilizadas, podendo não cumprir com a mesma capacidade sua função no decorrer da VU mínima edifício.

Diante de todas as análises apresentadas pode-se destacar resumidamente como sendo os principais resultados alcançados nesta pesquisa os dados contidos no Quadro 11:

Quadro 11: Síntese dos resultados obtidos por modelos com TC no recorte amostral

Ponto de análise	Respostas		Comentário
Resposta do modelo Mnor_T			
Foi capaz de definir o alcance de desempenho térmico mínimo?	N	S	Não. A melhoria da condição de aberturas para ventilação natural foi imprescindível, pela metodologia de análise atual.
Foi capaz de melhorar resultados de desempenho térmico quando combinado à melhoria das áreas de aberturas para ventilação natural?	N	S	Sim, com sobreposição de melhorias de resultados, mesmo em condição desfavorável de vento.
O nível de desempenho térmico alcançado pelo modelo com TC foi maior que o nível mínimo?	N	S	Não. Nenhum dos modelos do estudo em clima atual conseguiu realizar o incremento mínimo no PHFT _{UH} em relação ao modelo de referência
Resultados com uso desta estratégia se aproximam dos resultados com uso de isolamento da cobertura?	N	S	Sim. Embora os resultados de coberturas com isolamento tenham sido melhores, PHFT _{UH} (34,76%), a diferença não alcança 2% do PHFT _{UH} de Mnor_T (33,41%) na análise anual, e foi menor que 1% no período de maior estresse térmico.
Apresentou resposta positiva quando em condição de ventilação próxima à calmaria?	N	S	Associado à melhoria da ventilação natural sim. Enquanto os resultados retornaram PHFT muito baixos.
Apresentou resposta positiva em relação ao modelo de referência quando em melhor condição de ventilação?	N	S	Associado à melhoria da ventilação natural sim. Enquanto o Mref apresentou 1,22% de horas dentro da FT, e, enquanto o modelo Mnor apresentou resposta de 4,60%, Mnor_T apresentou 5,83%.
Houve algum indicativo sobre possibilidade de melhoria das respostas de desempenho térmico se combinado o TC com outras estratégias bioclimáticas?	N	S	Sim, os resultados por APP de Mnor_T_270 sugeriram que a redução de elementos transparentes expostos ao sol da tarde poderia melhorar os resultados da UH quando em melhor condição de ventilação. Nesta situação a utilização de elementos para reduzir a incidência solar nos elementos transparentes poderia somar resultados positivos em desempenho térmico.
O terraço capixaba continuará sendo "uma descoberta genial para o nosso clima quente e chuvoso" ¹⁸ diante dos cenários previstos de mudanças climáticas?	N	S	Sim, até proximidades da metade do século XXI.

¹⁸ Qualificação para o TC expressa por ALJEUS; HASSE; KOGURE (2016) como apresentado no item 1.1 Problema.

Foi possível perceber característica específica do TC nos resultados de desempenho térmico?	N	S	Sim, percebeu-se a capacidade do TC de melhor equilibrar os resultados de PHFT ao longo do ano.
Seria possível aferir classificação energética ao modelo com TC?	N	S	Com base na metodologia proposta para a INI-R a classificação energética seria no máximo C, não havendo possibilidade de incrementar a redução de carga térmica para alcançar níveis B e A.

Resposta do modelo Mnor T 50

O nível de desempenho térmico alcançado pelo modelo com TC foi maior que o nível mínimo?	N	S	Não. O modelo do estudo para este cenário de clima não conseguiu realizar o incremento mínimo no PHFT _{UH} em relação ao modelo de referência.
Do ponto de vista da exigência do usuário quanto à habitabilidade, e da VU e de edifícios brasileiros a utilização dos TC se fez relevante?	N	S	Sim. O TC apresentou resultados de melhoria no PHFT _{UH} para o clima projetado para o <i>slice time</i> 2050's com aumento de 2,08 no clima atual para 6,36 vezes o PHFT _{UH} do Mref neste <i>slice time</i> .
Seria possível aferir classificação energética ao modelo com TC?	N	S	Com base na metodologia proposta para a INI-R a classificação energética seria C, sem possibilidade de incrementar a redução de carga térmica para alcançar níveis B e A.

Resposta do modelo Mnor T 80

O nível de desempenho alcançado pelo modelo com TC é maior que o nível mínimo?	N	S	Sim. O modelo do estudo para este cenário de clima futuro realizar o incremento mínimo no PHFT _{UH} .
Do ponto de vista da exigência do usuário quanto à habitabilidade, e da VU e de edifícios brasileiros a utilização dos TC é relevante?	N	S	Não. O TC apresentará resultados de piora no PHFT _{UH} para o clima projetado para o <i>slice time</i> 2080's com redução de 2,08 no clima atual para 1,21 vezes o PHFT _{UH} do Mref neste <i>slice time</i> .
Seria possível aferir classificação energética ao modelo com TC?	N	S	Com base na metodologia proposta para a INI-R a classificação energética seria no mínimo C, com possibilidade de incrementar a redução de carga térmica para alcançar níveis B, ou A.

Onde:

S destacado = Sim

N destacado = Não

5. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi analisar comparativamente diferentes tipos de coberturas e a configuração de terraço capixaba em região quente e úmida sob grande estresse climático ocasionado pela falta de ventilação, e suas atuações sobre o desempenho térmico de edifícios em cenários de clima atuais e clima futuros, projetados para mudanças climáticas.

Os resultados desta investigação apontaram que, sob a metodologia recém atualizada da NBR 15575/2021 para desempenho térmico de edifícios, os sistemas de coberturas do tipo terraço capixaba não foram capazes de garantir os resultados mínimos estabelecidos para o atendimento dos critérios normativos sozinhos, nos modelos estudados. Mas quando associados à melhoria da ventilação natural os TC seriam capazes de somar melhorias aos resultados obtidos com a maximização da ventilação natural.

Isto se deve ao fato de a metodologia ser baseada na capacidade da ventilação natural realizar trocas de calor e colaborar na exfiltração de ar quente de dentro dos ambientes construídos e coberturas.

Todavia, a análise sobre o recorte amostral acenou para a possibilidade de combinações de variáveis climáticas e geomorfológicas tornarem dificultoso o atendimento dos critérios metodológicos devido à falta de condições climáticas compatíveis com a metodologia, uma vez que a normativa não estabelece outros parâmetros quando a ventilação natural não for suficientemente capaz de realizar trocas térmicas e dissipação de calor.

Embora o método defina limites de Temperatura Operativa a partir da Temperatura de Bulbo Seco média anual do arquivo climático considerado na análise, não há nenhuma ressalva sobre a condição de ventos. Apesar dos dados do recorte amostral terem resultado em intervalo 1 de FT para análise de dados, os $PHFT_{UH}$ se mostraram muito baixos mesmo no modelo de referência.

Em nenhum dos modelos simulados para o período anual houve temperatura abaixo de 18°C, limite inferior da faixa. Enquanto no período de maior estresse térmico as médias de TBS ultrapassaram o valor de 25°C, o que alteraria a FT da análise se o período mais confortável do ano fosse desconsiderado.

O estudo ainda demonstrou que para o recorte amostral, termicamente estressado, o melhor modelo de terraço capixaba a ser utilizado é o modelo que apresenta camada de isolamento logo abaixo do telhamento, mas que o modelo mais popular, sem qualquer camada de isolamento e amplamente utilizado pela população local, obtém resultados muito similares ao do melhor modelo com diferenças no $PHFT_{UH}$ de aproximadamente 1,5% na análise anual.

Entre os modelos com mesma área de elementos transparentes e de abertura para ventilação, os resultados de períodos sazonais com melhor condição de vento (SetDez) e pior condição (JanMar) foram capazes de indicar com mais objetividade a parcela de desempenho devida à ventilação natural e devida ao terraço capixaba.

Assim como no estudo bibliométrico apresentado por Abuseif e Gou (2018), que observou poucos estudos sobre os tetos de pele dupla, observou-se nas normativas, manuais e demais documentos de referência poucas indicações sobre a utilização do TC ou de sistemas similares, para ZB8, ou outras zonas quentes do país, restringindo-se ao fator de correção de transmitância térmica de coberturas ventiladas que consta da Parte 5 da NBR 15575/2021.

Os TC, embora tratados como Capixabas são percebidos em diversos estados como Rio de Janeiro, Minas Gerais, Bahia, e tem ampla aceitação popular, exatamente por ter origem popular. Do ponto de vista dos dados obtidos, considerando os desafios do clima local, os resultados se mostram positivos, e a replicação do método com a utilização de outros dados climáticos, e outros tipos de arquivos climáticos faz-se necessário para confirmar os benefícios obtidos com sua utilização em clima sob estresse térmico em outras condições de clima quente brasileiro.

Considerando as tecnologias construtivas disponíveis à população e às dificuldades técnicas de execução de TC, a estratégia se mostra apta a ser implementada mesmo em edificações existentes,

desde que haja condições estruturais prévias para as reformas. É uma estratégia passiva aplicável a novas edificações e edificações existentes.

Quanto às análises em projeções de climas futuros os resultados obtidos alertam e reforçam sobre situações específicas do método normativo que ainda não considera o fenômeno das mudanças climáticas. Os intervalos de TO listados na Tabela 2 da parte 1 da NBR 15575/2021 podem mascarar a comparação entre o modelo e sua referência durante o período de vida útil da edificação.

Causa estranheza que o mesmo edifício apresente desempenho em nível inferior quando em clima com média anual de TBS menor que em clima de média mais alta. E a estranheza não é vã. O mesmo edifício com TC, analisado em clima atual e no clima do *slicetime 50*, passou por análises a partir do mesmo intervalo de temperatura, ou seja, apresentaram médias de temperaturas anuais similares, que definiram a mesma FT para a análise. Não obstante a piora do cenário climático, os resultados das avaliações resultam no mesmo nível de desempenho (mínimo), mas neste caso há melhora na comparação com os próprios modelos de referência. Os modelos reais apresentaram respectivamente 2,08 vezes e 6,36 vezes o número de horas dentro da FT em relação aos seus modelos de referência. O modelo com TC, em pior condição de clima é melhor em relação ao seu modelo de referência, indicando coerência e confiabilidade no resultado do ponto de vista da qualidade térmica do edifício, que estará submetida à proposta de vida útil de 50 anos. Entretanto, com a ampliação do aumento da média anual de TBS mudou-se o intervalo de temperaturas da análise. No clima projetado para o *slicetime 80* a média anual de TBS de 27,8°C altera o intervalo do 1 das análises anteriores para o intervalo 3, ampliando em 4°C o limite superior da análise.

Mas de fato o modelo com TC, nesta condição de clima, é pior em relação ao seu modelo de referência. Na comparação apresenta apenas 1,21 vezes o número de horas dentro da FT, e o nível alcançado foi intermediário, pois passou a apresentar mais de 70% das horas dentro da nova FT e o PHFT que em relação ao modelo de referência é maior que 90%.

Os intervalos das FT de análise não falam do desempenho térmico do edifício, mas sim da relação conforto térmico do usuário e clima na perspectiva do conforto adaptativo com base apenas na temperatura para analisar uma resposta de desempenho térmico.

O ábaco utilizado para definição do incremento do percentual de hora dentro da FT da UH (Figura 64) quando os modelos de referência apresentam menos de 70% do PHFT penaliza a análise sobremaneira, sem nenhuma relação, consideração, ou ressalva, entre parâmetros TBS e disponibilidade de ventos.

Sob essas condições ao edifício caberia unicamente incrementar a redução de cargas térmicas, o que pode demandar a utilização de novas estratégias como a ventilação controlada com recuperação de calor associada à refrigeração, ou o provimento de fluxo de ar em horários, velocidades e direções específicas, considerando a necessidade ou não de umidificação, coerentes com as estatísticas climáticas do local.

Apesar da estranheza metodológica observada, a análise entre os $PHFT_{UH}$ dos modelos de referência e dos modelos reais utilizados na investigação permitiu entender que para o clima do estudo o TC popular como conhecido em 2022 pode ser considerado uma boa estratégia bioclimática passiva para o desempenho térmico de edificações até aproximadamente meia VU (*slicetime 50*), pois a estratégia ajudará a ampliar o PHFT de edifícios em relação a edifícios sem TC. Entretanto estes edifícios, mesmo com a utilização de TC perderão grande parte de sua capacidade de melhorar o PHFT ao final dos próximos 50 anos (*slicetime 80*) se o processo de mudanças climáticas não for desacelerado, ou seja, se o processo de mudanças climáticas não for incisivamente combatido.

Assim a hipótese apresentada inicialmente obtém resposta parcialmente comprovada. Sim, os TC podem resultar em melhorias, ou somar melhorias às respostas de desempenho térmico de edificações de climas quentes, quando submetidos ao aumento de temperatura previsto por

modelos matemáticos de circulação geral de oceanos e atmosfera. Entretanto, a contribuição ocasionada pela utilização dos TC pode não contemplar em completude o tempo de VU das edificações.

5.1. Limitações da pesquisa

É importante a replicação do método utilizando em outros modelos e proporções geométricas para a edificação, outras formas e geometrias para o TC, e também outras formas de modelagem para os recintos do tipo TC, as quais permitam maior aproximação entre a condição do ático exposto ao ar externo, com maior dinâmica para trocas de calor entre ático e ar externo.

A literatura recomenda a não utilização de tetos de pele dupla em regiões frias, devido à possibilidade de condensação junto aos materiais que compõem as coberturas, o que pode reduzir o tempo de vida dos sistemas.

Não foram realizadas simulações e análises com arquivos climáticos de regiões quentes com melhores condições de vento. Esses resultados poderiam ajudar a entender melhor a capacidade de aplicação dos TC em outros climas quentes ao longo do território nacional.

A experimentação com outros softwares como o Contam®, voltados para dinâmica de fluidos, poderia colaborar no desenvolvimento de novas pesquisas e seus desdobramentos, haja vista as complexidades matemáticas próprias da dinâmica dos fluidos, e dos processos de troca de calor por condução e convecção, as quais fazem parte do processo de ventilação e exfiltração de ar quente de telhamentos, de áticos, e de coberturas como TC.

Não foram realizadas nesta pesquisa medições *in loco*, as quais poderiam colaborar com a calibração dos modelos e permitir maior aproximação dos resultados e do objeto de estudo.

Não foram experimentadas associações entre TC e proteções solares de elementos transparentes, o que poderia resultar em novos ganhos em desempenho térmico de edifícios. Novos estudos com esta combinação de estratégias podem apresentar resultados importantes, especialmente em climas sobre estresse térmico como o deste estudo, e em novas análises para projeções de cenários futuros de mudanças climáticas.

Foram observadas inconsistências nos resultados de saída com a utilização do arquivo climático da estação utilizada no estudo não apenas na análise das temperaturas operativas, mas também na análise das cargas térmicas no período mais crítico do ano. Foram observadas TO com valores abaixo do percebido localmente e discrepantes de outros dias do registro do arquivo até o dia 04 de janeiro e resultados de Cargas Térmicas aquém do esperado até meados do mês de janeiro sobretudo nos APP Sala. As anomalias percebidas tornavam os resultados substancialmente melhores no mês de janeiro.

Por este motivo, optou-se por não realizar as análises sobre a possibilidade de desempenho em nível superior em nenhum dos modelos, embora todas as simulações tenham sido configuradas e realizadas para gerar os dados conforme requisitado pelo método normativo para carga térmica, e a planilha Microsoft Excel ter sido preparada para retornar as respostas de níveis de desempenho.

Faz-se urgente que os estudos do clima e de edificações se aproximem, que novos métodos para análise de dados sejam desenvolvidos e compartilhados de forma acessível às diversas áreas do conhecimento, e que sejam amplamente divulgados a fim de reduzir lacunas metodológicas para aplicação em cidade.

5.2. Melhorias para publicações futuras

Os modelos foram simulados sem a configuração do campo Terreno (*Simulation Parameters>Building>Terrain*) no EnergyPlus. Para publicações futuras será importante aplicar a configuração, haja vista que a rugosidade do entorno imediato ao edifício também afeta a velocidade de ventos.

A sugestão inicial é que, para este estudo, seja aplicada a configuração de ambiente urbano, ou a configuração centro de cidade (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Os obstáculos de área urbana e a presença de cadeia de montanhas de grande porte poderão imputar aos resultados obtidos neste estudo valores menores do que os apresentados no estudo devido a redução da velocidade média de ventos.

BIBLIOGRAFIA

- AB' SABER, A. Os Domínios da Natureza no Brasil: Potencialidades Paisagísticas. (Ateliê Editorial, Ed.) São Paulo, 2012.
- ABRAHÃO, K. C. DE F. J.; SOUZA, R. G. V. DE. Estimativa da evolução do uso final de energia elétrica no setor residencial do Brasil por região geográfica. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 2, p. 383–408, abr. 2021.
- ABUSEIF, M.; GOU, Z. A Review of Roofing Methods: Construction Features, Heat Reduction, Payback Period and Climatic Responsiveness. **Energies**, v. 11, n. 11, p. 3196, 18 nov. 2018.
- AHMED, T.; KUMAR, P.; MOTTET, L. Natural ventilation in warm climates: The challenges of thermal comfort, heatwave resilience and indoor air quality. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 138, n. December 2020, p. 110669, 2021.
- AKBARI, H.; MATTHEWS, H. D. Global cooling updates: Reflective roofs and pavements. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 2–6, 2012.
- ALAWADHI, E. M.; ALQALLAF, H. J. Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: Numerical study. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 8–9, p. 2958–2964, 1 ago. 2011.
- ALJEUS, A.; HASSE, G.; KOGURE, L. **Morro do Moreno**. Disponível em: <http://www.morrodomoreno.com.br/site_2016/materias/o-terraço-inteligente-uma-invenção-popular-boa-para-nosso-clima-.html>. Acesso em: 10 jun. 2021.
- AL-OBAIDI, K. M.; ISMAIL, M.; ABDUL RAHMAN, A. M. Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review. **Frontiers of Architectural Research**, v. 3, n. 3, p. 283–297, 2014a.
- AL-OBAIDI, K. M.; ISMAIL, M.; ABDUL RAHMAN, A. M. Design and performance of a novel innovative roofing system for tropical landed houses. **Energy Conversion and Management**, v. 85, p. 488–504, 2014b.
- ALSHAYEB, M. J.; CHANG, J. D. Variations of PV Panel Performance Installed over a Vegetated Roof and a Conventional Black Roof. **Energies**, v. 11, n. 5, 2018.
- ALVARADO, J. L.; TERRELL, W.; JOHNSON, M. D. Passive cooling systems for cement-based roofs. **Building and Environment**, v. 44, n. 9, p. 1869–1875, 1 set. 2009.
- ALVARES, C. A.; S. J. L.; S. P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711–728, jan. 2014.
- ALVES, C. A.; GONÇALVES, F. L. T.; DUARTE, D. H. S. The recent residential apartment buildings' thermal performance under the combined effect of the global and the local warming. **Energy and Buildings**, v. 238, 2021.
- AL-YASIRI, Q.; SZABÓ, M. Incorporation of phase change materials into building envelope for thermal comfort and energy saving: A comprehensive analysis. **Journal of Building Engineering**, v. 36, n. December 2020, 2021.
- AMARANTE, O. A. C. DO. **Atlas Eólico: Espírito Santo**. (ASPE, Ed.) Vitória, 2009. Disponível em: <<https://arsp.es.gov.br/Media/arsp/Energia/Estudos%20Energ%C3%A9ticos/2009/AtlasEolicoES.pdf>>. Acesso em: 8 nov. 2022
- ANDROUTSOPOULOS, A. V.; STAVRAKAKIS, G. M.; DAMASIOTIS, M. Cool Roof Impacts on a School-building Thermal and Energy Performance in Athens, Greece. **Procedia Environmental Sciences**, v. 38, p. 178–186, 2017.
- ARIAS, P. A. et al. **Foreword Technical and Preface**. 2022. ed. Cambridge; UK and New York; NY; USA; [s.n.].
- ASCIONE, F. Energy conservation and renewable technologies for buildings to face the impact of the climate change and minimize the use of cooling. **Solar Energy**, v. 154, p. 34–100, 2017.

- ASSENG, S. et al. **Personal View The upper temperature thresholds of life**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.thelancet.com/>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15575-1/2013. Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15575-5/2013. Edificações habitacionais-Desempenho Parte 5: Requisitos para sistemas de Coberturas. Rio de Janeiro, 2013b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6023/2018. Informação e documentação-Referências - Elaboração**. Rio de Janeiro, 14 nov. 2018. Disponível em: <www.abnt.org.br>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1/2021. Edificações habitacionais-Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2021a. Disponível em: <www.abnt.org.br>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15575-5/2021. Edificações habitacionais-Desempenho Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas. Rio de Janeiro, 2021b. Disponível em: <www.abnt.org.br>
- AUSTRALIAN PASSIVE HOUSE ASSOCIATION. **Yes, Passive House Can Exist in the Sub-Tropics**. Disponível em: <https://passivehouseaustralia.org/APHA/News/Articles/PASSIVBLOG_Passive_House_Can_Exist_In_SubTropics_021121.aspx>. Acesso em: 8 nov. 2022.
- BACCINI, M. et al. Heat effects on mortality in 15 European cities. **Epidemiology**, v. 19, n. 5, p. 711–719, set. 2008.
- BAN-WEISS, G. et al. Electricity production and cooling energy savings from installation of a building-integrated photovoltaic roof on an office building. **Energy and Buildings**, v. 56, p. 210–220, 1 jan. 2013.
- BELCHER, S. E.; HACKER, J. N.; POWELL, D. S. Constructing design weather data for future climates. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 26, n. 1, p. 49–61, 2005.
- BEVILACQUA, P. et al. Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area. **Energy and Buildings**, v. 122, p. 63–79, 15 jun. 2016.
- BŁAZEJCZYK, K. et al. An introduction to the Universal thermal climate index (UTCI). **Geographia Polonica** v 86, p. 5-10, 2013.
- BRASIL (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA). **ProjeteEEE - Dados climáticos**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteeee/dados-climaticos/?cidade=ES+-+Alegre&id_cidade=bra_es_alegre.868280_inmet>. Acesso em: 10 set. 2022.
- BRASIL (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA); LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **ProjeteEEE - Componentes construtivos**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/projeteeee/componentes-construtivos/#pisos-e-coberturas>>. Acesso em: 9 ago. 2022.
- BRITO, A. C. DE; MARTINS, J. C. Dúvidas sobre a norma de desempenho: especialistas respondem às principais dúvidas e elencam requisitos de suportes para elaboração de projetos. Brasília: CBIC, 2015.
- BRITO, P. H. F. DE; ARAÚJO, R. D. S.; MARINHO, G. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO: UMA REVISÃO DE LITERATURA. **HOLOS**, v. 4, p. 62–74, 1 nov. 2018.
- BROWN, G. Z.; DEKAY, M. **Sol, Vento e Luz: Estratégias para o Projeto de Arquitetura**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004. v. 1
- CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013. CBIC ed. Fortaleza: [s.n.].

- CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. Análise dos critérios de atendimento à Norma de Desempenho ABNT NBR 15575. [s.l.] CBIC, 2016.
- CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. Energia nas Construções: Uma Contribuição do Setor à Redução de Emissões e de Uso de Fontes Renováveis de Energia. Brasília: CBIC, 2017.
- CASAGRANDE, ANDRÉ. D.; BARBIEIRO, M. H. M. **Castelo: Da pré-história ao início do século XX**. 2. ed. Castelo: [s.n.].
- CASAGRANDE, B. G.; ALVAREZ, C. E. DE. Preparação de arquivos climáticos futuros para avaliação dos impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de edificações. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 173–187, 2013.
- CENTRO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **Procel Info - O Programa**. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?TeamID={921E566A-536B-4582-AEAF-7D6CD1DF1AFD}>>. Acesso em: 9 ago. 2022.
- CHAN, A. L. S.; CHOW, T. T. Energy and economic performance of green roof system under future climatic conditions in Hong Kong. **Energy and Buildings**, v. 64, p. 182–198, 1 set. 2013.
- CHEMISANA, D.; LAMNATOU, C. Photovoltaic-green roofs: An experimental evaluation of system performance. **Applied Energy**, v. 119, p. 246–256, 15 abr. 2014.
- CIAMPI, M.; LECCESE, F.; TUONI, G. Energy analysis of ventilated and microventilated roofs. **Solar Energy**, v. 79, n. 2, p. 183–192, 2005.
- CORBELLA, O.; CORNER, V. **Manual de arquitetura bioclimática tropical**. Rio de Janeiro: Editora Revan, 2011.
- COSTA, W. **Gazeta Online. Capixapédia - De área de serviço à área de lazer, terraço é marca capixaba na arquitetura mundial**, 1 ago. 2015. Disponível em: <<https://www.gazetaonline.com.br/especiais/capixapedia/2015/07/de-area-de-servico-a-area-de-lazer-terraço-e-marca-capixaba-na-arquitetura-mundial-1013904263.html>>. Acesso em: 4 nov. 2021.
- DAOUAS, N.; HASSEN, Z.; AISSIA, H. BEN. Analytical periodic solution for the study of thermal performance and optimum insulation thickness of building walls in Tunisia. **Applied Thermal Engineering**, v. 30, n. 4, p. 319–326, 1 mar. 2010.
- DIMOUDI, A.; ANDROUTSOPOULOS, A. The cooling performance of a radiator based roof component. **Solar Energy**, v. 80, n. 8, p. 1039–1047, 2006.
- DIMOUDI, A.; ANDROUTSOPOULOS, A.; LYKOUKIDIS, S. Summer performance of a ventilated roof component. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 6, p. 610–617, 2006.
- DOMINGUEZ, A.; KLEISSL, J.; LUVALL, J. C. Effects of solar photovoltaic panels on roof heat transfer. **Solar Energy**, v. 85, n. 9, p. 2244–2255, 1 set. 2011.
- D’ORAZIO, M.; DI PERNA, C.; DI GIUSEPPE, E. Green roof yearly performance: A case study in a highly insulated building under temperate climate. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 439–451, 1 dez. 2012.
- EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA O DESENVOLVIMENTO URBANO SUSTENTÁVEL et al. **Apostilas dos diálogos sobre eficiência energética (DEE) por zonas bioclimáticas: Diálogos sobre Eficiência Energética por Zonas Bioclimáticas**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/APOSTILA_DialogoEE_ZB.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2022.
- ELI, L. G. et al. Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto Ground Domain no programa EnergyPlus. , 2019.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **BEN: Relatório síntese - Ano base 2020**. Rio de Janeiro: [s.n.].
- ESPÍRITO SANTO (ESTADO). **Clima dos Municípios**. Vitória: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>. Acesso em: 12 ago. 2021.

- ESPÍRITO SANTO (ESTADO). **Instituto Jones dos Santos Neves - Mapas**. Disponível em: <<http://www.ijns.es.gov.br/mapas/>>. Acesso em: 11 set. 2022.
- GUARDA, E. L. A. DA; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J. A. Efeitos do Aquecimento Global nas Estratégias de Projeto das Edificações por Meio de Cartas Bioclimáticas. **E&S Engineering and Science**, v. 7, n. 2, p. 54–69, 2018.
- GUARDA, E. L. A. et al. Potencial Bioclimático em Cenários de Aquecimento Global: Estudo de caso para lcima tropical continental. n. 1, p. 1–10, 2019.
- GURGEL, M. Design Passivo: baixo consumo energético. São Paulo: [s.n.].
- HE, B.; ZHU, J. Constructing community gardens? Residents' attitude and behaviour towards edible landscapes in emerging urban communities of China. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 34, p. 154–165, 1 ago. 2018.
- IBPSA-BRASIL E ASHRAE SOUTH BRAZIL. **Carga térmica e consumo: estamos simulando com climas do passado?** (palestra online) IBPSA BRASIL e ASHRAE SOUTH BRAZIL, 14 jun. 2022.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **IPCC WGI Interactive Atlas: Regional information**. Disponível em: <[www.labee.ufsc.br](https://interactive-atlas.ipcc.ch/regional-information#eyJ0eXBIIjoiQVRMQVMiLCJjb21tb25zIjpw7ImxhdCI6LTM5OTcxMiwibG5nIjotNTE2NDE0Miwiem9vbSI6MywicHJvaimi6I6kVQU0c6NTQwMzAiLCJtb2RlIjoiY29tcGxldGVfYXRsYXMiSwicHJpbWFyeSI6eyJzY2VuYXJpbyI6InNzcDU4NSIsInBlcmlyZCI6ImZhcilIsInNlYXNvbil6InllyXliLCJkYXRhc2V0IjoiQ01JUDYiLCJ2YXJpYWJsZSI6InRhc21heCIsInZhbnVlVHlwZSI6IkFOT01BTfkiLCJoYXRjaGluZyI6IiNJTVMRSIsInJlZ2lvdmlldCI6ImFyNiIsImJhc2VsaW5lIjoiQVIlIiwicmVnaW9uc1NlbGVjdGVkIjpbMTRdfSwicGxvdCI6eyJhY3RpdmVUYWliOiJwbHVtZSIsInNob3dpbmcionRydWUsIm1hc2siOiJub25lIiwic2NhdHRlcilINyWciOiJBTk9NQXZlIiwic2NhdHRlcilWYXliOiJ0YXNtYXgifX0=>. Acesso em: 5 nov. 2022.</p>
<p>JENTSCH, M. F. et al. Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. Renewable Energy, v. 55, p. 514–524, 1 jul. 2013.</p>
<p>JENTSCH, M. F.; BAHAJ, A. B. S.; JAMES, P. A. B. Climate change future proofing of buildings-Generation and assessment of building simulation weather files. Energy and Buildings, v. 40, n. 12, p. 2148–2168, 2008.</p>
<p>KADRI AKYÜZ, M.; ALTUNTA, Ö.; ZIYA SÖ, M. Economic and Environmental Optimization of an Airport Terminal Building's Wall and Roof Insulation. Sustainability, v. 9, 2017.</p>
<p>KIRCH, R. et al. Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa Energyplus–versão 9.0.1. Florianópolis, 1 jul. 2020. Disponível em: <
- KOLOKOTRONI, M. et al. Cool roofs: High tech low cost solution for energy efficiency and thermal comfort in low rise low income houses in high solar radiation countries. **Energy and Buildings**, v. 176, p. 58–70, 2018.
- KRARTI, M. **Roof Cover Impact on Cooling Energy Use of Office Buildings**. Roof Cover Impact on Cooling Energy Use of Office Buildings . **Anais...**Boston: 24 out. 2014.
- KRELLING, A. F. ; et al. **XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Proposta de Método de Avaliação do Desempenho térmico de residências: NBR 15575. **Anais...**Porto Alegre: ANTAC, nov. 2020.
- KUMAR, A.; SUMAN, B. M. Experimental evaluation of insulation materials for walls and roofs and their impact on indoor thermal comfort under composite climate. **Building and Environment**, v. 59, p. 635–643, 1 jan. 2013.
- KUMAR, V. V.; RAUT, N.; AKEEL, N. Double skin polystyrene- aluminium radiation reflector roofs in arid environments for passive cooling - A case study in Sohar, Sultanate of Oman. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 28, p. 101655, 1 dez. 2021.

- LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES et al. **Casa Eficiente: Bioclimatologia e Desempenho Térmico**. (R. Lamberts et al., Eds.) Florianópolis, 2010.
- LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Análise de custo/benefício de parâmetros de eficiência energética em Habitações de Interesse Social**. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/Cartilha_CasosOtimizados_Janeiro2022.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2022.
- LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES et al. **Análise de custo/benefício de parâmetros de eficiência energética em habitações de interesse social**. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/Cartilha_CasosOtimizados_Janeiro2022.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2022.
- LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES; CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES; ELETROBRAS. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação da Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. (Capacitação INI-R OIAS/Inmetro - 2022), mar. 2022.
- LAI, C. MING; HUANG, J. Y.; CHIOU, J. S. Optimal spacing for double-skin roofs. **Building and Environment**, v. 43, n. 10, p. 1749–1754, 1 out. 2008.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2014.
- LAMNATOU, C.; CHEMISANA, D. Photovoltaic-green roofs: a life cycle assessment approach with emphasis on warm months of Mediterranean climate. **Journal of Cleaner Production**, v. 72, p. 57–75, 1 jun. 2014.
- LAN, L. et al. Thermal comfort improvement of naturally ventilated patient wards in Singapore. **Energy and Buildings**, v. 154, p. 499–512, 2017.
- LIANG, H.-H.; HUANG, K.-T. Study on rooftop outdoor thermal environment and slab insulation performance of grass planted roof. **International Journal of the Physical Sciences**, v. 6, n. 1, p. 65–73, 2011.
- LUO, M.; LAU, N. C. Characteristics of summer heat stress in China during 1979–2014: climatology and long-term trends. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 9–10, p. 5375–5388, 1 nov. 2019.
- MACHADO, J. DE M. Avaliação de desempenho térmico em edificações multifamiliares considerando as mudanças climáticas futuras. Dissertação—Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 14 maio 2019.
- MACHADO, J. DE M. et al. Impacts of climate change on the thermal and energy performance of brazilian residential buildings. **PARC**, v. 13, 8 set. 2022.
- MARENCO, J. et al. Dangerous Climate Change in Brazil. **Change**, p. 56, 2011.
- MASSON-DELMOTTE, V. et al. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: [s.n.].
- MICHELS, C. et al. Development of an experimental test rig for the evaluation of the thermal performance of building roofs. **Energy and Buildings**, v. 180, p. 32–41, 2018.
- MITCHELL, D. et al. Realizing the impacts of a 1.5 °C warmer world. Nature Climate Change/Nature Publishing Group, , 1 ago. 2016.
- MITCHELL, D. et al. Extreme heat-related mortality avoided under Paris Agreement goals. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 7, p. 551–553, 25 jun. 2018.
- MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. **The Ventilation System for Enhanced Air Quality** - Lossnay. Tokyo: [s.n.]. Disponível em: <https://passivehouse.com.au/cms/tinyMCE/filemanager/library/LOSSNAY_LGH_RX5.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2022.

- MORA, C. et al. Global risk of deadly heat. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 7, p. 501–506, 30 jun. 2017.
- MORAN, F. et al. Improving thermal comfort in refugee shelters in desert environments. **Energy for Sustainable Development**, v. 61, p. 28–45, 2021.
- NAGENGAST, A.; HENDRICKSON, C.; SCOTT MATTHEWS, H. Variations in photovoltaic performance due to climate and low-slope roof choice. **Energy and Buildings**, v. 64, p. 493–502, 1 set. 2013.
- NAJIM, K. B.; FADHIL, O. T. Assessing and improving the thermal performance of reinforced concrete-based roofing systems in Iraq. **Energy and Buildings**, v. 89, p. 213–221, 15 fev. 2015.
- NANDAPALA, K.; HALWATURA, R. Design of a durable roof slab insulation system for tropical climatic conditions. **Cogent Engineering**, v. 3, n. 1, 31 maio 2016.
- NOBRE, C. A.; SOARES, W.; QUEIROZ, M. Tópicos de aula da disciplina Mudanças Climática (PAMB 5093). Vitória, 2020.
- NUNES, G. H.; GIGLIO, T. G. F. Influência das mudanças climáticas no desempenho térmico de uma habitação com diferentes sistemas construtivos: análise do clima de São Paulo. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, v. 1, n. 48, p. 46, 2020.
- OLESON, K. W.; BONAN, G. B.; FEDDEMA, J. Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model. **Geophys. Res. Lett**, v. 37, p. 3701, 2010.
- OLIGRAF. **À descoberta de Granada (Andaluzia, Espanha): Alhambra, El Generalife e Bairro de Albaicín**. Disponível em: <<https://oliraf.com/2017/01/02/%F0%9F%93%8Ca-descoberta-de-granada-andaluzia-espanha-alhambra-el-generalife-e-bairro-de-albaicin/>>. Acesso em: 10 out. 2021.
- OMAR, A. I. et al. Energy Saving Potential with a Double-Skin Roof Ventilated by Natural Convection in Djibouti. **Energy Procedia**, v. 140, p. 361–373, 1 dez. 2017.
- PACHAURI, R. K. et al. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2008.
- PASSIVE HOUSE INSTITUTE. **Passivhaus-Datenbank**. Disponível em: <https://passivehouse-database.org/index.php#d_5892>. Acesso em: 9 ago. 2022.
- PBE EDIFICA. **PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem**. Disponível em: <<https://pbeedifica.com.br/sobre>>. Acesso em: 9 ago. 2022a.
- PBE EDIFICA. **Fatores de Energia Primária**. Disponível em: <<https://www.pbeedifica.com.br/node/134>>. Acesso em: 8 nov. 2022b.
- PERKINS-KIRKPATRICK, S. E.; LEWIS, S. C. Increasing trends in regional heatwaves. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, 1 dez. 2020.
- RAN, J.; TANG, M. Effect of Green Roofs Combined with Ventilation on Indoor Cooling and Energy Consumption. **Energy Procedia**, v. 141, p. 260–266, 1 dez. 2017.
- RAYMOND, C.; MATTHEWS, T.; HORTON, R. M. **The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.science.org>>.
- REFAHI, A. H.; TALKHABI, H. Investigating the effective factors on the reduction of energy consumption in residential buildings with green roofs. **Renewable Energy**, v. 80, p. 595–603, 1 ago. 2015.
- ROELS, S.; LANGMANS, J. Highly insulated pitched roofs resilient to air flow patterns: Guidelines based on a literature review. **Energy and Buildings**, v. 120, p. 10–18, 2016.
- RORIZ, M. **Correções nas Irradiâncias e Iluminâncias dos arquivos EPW da Base ANTAC**. São Carlos: [s.n.]. Disponível em: <https://labeec.ufsc.br/sites/default/files/correcao_epw_antac.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2022.
- ROVERE, E. L. LA et al. Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Mitigação de Gases de Efeito Estufa no Brasil até 2030: Sumário Técnico / Projeto IES-Brasil. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01695230>>.

- ROVERE, E. L. LA. O Brasil e a COP-21 1. **Cadernos Adenauer: Mudanças climáticas: o desafio do século**, v. 2, p. 1–11, 16 ago. 2016.
- SAMPAIO, G.; DIAS, P. L. DA S. Evolução dos Modelos Climáticos e de Previsão de Tempo e Clima. **Revista USP**, n. 103, p. 41, 2014.
- SASSO-FERRÃO, A. L.; NICO-RODRIGUES, E. A. **IV Encontro Latino-americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis**. (A. M. C. Barroso et al., Eds.) Análise do desempenho térmico em edificações habitacionais no município de Castelo (ES). **Anais...evento online: Universidade Federal da Bahia**, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/handle/ri/35359>>. Acesso em: 9 ago. 2022
- SASSO-FERRÃO, A. L.; NICO-RODRIGUES, E. A. **XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Terraço Capixaba: Cobertura resiliente para climas quente-úmidos. **Anais...Canela - RS: ANTAC**, 11 nov. 2022.
- SCHREIBER, H.; JANDAGHIAN, Z.; BASKARAN, B. Energy performance of residential roofs in Canada – Identification of missing links for future research opportunities. **Energy and Buildings**, v. 251, p. 111382, 2021.
- SHI, C. et al. Risks of temperature extremes over China under 1.5 °C and 2 °C global warming. **Advances in Climate Change Research**, v. 11, n. 3, p. 172–184, 1 set. 2020.
- SHI, G. Z. et al. 3D numerical thermal optimization of the roofs constructed with cast-in-situ hollow concrete floor system by finite volume method. **Energy and Buildings**, v. 131, p. 142–152, 1 nov. 2016.
- STENERI, R. **O que é um Sistema de Recuperação de Calor?** Disponível em: <<https://eficienciaenergetica.blogspot.com/2014/05/o-que-e-um-sistema-de-recuperacao-de.html>>. Acesso em: 9 ago. 2022.
- STONE, B. et al. Climate change and infrastructure risk: Indoor heat exposure during a concurrent heat wave and blackout event in Phoenix, Arizona. **Urban Climate**, v. 36, n. October 2020, p. 100787, 2021.
- SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M.; AKBARI, H. Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 11, p. 1167–1174, 2007.
- TONG, S. et al. Thermal performance of concrete-based roofs in tropical climate. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 392–401, 1 jun. 2014.
- TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Sustainable energy performance in Brazilian social housing: A proposal for a Sustainability Index in the energy life cycle considering climate change. **Energy and Buildings**, v. 242, p. 110845, 2021.
- TUCK, N. W. et al. Effectiveness of free running passive cooling strategies for indoor thermal environments: Example from a two-storey corner terrace house in Malaysia. **Building and Environment**, v. 160, n. April, p. 106214, 2019.
- TUCK, N. W. et al. Affordable retrofitting methods to achieve thermal comfort for a terrace house in Malaysia with a hot–humid climate. **Energy and Buildings**, v. 223, p. 110072, 2020.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO (BIBLIOTECA CENTRAL). **Normalização e apresentação de trabalhos científicos e acadêmicos**. 2. ed. Vitória: [s.n.].
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO (BIBLIOTECA CENTRAL). **Normalização de Trabalhos Acadêmicos: Guia rápido para consulta às alterações nas normas ABNT NBR 6023:2018 e NBR 6028: 2021**. Vitória, 2021. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/1WCKW5uHjktNZPoDeAPna-sq5f2rqYRIa/view>>. Acesso em: 11 set. 2022
- UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON. CCWorldWeatherGen Climate change world weather file generator manual Climate change world weather file generator- CWorldWeatherGen. Southampton: [s.n.]. Disponível em: <https://energy.soton.ac.uk/wp-content/uploads/sites/372/2022/08/manual_weather_tool_v1.9.pdf>. Acesso em: 10 set. 2022.

- ÜRGE-VORSATZ, D. et al. Buildings. In: Mitigation. Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. p. 671–738, 2014.
- VIEIRA, J. E. Castello: Origem, emancipação e desenvolvimento – 1702 a 2004. Vitória, 2014
- WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric Science**. (R. Dmowska, D. Hartmann, H. T. Rossby, (Eds.) Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York, Oxford, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sidney, Tokyo, Elsevier, 16 dez. 2006.
- WANG, F. et al. Potential heat-risk avoidance from nationally determined emission reductions targets in the future. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 5, 2022.
- WANG, Y. et al. The effect of moisture transfer on the inner surface thermal performance and the thermal transmittance of the roof-wall corner building node in high-temperature and high-humidity areas. **Journal of Building Engineering**, v. 44, n. June, p. 102949, 2021.
- WASSOUF, M. **De la casa passiva al estándar Passivhaus**. 1. ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2014.
- XAMÁN, J. et al. Thermal performance of a hollow block with/without insulating and reflective materials for roofing in Mexico. **Applied Thermal Engineering**, v. 123, p. 243–255, 1 ago. 2017.
- XU, X. et al. Research and application of active hollow core slabs in building systems for utilizing low energy sources. **Applied Energy**, v. 116, p. 424–435, 2014.
- YANG, J. et al. Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate. **Solar Energy**, v. 173, p. 597–609, 1 out. 2018.
- YANG, Y.; JAVANROODI, K.; NIK, V. M. Climate change and energy performance of European residential building stocks – A comprehensive impact assessment using climate big data from the coordinated regional climate downscaling experiment. **Applied Energy**, v. 298, p. 117246, 2021.
- YESILATA, B.; ISIKER, Y.; TURGUT, P. Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 5, p. 1878–1882, 1 maio 2009.
- YEW, M. C. et al. Experimental analysis on the active and passive cool roof systems for industrial buildings in Malaysia. **Journal of Building Engineering**, v. 19, p. 134–141, 1 set. 2018.
- YU, J. et al. Thermal performance evaluation and optimal design of building roof with outer-layer shape-stabilized PCM. **Renewable Energy**, v. 145, p. 2538–2549, 2020a.
- YU, J. et al. Study on thermal insulation characteristics and optimized design of pipe-embedded ventilation roof with outer-layer shape-stabilized PCM in different climate zones. **Renewable Energy**, v. 147, p. 1609–1622, 2020b.
- ZHANG, J.; WANG, F. Regional temperature response in central Asia to national committed emission reductions. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 15, 1 ago. 2019.
- ZHANG, Z.; TONG, S.; YU, H. Life Cycle Analysis of Cool Roof in Tropical Areas. **Procedia Engineering**, v. 169, p. 392–399, 1 jan. 2016.
- ZINGRE, K. T. et al. Modelling of cool roof performance for double-skin roofs in tropical climate. **Energy**, v. 82, p. 813–826, 15 mar. 2015.
- ZINGRE, K. T.; YANG, E. H.; WAN, M. P. Dynamic thermal performance of inclined double-skin roof: Modeling and experimental investigation. **Energy**, v. 133, p. 900–912, 15 ago. 2017.

ANEXOS

ANEXO 1 – INTERFACE METAMODELO INI-R

Parâmetros gerais da UH

Cidade 

Não encontrou sua cidade?

Área total dos APTs [m²] 

Número de APPs 

Parâmetros ou informações dos ambientes de permanência prolongada (APP)

	APP 0	APP 1	APP 2	APP 3
Uso do ambiente 	<input type="text" value="Sala"/>	<input type="text" value="Dormitório"/>	<input type="text" value="Dormitório"/>	<input type="text" value="Dormitório"/>
Coefficiente de eficiência energética do sistema de AC para refrigeração [CEEr] 	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Coefficiente de eficiência energética do sistema de AC para aquecimento [CEEa] 	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Condição de exposição do piso 	<input type="text" value="Contato com o solo"/>			
Condição de exposição da cobertura 	<input type="text" value="Exposto ao sol e ao vento"/>	<input type="text" value="Exposto ao sol e ao vento"/>	<input type="text" value="Exposto ao sol e ao vento"/>	<input type="text" value="Exposto ao sol e ao vento"/>
Área de piso do APP [m ²] 	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Pé-direito [m] 	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Possui veneziana? 	<input type="text" value="Sim"/>	<input type="text" value="Sim"/>	<input type="text" value="Sim"/>	<input type="text" value="Sim"/>
Ângulo de desvio da parede norte em relação ao norte verdadeiro [°] 	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Área efetiva de abertura para ventilação 	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Transmitância térmica do elemento transparente [W/m ² K] 	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Fator solar do elemento transparente - FS 	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Transmitância térmica do piso [W/m ² K] 	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Capacidade térmica do piso [kJ/(m. ² K)] 	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Absortância da parede externa 	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Transmitância térmica das paredes externas [W/m ² K] 	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Capacidade térmica das paredes externas [kJ/(m. ² K)] 	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Absortância da cobertura 	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Transmitância térmica da cobertura [W/m ² K] 	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

Figura 75: Apresentação parcial da ferramenta de apoio ao método simplificado de avaliação Metamodelo da INI-R.

Fonte: <<https://cb3e.sites.ufsc.br/interface?>>, 2022.

ANEXO 2 – TABELAS E ÁBACOS DA NBR 15575-1/2021

Para verificação de desempenho em níveis intermediários e superior, observa-se o incremento do percentual de horas dentro da FT da UH ($PHFT_{UH} / \Delta PHFT_{UH}$), a redução de cargas térmicas (RedCgTT) nos APP.

Assim o texto normativo em vigor trouxe a escala com níveis de desempenho e os critérios a serem adotados em sua Tabela 4, conforme apresentado pelo Quadro 12.

Quadro 12: Tabela 4 da NBR 15575-1/2021 – Níveis de desempenho

Nível de desempenho	Critério
Mínimo (M)	$PHFT_{UH,real} > 0,9.PHFT_{UH,ref}$
Intermediário (I)	$\Delta PHFT \geq PHFT_{mín} - \text{Tabela 20}$
Superior (S)	$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{mín} - \text{Tabela 21}$

Nota: $\Delta PHFT$ é o incremento do $PHFT_{UH,real}$ em relação ao $PHFT_{UH,ref}$. $\Delta PHFT_{mín}$ é o incremento mínimo do $PHFT_{UH,real}$ em relação ao $PHFT_{UH,ref}$, com valor obtido pela Tabela 20 da NBR 15575-1/2021, para o nível intermediário, e pela Tabela 21 da NBR 15575-1/2021, para o nível superior.

Fonte: ABNT, 2021a.

A Tabela 4 da NBR15575/2021-1 aponta para as Tabelas 20 e 21 para a complementação do entendimento dos critérios de incremento mínimo do $PHFT_{UH,real}$ e da redução da carga térmica total do modelo real ($CgTT_{UH,real}$). As tabelas 20 e 21 da NBR 15575/2021-1 estão apresentadas na Figura 79.

Tabela 20 – Incremento mínimo do $PHFT_{UH,real}$ e redução mínima da $CgTT_{UH,real}$ para o atendimento ao nível de desempenho térmico intermediário

Critério		Tipologia			
		Unifamiliar	Multifamiliar		
			Pavimento térreo	Pavimento tipo	Pavimento cobertura
$PHFT_{UH,ref}$ %	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH}$ kWh / (ano.m ²)	$\Delta PHFT_{min}$ %			
$PHFT_{UH,ref} < 70\%$	Todos os valores	Obtido a partir do ábaco ou das equações da Figura 4			
$PHFT_{UH,ref} \geq 70\%$	Todos os valores	0	0	0	0
$PHFT_{UH,ref}$ %	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH}$ kWh / (ano.m ²)	$RedCgTT_{min}$ %			
$PHFT_{UH,ref} < 70\%$	Todos os valores	0	0	0	0
$PHFT_{UH,ref} \geq 70\%$	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH} < 100$	17	15	22	15
	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH} \geq 100$	27	20	25	20

Tabela 21 – Incremento mínimo do $PHFT_{UH,real}$ e redução mínima da $CgTT_{UH,real}$ para o atendimento ao nível de desempenho térmico superior (continua)

Critério		Tipologia			
		Unifamiliar	Multifamiliar		
			Pavimento térreo	Pavimento tipo	Pavimento cobertura
$PHFT_{UH,ref}$ %	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH}$ kWh / (ano.m ²)	$\Delta PHFT_{min}$ %			
$PHFT_{UH,ref} < 70\%$	Todos os valores	Obtido a partir do ábaco ou das equações da Figura 4			
$PHFT_{UH,ref} \geq 70\%$	Todos os valores	0	0	0	0
$PHFT_{UH,ref}$ %	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH}$ kWh / (ano.m ²)	$RedCgTT_{min}$ %			

Critério		Tipologia			
		Unifamiliar	Multifamiliar		
			Pavimento térreo	Pavimento tipo	Pavimento cobertura
Todos os valores	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH} < 100$	35	30	45	30
	$CgTT_{UH,ref} / A_{p,UH} \geq 100$	55	40	50	40

NOTA O nível superior também pode ser obtido se o $PHFT_{UH,real}$ do modelo real for maior ou igual a 95 %, juntamente com o atendimento ao critério de temperaturas anuais máxima e mínima ($Tomax_{UH}$ e $Tomín_{UH}$).

Figura 76: Tabelas 20 e 21 da NBR 15575-1/2021.

Fonte: ABNT, 2021a.

Por sua vez, as Tabelas 20 e 21 da NBR 15575-1/2021 referenciam o ábaco contido na Figura 80, que determina, por meio de equação, o $\Delta PHFT_{min}$ quando o $PHFT_{UH,ref}$ for inferior a 70%,

situação que pode ocorrer especialmente quando o clima local não viabiliza trocas de calor entre ambiente interno e externo suficientes, ou quando há erros em relação à utilização de estratégias bioclimáticas no edifício, conferindo ao modelo da UHref poucas horas com temperaturas operativas dentro da faixa de temperatura definida para o clima local ao longo do ano.

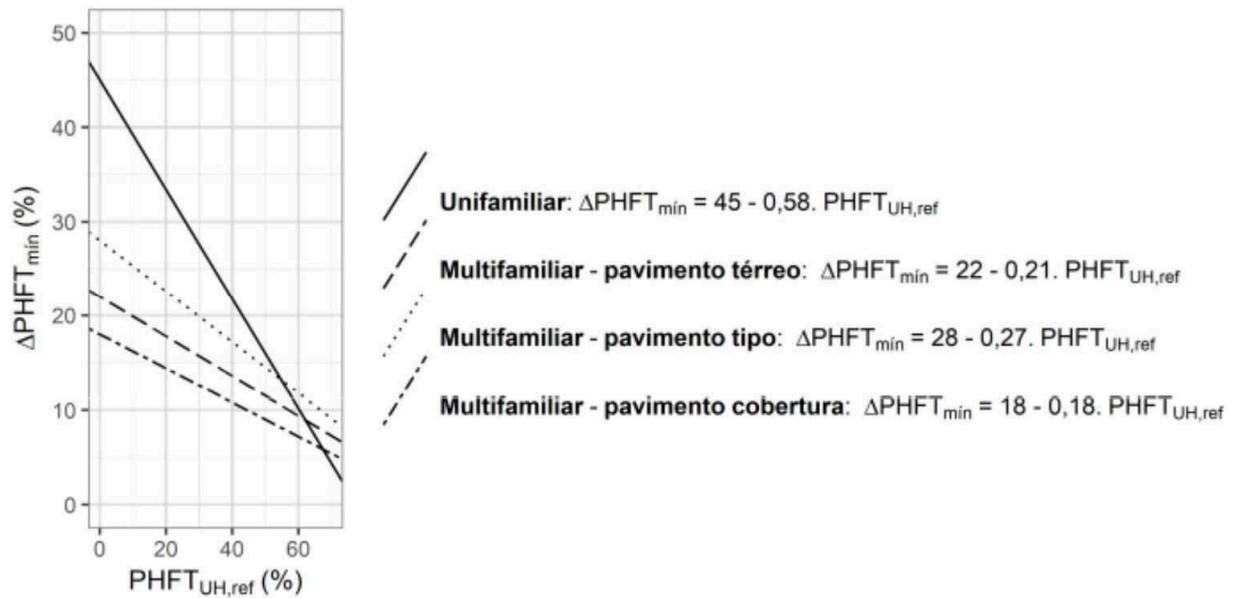


Figura 77: Ábaco e equações para obtenção do $\Delta\text{PHFT}_{\text{mín}}$ quando o $\text{PHFT}_{\text{UH,ref}}$ for inferior a 70%.

Fonte: ABNT, 2021a.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - FORMULÁRIOS DE RUA

Tr. Clarinha eternif.

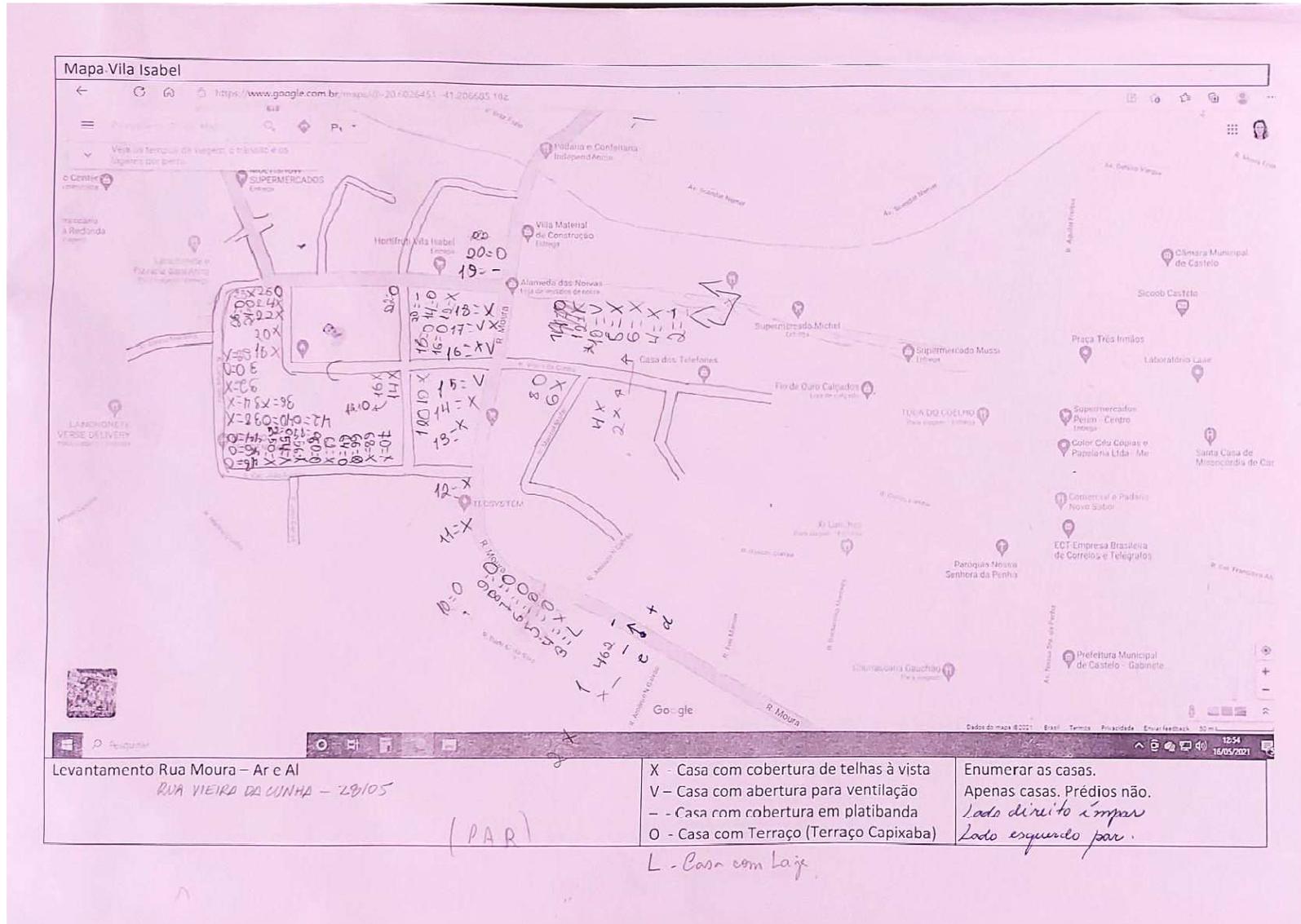
Mapa Vila Isabel

https://www.google.com.br/maps/@-23.626451,-41.206685,18z

Levantamento Rua Moura – Ar e Al
 RUA VIEIRA DA CUNHA – 20.105

Antônio Rangel - /
 07/106 Thais Rangel ✓
 Domingos Martins
 Travessa P. Martins

X - Casa com cobertura de telhas à vista	Enumerar as casas.
V - Casa com abertura para ventilação	Apenas casas. Prédios não.
- - Casa com cobertura em platibanda	
O - Casa com Terraço (Terraço Capixaba)	Lado direito Ímpar
L - Casa com Laje	Lado esquerdo Par



Levantamento Rua Moura – Ar e Al
 RUA VIEIRA DA CUNHA – 29/105

(PAR)

- X - Casa com cobertura de telhas à vista
- V - Casa com abertura para ventilação
- - Casa com cobertura em platibanda
- O - Casa com Terraço (Terraço Capixaba)
- L - Casa com Laje

Enumerar as casas.
 Apenas casas, Prédios não.
 Lado direito ímpar
 Lado esquerdo par.

APÊNDICE 2 – CABEÇALHO PLANILHA DE ANÁLISE DE DADOS

Salvamento Automático | Diagnóstico_NBR15575 Mnor_T_80.xlsx • Salvo | Pesquisar (Alt+G) | Ariane Louzada Sasso Ferrão

Arquivo | Página Inicial | Inserir | Layout da Página | Fórmulas | Dados | Revisão | Exibir | Desenvolvedor | Ajuda | Power Pivot | Comentários | Compartilhamento

L14 | =Modelo Real!C2

Nível de desempenho	Critério
Mínimo (M)	$PHFT_{UH,real} > 0,9 \cdot PHFT_{UH,ref}$
Intermediário (I)	$\Delta PHFT^a \geq \Delta PHFT_{min}^b$
Superior (S)	$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{min}$

^a $\Delta PHFT$ é o incremento do $PHFT_{UH,real}$ em relação ao $PHFT_{UH,ref}$.
^b $\Delta PHFT_{min}$ é o incremento mínimo do $PHFT_{UH,real}$ em relação ao $PHFT_{UH,ref}$, com valor obtido pela Tabela 20, para o nível intermediário, e pela Tabela 21, para o nível superior.

Nível de desempenho	Critérios
Intermediário (I)	$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{min}^a$, $Tomax_{UH,real} \leq Tomax_{UH,ref} + \Delta Tomax$, $Tomin_{UH,real} \geq Tomin_{UH,ref} - \Delta Tomin$ e $RedCgTT \geq RedCgT_{min}^b$
Superior (S)	$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{min}$, $Tomax_{UH,real} \leq Tomax_{UH,ref} + \Delta Tomax$, $Tomin_{UH,real} \geq Tomin_{UH,ref} - \Delta Tomin$ e $RedCgTT \geq RedCgT_{min}$

^a $\Delta PHFT_{min}$ é obtido pela Tabela 20, para o nível intermediário, e pela Tabela 21, para o nível superior.
^b $RedCgT_{min}$ é obtido pela Tabela 20, para o nível intermediário, e pela Tabela 21, para o nível superior. Deve-se adotar $\Delta Tomax$ igual a 2 °C para as UH unifamiliares e UH em edificações multifamiliares localizadas no pavimento de cobertura. Para as UH em edificações multifamiliares localizadas nos pavimentos térreo ou tipo, deve-se adotar $\Delta Tomax$ igual a 1 °C.
 Deve-se adotar $\Delta Tomin$ igual a 1 °C para todas as UH avaliadas.

Modelo Real	Modelo Referência
Área de abertura: 2.53	Área de abertura: 3.39
Área de ventilação: 1.53	Área de ventilação: 1.53
Tomax: 31.74	Tomax: 32.50
Tomin: 23.68	Tomin: 27.07

Modelo Real	Modelo Referência
Área de abertura: 2.53	Área de abertura: 1.38
Área de ventilação: 0.62	Área de ventilação: 0.62
Tomax: 30.23	Tomax: 30.69
Tomin: 21.82	Tomin: 24.27

PHSFTUH (%)	Real	Referência
Operativa	68.42%	30.75%
Operativa	31.58%	69.25%

Q1	Modelo Real	Modelo Referência
Operativa	99.78%	95.92%

Modelo Referência	Modelo Real	Diagnóstico_UH VENT	CARGAS TÉRMICAS Ref e Real	Diagnóstico CGT UH
Temp. Operativa: 68.42%	Temp. Operativa: 30.75%	Temp. Operativa: 31.58%	Temp. Operativa: 69.25%	Temp. Operativa: 99.78%

Modelo Referência	Modelo Real	Diagnóstico_UH VENT	CARGAS TÉRMICAS Ref e Real	Diagnóstico CGT UH
Temp. Operativa: 99.78%	Temp. Operativa: 95.92%	Temp. Operativa: 31.58%	Temp. Operativa: 69.25%	Temp. Operativa: 99.78%

Modelo Referência	Modelo Real	Diagnóstico_UH VENT	CARGAS TÉRMICAS Ref e Real	Diagnóstico CGT UH
Temp. Operativa: 99.78%	Temp. Operativa: 95.92%	Temp. Operativa: 31.58%	Temp. Operativa: 69.25%	Temp. Operativa: 99.78%

Modelo Referência	Modelo Real	Diagnóstico_UH VENT	CARGAS TÉRMICAS Ref e Real	Diagnóstico CGT UH
Temp. Operativa: 99.78%	Temp. Operativa: 95.92%	Temp. Operativa: 31.58%	Temp. Operativa: 69.25%	Temp. Operativa: 99.78%

APÊNDICE 3 – INCONSISTÊNCIAS DO ARQUIVO CLIMÁTICO PARA O PERÍODO SAZONAL JANEIRO-MARÇO

Na análise do período sazonal janeiro-março (JanMar) foi observada anomalia a partir dos dados de saída dos modelos simulados com áreas de ventilação em consonância com a indicação de elementos transparentes da NBR 15575/2021 utilizado no trabalho.

Em todas as simulações os modelos com aberturas de ventilação normativas os dados de saída de TO retornaram com resultados abaixo de 26° C no período entre 14 e 21 h no APP Sala até o dia 04/01. Assim apresenta-se a Tabela 12 com os dados anômalos do princípio de janeiro para o APP Estar nos modelos Mnor e Mnor_T e o PHFT_{APP} que representam dentro do período sazonal integral JanMar de 01/01 a 31/03:

Tabela 12: Anomalias de janeiro

Modelo	APP	Dado de saída		PHFAPP total do período sazonal (%)
		Dia/Horário	Temperatura	
Mnor	Sala	02/01-15:00	25.26	92,59%
		02/01-16:00	25.60	
		02/01-17:00	25.97	
		02/01-18:00	25.92	
		02/01-19:00	25.78	
		02/01-20:00	25.80	
		02/01-21:00	25.70	
		03/01-14:00	25.65	
		03/01-15:00	25.35	
		03/01-16:00	25.90	
		03/01-17:00	25.93	
		03/01-18:00	25.72	
		03/01-19:00	25.73	
		03/01-20:00	25.56	
		03/01-21:00	25.46	
		04/01-14:00	25.16	
		04/01-15:00	25.19	
		04/01-16:00	25.40	
		04/01-17:00	25.27	
		04/01-18:00	25.17	
04/01-19:00	25.04			
04/01-20:00	25.00			
04/01-21:00	24.93			
Mnor_T	Sala	02/01-14:00	25.15	72,72%
		02/01-15:00	25.42	
		02/01-16:00	25.74	
		02/01-17:00	25.63	
		02/01-18:00	25.47	
		02/01-19:00	25.47	
		02/01-20:00	25.37	
		02/01-21:00	25.15	
		03/01-14:00	25.60	
		03/01-15:00	25.28	
		03/01-16:00	25.77	
		03/01-17:00	25.79	
		03/01-18:00	25.50	
		03/01-19:00	25.51	
		03/01-20:00	25.31	
		03/01-21:00	25.18	
		04/01-14:00	25.03	
		04/01-15:00	25.06	
04/01-16:00	25.31			
04/01-17:00	25.14			
04/01-18:00	25.02			

		04/01-19:00	24,84	
		04/01-20:00	24,81	
		04/01-21:00	24,74	

As horas que faltavam para completar o número de horas do período sazonal estão nos meses seguintes e concentram-se em horários após as 18 h, como esperado, de forma que a anomalia impactou diretamente nos resultados do período sazonal durante a ocupação do APP Sala.

Considerando que em todos os modelos derivados de Mnor, este APP retornou dados de TO mais de um grau e meio abaixo dos demais APP desde a primeira hora de janeiro, que os resultados de cargas térmicas para o mesmo APP também apresentaram anomalias no mesmo período, e a deficiência estatística do arquivo climático, optou-se por iniciar a análise dos dados de TO do período sazonal a partir do dia cinco de janeiro, quando os resultados retornaram à não anomalia para o horário.

Assim o período JanMar correspondeu ao período 05/01 a 31/03, e o total de horas do período é de 2064 horas, em vez de 2160 horas.

A análise por período sazonal sem a anomalia confirmou as impressões obtidas a partir dos gráficos anuais. Assim foram apresentadas as análises das TO no formato de PHFT na relação percentual para o total de horas dos períodos sazonais considerando as 4992 horas da soma dos dois períodos.

O período JanMar tem menor número de horas que SetDez, mas o que de fato definiu os melhores resultados de PHFT no período SetDez foi a melhor condição de ventilação do mês de setembro. A Tabela 13 traz os dados do período definido para a análise sazonal sem o período em que foi identificado anomalia em TO para o APP Sala, possivelmente proveniente de condição de clima do dia, inconsistências do processo de medição e registro da estação meteorológica.

Tabela 13: TO dos APP em JanMar e SetDez. Dados de saída de 05 de janeiro à 31 de março e 01 de setembro à 31 de dezembro.

		Nº de horas dentro da FT do período sazonal por APP		PHFT do APP total sazonal (%)
		JanMar	SetDez	
Mref	Sala	0	6	0,61
	Q1	2	116	9,74
	Q2	5	137	11,18
Mref_T	Sala	0	1	0,10
	Q1	0	20	1,64
	Q2	0	37	3,03
Mnor	Sala	4	82	8,98
	Q1	2	72	6,71
	Q2	5	252	21,24
Mnor_T	Sala	9	86	10,12
	Q1	14	272	24,24
	Q2	17	302	26,73