D 2023

U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE TÉCNICAS DE ARREFECIMENTO PASSIVO NO CONFORTO TÉRMICO INTERIOR DE EDIFÍCIOS EM CLIMAS QUENTES E HÚMIDOS

MURILO DE PÁDUA MARCOLINI
TESE DE DOUTORAMENTO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM JANEIRO DE 2023
ÁREA CIENTÍFICA DE ENGENHARIA CIVIL

Assinado por: **Eva Sofia Botelho Machado Barreira**
Num. de Identificação: 11006499
Data: 2023.06.22 15:45:28+01'00'

ORIENTADORA: PROFESSORA DOUTORA EVA BARREIRA
COORIENTADOR: PROFESSOR DOUTOR RICARDO ALMEIDA

PROGRAMA DOUTORAL EM ENGENHARIA CIVIL 2022/2023

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ prodec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465

PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência a Programa de Tese de Doutoramento em Engenharia Civil - 2022/2023 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2023.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família

Não existe triunfo sem perda,
não há vitória sem sofrimento,
não há liberdade sem sacrifício.

Senhor dos Anéis - O Retorno do Rei
J. R. R. Tolkien

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus antes de tudo.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pela disponibilização de sua excelente estrutura física através de laboratórios, biblioteca, repositórios, equipe administrativa que muito contribuiu para execução dessa tese.

À Professora Doutora Eva Barreira, minha orientadora, pela disponibilidade, apoio, orientação, incentivo, compreensão e amizade, que manifestou durante a elaboração deste trabalho.

Ao Doutor Ricardo Almeida, meu coorientador, pelos conselhos, disponibilidade, leitura atenta dos textos e amizade, demonstrada desde o início do doutoramento até hoje.

Ao PRODEC/FEUP – Programa Doutoral em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e a UFT – Universidade Federal do Tocantins.

À Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções que financiou esse trabalho por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020.

À Universidade Federal do Tocantins – UFT pela disponibilização da área para a montagem das células na fase experimental do trabalho.

Ao Centro Universitário Luterano do Brasil – CEULP/ULBRA pela cessão de equipamentos de seu laboratório que possibilitou fazermos analises complementares que contribuíram para este estudo.

Aos meus pais, Sr. Marcio Marcolini e Sra. Juracy C. de Pádua, pelo carinho e apoio incondicional. Tenho muito orgulho de ser o filho de vocês.

Às minhas sobrinhas, Ana Luiza, Bia, Sofia e Anna Julia, por tornar meus dias mais alegres.

Às minhas irmãs, Flavia e Bruna pelo sentimento de cuidado que tem comigo.

À minha sogra e cunhada pelos lanches, cafés, jantas e cuidados que tornaram as horas de trabalho home office mais leves.

Ao Dr. Breno Coimbra e Dr. Frederico Póvoa, médicos, que estiveram presentes na minha internação contra o COVID no andamento desta tese, momento em que auxiliaram a mim e minha família de maneira excepcional.

A todos professores e colaboradores do Programa de Doutoramento em Engenharia Civil da FEUP, que contribuíram com suas experiências para esse trabalho.

A todos colegas adquiridos da FEUP em especial Antônio (Tonhão) que com sua experiência me orientou no processo.

Aos meus amigos Ygor Freitas, Hider Cordeiro, Daphinny Moreira, João Batista, Reinaldo Povoa, Rivia Teles e Kenniane Lenir que participaram desta caminhada desde a fase inicial e estiveram juntos em diversas aventuras pelo Porto.

À minha esposa, Izabella Downar, que foi parceira de todas as viagens, calmaria nos piores dias, motivadora durante todo processo e uma rocha firme que sempre me dá segurança para poder sonhar. Amor você é parte dessa conquista.

Meu muito obrigado a todos!

RESUMO

A região norte do Brasil possui temperaturas muito altas no decorrer do ano e Palmas, a capital do estado do Tocantins, apresenta-se como uma das cidades mais quentes dessa região. Em decorrência disso, o consumo de energia elétrica e os custos associados têm sido cada vez mais elevados. Sendo assim, faz-se necessário encontrar soluções que possam garantir o conforto térmico nas residências, relacionado com as reduções dos custos com energia elétrica destinadas a esse arrefecimento e também com a crescente preocupação com a sustentabilidade. Diante desta realidade, este trabalho tem como principal objetivo avaliar o desempenho de diferentes técnicas de arrefecimento passivo para melhoria do conforto térmico em climas quentes.

O percurso metodológico contemplou a montagem de duas células teste idênticas em Palmas-TO utilizando diferentes técnicas de arrefecimento passivo, separadas em duas fases: na primeira fase foi avaliado o efeito do sombreamento do vão envidraçado, quebra-sol, aplicação de película refletante no desvão do telhado, ventilação natural cruzada por ação do vento e pintura da envolvente opaca com tinta refletante quando aplicadas individualmente. Na segunda fase avaliam-se estas medidas quando combinadas entre si.

Como resultado, verificou-se que, quando aplicadas individualmente, a ventilação natural cruzada por ação do vento foi a mais eficaz durante o período noturno, enquanto que a pintura da envolvente opaca com tinta refletante mostrou melhor desempenho no período diurno. O sombreamento do vão obteve uma redução de temperatura insignificante, enquanto a película refletante não se mostrou eficaz nas condições de ensaio. No que se refere às combinações das técnicas, a pintura da envolvente opaca com tinta refletante juntamente com a ventilação natural (cruzada, cruzada apenas durante a noite e por efeito chaminé) apresentou uma melhoria do desempenho. Das três combinações possíveis a que apresentou maior diferença média diária foi a pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à ventilação natural cruzada por ação do vento. Contudo, se avaliar a eficácia das técnicas tendo em conta o período do dia, comprova-se que a ventilação por efeito chaminé gera maiores variações no período diurno, sendo as diferenças no período noturno muito semelhantes.

Após as campanhas, foi definido um plano de simulações, com uso do EnergyPlus 8.6 e do DesignBuilder 5.5.2., efetuando assim a modelação de uma casa de habitação social, considerando os principais materiais empregues nesse tipo de habitação no Brasil. Foram realizadas 96 simulações, utilizando diferentes tipos de materiais e de elementos construtivos. Para cada uma das variantes construtivas foi avaliado o efeito de três técnicas passivas de arrefecimento: (a) pintura da envolvente opaca com tinta refletante, (b) ventilação natural cruzada por ação do vento, (c) pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada a ventilação natural cruzada. Em seguida foram definidos quatro indicadores para avaliação do conforto térmico, seguindo o preconizado pelas normas ASHRAE standard 55 e EN 16798, que permitiram classificar cada uma das soluções testadas. Entre as simulações testadas a S11 (bloco de betão com espessura de 19cm, janela de aço e cobertura termoacústica, com aplicação de tinta refletante isoladamente (P) e associada ventilação (P+V)) foi a que se mostrou mais eficaz. Por fim, foi ainda desenvolvida uma aplicação móvel, recorrendo aos programas Angular e Ionic, com a finalidade de auxiliar os agentes de tomada de decisão sobre técnicas de arrefecimento passivo a serem adotadas de acordo com a demanda de cada edifício.

PALAVRAS-CHAVE: Arrefecimento passivo, Conforto térmico, Célula teste, Monitorização, Simulação numérica, EnergyPlus, Aplicação móvel.

ABSTRACT

The northern region of Brazil has very high temperatures throughout the year and Palmas, the capital of the state of Tocantins, is one of the hottest cities in this region. As a result, electricity consumption and associated costs have been increasing. Therefore, it is necessary to find solutions that can guarantee thermal comfort in homes, related to the reduction of electricity costs for this cooling and also with the growing concern for sustainability. Given this reality, this study has as its main objective to evaluate the performance of different passive cooling techniques to improve thermal comfort in hot climates.

The methodological route included the assembly of two identical test cells in Palmas-TO using different passive cooling techniques, separated into two phases, in which the first evaluated the effect of shading the glazed span-sunshade, the application of a reflective film on the attic of the roof, natural ventilation crossed by the action of the wind and the painting of the opaque envelope with reflective paint when applied individually and in the second phase when combined.

As a result, it was found that when applied individually, natural ventilation crossed by wind action was the most effective when referring to the night period, while painting the opaque envelope with reflective paint indicated better performance in the daytime period. The shading of the span obtained an insignificant temperature reduction while the reflective film was not very effective under the test conditions. Through the combination of techniques, painting the opaque surroundings with reflective paint together with natural ventilation (crossed, crossed only during the night and by chimney effect), a performance improvement was observed. Of the three possible combinations, the one with the highest average daily difference was painting the opaque envelope with reflective paint associated with natural cross ventilation by wind action. However, if the effectiveness of the techniques is evaluated separately at night and during the day, it is shown that chimney effect ventilation generates greater variations during the day, with differences at night being very similar.

After the campaigns, a simulation plan was defined, using EnergyPlus 8.6 and DesignBuilder 5.5.2., thus modeling a popular house, considering the main materials used in this type of housing in Brazil. 96 simulations were carried out, using different types of materials and construction elements. For each of the constructive variants, the effect of three passive cooling techniques was evaluated: (a) painting the opaque envelope with reflective paint, (b) natural cross ventilation by wind action, (c) painting the opaque envelope with reflective paint associated with natural cross ventilation. Next, four indicators were defined to assess thermal comfort, following the recommendations of ASHRAE standard 55 and EN 16798, which allowed classifying each of the tested solutions. Among the simulations tested the S11 (concrete block with thickness of 19cm, steel window and thermoacoustic cover, with application of reflective paint alone (P) and associated ventilation (P+V)) was the most effective. Finally, a mobile application was also developed, using the Angular and Ionic programs, to help decision-makers on passive cooling techniques to be adopted according to the demand of each building.

KEY-WORDS: Thermal monitoring, Passive cooling, Test cell, Thermal comfort, Numerical simulation, Mobile application.

ÍNDICE GERAL

RESUMO i

ABSTRACT iii

1. INTRODUÇÃO 1

1.1 ENQUADRAMENTO 1
1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIA 1
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 3

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5

2.1 MODELOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR 5
2.1.1 ENQUADRAMENTO 5
2.1.2 CONDUÇÃO 5
2.1.3 CONVECÇÃO 7
2.1.4 RADIAÇÃO 9
2.2 TÉCNICAS DE ARREFECIMENTO PASSIVO 13
2.2.1 ENQUADRAMENTO 13
2.2.2 ISOLAMENTOS 14
2.2.3 PINTURAS DE BAIXA EMISSIVIDADE 17
2.2.4 PELÍCULAS REFLETANTE 18
2.2.5 SOMBREAMENTO 18
2.2.6 VENTILAÇÃO 20
2.2.7 COBERTURA VERDE 22
2.2.8 ÁGUA NA COBERTURA 22
2.2.9 TUBOS ENTERRADOS (AR E ÁGUA) 23
2.2.10 UTILIZAÇÃO DE PHASE CHANGE MATERIALS (PCM) 24
2.2.11 VIDROS ELETROCRÓMICOS 25
2.3 MONITORIZAÇÃO DE CÉLULAS-TESTE 26

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL 31

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO 31
3.1.1 ÁREA DE ESTUDO 31
3.1.2 CÉLULAS-TESTE 32
3.2 TÉCNICAS IMPLEMENTADAS 34
3.3 EQUIPAMENTOS 37
3.3.1 SENSOR PORTÁTIL DE TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA 37
3.3.2 SENSOR PORTÁTIL DE MEDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO_2 38
3.3.3 SENSOR PORTÁTIL PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA RADIANTE - GLOBO NEGRO 40
3.3.4 ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE PALMAS -TO 41
3.4 PROCEDIMENTOS 42
3.5 AFERIÇÕES RELATIVAS 43
3.5.1 EQUIPAMENTO 43
3.5.2 CÉLULAS 44
3.5.3 PINTURA COM TINTA CORRENTE VS PINTURA COM TINTA REFLETANTE 48

4. RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL – FASE 1 51

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA EXTERIOR – FASE 1 51
4.2 SOMBREAMENTO DO VÃO ENVIDRAÇADO - QUEBRA-SOL 57
4.3 APLICAÇÃO DE PELÍCULA REFLETANTE NO DESVÃO DO TELHADO 61
4.4 VENTILAÇÃO NATURAL CRUZADA POR AÇÃO DO VENTO 65
4.5 PINTURA DA ENVOLVENTE OPACA COM TINTA REFLETANTE 70
4.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA FASE EXPERIMENTAL 1 74

5. RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL – FASE 2 75

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA EXTERIOR – FASE 2 75
5.2 PINTURA DA ENVOLVENTE OPACA COM TINTA REFLETANTE ASSOCIADA À ESTRATÉGIA DE VENTILAÇÃO 1 80
5.3 PINTURA DA ENVOLVENTE OPACA COM TINTA REFLETANTE ASSOCIADA À ESTRATÉGIA DE VENTILAÇÃO 2 82
5.4 PINTURA DA ENVOLVENTE OPACA COM TINTA REFLETANTE ASSOCIADA À ESTRATÉGIA DE VENTILAÇÃO 3 85
5.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA FASE EXPERIMENTAL 2 88

6. SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO 91

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 91
6.1.1 ENERGYPLUS 91
6.1.2 DESIGNBUILDER 93
6.1.3 ESTRATÉGIA DE SIMULAÇÃO 93
6.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAS CÉLULAS-TESTE: COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS DAS CAMPANHAS EXPERIMENTAIS 94
6.2.1 MODELAÇÃO DAS CÉLULAS-TESTE 94
6.2.2 CRIAÇÃO DO FICHEIRO CLIMÁTICO 95
6.2.3 COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS 96
6.2.4 DISCUSSÃO SOBRE A ROBUSTEZ DO MODELO 98
6.3 MODELAÇÃO DE UMA CASA DE HABITAÇÃO SOCIAL 99
6.3.1 ENQUADRAMENTO 99
6.3.2 GEOMETRIA 100
6.3.3 MATERIAIS E ELEMENTOS CONSTRUTIVOS 102
6.3.4 GANHOS INTERNOS E INFILTRAÇÃO DE AR 104
6.3.5 BASE DE DADOS CLIMÁTICOS 108
6.4 ESTRATÉGIA PARA A AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UMA CASA DE HABITAÇÃO SOCIAL 109
6.4.1 CENÁRIOS SIMULADOS 109
6.4.2 NORMAS UTILIZADAS 111
6.4.2.1 Norma ASHRAE standard 55 – método adaptativo 111
6.4.2.2 Norma EN 16798 – método adaptativo 112
6.4.3 DEFINIÇÃO DE INDICADORES DE DESEMPENHO 113
6.5 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA CASA DE HABITAÇÃO SOCIAL 116
6.5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO REFERÊNCIA (S) 116
6.5.1.1 Metodologia de interpretação dos resultados 116

6.5.1.2 Análise dos parâmetros construtivos do edifício 118
6.5.2 APLICAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE ARREFECIMENTO PASSIVO (P), (V) E (P+V) 123
6.5.2.1 Simulação da estratégia com pintura da envolvente opaca com tinta refletante (P) 123
6.5.2.2 Simulação da estratégia com ventilação natural (V) 125
6.5.2.3 Simulação da estratégia com pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada a ventilação natural (P+V) 127
6.5.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE CONFORTO TÉRMICO 128

7. DESENVOLVIMENTO DE UMA APLICAÇÃO MÓVEL 131

7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 131
7.2 ESCOLHA DOS PROGRAMAS ANGULAR E IONIC 131
7.3 AMBIENTE GRÁFICO DA APLICAÇÃO MÓVEL 133
7.3.1 JANELAS DE ABERTURA, CADASTRO DO USUÁRIO, LOGIN E SENHA 133
7.3.2 DADOS DE ENTRADA - INPUT 135
7.3.3 DADOS DE SAÍDA - OUTPUT 137

8. CONCLUSÕES 139

8.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS 139
8.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 141

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 143

ANEXO I 153

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA CASA DE HABITAÇÃO SOCIAL 153

ANEXO II 199

TUTORIAL DE EXECUÇÃO – APLICAÇÃO MÓVEL 199

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Plano de trabalho com tarefas e interações 2

Figura 2 – Esquema de condução 6

Figura 3 - Esquema de convecção 8

Figura 4 – Espectro eletromagnético 10

Figura 5 – Esquema de radiação 11

Figura 6 - Categorização dos princípios de arrefecimento passivo com base na revisão de literatura, adaptado de Prieto, et al. (2018) 14

Figura 7 - Materiais de isolamento endógenos – A) casca de arroz; B) bagaço da cana; C) argamassa térmica; D) casca do coco; E) folha de buriti 15

Figura 8 - Paredes de água com isolante externo 16

Figura 9 - Pinturas de baixa emissividade 17

Figura 10 - Película refletante 18

Figura 11 - Dispositivos de sombreamento 19

Figura 12 – Sombreamento com cobogó (esq) e com pérgulas (dir) 20

Figura 13 - Ventilação em ambientes internos 21

Figura 14 - Cobertura verde 22

Figura 15 - Água na cobertura 23

Figura 16 - Tubos enterrados 24

Figura 17 - Vista de uma parede leve com introdução de microcápsulas PCM no reboco interno e um edifício com duas salas teste, uma utilizando reboco com PCM e outra com reboco convencional, por Shossig, et al., 2005. 24

Figura 18- Células-teste com vidros eletrocrómicos (esq) e vidros tradicionais (dir), por Pittaluga, et al., (2013). 25

Figura 19 – Células-teste utilizadas por Roque, et al. (2021). 26

Figura 20 – Células-teste desenvolvidas por Nahar, et al. (1999). 27

Figura 21 - Células teste utilizadas por Peralta (2006) 27

Figura 22 – Célula-teste utilizada por Marinosci, et al. (2011) 28

Figura 23 – Célula-teste utilizada por Mateus, et al. (2014) 29

Figura 24 – Célula-teste utilizada por Silva, et al. (2016) 29

Figura 25 – Célula teste utilizada por Kachkouch, et al. (2018) 30

Figura 26- Localização do Tocantins e de Palmas. 31

Figura 27 – Médias mensais da temperatura e precipitação, no estado do Tocantins, adaptado de SEPLAN (2012) 32

Figura 28- Campus Palmas Universidade Federal do Tocantins-UFT. A amarelo o edifício de laboratórios do curso de Engenharia Civil, a vermelho a localização das células-teste..... 33

Figura 29 - Dimensões e orientação das células-teste 33

Figura 30 – Células-teste..... 34

Figura 31- Campanha 1 – sombreamento do vão envidraçado - quebra-sol..... 35

Figura 32 – Campanha 2 – aplicação de película refletante no desvão do telhado 35

Figura 33 – Campanha 3 – ventilação natural cruzada por ação do vento..... 35

Figura 34 – Campanha 4 – pintura na envolvente opaca com tinta refletante..... 36

Figura 35 – Campanhas 5, 6 e 7, aberturas inferiores (fachadas oeste e este) e superior (teto) e pintura da envolvente opaca com tinta refletante..... 36

Figura 36 - Sensor portátil 37

Figura 37- Exemplo da técnica do declive. A) diminuição do gás traçador ao longo do tempo; B) logaritmo da concentração do gás traçador versus tempo (adaptado de AWBI, 2003). 39

Figura 38 - Equipamento C.A 1510 40

Figura 39- Globo negro TGD-200 da Instrutherm 40

Figura 40- Localização relativa da estação automática INMET em Palmas - TO e das células-teste . 42

Figura 41- Croqui das células e posição dos equipamentos 42

Figura 42- Ciclo de verificação da temperatura e humidade relativa..... 43

Figura 43- Verificação da temperatura medida pelos sensores portáteis..... 43

Figura 44- Verificação da humidade relativa medida pelos sensores portáteis..... 44

Figura 45- Variação da temperatura ao longo do período experimental preliminar..... 44

Figura 46- Temperatura ambiente nas células e no exterior..... 45

Figura 47- Variação da humidade relativa ao longo do período experimental preliminar..... 45

Figura 48- Humidade relativa das células-teste e do ambiente exterior 46

Figura 49- Temperatura radiante x Temperatura bulbo seco: A) célula C1; B) célula C2 46

Figura 50- Renovações por hora das células-teste..... 47

Figura 51- Variação da temperatura no interior da célula C1 (tinta refletante) e da célula C2 (tinta corrente)..... 48

Figura 52- Variação da temperatura entre os dias 23 e 25 de agosto no interior da célula C1 (tinta refletante) e da célula C2 (tinta corrente) 48

Figura 53- Boxplots das diferenças entre as temperaturas no interior da célula C2 (tinta corrente) e da célula C1 (tinta refletante), por hora, para todo o período de medição..... 49

Figura 54- Velocidade do vento e variação da temperatura nas horas da campanha – pintura tinta refletante x pintura tinta corrente..... 49

Figura 55- Temperatura exterior para as campanhas de 1 a 4 (de cima para baixo) – fase 1..... 52

Figura 56- Humidade relativa exterior para as campanhas de 1 a 4 (de cima para baixo) – fase 1 53

Figura 57- Radiação solar para as campanhas de 1 a 4 (de cima para baixo) – fase 1 54

Figura 58- Velocidade do vento para as campanhas de 1 a 4 (de cima para baixo) – fase 1 56

Figura 59- Direção do vento para as campanhas: 1, 2 (superior e inferior esq), 3 e 4 (superior e inferior dir) fase 1..... 57

Figura 60- Temperatura ambiente - quebra-sol 58

Figura 61- Temperatura ambiente entre os dias 13 e 14 de junho– quebra-sol..... 58

Figura 62- Diferenças de temperatura ambiente (C2-C1) em média horária – quebra-sol 59

Figura 63- Diferença geral da temperatura ambiente diária de C2 e C1 durante a implementação do efeito – quebra-sol..... 59

Figura 64- Humidade relativa ambiente durante período de campanha – quebra-sol 60

Figura 65- Humidade relativa ambiente – quebra-sol..... 60

Figura 66- Média horária de: A) velocidade do vento com direção predominante e diferença de temperatura, B) temperatura do exterior, C) radiação solar, em função das horas do dia – quebra-sol 61

Figura 67- Temperatura ambiente – película refletante..... 62

Figura 68- Temperatura ambiente entre os dias 31 e 1 de agosto– película refletante 62

Figura 69- Diferença de temperatura ambiente (C2-C1) em média horária – película refletante 63

Figura 70- Diferença geral da temperatura ambiente diária de C2 e C1 durante a implementação do efeito – película refletante 63

Figura 71 - Humidade relativa ambiente durante período de campanha – película refletante..... 64

Figura 72 - Humidade relativa Ambiente – película refletante..... 64

Figura 73 - Média horária de: A) velocidade do vento com direção predominante e diferença de temperatura, B) temperatura exterior, C) radiação solar, em função das horas do dia – película refletante 65

Figura 74- Temperatura ambiente – ventilação natural cruzada 66

Figura 75- Temperatura ambiente entre os dias 20 e 21 de agosto – ventilação natural cruzada 66

Figura 76- Diferenças de temperatura ambiente (C2-C1) em média horária - ventilação natural cruzada 67

Figura 77- Diferença geral da temperatura ambiente diária de C2 e C1 durante a implementação do efeito – ventilação natural cruzada 67

Figura 78- Humidade relativa ambiente – ventilação natural cruzada..... 68

Figura 79- Humidade relativa ambiente para células e exterior - ventilação natural cruzada..... 68

Figura 80- Média horária de: A) velocidade do vento com direção predominante e diferença de temperatura, B) temperatura exterior, C) radiação solar, em função das horas do dia – ventilação natural cruzada..... 69

Figura 81- Renovação do ar por hora (h^{-1}) – ventilação natural cruzada 70

Figura 82- Temperatura ambiente – pintura com tinta refletante 70

Figura 83- Temperatura ambiente entre os dias 13 e 14 de outubro– Pintura com tinta refletante 71

Figura 84- Diferenças de temperatura ambiente (C2-C1) em média horária – pintura com tinta refletante 71

Figura 85- Diferença geral da temperatura ambiente diária de C2 e C1 durante a implementação do efeito – pintura com tinta refletante 72

Figura 86- Humidade relativa ambiente – pintura com tinta refletante 72

Figura 87- Humidade relativa ambiente para o interior das células e o exterior – pintura com tinta refletante 72

Figura 88- Média horária de: A) velocidade do vento com direção predominante e diferença de temperatura, B) temperatura exterior, C) radiação solar, em função das horas do dia – pintura com tinta refletante 73

Figura 89- Temperatura exterior para as campanhas 5 a 7 (de cima para baixo) – fase 2 75

Figura 90- Humidade relativa exterior para as campanhas 5 a 7 (de cima para baixo) – fase 2 76

Figura 91- Radiação solar para as campanhas 5 a 7 (de cima para baixo) – fase 2 77

Figura 92- Velocidade do vento para as campanhas 5 a 7 (de cima para baixo) – fase 2 78

Figura 93- Direção do vento para as campanhas 5 e 6 (superior e inferior esq) e 7 (superior dir) fase 2 79

Figura 94- Temperatura ambiente – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 1 80

Figura 95- Temperatura ambiente entre os dias 26 e 28 de fevereiro - pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 1 80

Figura 96- Diferenças de temperatura ambiente (C2-C1) em média horária – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 1 81

Figura 97- Diferença geral da temperatura ambiente diária de C2 e C1 durante a implementação do efeito – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 1 81

Figura 98- Média horária de: A) velocidade do vento com direção predominante e diferença de temperatura, B) temperatura do exterior, C) radiação solar, em função das horas do dia – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 1 82

Figura 99- Temperatura ambiente – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 2 83

Figura 100- Temperatura ambiente entre os dias 11 e 13 de março – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 2 83

Figura 101- Diferenças de temperatura ambiente (C2-C1) em média horária – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 2 84

Figura 102- Diferença geral da temperatura ambiente diária de C2 e C1 durante a implementação do efeito – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 2 84

Figura 103- Média horária de: A) velocidade do vento com direção predominante e diferença de temperatura, B) temperatura do exterior, C) radiação solar, em função das horas do dia – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 2 85

Figura 104- Temperatura ambiente – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 3..... 86

Figura 105- Temperatura ambiente entre os dias 13 e 15 de abril – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 3 86

Figura 106- Diferenças de temperatura ambiente (C2-C1) em média horária – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 3 87

Figura 107- Diferença geral da temperatura ambiente diária de C2 e C1 durante a implementação do efeito – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 3 87

Figura 108- Média horária de: A) velocidade do vento com direção predominante e diferença de temperatura, B) temperatura exterior, C) radiação solar, em função das horas do dia – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 3 88

Figura 109- Aplicações e serviços adicionais suportados pelo programa EnergyPlus 91

Figura 110- Interface do DesignBuilder 93

Figura 111- A) Perspetiva, B) alçado poente e C) alçado norte 94

Figura 112- Preparação do ficheiro em formato EPW 96

Figura 113- Comparação entre as temperaturas medidas e simuladas – SI 96

Figura 114- Comparação entre as temperaturas medidas e simuladas – SII 97

Figura 115- Comparação entre as temperaturas medidas e simuladas – SIII 97

Figura 116- Comparação entre as temperaturas medidas e simuladas – SIV 97

Figura 117 – Programa atual de habitação de interesse social do governo federal..... 99

Figura 118 - Perspetivas da casa de habitação social modelada como caso de estudo 100

Figura 119- Alçados frontal, posterior e laterais 101

Figura 120 - Modulação no DesignBuilder da casa de habitação social com as suas divisões internas 101

Figura 121 - Local do ensaio: A) localização da casa (Google Earth); B) planta; C) habitação in loco 104

Figura 122 - Porta, janela, piso e forro da construção. 105

Figura 123 - Equipamentos utilizados: A) sensor portátil / Data-logger (concentração de CO_2, temperatura e humidade relativa); B) extintor de CO_2; C) ventilador de teto. 106

Figura 124- Variação do logaritmo da concentração de dióxido de carbono ao longo do período de ensaio: A) ensaio 1; B) ensaio 2; C) ensaio 3; D) ensaio 4; e E) ensaio 5. 107

Figura 125- Temperatura exterior do TMY..... 109

Figura 126- Temperatura operativa aceitável para os espaços naturalmente condicionados. Fonte: ASHRAE 55, 2017, p. 15..... 112

Figura 127 - Temperatura operativa interior em função da temperatura média exterior exponencialmente ponderada, em edifícios sem sistemas de arrefecimento mecânico. Fonte: EN 16798-1, 2019, p. 32 112

Figura 128 – Indicadores de desempenho: A) indicador 1; B) indicador 2; C) indicador 3 e D) indicador 4 115

Figura 129 – Variação anual da temperatura operativa interior para a simulação S1 (S) e a temperatura exterior 116

Figura 130 – Resultados da temperatura operativa para a simulação S1 (S) com as linhas limite de conforto para as normas EN 16798 (superior) e ASHRAE 55 (inferior). 118

Figura 131 – Variação anual da temperatura operativa interior para S1 (S) e S2 (S) 119

Figura 132 – Variação anual da temperatura operativa interior para S1 (S) e S4 (S) 119

Figura 133 – Variação anual da temperatura operativa interior para S1 (S) e S5 (S) 120

Figura 134 – Variação anual da temperatura operativa interior para S1 (S), S9 (S) e S17 (S) 121

Figura 135 – Variação anual da temperatura operativa interior para S5 (S) e S11 (S) 122

Figura 136 – Resultados da temperatura operativa para S5 (S) (superior) e S11 (S) (inferior) com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798. 122

Figura 137 – Resultados da temperatura operativa para S5 (S) (superior) e S11 (S) (inferior) com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55. 123

Figura 138 – Variação anual da temperatura operativa interior para S1 (S) e S1 (P) 124

Figura 139 – Resultados da temperatura operativa para S1 (P) com as linhas limite de conforto para as normas EN 16798 (superior) e ASHRAE 55 (inferior). 125

Figura 140 – Variação anual da temperatura operativa interior para S1 (V) e S1 (P) 125

Figura 141 – Resultados da temperatura operativa para S1 (V) com as linhas limite de conforto para as normas EN 16798 (superior) e ASHRAE 55 (inferior). 126

Figura 142 – Variação anual da temperatura operativa interior para S1 (V) e S1 (P+V) 127

Figura 143 – Resultados da temperatura operativa para S1 (P+V) com as linhas limite de conforto para as normas EN 16798 (superior) e ASHRAE 55 (inferior). 128

Figura 144- Ambiente de trabalho angular.io. 132

Figura 145- Esquema da atribuição da Ionic. Fonte: Joram, 2020. 133

Figura 146- Apresentação da janela inicial da aplicação 133

Figura 147- Apresentação da segunda janela da aplicação - cadastro das Habitações 134

Figura 148- Apresentação da terceira janela da aplicação – opção de cadastro de habitação 134

Figura 149- Dados de entrada de material utilizado na construção das paredes da envolvente exterior 135

Figura 150- Dados de entrada relacionados com a posição dos blocos das paredes da envolvente exterior 135

Figura 151- Dados de entrada relacionados com o tipo de janelas 136

Figura 152- Dados de entrada relacionados com o tipo de cobertura 136

Figura 153- Dados de entrada relacionados com a norma utilizada na avaliação do conforto térmico 137

Figura 154- Resultado com a apresentação das técnicas mais eficientes de acordo com a metodologia de atribuição de medalhas 138

Figura 155- Apresentação da janela da aplicação para descarregar o tutorial de execução 138

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção (Incropera, et al., 2008) 9

Tabela 2 – Valores de h_c para a envolvente exterior de um edifício 9

Tabela 3 – Absorção (αS) para radiação solar e emissividade (ε) para radiações a temperaturas comuns 11

Tabela 4 - Cronograma das medições efetuadas. 37

Tabela 5 – Temperatura ºC (médias, máximas e mínimas) 45

Tabela 6 - Humidade relativa % (médias, máximas e mínimas) 46

Tabela 7 – Valores das renovações por hora por ensaio realizado 47

Tabela 8 - Temperatura média, máxima e mínima no interior da célula C1 (tinta refletante) e da célula C2 (tinta corrente) 49

Tabela 9 – Temperatura ambiente do exterior (ºC) – fase 1 51

Tabela 10 – Humidade relativa exterior (%) – fase 1 53

Tabela 11 - Radiação solar (W/m²) – fase 1 55

Tabela 12 – Velocidade do vento (m/s) – fase 1 55

Tabela 13 - Temperatura (ºC) – quebra-sol 58

Tabela 14 - Humidade relativa (%) – quebra-sol 60

Tabela 15 - Temperatura (ºC) – película refletante 62

Tabela 16 - Humidade relativa (%) – película refletante 64

Tabela 17 - Temperatura (ºC) – ventilação natural cruzada 66

Tabela 18 - Humidade relativa (%) – ventilação natural cruzada 68

Tabela 19 - Temperatura (ºC) – pintura com tinta refletante 71

Tabela 20 - Humidade relativa (%) – pintura com tinta refletante 73

Tabela 21 - Diferença entre a média de temperatura da célula C1 e da célula C2 em °C – fase 1 74

Tabela 22 - Temperatura ambiente do exterior (ºC) – fase 2 76

Tabela 23 – Humidade relativa no exterior (%) – fase 2 77

Tabela 24 - Radiação solar (W/m²) – fase 2 78

Tabela 25 - Velocidade do vento (m/s) – fase 2 79

Tabela 26 - Temperatura (ºC) – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 1 80

Tabela 27 - Temperatura (ºC) – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 2 83

Tabela 28 - Temperatura (ºC) – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 3 86

Tabela 29 - Diferença de temperatura entre a célula C1 e a célula C2 em °C 89

Tabela 30 – Propriedades dos materiais 95

Tabela 31 - Dados gerais quanto à robustez do modelo 98

Tabela 32 - Dados diurnos quanto à robustez do modelo 98

Tabela 33 - Dados noturnos quanto à robustez do modelo 98

Tabela 34 – Tipos de elementos construtivos 102

Tabela 35 – Propriedades térmicas dos materiais utilizados 103

Tabela 36 - Níveis de temperatura e humidade relativa conforme horário e ensaio realizado. 105

Tabela 37- Resultados da taxa de renovação horária (RPH) e do caudal de ventilação de todos os ensaios realizados 108

Tabela 38 – Parâmetros variáveis relevantes das simulações 110

Tabela 39 – Técnicas de arrefecimento passivo utilizadas nas simulações 111

Tabela 40 – Limites de temperatura operativa. Fonte: EN 16798, 2019. 113

Tabela 41 – Resultado dos indicadores para simulação S1 (S) 117

Tabela 42 – Resultado dos Indicadores para S1 (S) e S2 (S) segundo as normas EN 16798 e ASHRAE 55 119

Tabela 43 – Resultado dos indicadores para S1 (S) e S4 (S), segundo as normas EN 16798 e ASHRAE 55 120

Tabela 44 – Resultado dos indicadores para S1 (S) e S5 (S), segundo as normas EN 16798 e ASHRAE 55 120

Tabela 45 - Resultado dos Indicadores para S1 (S), S9 (S) e S17 (S), segundo as normas EN 16798 e ASHRAE 55 121

Tabela 46 – Resultado dos Indicadores para S5 (S) e S11 (S), segundo as normas EN 16798 e ASHRAE 55 123

Tabela 47 – Resultado dos indicadores para simulação S1 (P) 124

Tabela 48 – Resultado dos indicadores para simulação S1 (V) 126

Tabela 49 – Resultado dos indicadores para simulação S1 (P+V) 127

Tabela 50 – Resultado dos indicadores para simulação S1, segundo as normas EN 16798 e ASHRAE 55 128

Tabela 51 – Critérios de pontuação 137

Tabela 52 – Critérios de pontuação para a atribuição das medalhas 137

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

SÍMBOLOS

h_{cg} - coeficiente de transferência de calor por convecção ao nível do globo [W/m².K]

$E_n -$ radiação total emitida pelo corpo negro $[\mathrm{W/m^2}]$

$G_{abs} - a$bsortividade [-]

T_a - temperatura do ar [K]

T_g - temperatura de globo [K]

T_{rdmed} – temperatura média radiante [K]

T∞ - temperatura do fluido [K]

$\dot{q}$ - geração de calor por unidade de volume no meio atravessado [W/m³]

ε_g - emissividade do globo negro [-]

As - área da superfície transversal à direção do fluxo [m²]

C(t) - concentração do gás traçador [ppm]

C_p - calor específico do meio atravessado [J/(kg.K)]

e - espessura do material [cm]

h - coeficiente de convecção [W/(m².K)]

h_c - Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/(m².K)]

$I_{s,perp}$ - Componente da radiação solar normal à superfície [W/m²]

Q - caudal de ar exterior [m³/s]

q_{solar} - densidade do fluxo de calor absorvido pela superfície devido à radiação solar incidente [W/m²]

q_x - fluxo de calor na direção x [W/m²]

R - resistência térmica [(m².ºC)/W]

UR – humidade relativa [%]

V - volume efetivo do espaço [m³]

V_v - velocidade do vento [m/s]

α - coeficiente de absorção [-]

α_s - Coeficiente de absorção para a radiação solar [-]

ε – emissividade [-]

λ - coeficiente de condutibilidade térmica do meio atravessado [W/(m.K)]

λ= condutibilidade térmica [W/(m.ºC)]

ρ - coeficiente de reflexão [-]

ρ - massa volúmica [kg/m³]

σ - constante de Stefan-Boltzman [5,67x10^{-8} W/m².K^4]

τ - coeficiente de transmissão [-]

ρ - corpo cinzento opaco [-]

∂T - diferencial de temperatura entre as superfícies [K]

ρ_{air} – massa volúmica do ar [kg/m³]

C_p^{air} – calor específico do ar da zona [J/kg.K]

C_T- fator de ponderação da transferência de calor sensível [K/m³]

Q_{sys} – taxa de troca de calor entre o ar interior da zona e o sistema de climatização [W/s]

Q_1- ganhos internos por convecção [J/s]

$N_{surfaces}$- número total de superfícies na zona [-]

N_{zones}- Número total de zonas [-]

m_{inf}- massa de ar infiltrado [kg/s]

m_i- fluxo de ar no nó i [kg/s]

C_p^{air}- calor especifico do ar [J/(kg.K)]

hi – coeficiente de troca de calor [W/m².K]

Θ_i - valor limite da temperatura operativa interior [-]

ACRÓNIMOS

ASHRAE - American society of heating, refrigerating and air conditioning engineers

ASTM – American society for testing and materials

BLAST – Basic local alignment search tool

CAD - Computer aided design

CCIM - Centro de controle integrado de informações meteorológicas

CEULP – Centro universitário luterano de palmas

CTF - Conduction transference functions

CTR – Carga térmica de radiação

DICLA – Divisão de acreditação de laboratórios

DOE - United states department of energy

EMA - Estação meteorológica automática

EN – Norma europeia

EPS - Poliestireno expandido

ESP-r - Programa de simulação térmica dinâmica

EUA – Estados Unidos da América

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FNQ - Fundação nacional de qualidade

HIS - Habitação de interesse social

IBGE – Instituto brasileiro de geografia e estatística

INMET - Instituto nacional de meteorologia

INMETRO – Instituto nacional de metrologia, qualidade e tecnologia

IOS - Iphone operating system

ISO – Organização internacional de normalização

ITGU - Índice de temperatura do globo negro e humidade

LFC - Laboratório de física das construções

LSF - Lightweight steel framing

NBR – Norma brasileira

NIR - Infravermelho visível e próximo

NIT – Norma inmetro técnica

OSB - Painel de tiras de madeira orientadas

PCM - Phase change materials

PPM – Partes por milhão

PR – Paraná

PVC - Policloreto de vinilo

RPH - Renovação por hora

RTQ-R - Regulamento brasileiro de eficiência energética

SC – Santa Catarina

SD – Sandisk

SEPLAN – Secretaria de planejamento

SRI - Índice de reflectância solar

TBS – Temperatura de bulbo seco

TGN- Temperatura de globo negro

TMY - Typical meteorological year

TRNSYS – Trannsient systems simulation

UFT – Universidade federal do Tocantins

ULBRA – Universidade luterana do Brasil

UR – Humidade relativa

USB - Universal serial bus

ABREVIATURAS

3D – Três dimensões

CO_2 – Dióxido de carbono

C1 – Célula 01

C2 – Célula 02

Ext – Exterior

Fig - Figura

HRext – Humidade relativa exterior

HRint – Humidade relativa interior

Int – Interior

Máx - Máximo

Méd – Media

Min – Mínimo

Ref - Referência

SI – Simulação um

SII – Simulação dois

SIII – Simulação três

SIV – Simulação quatro

Text – Temperatura exterior

Tint – Temperatura interior

Tmáx – Temperatura máxima

Tmédia – Temperatura média

Tmin – Temperatura mínima

1
INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

O setor da construção civil é responsável por parte considerável da demanda do consumo de energia. A literatura estima entre 30% a 40% do total de consumo global. No caso de países com clima quente, essa demanda é alavancada pela necessidade de refrigeração dos ambientes internos para a melhoria do conforto térmico. A procura por eficiência e sustentabilidade, desde a fase de projeto até as etapas de execução, tem-se tornado cada vez mais um fator diferenciador das novas construções, estando presentes no mercado cada vez mais novas alternativas para reduzir gastos e, em simultâneo, preservar o meio ambiente.

Em climas quentes, investe-se muito em arrefecimento, pois, sem ele, o conforto térmico não atinge os níveis adequados à utilização dos ambientes internos. O arrefecimento por aparelhos de ar-condicionado implica um grande investimento financeiro, principalmente devido ao elevado consumo de energia, e, consequentemente, de recursos naturais.

Para caracterizar uma edificação como verde tem-se em conta também a sua capacidade de economizar energia. Logo, ao contrário do ar-condicionado, o arrefecimento passivo vem ao encontro do objetivo de uma construção mais sustentável, ao possibilitar a diminuição da necessidade energética para alcançar o conforto térmico almejado.

Nas técnicas passivas de arrefecimento são utilizados revestimentos, sombreamentos, vegetação, água e características arquitetónicas que possibilitam um ambiente interior com temperatura mais amena do que o exterior, sem a utilização de qualquer tipo de energia. Para a avaliação da eficácia destas técnicas é imprescindível a monitorização das condições climáticas interiores das edificações.

1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIA

Neste trabalho, foi testada a eficácia de algumas técnicas de arrefecimento passivo. A escolha da localidade para a realização desta experiência é a capital mais recente do Brasil, Palmas, situada na região norte do Brasil, estado do Tocantins, em latitude próxima à linha do Equador, logo com elevadas temperaturas durante todo o ano. Nesta região, o arrefecimento com o menor consumo de energia possível é uma contribuição importante para o desenvolvimento sustentável.

Desta forma, o principal objetivo desta tese é avaliar o desempenho de diferentes técnicas de arrefecimento passivo para a melhoria do conforto térmico em climas quentes, por meio da utilização comparativa de técnicas, meios, métodos e materiais construtivos que sejam capazes de demonstrar a

eficácia e eficiência dos elementos utilizados em cada unidade avaliada. De modo a alcançar este objetivo estabeleceu-se um conjunto de tarefas que conduzissem este trabalho à finalidade proposta, entre elas:

- Revisão da literatura sobre técnicas de arrefecimento passivo e o seu impacto no desempenho térmico de edifícios e sobre metodologias de avaliação do conforto térmico;
- Seleção das técnicas de arrefecimento passivo com maior potencial de desempenho no contexto climático de Palmas-TO;
- Construção de duas células-teste em Palmas-TO na UFT;
- Monitorização das células em duas fases, uma com as técnicas implementadas individualmente e outra com as técnicas combinadas;
- Simulação numérica para avaliação da aplicação das técnicas de arrefecimento passivo numa casa de habitação social[1], considerando a utilização de diferentes elementos construtivos num contexto climático de clima quente;
- Comparação do desempenho das diferentes técnicas de arrefecimento passivo simuladas para a melhoria do conforto térmico, segundo as normas EN 16798 e ASHRAE 55, utilizando quatro indicadores distintos;
- Desenvolvimento de uma aplicação móvel para apoio à tomada de decisão sobre a escolha das técnicas de arrefecimento passivo mais eficientes.

Com objetivo de facilitar a leitura e visualização do conjunto de tarefas descritas nos pontos elencados acima, é apresentada a Figura 1 que reune de forma esquemática toda a informação acima.

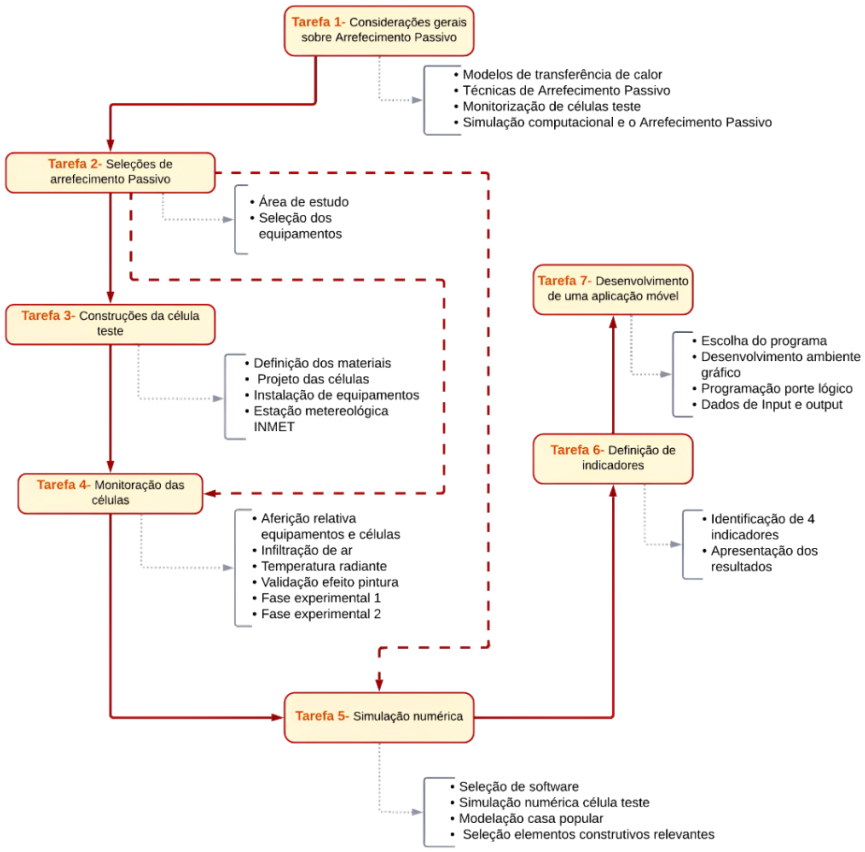


Figura 1- Plano de trabalho com tarefas e interações

[1] No Brasil designada por casa popular.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente estudo apresenta-se organizado em oito capítulos, numa estrutura esquemática que procura responder ao problema inicialmente identificado de forma que os resultados finais forneçam e traduzam os passos e tarefas definidos aquando dos objetivos. Assim, apresenta-se em seguida sumariamente o conteúdo de cada um dos capítulos.

- Capítulo 1 – introduz-se o tema de estudo, fazendo o respetivo enquadramento da realidade atual em que se procura a melhoria no desempenho energético das edificações. Indicam-se os objetivos e a metodologia com as estratégias adotadas no trabalho;
- Capítulo 2 – abordam-se os fundamentos teóricos e o estado da arte relacionado com princípios físicos de transferência de calor, técnicas de arrefecimento passivo e formas de monitorização em estudos de arrefecimento de edificações;
- Capítulo 3 – apresenta-se a metodologia dos ensaios, com descrição do local de estudo, da execução das células-teste, das técnicas que foram empregues na campanha de ensaio, bem como a descrição e locações dos equipamentos que foram empregues, a aferição relativa dos equipamentos utilizados e das duas células construídas e um cronograma de todas as campanhas realizadas;
- Capítulo 4 – apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos na fase experimental 1, divididos nas seguintes campanhas: Sombreamento do vão envidraçado – quebra-sol; aplicação de película refletante no desvão do telhado; ventilação natural cruzada por ação do vento e pintura da envolvente opaca com tinta refletante;
- Capítulo 5 – apresentam-se e discutem-se os resultados da fase experimental 2 separados por campanhas em que se procedeu à aplicação simultânea de técnicas, com a associação da pintura da envolvente opaca com tinta refletante e três estratégias de ventilação natural distintas;
- Capítulo 6 – procede-se à simulação numérica do desempenho térmico. Apresentam-se, descrevem-se e caracterizam-se os softwares escolhidos (EnergyPlus e DesignBuilder) para o desenvolvimento do estudo e as motivações da sua escolha. Compara-se também os resultados experimentais descritos nos capítulos 4 e 5 com os resultados simulados, a modelação de uma casa de habitação social, bem como a seleção dos elementos construtivos mais relevantes, detalhando as estratégias para avaliação do desempenho térmico da habitação adotada. Por fim, expõem-se os resultados obtidos após a definição de quatro indicadores.
- Capítulo 7 – descreve-se o desenvolvimento de uma aplicação móvel cuja finalidade é auxiliar na tomada de decisão de qual técnica, entre as estudadas, melhor responde às necessidades de cada usuário. Apresenta-se o programa utilizado para o desenvolvimento da aplicação e o ambiente gráfico final, com todas as suas projeções.
- Capítulo 8 – apresentam-se as considerações finais sobre o tema em estudo, juntamente com as conclusões que se podem retirar da aplicação das técnicas de arrefecimento passivo. Também se apresentam alguns possíveis desenvolvimentos futuros na área de investigação a que se dedica esta tese.

2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MODELOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

2.1.1 ENQUADRAMENTO

O tema de investigação que se explora na presente tese torna necessário abordar o conceito físico de transferência de calor, pois constitui o alicerce do planeamento das técnicas de arrefecimento passivo. É este conceito que se aplica também ao conforto térmico humano, uma vez que a sensação de conforto surge da relação entre esforço realizado e a resposta do organismo no sentido de manter o balanço térmico. Por outras palavras, o corpo humano é regido por um sistema termodinâmico, que, em busca do balanço térmico, interage continuamente com o meio ambiente através da produção de calor. Esta relação implica uma constante troca de calor entre o corpo e o meio, regida pelas leis da física da condução, convecção e radiação, influenciadas pelas variáveis ou mecanismos de adaptação fisiológica, fatores individuais e condições ambientais. A eficiência do arrefecimento passivo depende diretamente da capacidade de transferência de calor ou a quase ausência dela nos materiais utilizados na construção dos edifícios (Ferreira, 2017).

2.1.2 CONDUÇÃO

Em 1822, com a Lei de Fourier, batizada com o nome do físico que a propôs, foi possível quantificar a transferência de calor na situação em que *x* é a direção única em que acontece tal transferência (Çengel e Ghajar, 2012):

$$\frac{q_x}{A} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \tag{1}$$

em que:

$\frac{q_x}{A}$	[W/m^2]	Fluxo de calor na direção *x* que atravessa determinado meio infinitesimal de área superficial *A* e espessura ∂x
λ	[W/(m.K)]	Coeficiente de condutibilidade térmica do meio atravessado

∂T	[K]	Diferencial de temperatura entre as superfícies que delimitam o meio infinitesimal, sendo numericamente igual à diferença entre a temperatura mais baixa e a mais alta

O fluxo de calor é uma grandeza vetorial. Considerando que o material possui homogeneidade e isotropia, com diferença de temperaturas nas três direções do espaço, existem, assim, três fluxos de calor e a equação pode ser escrita como (Çengel e Ghajar, 2012):

$$\frac{\vec{q}}{A} = -\lambda \overrightarrow{grad}\, T = -\lambda \nabla T = -\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z}\vec{k}\right) \quad (2)$$

Na análise de transferência de calor por condução, considerar as propriedades dos materiais como uniformes em todas as direções é válido na maior parte dos materiais, sendo necessária outra abordagem nos que possuem propriedades diferentes em direções diferentes (Çengel e Ghajar, 2012).

A condução pode ocorrer em sólidos, líquidos e gases (Figura 2). Na condução, a energia entre partículas é transferida da que possui mais energia para a que possui menos energia. Nos sólidos, as partículas estão em rede e a energia é transferida por eletrões livres, já em líquidos e gases, a transferência ocorre devido aos movimentos, vibrações e rotações moleculares (Incropera, et al., 2008). Quanto maior a agitação (energia) molecular, maior a temperatura do corpo. No momento do choque entre moléculas, ocorre a transferência de energia para moléculas com menor agitação. Assim, num gradiente de temperatura, a condução de calor ocorre sempre na direção da menor temperatura.

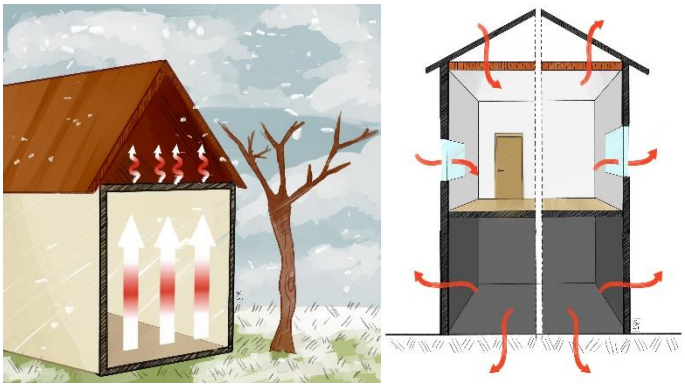


Figura 2 – Esquema de condução

Segundo Incropera, et al. (2008), relacionando os fluxos de calor que atravessam o material com a variação da energia interna e considerando o princípio de conservação de energia, a taxa de variação da energia interna com o tempo é igual à diferença entre o fluxo de energia que entra e que sai somado à taxa de geração de calor interna:

$$\rho . C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right)}{\partial y} + \frac{\partial\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right)}{\partial z} + \dot{q} \quad (3)$$

em que:

ρ	[kg/m^3]	Massa volúmica do meio atravessado

C_p	[J/(kg.K)]	Calor específico do meio atravessado
$\dot{q}$	[W/m^3]	Geração de calor por unidade de volume no meio atravessado

A distribuição das temperaturas pode ser determinada por meio da Lei de Fourier, Equação (4), em que a condução de calor é reescrita considerando os meios isotrópico e homogéneo (Hens, 2007):

$$div[\lambda . grad(T)] = \frac{\partial(\rho . c . T)}{\partial t} - Q' \quad (4)$$

em que:

ρ	[kg/m^3]	Massa volúmica do material seco
c	[J/(kg.K)]	Calor específico do meio atravessado
Q'	[W/m^3]	Fluxo de calor libertado ou absorvido
t	[s]	Tempo
∂T	[K]	Diferencial de temperatura entre as superfícies que delimitam o meio infinitesimal, sendo numericamente igual à diferença entre a temperatura mais baixa e a mais alta
T	[K]	Temperatura
λ	[W/(m.K)]	Coeficiente de condutibilidade térmica do meio atravessado

O fluxo de calor em determinado meio depende de fatores como o tipo de material, a temperatura do meio em que está inserido, a espessura e a geometria. Ao analisar determinado material, é necessário observar ainda a sua capacidade térmica, que define a energia que pode ser armazenada por unidade de volume (Incropera, et al., 2008). A propriedade dos materiais que permite avaliar a transferência de calor por condução é a condutibilidade térmica, ou seja, aquela capaz de avaliar as propriedades de condução de calor de cada material (Çengel e Ghajar, 2012).

2.1.3 Convecção

No caso da convecção, ocorre transferência de energia de um meio sólido para outro que pode ser líquido ou gasoso. As trocas de calor ocorrem devido ao movimento das partículas e serão tanto mais intensas quanto maior for o movimento (Figura 3). A convecção pode ser forçada ou natural. Na primeira, o fluido é forçado a se movimentar por uma força externa. Já na convecção natural esse movimento ocorre devido à diferença de densidade no líquido ocasionada pela variação da temperatura (Çengel e Ghajar, 2012).

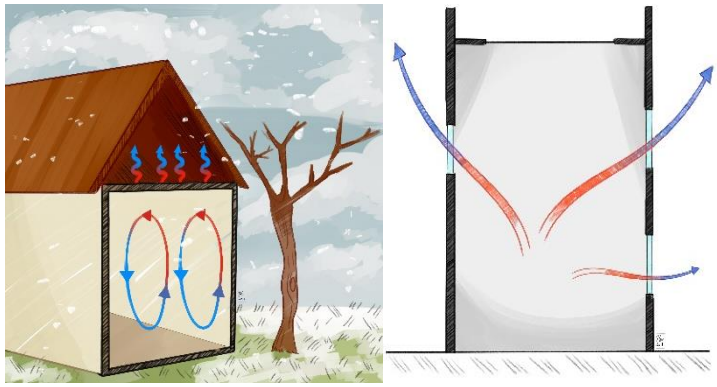


Figura 3 - Esquema de convecção

Neste processo, a taxa de transferência de calor entre os meios é mais complexa de determinar, sendo expressa pela lei de arrefecimento de Newton, que determina que a taxa de transferência de calor é proporcional à variação de temperatura, que, em equilíbrio, pode ser descrita por meio da Equação (5) (Campos, et al., 2017):

$$\frac{q}{A} = h(T_s - T_\infty) \tag{5}$$

em que:

$\frac{q}{A}$	[W/m^2]	Fluxo de calor trocado entre a superfície de área A de um corpo sólido e um fluido
h	[W/(m^2.K)]	Coeficiente de convecção
T_s	[K]	Temperatura da superfície do corpo
T_∞	[K]	Temperatura do fluido

De forma simples, esta lei relaciona a taxa de arrefecimento de um corpo com a diferença de temperatura entre o corpo e o meio em que está inserido, sendo considerada para o aumento ou diminuição de temperatura do meio (Incropera, et al., 2008). O coeficiente de convecção *h* depende diretamente da geometria da superfície, da natureza de escoamento do fluido e das suas propriedades. No entanto, a determinação deste valor não obtém consenso na literatura. A Tabela 1 mostra valores usuais do coeficiente de convecção na convecção natural, na convecção forçada e na mudança de fase. Na Tabela 2, estão apresentadas as expressões mais utilizadas para a determinação de valores no caso de superfícies externas da envolvente de uma edificação, em função da velocidade do vento v_v (m/s).

Tabela 1- Valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção (Incropera, et al., 2008)

Processo	**hc** **(W/(m² K))**
Convecção natural	
Gases	2-25
Líquidos	50-1.000
Convecção forçada	
Gases	25-250
Líquidos	100-20.000
Convecção com mudanças de fase	
Ebulição e condensação	2.500-100.000

Tabela 2 – Valores de h_c para a envolvente exterior de um edifício

EXPRESSÃO	**CONDIÇÕES**	**REFERÊNCIA**
a1) $hc = 5+4,5.v_v - 0,14.v_v^2$	Superfície ventosa $V_v \leq 10$ m/s	Hagentoft (2001)
a2) $hc = 5+1,5.v_v$	Superfície protegida do vento $V_v \leq 8$ m/s	
b1) $hc = 5,6+3,9.v_v$	$V_v \leq 5$ m/s	Hens (2007)
b2) $hc = 7,2.v_v^{0,78}$	$V_v > 5$ m/s	
c) $hc = 4+4.v_v$	-	CEN (2007)

2.1.4 RADIAÇÃO

Ao contrário dos fenómenos anteriores, na radiação eletromagnética a energia é transmitida por ondas eletromagnéticas (ou por fotões) sem necessidade de um meio material. É mais rápida (ocorre à velocidade da luz) e possui maior eficiência no vácuo (Çengel e Ghajar, 2012). As ondas eletromagnéticas possuem vários comprimentos de onda, sendo que a radiação térmica é a emitida pelos corpos devido ao seu nível de energia interno (temperatura), situando-se na zona intermédia do espectro eletromagnético, com comprimento de onda entre 0,1 a 100 μm, abrangendo parte da radiação ultravioleta, a radiação visível e parte da radiação infravermelha (Oliveira, 2022), como demonstrado na Figura 4.

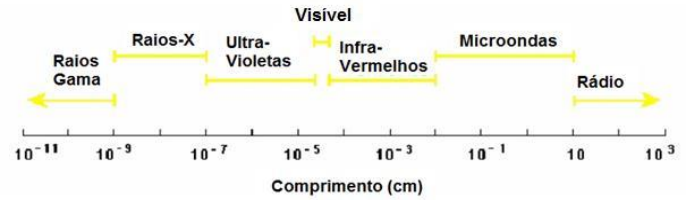


Figura 4 – Espectro eletromagnético

Em termos de radiação, o chamado corpo negro é tido como padrão, pois trata-se de um corpo ideal, ou seja, que emite o máximo de radiação e com intensidade igual em todas as direções, de acordo com a sua temperatura, e que absorve toda radiação que nele incide, também em todas as direções e de todos os comprimentos de onda (Oliveira, 2022).

A lei de Stefan-Boltzmann determina o poder emissivo de um corpo negro através da seguinte equação (6) (Incropera, et al., 2008):

$$E_n = \sigma T_s^4 \tag{6}$$

em que:

T_s	[K]	Temperatura absoluta da superfície
Σ	[$\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ W/(m^{2}K^4)]	Constante de Stefan-Boltzmann
E_n	[W/m^2]	Radiação total emitida pelo corpo negro

Para traduzir o comportamento de um corpo em relação à emissão e à receção de radiação são utilizadas as suas propriedades radiativas de absorção, reflexão e transmissão. Quanto à absorção e emissão, os corpos reais têm as suas propriedades indexadas ao corpo negro. A capacidade de o corpo emitir radiação (com referência à emissão num corpo-padrão) é chamada de emissividade, que no corpo negro é igual a 1. Se essa emissividade for constante independentemente do comprimento de onda, o corpo é denominado um corpo cinzento ou superfície cinzenta (Oliveira, 2022).

O cálculo da emissão térmica de um corpo cinzento pode ser representado pela equação 7 (Monteiro, 2008):

$$\varepsilon = \frac{E_n}{\sigma A T_s^4} \tag{7}$$

em que:

Ɛ	[-]	Emissividade da superfície

Considerando a superfície de um material que é atingido por energia radiante, parte desta energia é refletida, parte é absorvida e parte é transmitida (Figura 5).

No comportamento térmico de uma construção, considerando como fonte de energia radiante o Sol que nela incide, há sempre um certo ganho de calor em função da intensidade da radiação que a atinge e das

características térmicas das envolventes, que podem ser classificadas como opacas, transparentes ou translúcidas (Frota e Schiffer, 2001).

Em corpos opacos a radiação térmica é superficial (Çengel e Ghajar, 2012), visto que a radiação que é emitida pelas partículas interiores não atinge a superfície e a recebida é absorvida na camada superficial, ficando assim justificado que os revestimentos superficiais podem alterar a quantidade de energia associada à radiação (Oliveira, 2022).

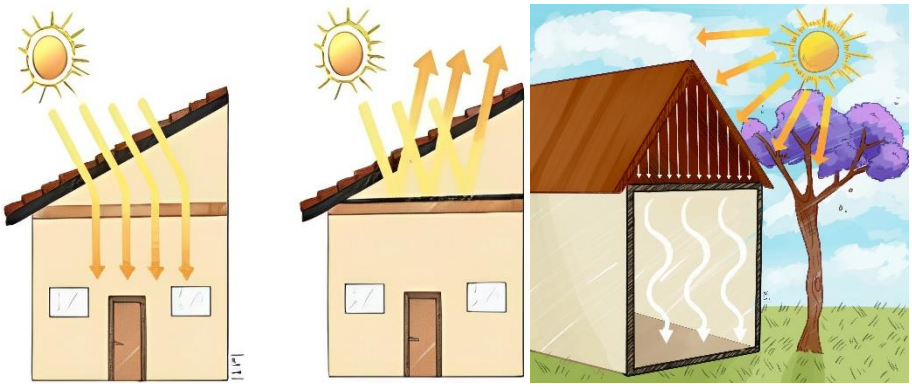


Figura 5 – Esquema de radiação

Quanto à absorção da energia pela superfície, o coeficiente de absorção pode ser relacionado com o espectro visível já que as superfícies escuras absorvem mais calor do que as claras. A Tabela 3 apresenta o coeficiente de absorção e emissividade para diferentes superfícies (Roriz, 2008):

Tabela 3 – Absorção (α_S) para radiação solar e emissividade (ε) para radiações a temperaturas comuns

TIPO DE SUPERFÍCIE	α_S	ε
Chapa de alumínio (brilhante)	0,05	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)	0,15	0,12
Chapa de aço galvanizada (brilhante)	0,25	0,25
Caiação nova	0,12/0,15	0,90
Betão aparente	0,65/0,80	0,85/0,95
Telha de barro	0,75/0,80	0,85/0,95
Tijolo aparente	0,65/0,80	0,85/0,95
Reboco claro	0,30/0,50	0,85/0,95
Revestimento asfáltico	0,85/0,98	0,90/0,98
Vidro de janela	0,07	0,90/0,95
Pintura na cor branca	0,20	0,90
Pintura na cor alumínio	0,40	0,90
Pintura na cor amarela	0,30	0,50
Pintura na cor verde claro	0,40	0,90
Pintura na cor verde escuro	0,70	0,90
Pintura na cor vermelha	0,74	0,90
Pintura na cor preta	0,97	0,90

Considerando a radiação incidente sobre a superfície (I), α traduz a parcela que é absorvida, ρ a que é refletida e τ a transmitida, cuja soma deve ser igual à unidade (equação 8) (Incropera, et al., 2008):

$$\propto + \rho + \tau = 1 \quad (8)$$

em que:

α	[-]	Coeficiente de absorção, que traduz a razão entre a radiação absorvida pelo objeto e a radiação total que sobre ele incide
ρ	[-]	Coeficiente de reflexão, que traduz a razão entre a radiação refletida pelo objeto e a radiação total que sobre ele incide
τ	[-]	Coeficiente de transmissão, que traduz a razão entre a radiação transmitida pelo objeto e a radiação total que sobre ele incide

Em superfícies opacas, uma parcela da radiação solar é absorvida e o fluxo de calor pode ser calculado seguindo a expressão (equação 9) (Kunzel, 1995):

$$q_{solar} = \alpha_s . I_{s,perp} \quad (9)$$

em que:

q_{solar}	[W/m^2]	Densidade do fluxo de calor absorvido pela superfície devido à radiação solar incidente
α_s	[-]	Coeficiente de absorção para a radiação solar
$I_{s,perp}$	[W/m^2]	Componente da radiação solar normal à superfície

Em relação à transmissividade, muitos corpos sólidos, com ênfase nos opacos, não transmitem radiação térmica. Assim, para esses casos a seguinte equação pode ser utilizada (equação 10) (Monteiro, 2008):

$$\rho + \alpha = 1 \quad (10)$$

em que:

ρ	[-]	Coeficiente de reflexão, que traduz a razão entre a radiação refletida pelo objeto e a radiação total que sobre ele incide
α	[-]	Coeficiente de absorção, que traduz a razão entre a radiação absorvida pelo objeto e a radiação total que sobre ele incide

Para corpos em equilíbrio térmico, ou seja, em que a energia emitida é igual à absorvida, para um mesmo comprimento de onda, e considerando a absorvância aplica-se a seguinte equação, chamada Lei de Kirchhoff (equação 11):

$$\varepsilon = \alpha \quad (11)$$

Considerando a refletividade, considera-se que a reflexão do fluxo de radiação após atingir uma superfície pode ser especular, quando o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, ou difusa, quando ocorre distribuição uniforme em todas as direções (Monteiro, 2008).

2.2 TÉCNICAS DE ARREFECIMENTO PASSIVO

2.2.1 ENQUADRAMENTO

Diante das preocupações ambientais em torno do consumo de energia e do bem-estar dos utilizadores dos edifícios, há procura por alternativas que representem maior sustentabilidade para as novas obras e para edificações já existentes. Segundo (Çengel e Ghajar, 2012), os edifícios contribuem consideravelmente para os gastos energéticos mundiais, chegando a 40% do consumo global por ano, sendo que a maior parte dessa energia é para iluminar, aquecer e arrefecer.

Com isso, tem-se assistido a um crescimento no número de alternativas e técnicas de construção que permitem consumos energéticos menores, mas que, simultaneamente, satisfaçam as necessidades dos utilizadores dos edifícios. Gonçalves e Graça (2004) explicam que na chamada arquitetura solar passiva na fase de conceção do edifício se considera o clima como variável importante para a tomada de decisões, de modo que haja interação entre as variáveis climáticas existentes no local e a construção, promovendo o conforto térmico.

As técnicas de arrefecimento passivo, utilizadas nas regiões quentes e secas, são importantes tanto para o quesito de sustentabilidade quanto para o económico, visto que as edificações nestes ambientes exigem muita energia para arrefecer. Ao analisar doze técnicas de arrefecimento passivo, identificou-se que o maior impedimento para a sua aplicação é a restrição de espaço (Hassan, et al., 2016).

O arrefecimento passivo, que vem ao encontro das preocupações com a sustentabilidade, garante a melhoria do conforto térmico com redução dos gastos de energia. Alguns autores também aceitam que seja considerado passivo o arrefecimento que utiliza apenas pequenos equipamentos, como ventiladores e bombas (Prieto, et al., 2018).

Além da economia de recursos energéticos, a utilização de técnicas de arrefecimento passivo também contribui para a redução da chamada ilha de calor. Este fenómeno ocorre nos grandes centros urbanos, onde há um elevado número de edificações e de pavimentação, o que causa uma elevada absorção da energia solar, com condições para o armazenamento de calor e posterior liberação, provocando um aumento da temperatura naqueles espaços. As técnicas de arrefecimento que utilizam plantas dão resposta a este fenómeno, com melhorias não só do ambiente interno do edifício, mas também da região urbana como um todo, contribuindo, assim, para o cumprimento das metas ambientais internacionais (Zinzi e Agnoli, 2012).

O momento ideal para aplicar este tipo de soluções é na fase de projeto, na qual diferentes revestimentos, proteções e alternativas arquitetónicas podem ser equacionadas para diminuir os ganhos solares e aumentar a capacidade de libertar calor para o exterior. Estas técnicas podem ser classificadas em duas categorias, conforme o objetivo que se pretende atingir: reduzir os ganhos de calor ou dissipar o calor acumulado no interior (Geetha e Velraj, 2012).

Durante a fase de projeto e construtiva, esta arquitetura diferenciada é levada em consideração, associada ao uso de princípios referentes à localização geográfica do imóvel e às condições climáticas do local, fazendo com que, além dos materiais utilizados, a forma, a orientação, as aberturas e os sombreamentos estratégicos sejam aplicados com o intuito de aumentar/melhorar o conforto térmico de forma passiva (Ralegaonkar e Gupta, 2010). O facto de este tipo de projeto considerar o clima e os

fenómenos naturais, que podem ser divergentes em determinadas estações ou horários, torna-o extremamente complexo (Ralegaonkar e Gupta, 2010).

Ambientes já construídos também podem receber adaptações para obter maior conforto térmico e diminuição do consumo energético. Entre as técnicas possíveis para essas adaptações há as que controlam a quantidade de radiação solar que chega ao interior do edifício, as que amortizam o calor absorvido e as que o dissipam (Santamouris e Kolokotsa, 2013). A envolvente do edifício, que consiste em paredes, coberturas e sombreamentos, é, em geral, o que separa o meio interno do externo, sendo a principal variável estudada para o arrefecimento passivo (Sadineni, et al., 2011).

A Figura 6 mostra uma visão geral das estratégias e sistemas de arrefecimento passivo, categorizados de acordo com determinadas variáveis. Assim, dois grupos principais foram identificados: estratégias de projeto para arrefecimento passivo e sistemas de arrefecimento passivo, que lidam com a prevenção e dissipação de calor, respectivamente. As diferentes possibilidades são contempladas dentro de cada grupo. Além disso, a visão geral também considera estratégias indiretas, que não fornecem especialmente um efeito de arrefecimento, mas cuja aplicação correta pode resultar numa redução das necessidades de arrefecimento (aproveitamento da estanqueidade da luz do dia) ou servir como complemento para estratégias de dissipação de calor (armazenamento de PCM). As estratégias de arrefecimento são ainda categorizadas dentro dos grupos principais. Assim, os sistemas passivos são classificados de acordo com os dissipadores de calor que empregam (ar, céu ou terra) e as estratégias de projeto para arrefecimento passivo são diferenciadas pelo seu efeito em todo o edifício, gerindo os ganhos de calor interno ou decisões de projeto relativos à transferência de calor através da fachada, seja através de componentes opacos ou transparentes (Prieto, et al., 2018).

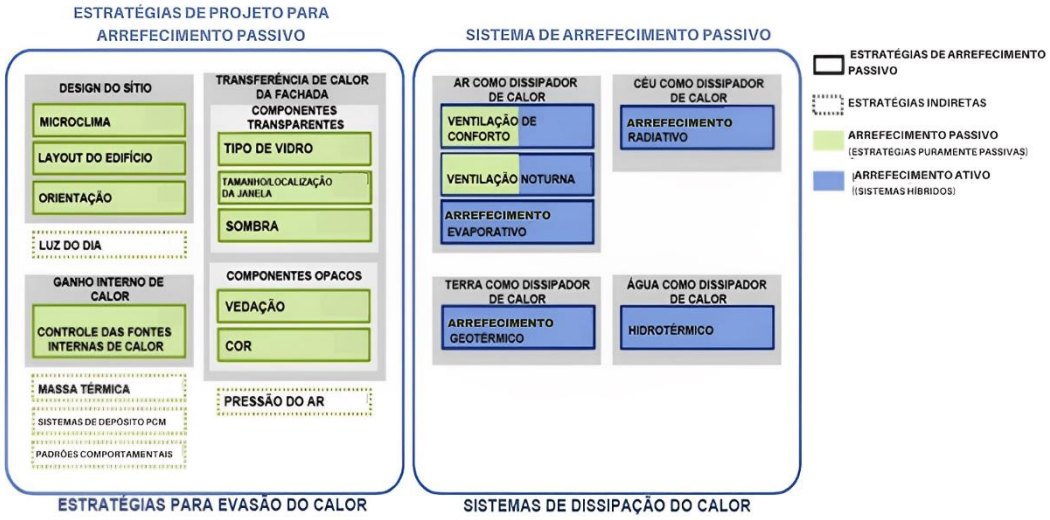


Figura 6 - Categorização dos princípios de arrefecimento passivo com base na revisão de literatura, adaptado de Prieto, et al. (2018)

2.2.2 ISOLAMENTOS

Na construção civil, duas das variáveis climáticas que mais influenciam o conforto térmico nos edifícios são a temperatura do ar exterior e a radiação solar. A temperatura do ar é a variável responsável pela troca de calor entre o interior da edificação e o meio externo, enquanto a radiação solar é a variável referente ao ganho de calor (Gonçalves e Graça, 2004). A construção que almeja o arrefecimento passivo

deve incluir no seu projeto tipos de isolamento que funcionem como uma barreira ao fluxo de calor proveniente do exterior, podendo ser utilizados em pisos, paredes e telhados (Taleb, 2014).

O isolamento térmico ocorre por meio da utilização de um material ou conjunto de materiais que diminuam as trocas de calor por condução. Assim, para a escolha da melhor técnica para o isolamento, os pontos mais importantes são a condutibilidade e a inércia térmica do material utilizado, juntamente com a exposição à humidade, aos impactos ambientais e à saúde. As técnicas de isolamento podem ser subdivididas pelo tipo de material utilizado, nomeadamente, painéis de isolamento a vácuo, painéis estruturais isolantes, massa térmica e materiais de mudança de fase (Sadineni, et al., 2011).

Quando utilizado nas paredes, que correspondem à maior parte da área da envolvente de um edifício, devem satisfazer, além das exigências de conforto térmico, as exigências arquitetónicas do edifício. Por outro lado, o isolamento deve ser aplicado de modo a controlar potenciais condensações na superfície dos elementos construtivos, que podem promover o crescimento de fungos, que, por seu lado, reduzem a vida útil dos materiais e componentes e prejudicam consideravelmente a qualidade do ar interior (Sadineni, et al., 2011). O objetivo do isolamento é diminuir a oscilação entre perda e ganho de calor. O edifício isolado impossibilita a transferência de calor do meio externo para o interno, ou vice-versa. Ou seja, apresenta grandes benefícios para regiões de climas quentes, ao reduzir os gastos com sistemas de arrefecimento devido a restringir as trocas de calor entre o exterior e o interior do edifício (Kamal, 2012).

Um exemplo de isolamento na envolvente são as fachadas ventiladas ou de dupla pele. Este sistema é composto por duas alvenarias, em que o ar flui através da cavidade intermédia. Esse espaço (que pode variar entre 20 cm a alguns metros) atua como isolamento contra temperaturas extremas, ventos e som, melhorando a eficiência térmica da edificação tanto para temperaturas altas como baixas. O fluxo de ar pela cavidade pode ocorrer naturalmente ou ser impulsionado mecanicamente (Sadineni, et al., 2011).

Nos últimos anos, tem-se assistido a um crescimento do número de estudos sobre isolantes que permitem maior preservação do ambiente, como alternativa aos tradicionais materiais sintéticos, de forma a construir mais sustentavelmente. Alguns materiais endógenos no Brasil (Figura 7), como o buriti e os resíduos gerados pelo consumo urbano, materiais como o bagaço da cana, casca de arroz e resíduos da casca do coco e do babaçu são objeto de pesquisas para servir de isolantes nas construções.

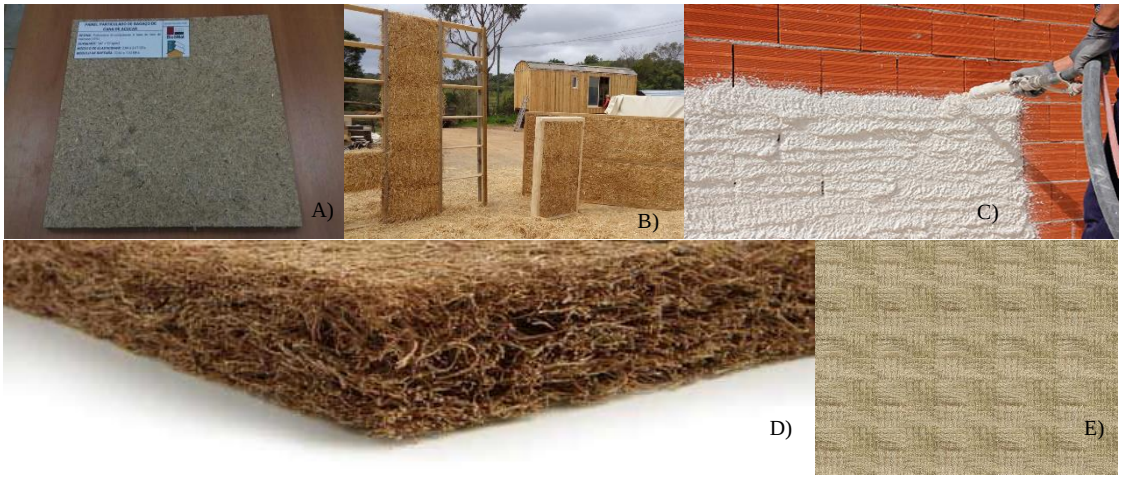


Figura 7 - Materiais de isolamento endógenos – A) casca de arroz; B) bagaço da cana; C) argamassa térmica; D) casca do coco; E) folha de buriti

O estudo realizado por Carvalho (2012), no qual se utiliza bagaço da cana como painel para revestimento térmico, observou experimentalmente que esse material apresenta baixa densidade e condutibilidade térmica, tendo grande potencial como isolamento em construções, promovendo a inércia térmica e podendo ser utilizado em subcoberturas, para a regularização de pisos, entre paredes duplas, como preenchimento de pisos elevados e divisórias.

Santos e Silveira (2013) nos ensaios que levaram a cabo concluíram que o painel de buriti de 2,0 cm e a manta de fibra de coco têm desempenhos térmicos semelhantes ao do poliestireno expandido (EPS), com a vantagem de serem materiais renováveis, regionais e de baixo impacto ambiental. No mesmo estudo, sugerem que sejam realizados mais estudos para entender, por exemplo, o motivo pelo qual as fibras estudadas se comportaram melhor do que os EPS face a temperaturas mais elevadas (período do dia entre as 11h e as 15h). A casca de arroz, num estudo realizado por Navroski, et al. (2010), foi comparada com a madeira e o EPS, tendo sido observado que este último é o melhor isolante térmico do grupo, uma vez que apresentou a menor variação entre as três caixas avaliadas (uma com cada material). Contudo, a casca de arroz mostrou-se interessante devido ao baixo custo e ao isolamento térmico também eficaz.

As fibras do coco, foco do estudo de Mendes, et al. (2012), analisadas em ensaios que simularam temperaturas elevadas, apresentaram baixa difusão do calor. Na análise do gradiente de temperatura verificou-se uma temperatura de 175ºC para interface sem a fibra, seguidos de valores de 70ºC e 55ºC quando inserido o isolamento, obtendo um gradiente de temperatura de 120ºC com apenas 20 mm de espessura do material analisado. Ou seja, estes resultados demonstram claramente a característica de retenção de calor da fibra de coco, o que viabiliza este material como isolante térmico.

Outra alternativa que utiliza um recurso natural para o isolamento térmico são as paredes de água com isolante externo (Figura 8), em que a capacidade de armazenamento de calor da água é utilizada para garantir o conforto térmico, servindo para substituir materiais comuns de alvenaria na parede. Para o armazenamento de água é necessário que o recipiente não tenha propriedades de isolante térmico. Em climas quentes, como em Palmas-TO, as paredes com maior inércia térmica devem estar expostas às brisas noturnas, para que o calor armazenado possa mais facilmente ser dissipado (Brasil, 2018).

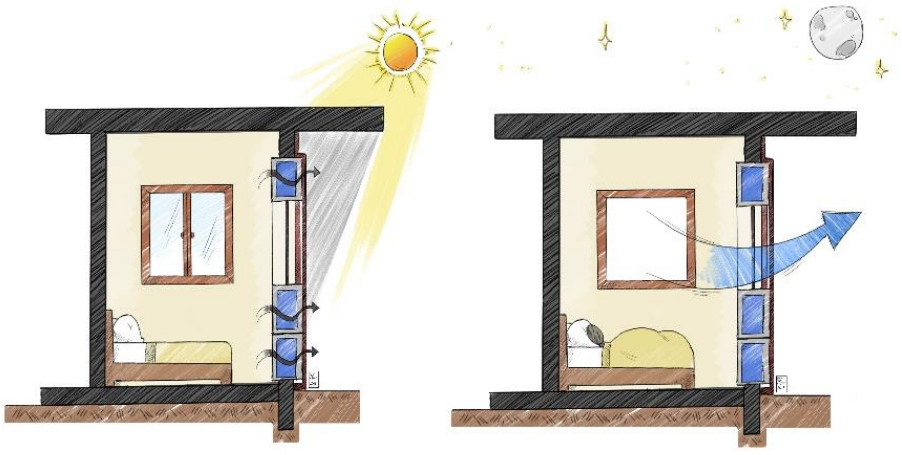


Figura 8 - Paredes de água com isolante externo

2.2.3 PINTURAS DE BAIXA EMISSIVIDADE

As pinturas de baixa emissividade, também chamadas *cool materials*, apresentam elevada refletância solar e baixa emitância (Figura 9). Devido a estas características, contribuem para a redução dos ganhos térmicos radiativos em ambiente urbano e para a mitigação da ilha de calor (Gonçalves, 2014). Os chamados telhados frios, que utilizam este tipo de pinturas, apresentam elevada refletância solar, refletindo a radiação durante o dia e mantendo a sua superfície mais fria, comparativamente aos telhados convencionais (Zinzi e Agnoli, 2012). Atualmente, os materiais mais utilizados variam entre pinturas, revestimentos, painéis, membranas e telhas (Costanzo et. al., 2013). As tintas apresentam cargas especiais de microesferas cerâmicas, que, incorporadas na tinta, refletem, refratam e bloqueiam o calor, além de o dissipar de forma rápida, diminuindo a transferência de calor nos revestimentos (Dornelles, et al., 2013).



Figura 9 - Pinturas de baixa emissividade

Uma pesquisa realizada em Itália (Zinzi; Fasano; Manilia, 2007) ressalta que os edifícios absorvem grande quantidade de radiação solar, característica intrínseca dos elementos que os constituem que produzem a retenção dessa energia, resultando no aquecimento de todos os componentes envolvidos. Os ambientes sujeitos a intensa radiação solar, especialmente os telhados, quando revestidos e pintados com materiais com elevada reflexão, reduzem as cargas térmicas e, consequentemente, garantem um menor aquecimento do espaço interior. Neste estudo afirma-se também que o revestimento reflexivo beneficia igualmente o conforto ambiental nos espaços urbanos ao ar livre. Deste modo, o uso de materiais de construção que refletem, em substituição da maioria que absorve a radiação solar, é capaz de amenizar as temperaturas e condições climáticas das regiões urbanas.

A elevada refletividade da radiação solar é garantida pela incorporação na composição das tintas de componentes conhecidos como *cool pigments* (Sousa, 2014). Estes não alteram a cor das tintas, possibilitando a sua utilização até em tintas escuras, funcionando como um contraponto, já que a maioria dos materiais classificados como frios apresenta cor clara.

No estudo de caso realizado por Costanzo, et al. (2013) foi observada uma redução significativa no gasto de energia para arrefecimento do edifício com o uso de uma tinta refletante. No entanto, os autores alertam para a possível necessidade de mais energia para o aquecimento no inverno, sugerindo a necessidade de se efetuar o balanço energético anual, especialmente em regiões com invernos longos e rigorosos. No Brasil, o desenvolvimento de tintas com estes pigmentos ainda é incipiente. Dos produtos disponíveis no mercado, a maior parte só está disponível em cor branca.

2.2.4 PELÍCULAS REFLETANTE

As películas refletante são produtos aluminizados comumente utilizados em coberturas, sejam elas inclinadas ou não. Como propriedade física este material é classificado como refletor de baixa emissividade, apresentando normalmente refletância superior a 0,9 e emissividade inferior a 0,1. A redução dos ganhos solares pela envolvente dos edifícios pode ser garantida através da aplicação de películas refletante de baixa emissividade, tais como o alumínio polido ou o polímero aluminizado, associado a espumas de polietileno ou ao plástico bolha (Figura 10). Um ónus associado ao uso deste tipo de película é a perda da capacidade de reflexão por parte do alumínio devido à acumulação de resíduos (Ferreira, 2017).

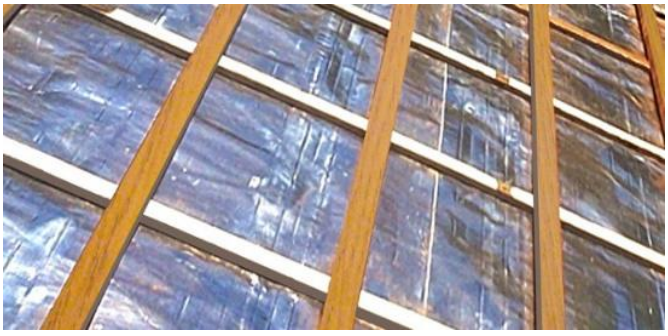


Figura 10 - Película refletante

As folhas de alumínio e as películas poliméricas metalizadas são os materiais mais utilizados nas películas refletante. As folhas de alumínio apresentam as seguintes características: bauxite como matéria-prima; barreira à radiação, a gases, ao vapor de água, ao aroma; reciclável; resistente ao fogo; condutor de calor e eletricidade. Estes materiais ganham interesse no setor da construção pela sua flexibilidade, aplicação fácil, inócuo para o meio ambiente e resistente a alguns solventes. As películas poliméricas distinguem-se das folhas de alumínio por apresentarem menor espessura, mais leveza e menor custo. Quanto à eficiência, esta fica diminuída em relação à refletividade (Ferreira, 2017).

2.2.5 SOMBREAMENTO

O arrefecimento passivo através de sombreamento baseia-se em reduzir os ganhos solares no período de aquecimento, devendo ser projetado de modo a evitar ganhos excessivos nos períodos de arrefecimento e sem prejudicar a iluminação natural. Assim, o conhecimento da localização geográfica e da geometria e posição das construções vizinhas, bem como da sua contribuição para o sombreamento do edifício é crucial para que este seja eficaz (Dekay e Brown, 2004).

Ahmadkhani (2011) afirma que o método de arrefecimento passivo mais eficaz é aquele capaz de impedir a acumulação de calor, sendo o sombreamento aquele que atende a este requisito de forma mais eficaz. Este método impossibilita que os raios solares penetrem nos edifícios, já que a causa fundamental de acumulação de calor é a incidência de luz solar sobre a edificação, absorvida pelos elementos opacos e transmitida pelos envidraçados. Este autor refere a eficácia dos dispositivos de sombreamento fixos, do tipo quebra-sol, projetados para sombrear durante todo o ciclo solar, uma vez que são capazes de reduzir os ganhos solares sem condicionarem de forma relevante a iluminação e a ventilação natural.

Por outro lado, o autor também refere que dispositivos de sombreamentos móveis aplicados no exterior asseguram os mesmos efeitos sem reduzir os níveis de luz no interior.

O sombreamento é a obstrução parcial ou total dos raios solares, realizada por um objeto ou superfície, de modo a direcionar esses raios para outra superfície (Figura 11). O uso do sombreamento está generalizado, variando o seu efeito em função da posição do sol e do tamanho e posição da superfície escolhida para o sombreamento. Assim, soluções de sombreamento corretamente projetadas podem garantir uma redução dos consumos energéticos para arrefecimento ao longo da vida útil da edificação (Geetha e Velraj, 2012).

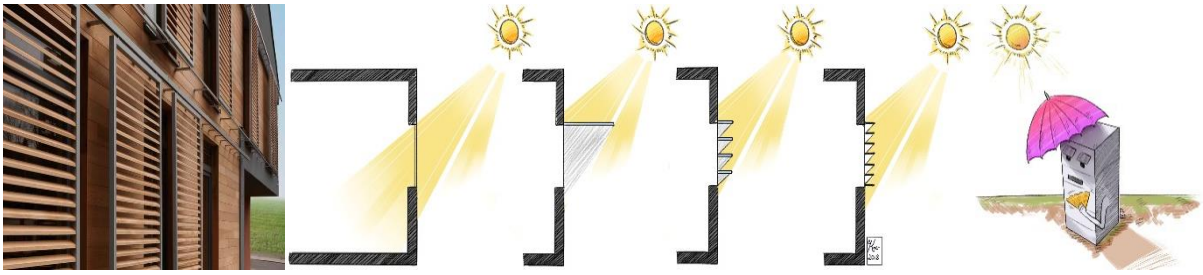


Figura 11 - Dispositivos de sombreamento

O sombreamento é uma técnica muito utilizada no setor de construção residencial por ter baixo custo de implementação, ser de fácil aplicação e de pouca manutenção, logo, sem necessidade de mão-de-obra especializada. No entanto, apresenta como desvantagem uma possível redução no aproveitamento da iluminação natural (Perez e Ostergaard, 2018).

Os sistemas de sombreamento podem ser aplicados no interior ou no exterior das fachadas. Estes sistemas contribuem para reduzir a temperatura interior em locais de clima mais quente (Ralegaonkar e Gupta, 2010). Os materiais utilizados devem possuir baixa capacidade térmica para que arrefeçam ao fim do dia, quando o sol se põe (Proussard, et al., 2003).

Os métodos de sombreamento existentes hoje podem ser verticais, horizontais, e projeções. Dentre eles destacam-se os seguintes exemplos (Figura 12):

- Sombreamento com vegetação: árvores com grandes copas funcionam como bloqueio à radiação solar (Gupta e Tiwari, 2016);
- Sombreamento com pérgulas: proteções que podem ser horizontais ou verticais e que devem ser aplicadas de acordo com o percurso solar que incide na fachada. Os pergolados externos e os toldos são exemplos deste método (Silva e Amorim, 2013);
- Sombreamento com cobogó: é um sistema misto que tem como vantagens permitir a boa ventilação, iluminação e privacidade dos ambientes. É um sistema muito utilizado no nordeste brasileiro (Gupta e Tiwari, 2016);
- Sombreamento com prateleira de luz: tem este nome devido à disposição das lâminas que se assemelham a uma prateleira e que dividem a abertura em duas partes (Gupta e Tiwari, 2016);
- Sombreamento com quebra-sol: O quebra-sol é um elemento de controlo solar na edificação, sendo a sua aplicação útil na procura do conforto térmico por impedir que o calor excessivo penetre no ambiente, além de ser eficiente na distribuição da iluminação,

auxiliar na ventilação e, naturalmente, diminuir o consumo energético (Silva e Amorim, 2013);

- Sombreamento com vidros especiais: os vidros utilizados têm na sua composição elementos que procedem à transmitância seletiva da radiação, impedindo a penetração dos infravermelhos (Proussard, et al., 2003).

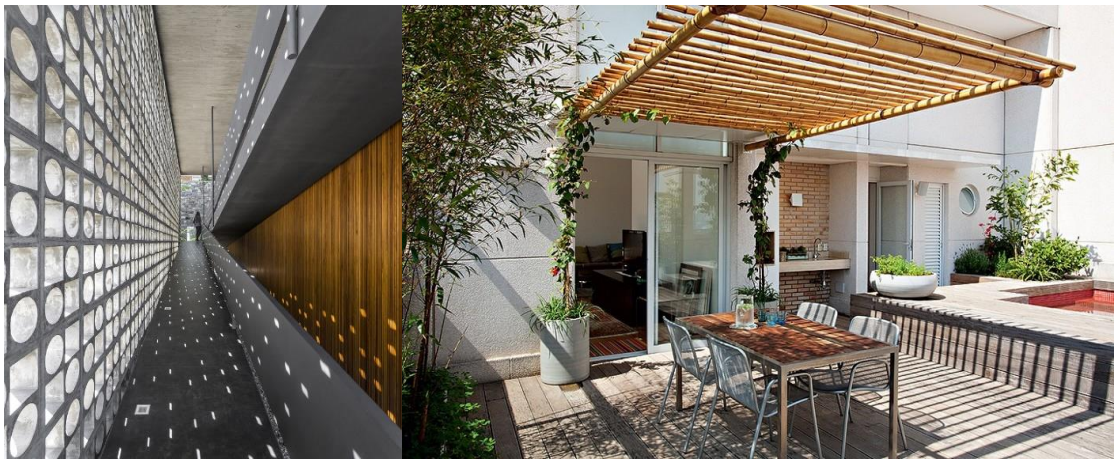


Figura 12 – Sombreamento com cobogó (esq) e com pérgulas (dir)

Os vidros especiais citados anteriormente podem resultar da incorporação de diferentes tecnologias que permitem o aumento da resistência térmica, a redução da transmissão de radiação de onda curta, o aumento da reflexão da radiação solar, etc. Destacam-se os vidros aerogel, os vidros a vácuo, o vidro reflexivo, os dispositivos de partículas suspensas e os elementos óticos holográficos (Sadineni, et al., 2011).

Para garantir uma maior eficácia do dispositivo de sombreamento é necessário que se tenha em consideração a informação da literatura sobre as características do dispositivo a utilizar juntamente com as particularidades do projeto, como a localização e a orientação do edifício (Prieto, et al., 2018).

Em climas quentes, recomenda-se o uso de áreas envidraçadas menores. Ressalte-se que o uso de vidros e sombreamento de forma combinada deve ser avaliado com cuidado, pois pode acarretar efeitos adversos, por bloquear em excesso a radiação solar, aumentando a necessidade de iluminação interna, logo, colaborando para o gasto de energia (Prieto, et al., 2018).

2.2.6 VENTILAÇÃO

A ventilação, natural ou mecânica é uma técnica importante não só para a garantia da qualidade do ar interior, mas também do conforto térmico (Sadineni, et al., 2011), pelo que é fundamental garantir o correto dimensionamento do sistema de ventilação, de forma a controlar os fluxos de ar através do edifício (Santamouris, et al., 2007). Para tal, é necessário observar, além das condições climáticas do local, os efeitos causados pelas edificações vizinhas (Geetha e Velraj, 2012). Gonçalves e Graça (2004) apontam para a importância de se dimensionarem os dispositivos de ventilação ainda na fase de projeto, para garantir o seu eficaz funcionamento, nomeadamente, para evitar o sobreaquecimento no interior dos edifícios.

Figueiredo (2007) destaca a importância da ventilação não só para o conforto térmico, mas também para a saúde dos usuários das edificações, pois ambientes demasiado estanques aumentam a concentração de poluentes no ar interior. Para a autora, a utilização de ventilação natural em áreas urbanas depende essencialmente de quatro parâmetros: temperatura, vento (forças motrizes), ruído e poluição. Em climas tropicais, devido à alta humidade, o uso de ventilação natural pode não ser sempre eficaz, podendo contribuir para sensação de desconforto, problemas de saúde e deterioração da estrutura do edifício devido à condensação no ambiente interno (Prieto, et al., 2018). O sistema de ventilação para evitar o sobreaquecimento pode incluir torres eólicas, ventilação noturna, ventilação natural cruzada (Perez e Ostergaard, 2018), chaminés solares, entre outras.

As torres eólicas, chamadas também de coletores de vento, são utilizadas desde a antiguidade na arquitetura persa e do Médio Oriente. O seu princípio de funcionamento consiste na entrada do ar por uma abertura na torre, na sua circulação pelo edifício e exaustão por uma abertura no lado oposto, por ação do vento. Este ar pode sofrer arrefecimento evaporativo ou convectivo. Em algumas técnicas com torres o ar é induzido a atravessar elementos humedecidos para reduzir a sua temperatura (Santamouris, et al., 2007).

A ventilação noturna baseia-se na transferência de calor por convecção, quando a estrutura dissipa, durante a noite, o calor que absorveu durante o dia. Trata-se de uma técnica utilizável com grande eficácia em quase todos os climas e indicada para famílias de baixos rendimentos, embora veja o seu potencial diminuído em ambiente urbano (Santamouris, et al., 2007). Maragogiannis, et al. (2011) avaliaram a eficácia desta técnica de arrefecimento em edifícios residenciais urbanos, através de um estudo com simulação numérica utilizando o TRNSYS realizado na Grécia, aplicado a quatro cenários diferentes. Os autores concluíram que a estratégia ideal para arrefecer um edifício era a associação da ventilação noturna com o ar condicionado. Também Blondeau, et al. (1997), através de ensaios experimentais em grande escala e simulações numéricas, confirmaram que ventilação noturna é uma técnica eficaz para garantir uma temperatura de conforto no interior dos edifícios.

Na ventilação cruzada (Figura 13) as aberturas devem ser colocadas em zonas opostas, para que as diferenças de pressão induzam a movimentação do ar através de toda a habitação, garantindo a libertação do calor por convecção e contribuindo para o conforto térmico (Harmon e Hoff, 2005).

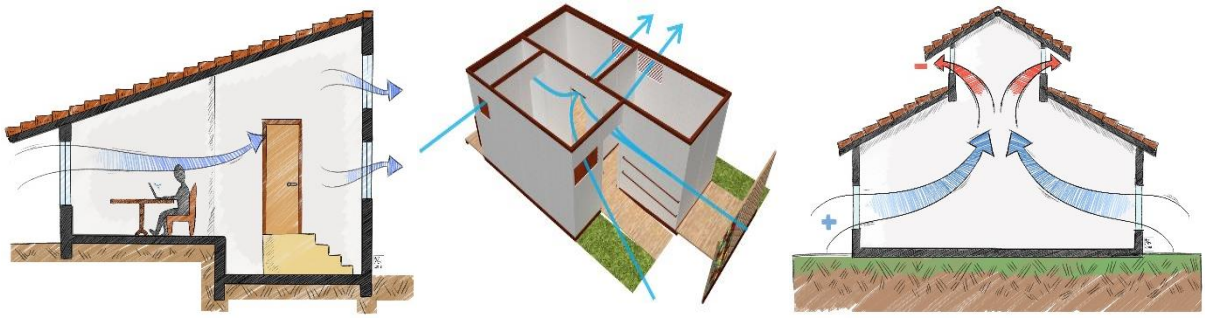


Figura 13 - Ventilação em ambientes internos

A chaminé solar é uma técnica de ventilação induzida, uma vez que o fluxo de ar ocorre devido a variações de temperatura. Tem um custo relativamente baixo e é capaz de amenizar a temperatura do edifício no período noturno. No entanto, deve-se atentar ao clima, pois se a temperatura exterior for maior do que a interior, o uso contínuo desta técnica pode gerar aquecimento da estrutura predial. Sendo assim, caso esta técnica seja empregue durante o período diurno, recomenda-se o uso conjunto de dispositivos de arrefecimento evaporativo (Kamal, 2012).

2.2.7 COBERTURA VERDE

Liz, et al. (2016) descrevem que a cobertura de uma edificação é a área mais exposta às radiações, tendo, por isso, grande impacto no comportamento térmico dos edifícios. Em áreas urbanas construídas, as coberturas representam 20-25% da superfície de construção, pelo que a utilização de uma cobertura verde (Figura 14) pode melhorar o conforto térmico no interior do edifício e também no ambiente urbano em que está inserido (Zinzi e Agnoli, 2012).

Este sistema construtivo consiste numa cobertura vegetal, que pode ser instalada nos mais variados suportes (lajes, telhados convencionais, entre outros), sobre um sistema de impermeabilização adequado e uma camada drenante (Silva, 2011; Taleb, 2014; Jaffal, et al., 2012; Liz, et al., 2016). A vegetação serve como uma barreira à radiação solar, de forma que a cobertura recebe menos calor. Por outro lado, com a irrigação para manutenção das plantas, há uma maior dissipação de calor por meio de arrefecimento evaporativo, o que diminui o ganho de calor da cobertura. A massa térmica do substrato diminui as oscilações de temperatura ao longo do dia (Hollmuller, 2002) e a evapotranspiração das folhas (libertação de vapor de água) reduz a temperatura na cobertura, sobretudo durante a noite (Kamal, 2012). No entanto, as características das plantas utilizadas influenciam as trocas de calor na superfície da cobertura e, consequentemente, no interior do edifício (Zinzi e Agnoli, 2012).

De acordo com Zinzi e Agnoli (2012), a comparação entre coberturas verdes e outras técnicas de cobertura exige análises mais aprofundadas. A gestão da água, o ciclo de vida das plantas e os custos de implantação e manutenção podem comprometer a viabilidade desta técnica, uma vez que é composta por um sistema vivo, de modo que a transferência de calor depende não só dos materiais, mas também do metabolismo das plantas e das características do solo utilizado como substrato (Liz, et al., 2016).



Figura 14 - Cobertura verde

É possível aplicar a vegetação não só na cobertura, mas também nas paredes exteriores, nas chamadas paredes verdes, em que são utilizadas, por exemplo, plantas trepadeiras, que aumentam a humidade do ambiente e promovem o arrefecimento (Brasil, 2018).

2.2.8 ÁGUA NA COBERTURA

A utilização de água na cobertura (Figura 15) tem origem no antigo Egito e na Pérsia e recorre ao fenómeno físico da evaporação como um dissipador de calor. A água pode estar presente na cobertura em espelhos de água ou em materiais embebidos nela, como sacos de serapilheira ou juta (Gupta e Tiwari, 2016; Sadineni, et al., 2011).



Figura 15 - Água na cobertura

O espelho de água na cobertura evita ganhos excessivos de calor durante o dia, uma vez que aumenta a capacidade térmica daquele elemento construtivo, absorvendo calor do ambiente interno, que liberta à noite. No entanto, é necessário ventilar no período noturno para auxiliar na eliminação da energia térmica acumulada. Durante o dia, o espelho de água deve ser protegido da radiação solar (Kamal, 2012). Neste tipo de sistema é possível o crescimento de formas de vida, como algas, o que pode ser um aspeto negativo do ponto de vista da manutenção (Dekay e Brown, 2004).

Também os espelhos de água interiores, associados à ventilação natural e dispostos em pátios na parte interna da edificação, constituem uma técnica muito comum para arrefecimento passivo. Por meio da evaporação, o ar próximo do espelho de água é arrefecido, potenciando os movimentos convectivos causados pela diferença de temperatura. O ar arrefecido entra no edifício através de aberturas direcionadas para o pátio e o ar quente sai por aberturas próprias (Brasil, 2018).

2.2.9 TUBOS ENTERRADOS (AR E ÁGUA)

Esta técnica de arrefecimento utiliza o solo como dissipador de calor, de forma a diminuir as oscilações de temperatura e a temperatura do ambiente interno. Nesta técnica são usados tubos enterrados no solo a uma profundidade de 1 a 3 m, sendo a sua utilização possível em meios com alta taxa de ventilação para trazer a temperatura até à zona de conforto (Hollmuller, 2002).

A utilização de tubos enterrados no solo é eficazmente comprovada nas construções islâmicas e persas. A transferência de calor entre o solo e o ar dos tubos no inverno ou o arrefecimento do ar no verão é determinada por alguns indicadores relacionados com o solo e a humidade da terra, a área de superfície, o comprimento e a profundidade do tubo e a velocidade do ar (Kamal, 2012). A dissipação ocorre por meio de contacto direto do edifício com o solo ou injetando ar que circulou no subsolo (Figura 16). É possível ainda utilizar tubos com água enterrados no solo, em que a temperatura da água amortiza a temperatura do ar quando este entra em contacto com o líquido (Gupta e Tiwari, 2016).

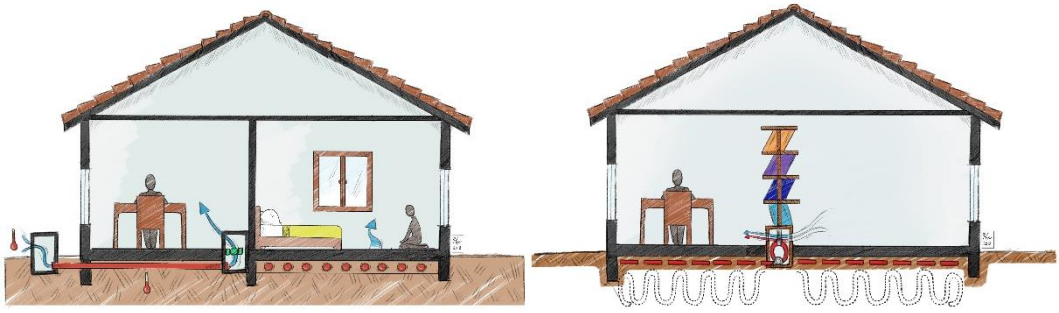


Figura 16 - Tubos enterrados

2.2.10 Utilização de Phase Change Materials (PCM)

A utilização de materiais com elevada inércia térmica nos elementos construtivos da envolvente exterior garante um amortecimento da onda de calor em climas onde existe uma estação de aquecimento e uma de arrefecimento perfeitamente demarcadas. Estes materiais absorvem a energia solar e retardam a sua propagação para o interior. Este efeito pode ser potenciado se incorporarem materiais de mudança de fase, PCMs (Bhamare, et al., 2019).

Akeiber, et al. (2016) avaliaram a utilização de PCMs para arrefecimento passivo das construções. Utilizar estes materiais faz com que, em temperaturas externas elevadas, a estrutura funcione como um dissipador de calor, reduzindo o consumo de energia destinada ao arrefecimento. Para poderem ser utilizados para arrefecimento passivo das construções é necessário que se considerem determinados parâmetros físicos e térmicos. Fisicamente, o PCM deve apresentar um ponto de fusão entre 10 °C a 30 °C. Termicamente, precisa de alto calor latente por unidade de volume, para que quanto menor volume possua, maior capacidade de absorção de calor obtenha. Além disso, é essencial ter uma boa condutibilidade térmica, uma vez que quanto maior a capacidade de transferência de calor melhor a resposta térmica. O estudo referido destaca também as formas de encapsulamento (micro e macro) e o uso do PCM em paredes, ainda que observe que não seja possível introduzi-los em todos os elementos construtivos.

Shossig, et al. (2005) comprovaram a eficácia do uso de PCM, na forma de microcápsulas, quando incorporado nas paredes. Os dados obtidos indicaram a eficácia do PCM em reduzir em 4º C a temperatura interna, por comparação com a externa, aumentando assim o conforto térmico em edifícios leves (Figura 17).

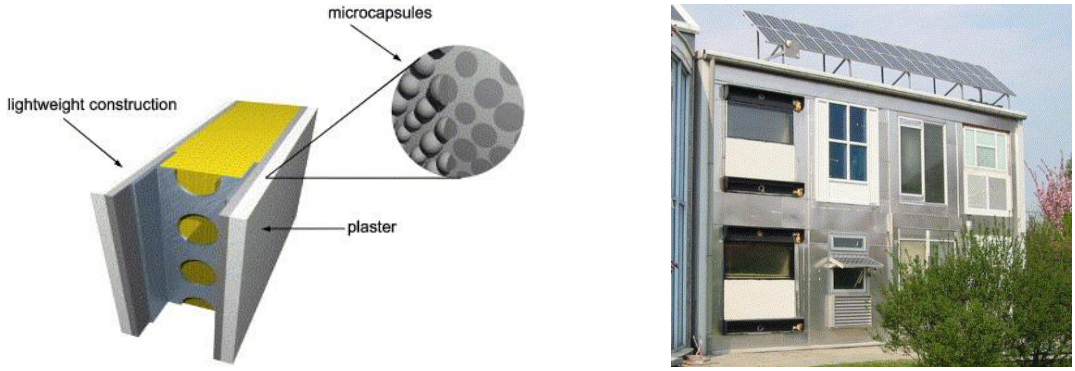


Figura 17 - Vista de uma parede leve com introdução de microcápsulas PCM no reboco interno e um edifício com duas salas teste, uma utilizando reboco com PCM e outra com reboco convencional, por Shossig, et al., 2005

2.2.11 VIDROS ELETROCRÓMICOS

A utilização de vidros eletrocrómicos, devido às suas propriedades óticas, possibilita controlar a iluminação e a temperatura provenientes dos raios solares, que são os grandes causadores do sobreaquecimento no interior de edifícios. Os eletrocrómicos mudam a sua coloração e transparência conforme a intensidade da radiação solar que sobre eles incide. O estudo realizado por Pittaluga (2015) demonstrou existir uma redução do consumo de energia elétrica destinada ao arrefecimento em lugares quentes quando estes vidros são aplicados, em substituição dos vidros tradicionais (Figura 18).



Figura 18- Células-teste com vidros eletrocrómicos (esq) e vidros tradicionais (dir), por Pittaluga, et al., (2013)

Também no estudo realizado por Tavares, et al. (2014) foi comparado o desempenho de vidros simples, vidros duplos tradicionais e vidros eletrocrómicos, verificando-se que o uso de vidros com propriedades ópticas dinâmicas favorece o conforto térmico e diminui os custos com energia para arrefecimento dos edifícios em climas mediterrâneos. Os resultados obtidos indicaram grandes benefícios de arrefecimento, principalmente se aplicados na fachada oeste.

DeForest, et al. (2017) estudaram, por meio de simulação, três tipos de vidros eletrocrómicos dinâmicos: o convencional; o de comutação NIR (infravermelhos visíveis e próximos), que difere do convencional por ser fabricado com métodos de baixo custo, incluindo spray ou revestimento de molde de ranhura de tinta à base de nanocristais, seguida de um processo de recozimento para fixar a película ao substrato; e o de banda dupla, que consiste na junção das propriedades do convencional e do de comutação NIR, conseguindo modular a transmissão NIR sem afetar a transmissão de luz visível. As simulações tiveram em consideração as 16 regiões climáticas dos Estados Unidos. Os vidros eletrocrómicos convencionais são excelentes para reduzir a necessidade de iluminação elétrica e cargas para arrefecimento; os envidraçados de comutação possuem design de revestimento inovador, melhor custo-benefício no fabrico e grande economia de energia; os de banda dupla, que alternam facilmente entre os estados frio, brilhante e escuro, mostraram melhor desempenho em termos de iluminação, arrefecimento e custo em quase todas as zonas climáticas testadas.

2.3 MONITORIZAÇÃO DE CÉLULAS-TESTE

A monitorização das condições térmicas de células-teste é um procedimento cada vez mais utilizado, uma vez que permite avaliar o desempenho dos edifícios/elementos construtivos de uma forma mais controlada. Efetivamente, por meio de células-teste é possível variar condições específicas relevantes para o fenómeno em estudo, o que não seria fácil, ou até mesmo possível, de implementar em edifícios reais. Esta metodologia também pode ser aplicada para avaliar a eficácia de técnicas de arrefecimento passivo, uma vez que, ao serem avaliadas duas células-teste com condições idênticas, exceto na aplicação da técnica em estudo, torna-se possível quantificar a sua contribuição para o desempenho global do edifício.

De Moura, et al. (2011) afirmam que existe pouca literatura no Brasil que descreva técnicas para aferição de variáveis climáticas, pelo que são normalmente utilizados sensores e protocolos de outros países. A monitorização de variáveis climáticas por meio de sistemas constituídos por transdutores, sensores e medidores gera bases de dados para pesquisas e trabalhos diversos. Para que os dados coletados por esses aparelhos sejam aceites pela comunidade científica é necessário que haja rastreabilidade metrológica nas suas medições, de forma que os resultados tenham referências estabelecidas por padrões nacionais ou internacionais. Essa rastreabilidade torna-se necessária pelo facto de muitos aparelhos específicos utilizados em diferentes estudos não possuírem uma padronização acreditada para calibração (Santana, et al., 2008).

Roque, et al. (2021) compararam o conforto térmico em dois sistemas de construção, utilizando duas células-teste experimentais em escala real, em que numa foi aplicado o *Lightweight Steel Framing (LSF)* e na outra alvenaria pesada. A monitorização do ambiente interno de cada célula-teste foi feita durante um ano e os resultados permitiram concluir que o método de construção *LSF* é o que confere maior conforto, já que apresentou 20% menos graus-hora de desconforto acumulados anualmente, em comparação com a alvenaria pesada (Figura 19).



Figura 19 – Células-teste utilizadas por Roque, et al. (2021)

Nahar, et al. (1999) construíram cinco células-teste idênticas (Figura 20) para comparar técnicas de arrefecimento passivo em clima árido. Nas coberturas das células aplicaram-se diferentes técnicas, tendo sido testadas: o isolamento térmico por baixo da cobertura, a aplicação de uma tinta branca na cobertura, a construção de um espelho de água com coluna de água de 100mm de espessura na cobertura com isolamento fixo nas laterais e móvel no topo e a aplicação de sacos de juta embebidos em água. Neste estudo, as menores temperaturas interiores ocorreram na célula com isolamento térmico, seguida pela

célula pintada de branco, depois a célula com o espelho de água e, por último, a célula com sacos de juta.

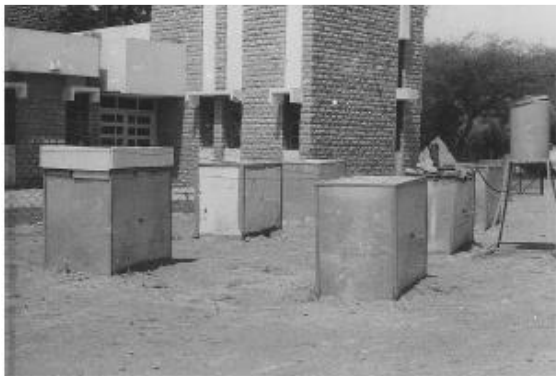


Figura 20 – Células-teste desenvolvidas por Nahar, et al. (1999)

No Brasil, na cidade de São Carlos – SP, Peralta (2006) realizou estudos com células-teste (Figura 21) para observar o desempenho térmico de diferentes tipos de telha, comparando os resultados das análises espectrofotométricas com informações retiradas de normas brasileiras.



Figura 21 - Células teste utilizadas por Peralta (2006)

Peralta (2006) recorreu a uma estação meteorológica automática, da qual foram extraídos dados do clima exterior, como temperatura, humidade relativa, radiação solar, direção dos ventos predominantes e índice pluviométrico. Nas células-teste foram instalados termopares tipo T que registaram a temperatura superficial das telhas e paredes. Utilizou-se também um sensor para medir a radiação solar global, outro para aferir a temperatura de bulbo seco e de bulbo húmido no interior de cada célula, além de anemómetros colocados no interior para avaliar a velocidade do ar. Todos os dados foram registados de 30 em 30 segundos, com cálculo de médias a cada 30 minutos. O autor do estudo justificou a posição dos termopares pela metodologia seguida e etapas da experiência. A monitorização das células revelou a hierarquia das temperaturas internas e a sua relação com a temperatura externa. Na primeira etapa de monitorização foi possível constatar que o maior ganho de calor em edificações térreas é sempre pela

cobertura, corroborando o que foi apontado pela literatura. O objetivo deste trabalho era ilustrar a importância das características térmicas superficiais no desempenho térmico das telhas.

Marinosci, et al. (2011), num trabalho experimental com células-teste em Itália (Figura 22), investigou o comportamento térmico de uma fachada ventilada. A monitorização do desempenho térmico durante o inverno, orientado a sul e a oeste, foi realizado recorrendo a 72 termopares tipo T, 2 anemómetros de fio quente, 1 pirómetro e 3 sensores de temperatura do ar. Os termopares foram posicionados dentro e fora da célula-teste. Para a aquisição e armazenamento dos dados foi utilizado o software *Labview* (Marinosci, et al., 2011). Esta análise comprovou que numa fachada ventilada podem ocorrer alterações na direção do fluxo de calor durante o inverno quando há grande irradiação solar, velocidade do vento moderada e quando a diferença entre as temperaturas interna e externa é pequena. Também permitiu concluir que esta alteração do fluxo contribui para a redução do consumo energético necessário para aquecimento do interior (Marinosci, et al., 2011). Estes resultados foram comprovados pela realização de simulação numérica.



Figura 22 – Célula-teste utilizada por Marinosci, et al. (2011)

Mateus, et al. (2014), num estudo para validação dos resultados de uma ferramenta numérica quando aplicada ao estudo do comportamento térmico de uma sala com fachada de dupla pele, naturalmente ventilada, monitorizaram as temperaturas superficiais de uma célula-teste em Lisboa (Figura 23). Foram utilizados 22 termopares conectados a um sensor portátil e uma estação meteorológica no local medindo a temperatura, humidade, velocidade e direção do vento, bem como a radiação solar global e difusa. Os termopares para medição da temperatura do ar foram protegidos com uma fina folha de alumínio e mecanicamente ventilados usando pequenos ventiladores. Os dados de radiação solar foram medidos usando dois piranómetros, colocados no telhado da célula-teste. Foram ainda utilizados quatro sensores para medir a temperatura do ar; quatro para avaliar a temperatura interna na proximidade do envidraçado e fazer uma estimativa da temperatura média radiante; um para medir a temperatura de cada superfície interna da sala (piso, teto, norte, oeste e leste) e um para avaliar a temperatura ambiente. Os dados foram coletados a cada minuto. Como resultado deste trabalho, observou-se que, na simulação numérica, a temperatura radiante tende a ser sobrestimada enquanto a temperatura real do ar está abaixo da simulada durante o período diurno.

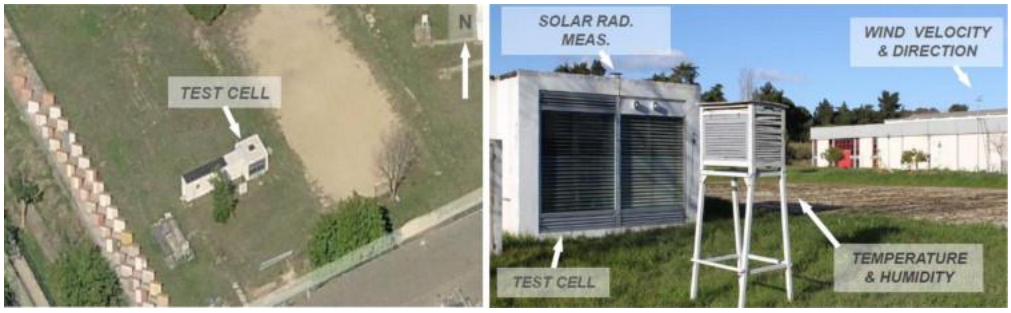


Figura 23 – Célula-teste utilizada por Mateus, et al. *(*2014)

Com o intuito de desenvolver um novo dispositivo de sombreamento para janelas que integra materiais de mudança de fase, foi realizado por Silva, et al. (2016) um estudo numa célula-teste em escala real, onde foram montadas duas persianas, uma contendo material de mudança de fase e outra não (Figura 24). Os resultados da campanha experimental foram comparados com os obtidos numa análise numérica do fenómeno. Para este trabalho consideraram-se três tarefas principais: (i) estudo das condições climáticas, seleção de materiais e definição das características geométricas; (ii) criação do protótipo e do procedimento experimental e (iii) modelagem numérica e validação. Colocou-se a célula-teste em Aveiro, Portugal, e recorreu-se à base de dados fornecida pela estação meteorológica da Universidade de Aveiro. A cada 5 minutos monitorizaram-se os parâmetros temperatura, radiação solar, humidade relativa e velocidade do vento. Todos os dados foram gravados com a utilização de dois módulos de entrada ICP I-7015P e dois módulos I-7561 para transferência de dados por USB. Como resultado, o modelo numérico foi validado de acordo com os critérios previamente definidos.



Figura 24 – Célula-teste utilizada por Silva, et al. (2016)

Três técnicas de arrefecimento passivo - pintura branca, sombreamento e isolamento térmico - foram utilizadas na cobertura de células-teste (Figura 25) em Marraquexe (Marrocos), no trabalho de Kachkouch, et al. (2018). Cada técnica foi implementada numa célula diferente, cujo desempenho foi avaliado, simultaneamente, ao longo de 29 dias. No mesmo período, foi também avaliada uma célula onde não se aplicou qualquer uma das técnicas em estudo, servindo assim de padrão. Foram medidas a temperatura do ar no interior das células, a temperatura superficial interior e exterior da laje de cobertura e o fluxo de calor através da laje. Nessa monitorização, sondas PT100 foram utilizadas para medir as temperaturas das superfícies interna e externa, o fluxo de calor foi aferido com um fluxímetro HFP01 e para a medição da temperatura e humidade do ar no interior das células foi utilizado um sensor portátil

TESTO174H. Quanto aos dados do ambiente externo, uma estação meteorológica foi instalada na proximidade das células-teste. As conclusões do estudo indicam que a técnica de pintura branca é a mais eficaz.



Figura 25 – Célula teste utilizada por Kachkouch, et al. (2018)

3

CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

3.1.1 ÁREA DE ESTUDO

O Tocantins é o mais jovem estado do Brasil, com 34 anos e, de acordo com estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021), ocupa a quarta posição em número de habitantes da região Norte, com 1.607.363 habitantes. O seu território cobre uma área total de 277.620,914 km^2, aproximadamente 7,2% do espaço geográfico da Região Norte e de 3,3% do território brasileiro. O Tocantins faz fronteira com os estados do Maranhão (nordeste), do Piauí (leste), da Bahia (sudeste), do Goiás (sul), do Mato Grosso (sudoeste) e do Pará (noroeste) (SEPLAN, 2012).

Palmas é a capital e a maior cidade do estado do Tocantins (Figura 26). De acordo com as estimativas de 2021 do IBGE, a sua população é de 313.349 habitantes, apresentando uma densidade populacional de 140,68 hab/km² (IBGE, 2021). Palmas possui as mais significativas taxas de crescimento demográfico do Brasil nos últimos quinze anos, recebendo pessoas de praticamente todos os estados brasileiros, devido ao desenvolvimento económico aí verificado.

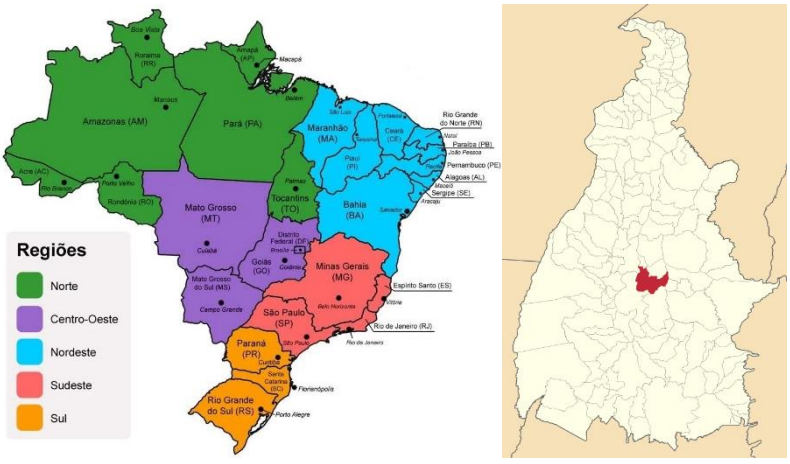


Figura 26- Localização do Tocantins e de Palmas

O estado possui relevo formado por planícies, embora sejam encontrados planaltos e depressões, principalmente na região sul, com pouca variação de altitude. A maior parte do estado não ultrapassa a altitude de 500 metros em relação ao nível do mar, sendo que o ponto mais elevado tem 1340 metros de altitude e fica na Serra das Traíras (SEPLAN, 2012).

De acordo com o Atlas do Tocantins, a precipitação média anual do estado varia de 1300 a 2100 mm, sendo que as chuvas não são distribuídas de forma uniforme durante o ano, com invernos com o mínimo de precipitação (seco) e verões com o máximo (chuvoso). A temperatura média é de 32 °C no período de seca (de abril a setembro) e de 25 °C no período de chuvas (de outubro a março). Na região norte do estado, as temperaturas médias são cerca de 3 °C mais altas do que na região sul. Existem áreas planas e elevadas, onde o clima é influenciado de maneira marcante pelo relevo, altitude e exposição das serras. Segundo a Figura 27, as temperaturas médias mais amenas ocorrem nos meses de junho (24,9 °C) e julho (24,9 °C), sendo esses também os meses mais secos, registando valores de precipitação de 11,49 mm e 5,22 mm, respetivamente (SEPLAN, 2012).

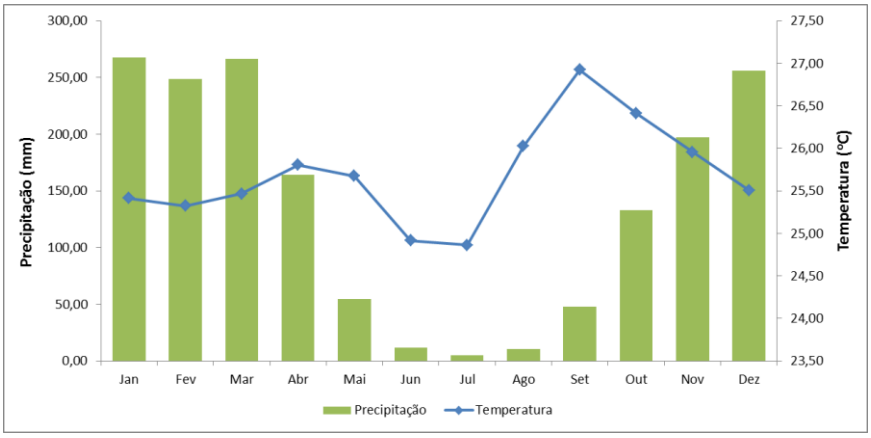


Figura 27 – Médias mensais da temperatura e precipitação, no estado do Tocantins, adaptado de SEPLAN (2012)

3.1.2 CÉLULAS-TESTE

Para este estudo foram construídas duas células-teste idênticas nos terrenos da Universidade Federal do Tocantins – UFT, no campus Palmas, atrás do edifício de laboratórios do curso de Engenharia Civil (Figura 28). Numa célula-teste foram implementadas as diferentes técnicas de arrefecimento passivo avaliadas, enquanto a outra célula-teste serviu de controlo, por não lhe ser implementada qualquer uma das técnicas em estudo.



Figura 28- Campus Palmas Universidade Federal do Tocantins-UFT. A amarelo o edifício de laboratórios do curso de Engenharia Civil, a vermelho a localização das células-teste

Foram executadas duas bases de betão a 4 m de distância uma da outra, com formato quadrado de 3x3 m^2 e com uma altura de 5 cm, que constituíram o pavimento. As paredes e forro foram materializadas em painéis OSB de 9,5 mm de espessura. Na parte interna das células foi fixada lã de vidro de 20 mm de espessura. As dimensões finais das células foram 2,4 x 2,4 x 2,4 m^3. A cobertura era inclinada, de duas águas (direções norte-sul), com inclinação de 10% em cada água. Como revestimento utilizou-se telha termoacústica (chapa metálica com EPS de 30 mm). Cada célula tem uma janela e uma porta. As janelas, com 0,6 x 0,6 m^2 (abertura segue o preconizado na norma brasileira de desempenho NBR 15575/2013) eram compostas por esquadria de alumínio com vidro simples, estando posicionadas a 1,5 m da altura da base, na fachada norte. As portas, com 0,8 x 2,10 m^2, são de OSB (material utilizado na envolvente) e posicionadas na fachada oeste (Figuras 29 e 30).

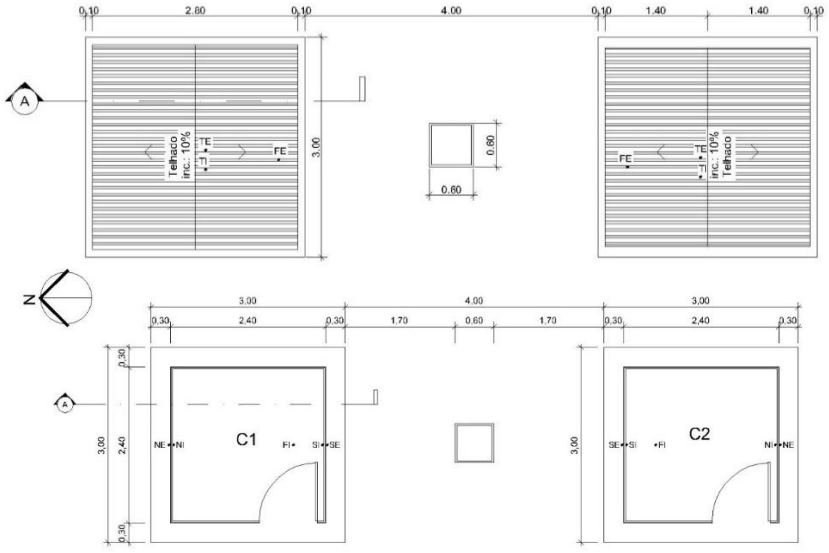


Figura 29 - Dimensões e orientação das células-teste



Figura 30 – Células-teste

A espessura das paredes das células-teste (placa de OSB e lã de vidro) foi determinada tendo como referência o valor do coeficiente de transmissão térmica das paredes mais usuais no Brasil, onde a envolvente vertical é constituída, na maioria dos casos, por paredes de tijolo cerâmico furado com espessura de 9 cm e reboco interno e externo de aproximadamente 3 cm de espessura. Tendo em conta as menores espessuras disponíveis no mercado (0,02 m para a lã de vidro e 9,5 mm para a placa OSB), o coeficiente de transmissão térmica calculado para a envolvente vertical foi de 1,64 W/(m^2.ºC), ligeiramente inferior ao de uma parede de alvenaria corrente. Convém referir que não se considerou relevante para o estudo a redução da inércia térmica das células, em comparação com os edifícios correntes, resultante da utilização de elementos construtivos leves.

3.2 TÉCNICAS IMPLEMENTADAS

Durante a experiência, na célula-teste C1 foram aplicadas 4 técnicas de arrefecimento passivo individualmente (Fase I) e 3 em combinação (Fase II). A célula C2 foi mantida sem alterações para que servisse de controlo na avaliação da eficácia de cada técnica em relação à variação da temperatura interior. As técnicas foram selecionadas levando em consideração elevado potencial combinado a condições socioeconômicas quanto a valores de execução. Da Fase I da campanha experimental fizeram parte as campanhas 1 a 4 e da Fase II as campanhas 5 a 7.

Na primeira fase experimental, a primeira técnica implementada, denominada como campanha 1, foi o sombreamento do vão envidraçado da célula C1, utilizando quebra-sol em esquadria de alumínio tipo veneziana, pintada com tinta esmalte sintético branco com dimensões de 0,8m x 0,8 m fixadas na face externa da janela (Figura 31).



Figura 31- Campanha 1 – sombreamento do vão envidraçado - quebra-sol

A segunda técnica implementada (campanha 2) foi a aplicação de película refletante no desvão do telhado da célula C1, tendo sido fixada entre a placa OSB do teto e a cobertura em telha termoacústica (Figura 32).



Figura 32 – Campanha 2 – aplicação de película refletante no desvão do telhado

Na campanha 3 garantiu-se a ventilação natural cruzada, por efeito do vento. Para tal foram realizadas duas aberturas na célula C1, com 20 cm x 20 cm cada uma, localizando-se uma delas na parte inferior da fachada este e a outra na parte superior da fachada oeste. A abertura à menor cota foi realizada na fachada este por estar orientada aos ventos dominantes (Figura 33).



Figura 33 – Campanha 3 – ventilação natural cruzada por ação do vento

Na campanha 4 foi aplicada uma pintura na envolvente opaca com tinta refletante de cor branca nas faces exteriores das quatro paredes e na cobertura. A aplicação foi efetuada com 3 demãos, de acordo com as instruções do fabricante (Figura 34).



Figura 34 – Campanha 4 – pintura na envolvente opaca com tinta refletante

A segunda fase experimental consistiu na associação das técnicas de pintura da envolvente opaca com tinta refletante e ventilação natural por ação do vento, sendo que esta última se dividiu em três estratégias distintas. Na estratégia 1, garantiu-se a ventilação cruzada natural durante as 24 horas. Na estratégia 2, semelhante à anterior, a ventilação natural cruzada por ação do vento foi favorecida apenas no período noturno (entre as 18h e as 08h). Na estratégia 3 implementou-se a ventilação natural durante as 24 horas do dia, mas por efeito chaminé, tendo sido realizadas para tal três aberturas de 20 cm x 20 cm cada, duas localizadas na parte inferior da célula nas fachadas oeste e este e a terceira na parte central do forro da célula (Figura 35). Durante todos os ensaios, a porta e a janela das células permaneceram fechadas, fazendo com que o efeito da ventilação natural ocorresse apenas pelas aberturas realizadas. As medições (Fase I e Fase II) decorreram durante 11 meses, entre junho e abril, de acordo com o cronograma apresentado na Tabela 4.



Figura 35 – Campanhas 5, 6 e 7, aberturas inferiores (fachadas oeste e este) e superior (teto) e pintura da envolvente opaca com tinta refletante

Tabela 4 - Cronograma das medições efetuadas.

Campanha	Fase I	Duração
1	Sombreamento do vão envidraçado - quebra-sol	16 dias
2	Aplicação de película refletante no desvão do telhado	24 dias
3	Ventilação natural cruzada por ação do vento durante 24 horas	21 dias
4	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante	27 dias
	Fase II	
5	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante e ventilação natural cruzada por ação do vento durante 24 horas (estratégia 1)	12 dias
6	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante e ventilação natural cruzada por ação do vento durante o período noturno (estratégia 2)	14 dias
7	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante e ventilação natural por efeito chaminé durante 24 horas (estratégia 3)	10 dias

3.3 EQUIPAMENTOS

3.3.1 SENSOR PORTÁTIL DE TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA

O sensor portátil (Figura 36) mede a temperatura e a humidade relativa do ambiente. Foram utilizados dois em cada célula, estando posicionados a um metro de altura do piso, um mais próximo da fachada norte (fachada com maior incidência solar) e outro mais próximo da fachada sul (fachada com menor incidência solar). O equipamento foi programado para fazer aferições em intervalos de tempo de 10 minutos. A precisão do equipamento é de ±0,35 ºC para a temperatura e ±2,5% para a humidade do ar (Onset, 2009).



Figura 36 - Sensor portátil

3.3.2 SENSOR PORTÁTIL DE MEDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO_2

Para a determinação do caudal de ventilação, recorreu-se ao método do gás traçador e à técnica do declive. Este procedimento consiste na medição, ao longo do tempo, da concentração de um gás traçador, previamente introduzido no espaço. Por princípio, esse gás deve ser pouco comum na atmosfera e obedecer a determinados requisitos (Etheridge e Sandberg, 1996): i) não deve ser um constituinte habitual do ambiente que está a ser estudado; ii) deve ser facilmente mensurável, incluindo em baixas concentrações; iii) não deve ser tóxico nem trazer qualquer risco para a saúde; iv) deve ser não inflamável e não explosivo; v) não deve ser dispendioso e vi) deve ser ambientalmente inerte. O procedimento experimental para a determinação do caudal de ventilação por meio do método do gás traçador e da técnica do declive está regulamentado pelas normas ISO 12569 (ISO, 2000) e ASTM E741-00 (ASTM, 2000).

Em termos matemáticos, a variação temporal da concentração de um gás numa determinada zona depende de três componentes: i) concentração do gás no ar admitido; ii) concentração do gás no ar extraído e iii) produção interna do gás. A Equação 12 traduz este fenómeno.

$$V \cdot \frac{dC(t)}{dt} = G + Q \cdot C_{ex} - Q \cdot C(t) \tag{12}$$

em que:

V	[m³]	Volume efetivo do espaço
C(t)	[ppm]	Concentração do gás traçador
t	[s]	Tempo
G	[cm³/s]	Produção interna do gás
Q	[m³/s]	Caudal de ventilação
C_{ex}	[ppm]	Concentração do gás no exterior

A solução da Equação (12) pode ser obtida por integração, resultando na Equação 13.

$$C(t) = C_{ex} + \frac{G}{Q} + \left(C_{in} - C_{ex} - \frac{G}{Q} \right) \cdot e^{-\frac{Q}{V} \cdot t} \tag{13}$$

em que:

C_{in}	[ppm]	Concentração do gás no interior

Uma vez que o gás traçador deve possuir concentrações residuais ou nulas no ar exterior e interior (abaixo das utilizadas nos ensaios), na Equação (13) a parcela referente ao ar exterior pode ser desprezada, obtendo-se a Equação 14.

$$C(t) = \frac{G}{Q} + \left(C_{in} - \frac{G}{Q} \right) \cdot e^{-\frac{Q}{V} \cdot t} \tag{14}$$

Como também não existe produção interna do gás traçador no espaço em estudo, a Equação 12 transforma-se na Equação 15, que rearranjada, permite obter a Equação 16, que traduz o número de renovações horárias em função da variação da concentração do gás traçador ao longo do tempo.

$$C(t) = C_{in} \cdot e^{-\frac{Q}{V} \cdot t} \tag{15}$$

$$\frac{Q}{V} = RPH = \frac{\ln\left(\frac{C_{in}}{C(t)}\right)}{t} \tag{16}$$

em que:

RPH	[h^{-1}]	Renovações horárias

Assim, para a medição do caudal de ventilação em espaços que podem ser considerados como uma única zona, é suficiente introduzir um gás traçador até se atingir uma concentração inicial uniforme, Cin. Num gráfico ln(C) versus tempo, e considerando a Equação 16, o módulo do declive da reta definida traduz Q/V, isto é, o número de renovações horárias, RPH (Figura 37).

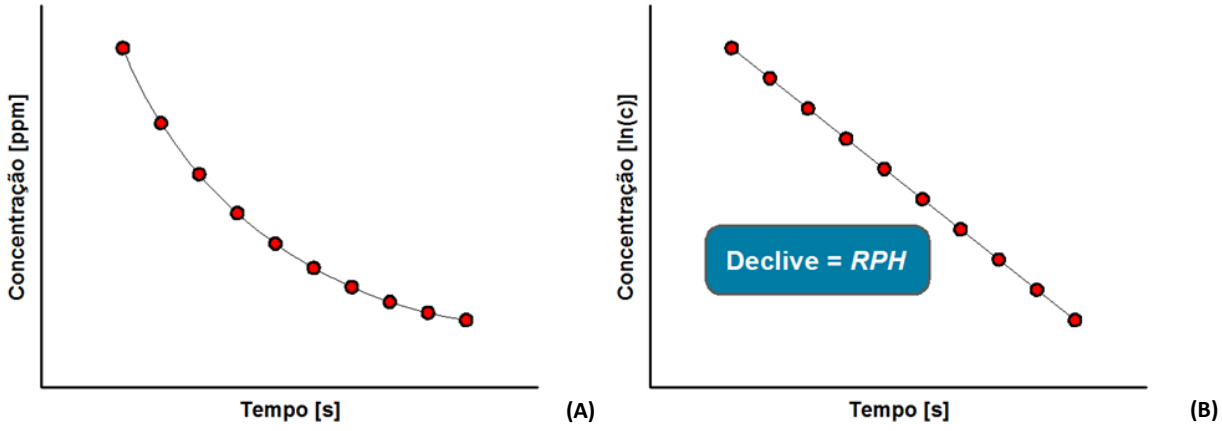


Figura 37- Exemplo da técnica do declive. A) diminuição do gás traçador ao longo do tempo; B) logaritmo da concentração do gás traçador *versus* tempo (adaptado de AWBI, 2003)

Esta metodologia também pode ser aplicada quando se utiliza o dióxido de carbono (CO_2) como gás traçador. Nesse caso, algumas adaptações têm de ser introduzidas na metodologia prescrita na ASTM E741-00, as quais vêm indicadas na norma ASTM D6245-12 (ASTM, 2012). A principal está relacionada com a concentração de CO_2 presente na atmosfera, que passa a ter que ser considerada. Assim, desde que a concentração de CO_2 no exterior se mantenha constante durante o ensaio, o método do gás traçador e da técnica do declive podem ser aplicados, tendo o cuidado de substituir a concentração interior da Equação 16 pela diferença entre a concentração interior e a concentração exterior. Adicionalmente, dado que esse método prevê que a geração interna de gás traçador é nula, os ocupantes do espaço têm de o abandonar antes do início do ensaio.

O equipamento utilizado foi o C.A 1510 do grupo *Chauvin Arnoux* (Figura 38). Este equipamento opera em temperaturas de -10 a 60 ºC e humidades de 5 a 95% (CHAUVIN, 2014).



Figura 38 - Equipamento C.A 1510

3.3.3 SENSOR PORTÁTIL PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA RADIANTE - GLOBO NEGRO

A temperatura média radiante foi avaliada através de dois equipamentos TGD-200 da Instrutherm, do Laboratório de Conforto do Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP ULBRA (Figura 39). Este termómetro de globo negro consiste num sensor de temperatura (termómetro de mercúrio), com um diâmetro do globo de 15 cm e uma emissividade de 0,95. O equipamento opera para uma gama de temperatura de -10 a 50 ºC, com precisão de ± 0,5 ºC (Instrutherm, 2006). Uma vez que o equipamento apresenta uma alta inércia, há restrições à sua utilização em ambientes cujas condições ambientais variam muito rapidamente. Os equipamentos foram instalados no centro de cada célula, durante um dia, sendo realizado quatro recolhas, com intervalo de duas horas entre cada uma.



Figura 39- Globo negro TGD-200 da Instrutherm

A temperatura média radiante (T_{rdmed}) é obtida a partir das medições das temperaturas do globo, utilizando a Equação 17 e a Equação 18 para a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção ao nível do globo, h_{cg}, assumindo a convecção natural (ISO 7726/1996).

$$T_{rdmed} = \sqrt[4]{T_g^4 + \frac{h_{cg}}{\varepsilon_{g*}\sigma} * (T_g - T_a)} \tag{17}$$

em que:

T_{rdmed}	[K]	Temperatura média radiante
T_g	[K]	Temperatura do globo
T_a	[K]	Temperatura do ar
h_{cg}	[W/m².K]	Coeficiente de transferência de calor por convecção ao nível do globo
ε_g	[-]	Emissividade do globo negro
σ	[5,67x10^{-8} W/m².K^4]	Constante de Stefan-Boltzman

Sendo que:

$$h_{cg} = 1{,}4\left(\frac{\Delta T}{D}\right)^{\frac{1}{4}} \tag{18}$$

em que:

D	[m]	Diâmetro do globo
ΔT	[-]	$T_a - T_g$

3.3.4 Estação meteorológica de Palmas -TO

Para a caracterização do clima exterior foram utilizados dados da estação meteorológica automática administrada pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. A estação meteorológica automática (EMA), localizada em Palmas-TO (Latitude: -10.190744º e Longitude: -48.301811º), coleta de minuto a minuto os dados da temperatura (ºC), humidade relativa (%), pressão atmosférica (hPa), precipitação (mm), direção (º) e velocidade dos ventos (m/s) e radiação solar (W/m²) (Figura 40). A cada hora esses dados são guardados e disponibilizados para serem transmitidos, via satélite ou telefonia celular, para a sede do INMET, em Brasília. O conjunto dos dados recebidos é validado por meio de um controlo de qualidade e armazenado num banco de dados, sendo disponibilizados dados de máxima, mínima e do instante da recolha (Brasil, 2011).



Figura 40- Localização relativa da estação automática INMET em Palmas - TO e das células-teste

3.4 PROCEDIMENTOS

O posicionamento dos equipamentos está indicado nos desenhos da Figura 41. Os equipamentos globo negro e sensores de concentração de CO_2 foram instalados no centro das células, a 1 metro de altura do piso acabado (para atingir essa altura foram utilizados tripés para os globos e cadeiras para os sensores).

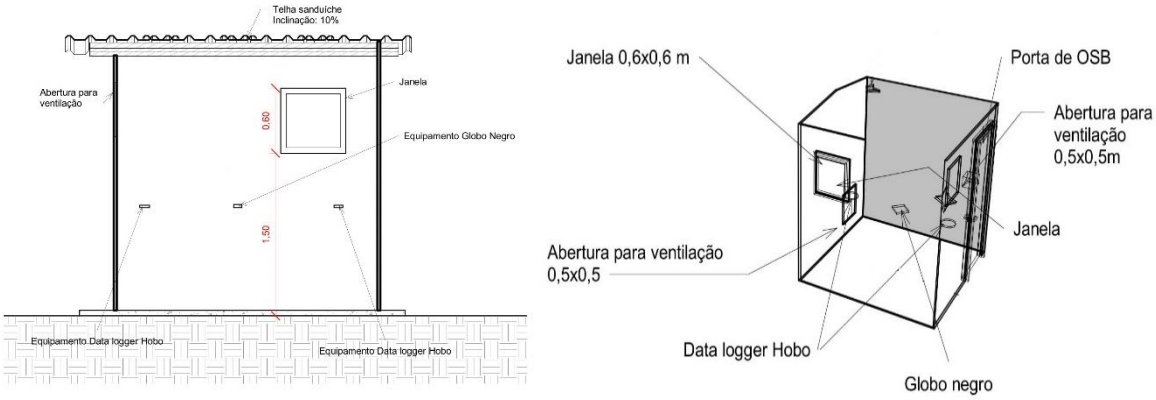


Figura 41- Croqui das células e posição dos equipamentos

Quanto aos sensores portáteis de temperatura e humidade, foram distribuídos igualmente entre as células, ficando dois em cada. Os equipamentos foram presos ao teto por uma linha, ficando a 1 metro de altura do piso acabado, como a NBR 15575 (2013) refere, e foram colocados no centro da célula (divisão este-oeste) a 0,8 e 1,6 metros da parede norte, ficando um mais próximo da fachada norte e outro da fachada sul, em posições similares nas duas células.

3.5 AFERIÇÕES RELATIVAS

3.5.1 EQUIPAMENTO

Para verificação do funcionamento dos sensores portáteis de temperatura e humidade relativa, utilizou-se uma câmara climática programada com um ciclo de 24 horas, na qual se variou a temperatura e a humidade. O ciclo iniciou-se com uma temperatura de 35ºC e 55% de humidade relativa e foi concluído com uma temperatura de 10ºC e 90% de humidade relativa (Figura 42).

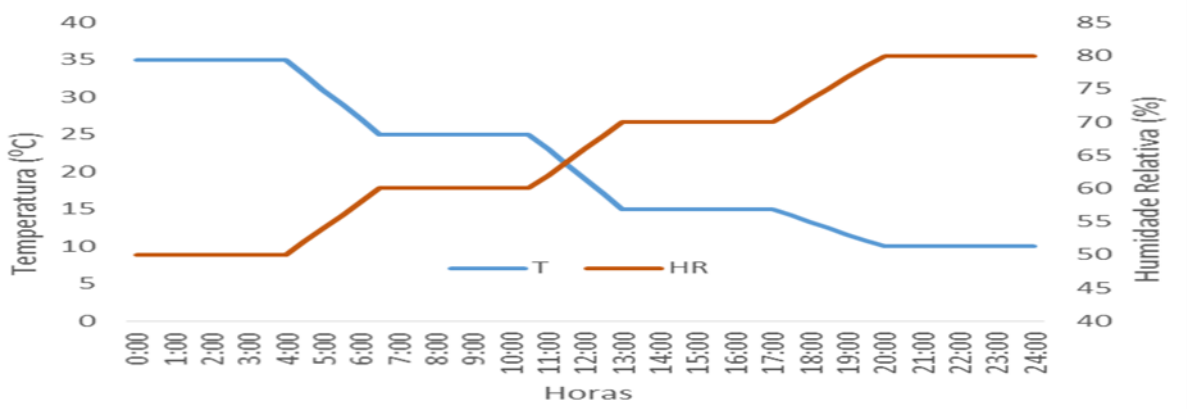


Figura 42- Ciclo de verificação da temperatura e humidade relativa

As Figuras 43 e 44 mostram que os sensores apresentaram resultados semelhantes, tanto para a temperatura quanto para a humidade relativa. Pode ainda observar-se que a câmara climática apresentou algumas inconsistências quanto à programação do ciclo para a humidade, o que não comprometeu a verificação. Realmente, os resultados apresentados pelos equipamentos em todos os momentos mantiveram-se análogos, mesmo com a falha apresentada no ciclo da câmara climática.

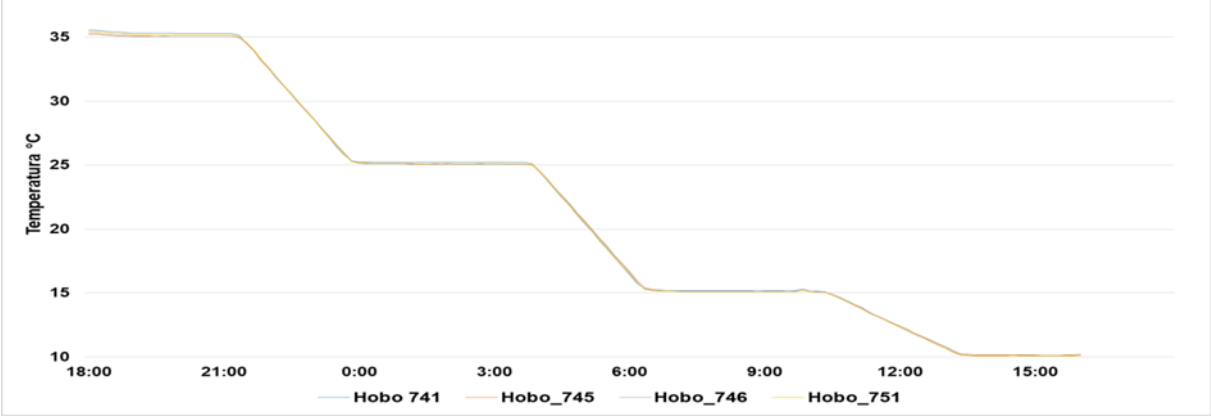


Figura 43- Verificação da temperatura medida pelos sensores portáteis

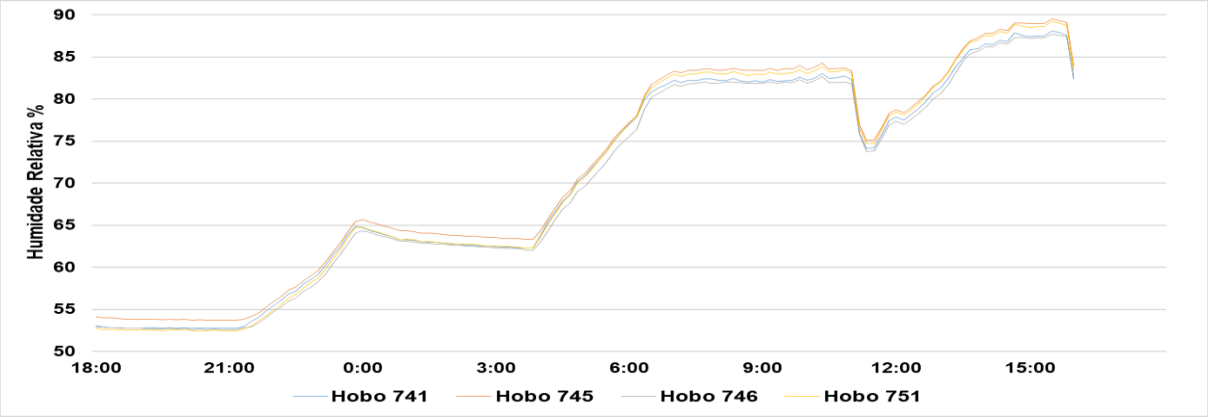


Figura 44- Verificação da humidade relativa medida pelos sensores portáteis

Com relação aos dois sensores de CO_2 e aos dois globos negros utilizados nas campanhas de ensaio, não foi efetuada nenhuma verificação, uma vez que as suas calibragens foram feitas em fábrica. Já a estação meteorológica automática do INMET apresenta rotinas mensais de manutenção preventiva e corretiva, executadas pelos técnicos do CCIM, com base no sistema de qualidade da ISO 9001. São também indicadas as falhas nas medições da estação (Brasil, 2011).

3.5.2 CÉLULAS

Antes da implementação das medidas de arrefecimento passivo na célula C1 foi realizada uma campanha experimental preliminar, que decorreu entre os dias 15/05 e 03/06 de 2018, para avaliar se as condições no interior das células C1 e C2 eram idênticas. Foram aferidos dados de temperatura (em ºC), de humidade relativa (em %), de temperatura média radiante (em ºC) e de renovações horárias para avaliar as infiltrações (em h^{-1}).

No que diz respeito à temperatura, avaliou-se este parâmetro no ambiente exterior (Text), no interior da célula C1 (Tint C1) e da célula C2 (Tint C2). A temperatura mais elevada ocorreu na célula C1 (39,8 ºC) e a mais baixa (18,6 ºC) no exterior. Entre as células não houve grande variação de temperatura como demonstrado na Tabela 5 e Figuras 45 e 46. Ambas as células apresentaram máxima, média e mínima superior à temperatura exterior, quer no período noturno quer no diurno.

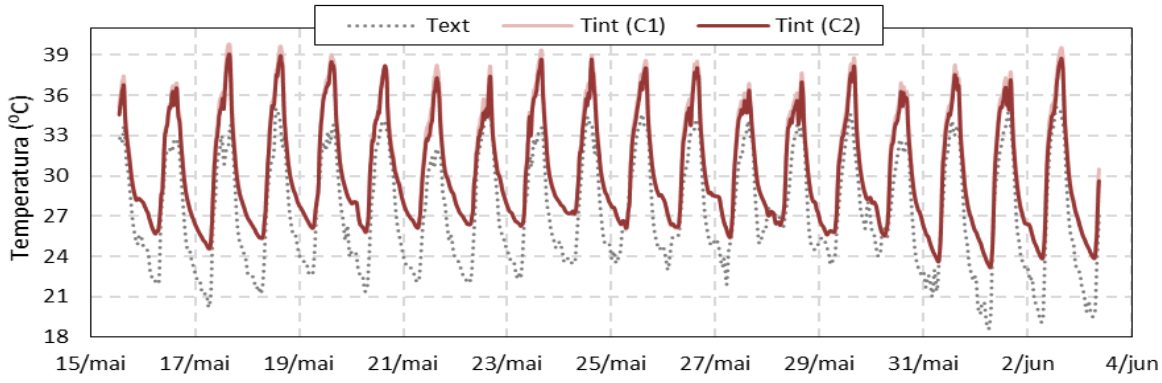


Figura 45- Variação da temperatura ao longo do período experimental preliminar

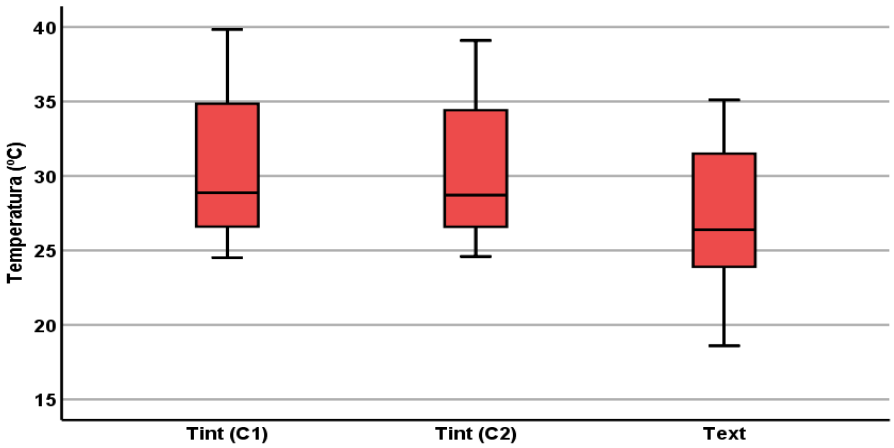


Figura 46- Temperatura ambiente nas células e no exterior

Tabela 5 – Temperatura ºC (médias, máximas e mínimas)

	Tmédia	Tmáx	Tmín
Exterior	27,3	35,1	18,6
Interior (C1)	30,5	39,8	23,1
Interior (C2)	30,2	39,1	23,2

A humidade relativa, assim como a temperatura, foi medida no ambiente exterior (HRext) e no interior de cada célula (HRint C1 e HRint C2). O valor mais alto de humidade relativa foi no ambiente exterior e, tal como a temperatura, os valores da humidade relativa no interior das células não apresentaram grande discrepância entre si. Cabe ressaltar a diferença de 66% entre os valores máximo e mínimo do ambiente exterior. Considerando as médias, houve semelhança nos 3 ambientes aferidos (Tabela 6 e Figuras 47 e 48).

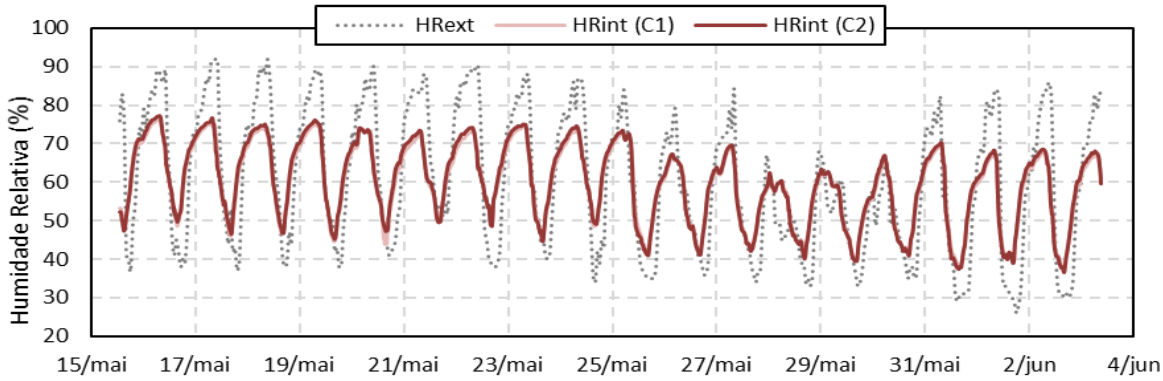


Figura 47- Variação da humidade relativa ao longo do período experimental preliminar

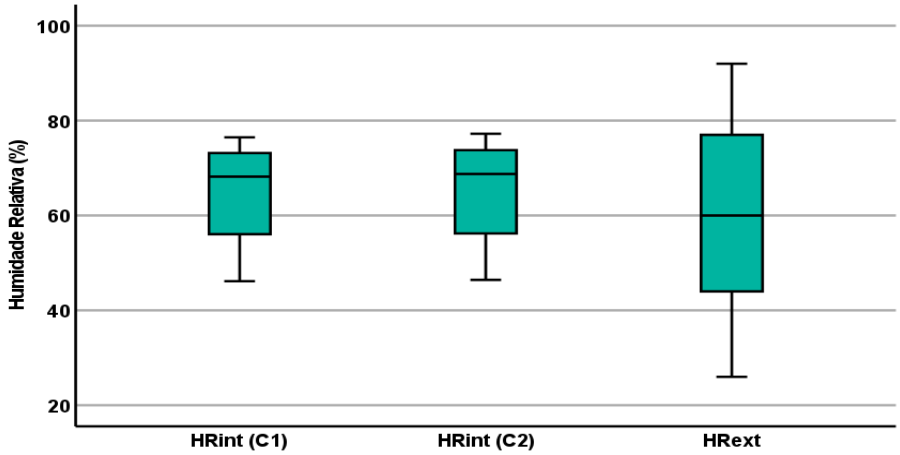
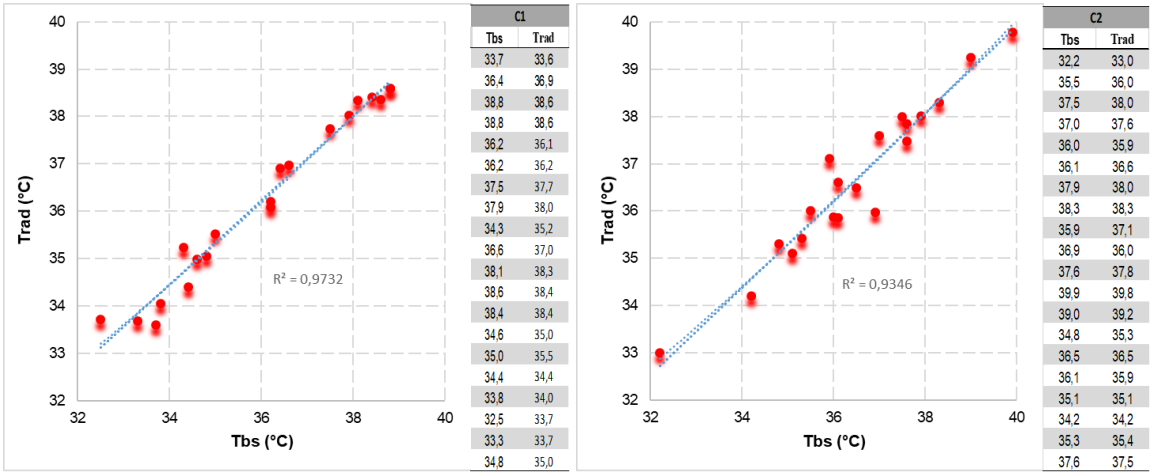


Figura 48- Humidade relativa das células-teste e do ambiente exterior

Tabela 6 - Humidade relativa % (médias, máximas e mínimas)

	HRmédia	HRmáx	HRmín
Exterior	61,0	92,0	26,0
Interior (C1)	59,8	76,5	37,0
Interior (C2)	60,1	77,2	36,5

Quanto à temperatura média radiante, verificou-se existir pouca variação entre os valores encontrados (em todos os horários coletados) para o bulbo seco e para o globo, garantindo-se assim condições aproximadas nas duas células (Figura 49).



(A) (B)

Figura 49- Temperatura radiante x Temperatura bulbo seco: A) célula C1; B) célula C2

Para avaliar se as condições de estanqueidade nas duas células eram idênticas, foram realizadas 11 medições das renovações por hora (RPH em h^{-1}) na célula C1 e 14 na célula C2. O aumento da

concentração de CO_2 no interior das células foi obtido com a presença de 3 pessoas durante aproximadamente 20 minutos. Após esse período, todas as pessoas se retiraram da célula e avaliou-se a descida da concentração de CO_2 durante cerca de uma hora, com porta e janela fechadas. Os valores obtidos (Tabela 7 e Figura 50) sugerem a existência de infiltrações significativas nas células, devido à falta de vedação entre as juntas de ligações das paredes e forro, com uma média de 2,29 h^{-1} e 2,42 h^{-1} para as células C1 e C2, respetivamente. Estes valores apontam para condições semelhantes nas duas células.

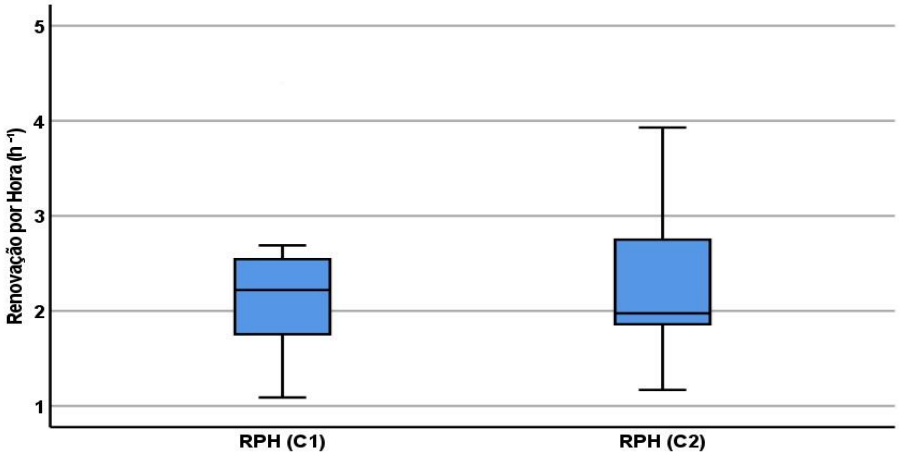


Figura 50- Renovações por hora das células-teste

Tabela 7 – Valores das renovações por hora por ensaio realizado

	RPH (C1)	RPH (C2)
Coleta 1	2,69	1,93
Coleta 2	2,22	1,90
Coleta 3	2,28	1,78
Coleta 4	2,55	2,61
Coleta 5	2,54	1,86
Coleta 6	1,79	1,92
Coleta 7	1,72	2,75
Coleta 8	2,17	2,99
Coleta 9	-	1,80
Coleta 10	-	2,75
Coleta 11	-	4,49
Coleta 12	1,67	2,02
Coleta 13	1,09	1,17
Coleta 14	4,45	3,93
Média	**2,29**	**2,42**

3.5.3 PINTURA COM TINTA CORRENTE VS PINTURA COM TINTA REFLETANTE

Durante cerca de 15 dias, realizou-se uma campanha experimental para aferir o efeito da pintura refletante relativamente a uma pintura com tinta corrente, ambas de cor branca, considerando a temperatura e a humidade relativa no interior das células. A Tabela 8 e as Figuras 51, 52 e 53 mostram que na célula C1 se mediram temperaturas mais baixas do que na célula C2, comprovando o efeito da pintura refletante. Mostram ainda que o efeito da pintura refletante é mais expressivo no período diurno, embora também seja possível constatar o seu efeito durante a noite.

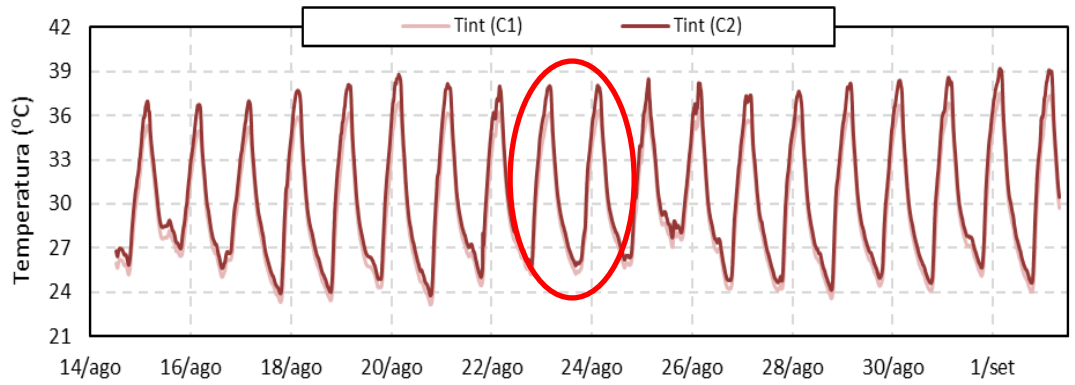


Figura 51- Variação da temperatura no interior da célula C1 (tinta refletante) e da célula C2 (tinta corrente)

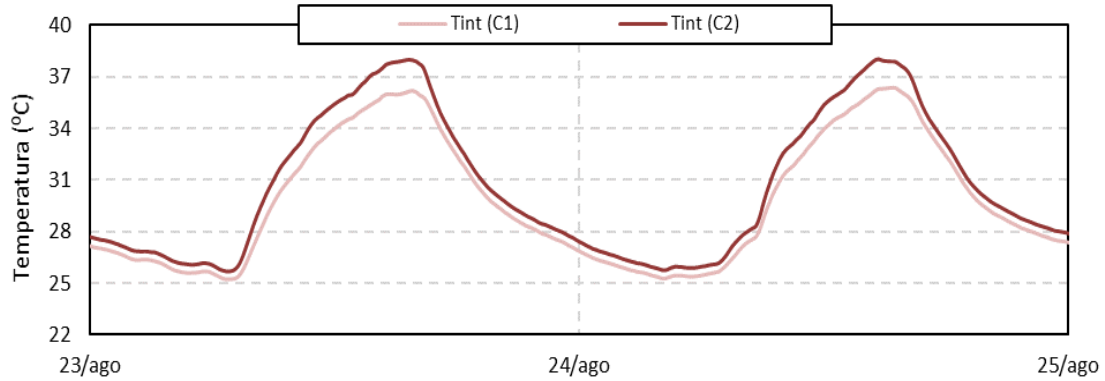


Figura 52- Variação da temperatura entre os dias 23 e 25 de agosto no interior da célula C1 (tinta refletante) e da célula C2 (tinta corrente)

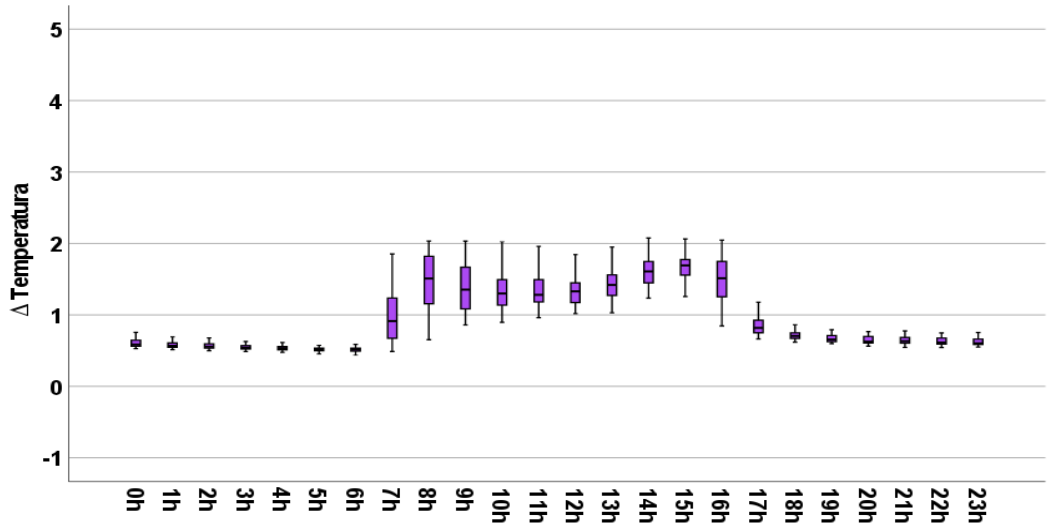


Figura 53- Boxplots das diferenças entre as temperaturas no interior da célula C2 (tinta corrente) e da célula C1 (tinta refletante), por hora, para todo o período de medição

Tabela 8 - Temperatura média, máxima e mínima no interior da célula C1 (tinta refletante) e da célula C2 (tinta corrente)

	Tmédia	**Tmáx**	**Tmín**
Interior (C1)	29,4	37,5	23,2
Interior (C2)	30,4	39,1	23,7

O gráfico apresentado na Figura 54 apresenta a direção predominante e as médias da velocidade do vento e da variação de temperatura em relação às horas dos dias em que a validação foi realizada. É conclusivo que nem a velocidade nem a direção do vento interferem nos resultados da temperatura visto que, quando a velocidade diminui, a temperatura continua a aumentar e a orientação do vento dominante é semelhante.

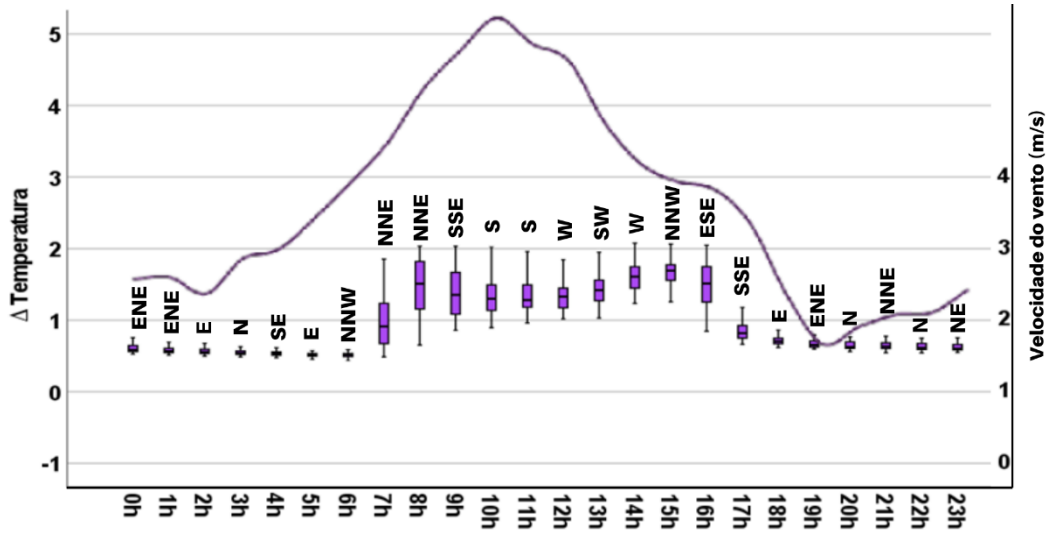


Figura 54- Velocidade do vento e variação da temperatura nas horas da campanha – pintura tinta refletante x pintura tinta corrente

4

RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL – FASE 1

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA EXTERIOR – FASE 1

Para iniciar a discussão sobre os resultados da campanha experimental – fase 1 apresenta-se uma breve caracterização do clima exterior, com dados do INMET, no período de junho a outubro de 2018. As variáveis extraídas foram: temperatura exterior, humidade relativa do ar, radiação solar, velocidade e direção do vento, apresentadas graficamente em figuras e com valores máximos, médios e mínimos em tabelas.

A temperatura ambiente exterior apresentou pouca variação ao longo desta primeira fase (Figura 55), a temperatura máxima verificou-se durante a campanha 3, atingindo 39,0 ºC, nesta também foi observada as maiores média (20,8 ºC) e mínima (29,6 ºC), e a menor temperatura registada no período da fase 1 ocorreu na campanha 2 (18,1 ºC) (Tabela 9).

Tabela 9 – Temperatura ambiente do exterior (ºC) – fase 1

Campanhas	Técnicas	Média	Máximo	Mínimo
1	Sombreamento do vão envidraçado - quebra-sol	27,5	36,9	19,6
2	Aplicação de película refletante no desvão do telhado	27,6	38,2	18,1
3	Ventilação natural cruzada por ação do vento	29,6	39,0	20,8
4	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante	27,5	37,5	20,9

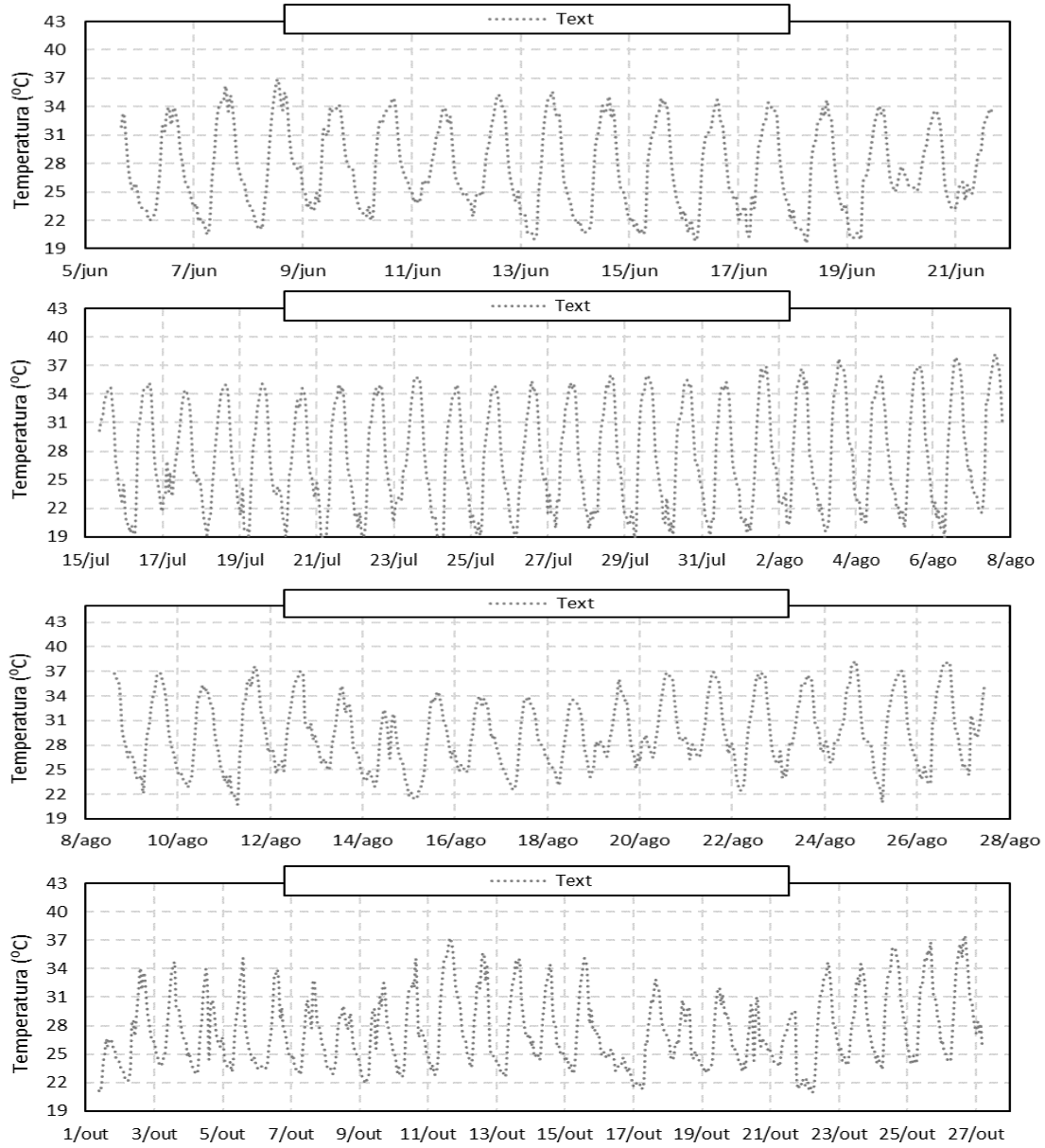


Figura 55- Temperatura exterior para as campanhas de 1 a 4 (de cima para baixo) – fase 1

A humidade relativa, com dados registados em percentagem (Figura 56), não apresentou grandes variações entre as máximas das campanhas, ocorrendo entre 93% (campanha 4) e 85% (campanha 2), as mínimas por sua vez diferiram mais entre si, ocorrendo entre 14% (campanha 2) e 28% (campanha 4) (Tabela 10). É provável que a maior percentagem observada no gráfico no mês de outubro seja resultado do período de chuvas que tem início nesta altura do ano.

Tabela 10 – Humidade relativa exterior (%) – fase 1

Campanhas	Técnicas	Média	Máximo	Mínimo
1	Sombreamento do vão envidraçado - quebra-sol	52,5	88,0	24,0
2	Aplicação de película refletante no desvão do telhado	42,1	85,0	14,0
3	Ventilação natural cruzada por ação do vento	42,9	86,0	15,0
4	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante	69,5	93,0	28,0

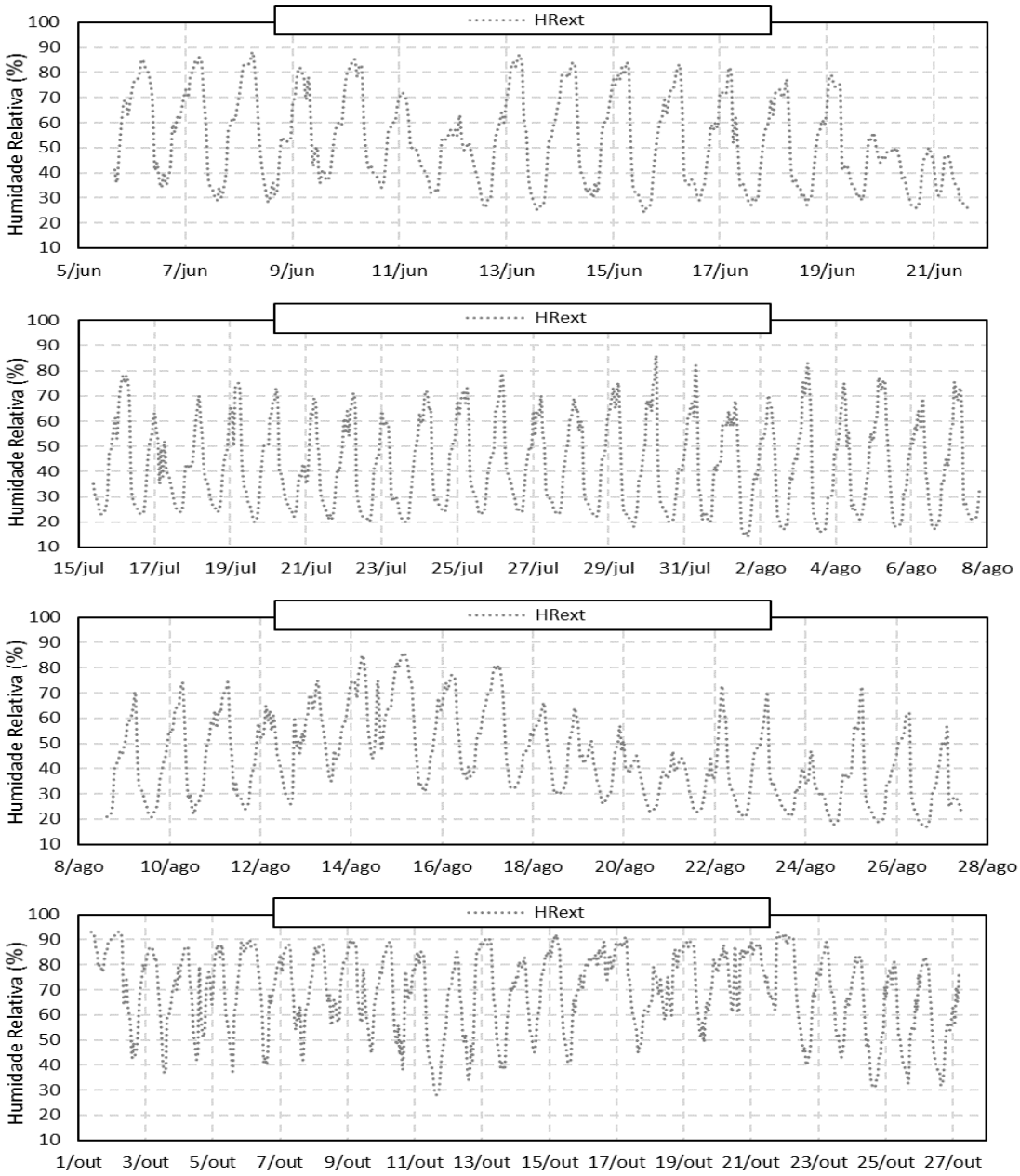


Figura 56- Humidade relativa exterior para as campanhas de 1 a 4 (de cima para baixo) – fase 1

No que respeita aos resultados obtidos de radiação solar incidente nas células C1 e C2, o pico máximo ocorreu na campanha 4 (Figura 57), 994,2 W/m^2, com uma radiação sol maior e mais intensa no início da tarde em todos os casos. Com relação aos valores médios diurno (08 ás 18hrs), todas as campanhas registaram aproximadamente 450 W/m^2, demonstrando um comportamento mais uniforme (Tabela 11).

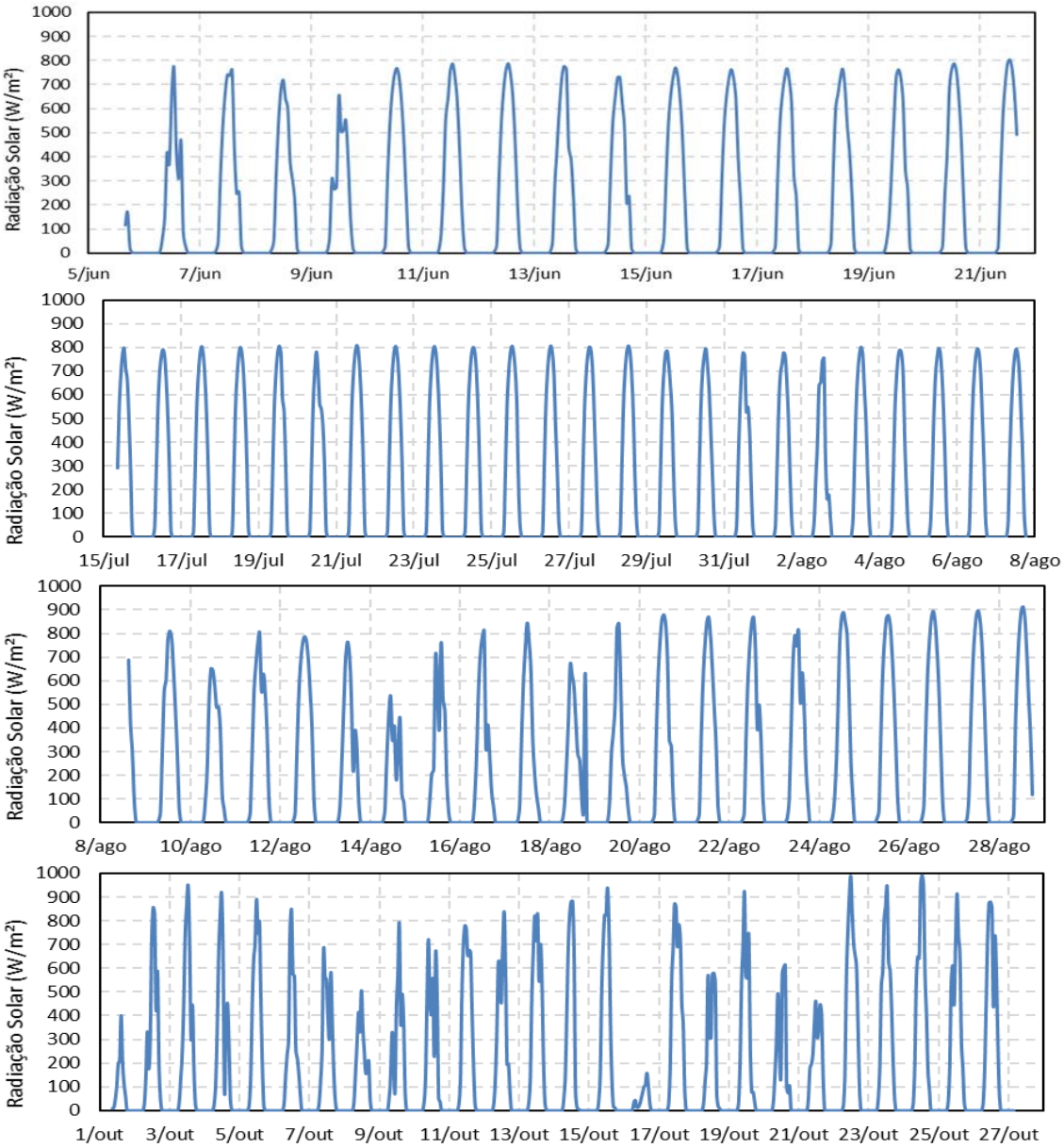


Figura 57- Radiação solar para as campanhas de 1 a 4 (de cima para baixo) – fase 1

Tabela 11 - Radiação solar (W/m²) – fase 1

Campanhas	Técnicas	Média diurna	Máximo
1	Sombreamento do vão envidraçado - quebra-sol	433,0	803,6
2	Aplicação de película refletante no desvão do telhado	489,5	810,6
3	Ventilação natural cruzada por ação do vento	467,1	912,5
4	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante	409,1	994,2

A velocidade do vento na campanha de ventilação natural cruzada atingiu como máximo 8,9 m/s e como média 2,0 m/s, sendo estes os maiores valores máximo e médio, respetivamente (Tabela 12). Durante a campanha 4 (pintura da envolvente opaca com tinta refletante) ocorreu a menor média da velocidade do vento e a menor máxima. No entanto, a variação encontrada entre as campanhas não é significativa (Figura 58), mantendo-se aproximadamente 0,9 m/s de média e 1,7 m/s de máxima.

Tabela 12 – Velocidade do vento (m/s) – fase 1

Campanhas	Técnicas	Média	Máximo	Mínimo
1	Sombreamento do vão envidraçado - quebra-sol	1,5	7,6	0,0
2	Aplicação de película refletante no desvão do telhado	1,6	6,7	0,0
3	Ventilação natural cruzada por ação do vento	2,0	8,9	0,0
4	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante	1,1	7,2	0,0

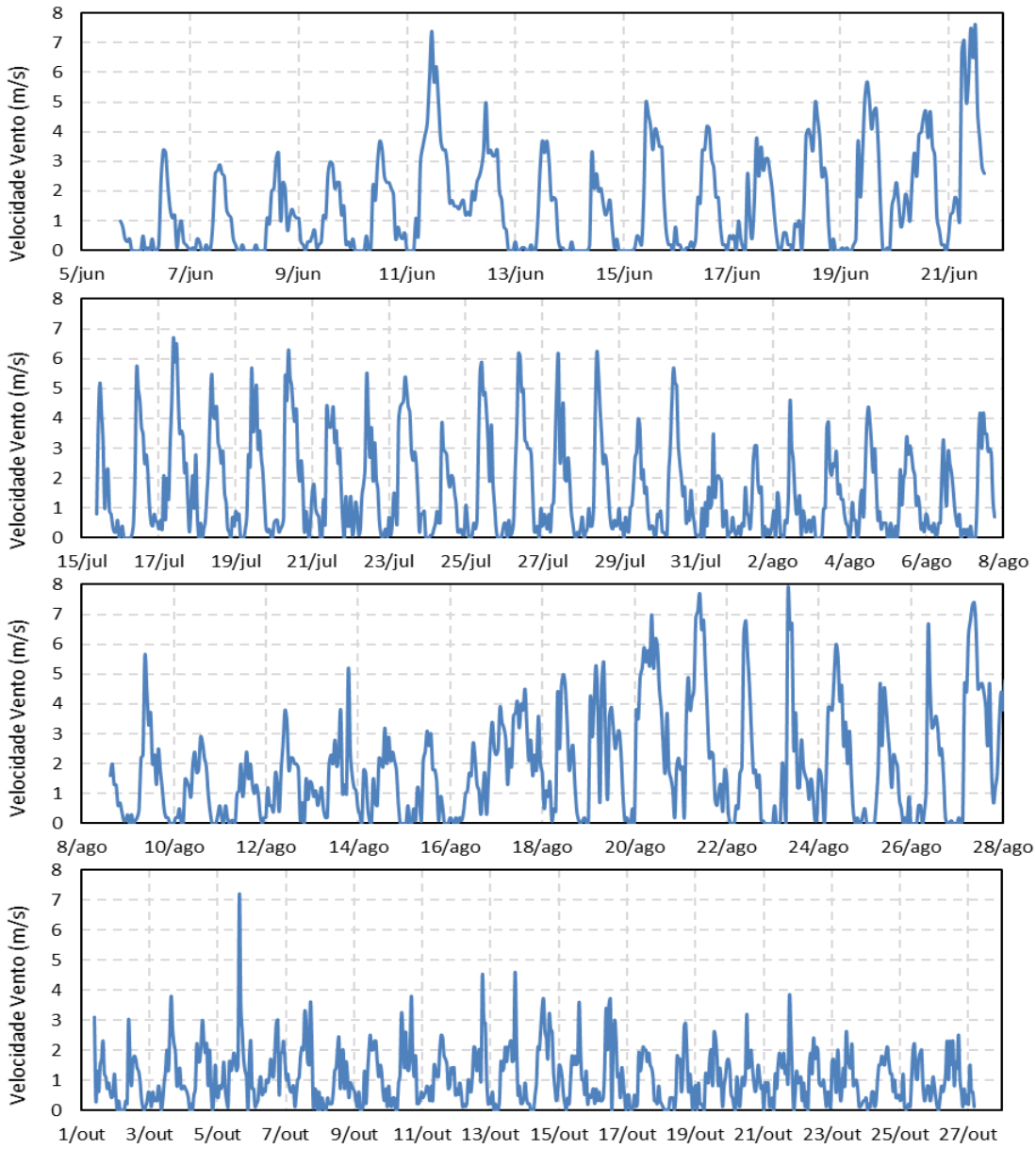


Figura 58- Velocidade do vento para as campanhas de 1 a 4 (de cima para baixo) – fase 1

Quanto à direção do vento, como observado nos gráficos da Figura 59, durante a campanha 1 esteve durante mais tempo na direção lés-nordeste, seguida pelas direções nordeste, leste e lés-sudeste, correspondendo a 65,8% de todas as orientações. Na campanha 2 esteve durante mais tempo na direção lés-nordeste, seguida pelas direções leste, lés-sudeste e nordeste, correspondendo a 54,0% das orientações. Na campanha 3 manteve-se mais tempo na direção leste, seguida pelas direções lés-nordeste, nordeste e nor-nordeste, correspondendo a 52,0% das orientações. Estas direções levaram a que a ventilação natural cruzada da célula contenha uma abertura posicionada a leste e outra a oeste. Já na campanha 4 a direção nor-nordeste é a que esteve durante mais tempo, seguida pelas direções norte, sudeste e nor- noroeste, com 38,6% das orientações. Nesta última campanha é possível observar uma maior variação nas direções do vento, quando comparada às demais campanhas.

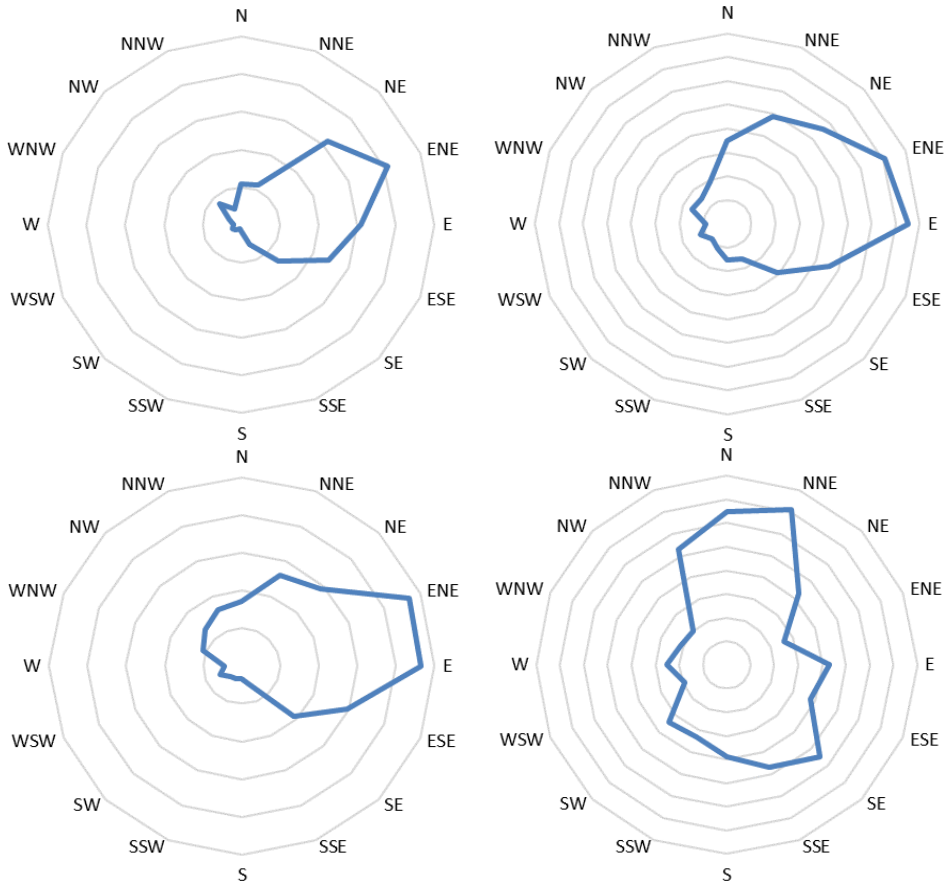


Figura 59- Direção do vento para as campanhas: 1, 2 (superior e inferior esq), 3 e 4 (superior e inferior dir) fase 1

4.2 SOMBREAMENTO DO VÃO ENVIDRAÇADO - QUEBRA-SOL

A campanha 1, durante a qual se testou o efeito do sombreamento do vão envidraçado (quebra-sol), ocorreu durante 16 dias, entre 05/06 e 21/06 de 2018. A técnica de arrefecimento foi apenas implementada na célula C1, com a C2 a funcionar como controlo. A Figura 60 apresenta os resultados dos dados aferidos de temperaturas (em ºC) no ambiente exterior (Text) e nos ambientes interiores da célula C1 (Tint C1) e da célula C2 (Tint C2) para o período de campanha mencionado. O círculo a vermelho na figura destaca o comportamento da temperatura para um dia especifico da campanha, facilitando assim a interpretação dos dados, como pode ser visto na Figura 61. Das temperaturas aferidas, a mais elevada ocorreu na célula C2 (40,4 ºC) e a menor (19,6 ºC) ocorreu no meio externo. Comparando os resultados obtidos nas duas células, a célula C2 apresentou uma média de temperatura superior em 0,3 ºC em relação à célula C1, como demonstrado na Tabela 13.

Ambas as células apresentaram máxima, média e mínima superiores à temperatura exterior. As temperaturas medidas no período noturno têm valores semelhantes. Por outro lado, no período diurno é possível notar uma pequena redução na temperatura na célula em que se aplicou a técnica proposta. Este resultado não se mostra muito expressivo sobretudo devido às dimensões reduzidas da área envidraçada. Presume-se que a utilização de um quebra-sol em áreas envidraçadas maiores e em mais fachadas potencie os resultados obtidos.

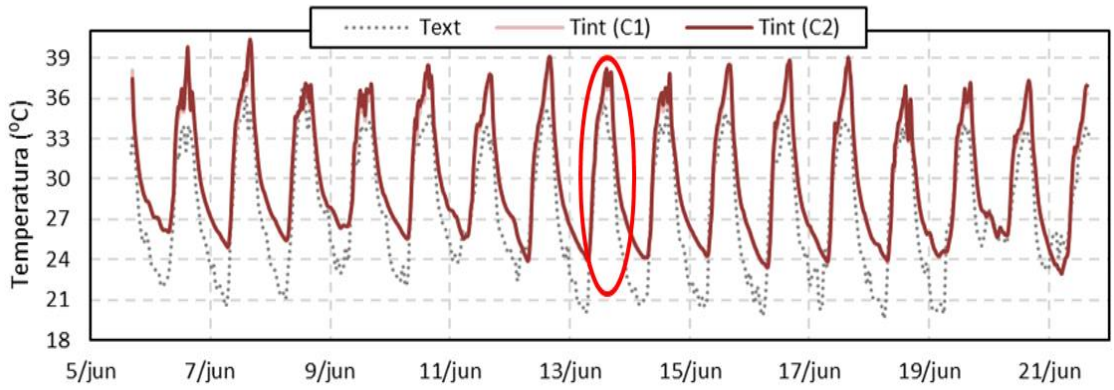


Figura 60- Temperatura ambiente - quebra-sol

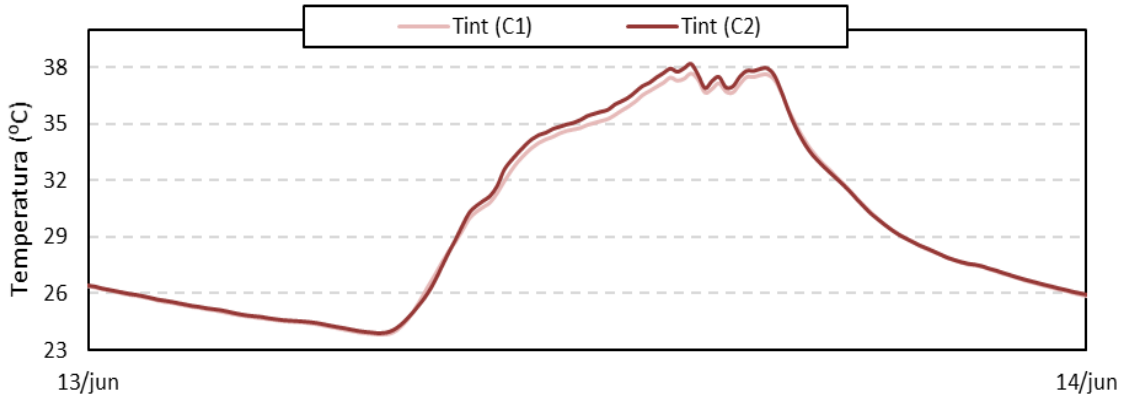


Figura 61- Temperatura ambiente entre os dias 13 e 14 de junho– quebra-sol

Tabela 13 - Temperatura (ºC) – quebra-sol

	Tmédia	**Tmáx**	**Tmín**
Exterior	27,5	36,9	19,6
Interior (C1)	29,8	39,6	22,9
Interior (C2)	29,9	40,4	22,9

A Figura 62 apresenta o gradiente comparativo de temperaturas internas de C1 e C2, que evidencia que no período diurno, de 8h às 16h, que também coincide com a incidência de maiores temperaturas, a célula com a técnica implementada (C1) demonstrou maior diferença, quando comparada a C2, em consequência da utilização do sombreamento do vão envidraçado. Por sua vez, no período noturno, onde as técnicas de sombreamento não favorecem qualquer efeito de arrefecimento, pode notar-se que C1 se mostrou na maioria do tempo com uma menor diferença de temperaturas abaixo de C2, em consequência da redução ocasionada durante o dia. Cabe ressaltar que entre as 17h e as 18h C2 apresentou melhores resultados do que C1 possivelmente devido à capacidade de dissipação de calor do material utilizado para o sombreamento. Este efeito pode ser melhor notado na Figura 63.

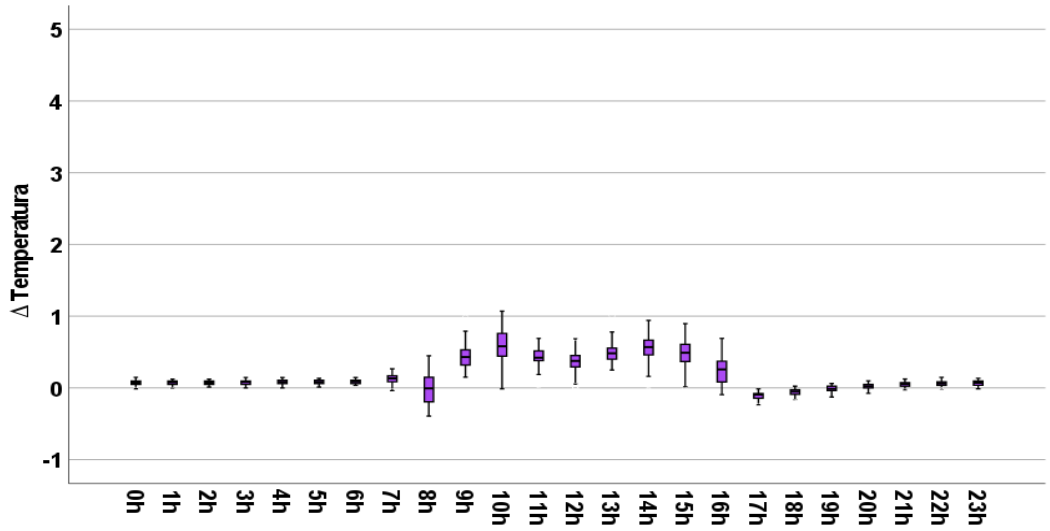


Figura 62- Diferenças de temperatura ambiente (C2-C1) em média horária – quebra-sol

Na Figura 63 está demonstrado graficamente as diferenças de temperatura entre C2 e C1 em determinado período de medição (5 de junho a 21 de junho) com a técnica do sombreamento. Nele é possível observar que a diferença máxima de temperatura entre as células, quando a temperatura de C2 é maior, é de 2,0 ºC e ocorre às 10h40m (período do dia onde a técnica se mostra mais eficaz), já a diferença média de temperatura de todo período foi de apenas 0,2 ºC.

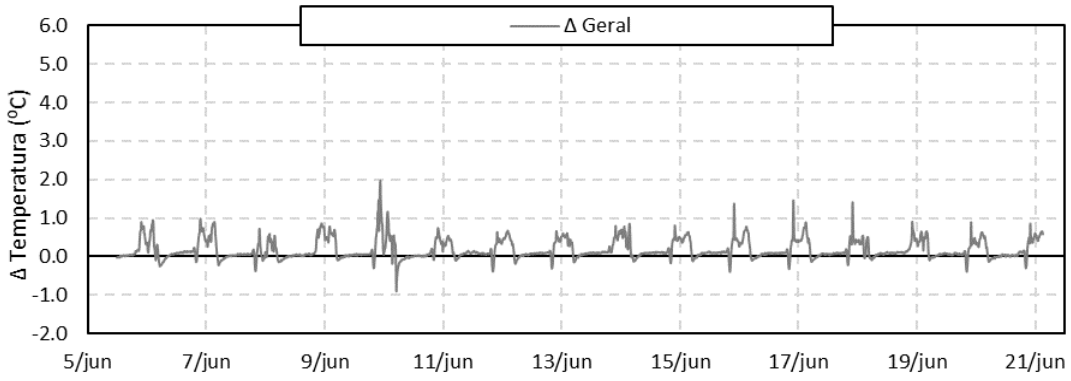


Figura 63- Diferença geral da temperatura ambiente diária de C2 e C1 durante a implementação do efeito – quebra-sol

A humidade relativa foi medida no ambiente exterior (HRext) e interior de cada célula (C1 e C2). Notou-se que o valor mais alto da humidade relativa ocorreu no ambiente externo, alcançando 88%. De uma maneira geral, a humidade relativa exterior apresenta extremos diários mais afastados do que a humidade relativa interior, embora nalguns dias o pico máximo do parâmetro medido no exterior seja semelhante ao medido no interior. Durante todo o período de medição, a humidade relativa nas duas células é muito semelhante. Já em relação às médias em cada uma das células, é possível constatar que a humidade relativa externa é superior à da célula C1 (onde foi aplicado o quebra-sol) e, consequentemente, à da C2, já que os valores de ambas possuem diferença de apenas 0,7% (Tabela 14, Figuras 64 e 65).

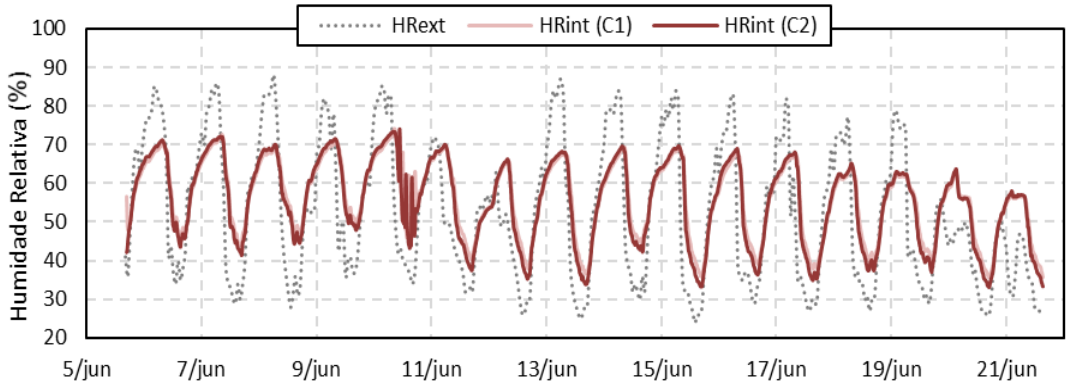


Figura 64- Humidade relativa ambiente durante período de campanha – quebra-sol

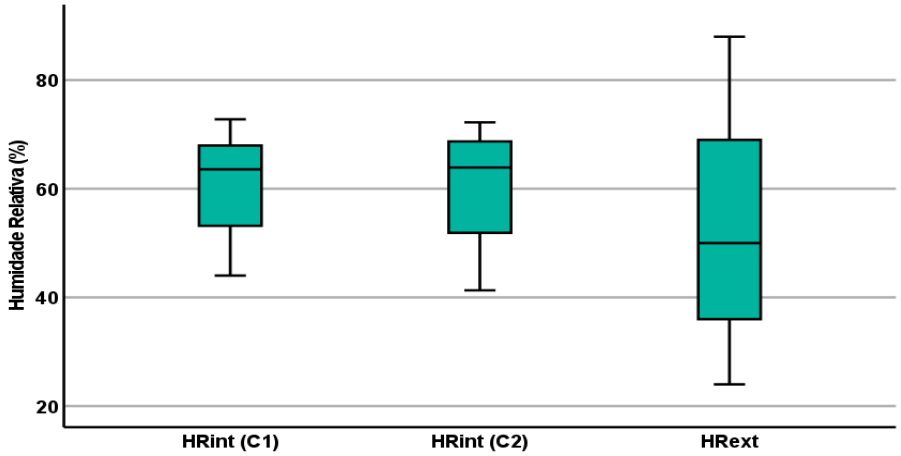


Figura 65- Humidade relativa ambiente – quebra-sol

Tabela 14 - Humidade relativa (%) – quebra-sol

	HRmédia	HRmáx	HRmín
Exterior	52,5	88,0	24,0
Interior (C1)	56,1	74,3	35,8
Interior (C2)	55,4	74,0	33,0

Na Figura 66 apresentam-se três gráficos para melhor compreensão da influência dos parâmetros externos à variação de temperatura interna das células, com a média horária de: a) velocidade do vento com direção predominante e diferença de temperatura, b) temperatura do exterior, c) radiação solar, em função das horas do dia. Com base nos dados coletados, verifica-se que a velocidade do vento não possui alteração relevante, apesar de a maior variação de temperatura ocorrer durante o período em que o vento está nos seus valores máximos. No entanto, essa variabilidade de temperatura oscila mas continua, enquanto a velocidade do vento volta a diminuir. A curva de diferenças de temperatura entre as células desenvolve-se numa morfologia semelhante à da temperatura exterior e da radiação solar, apresentando ascendência no início da manhã e finalizando a sua descida no início da noite. Ao interpretar os gráficos

de velocidade do vento, incidência solar e temperatura externa com o de variabilidade de temperatura nas células C1 e C2 é provável e aceitável apontar que a velocidade do vento não influencia as diferenças de temperatura interna (horárias) de C1 com C2

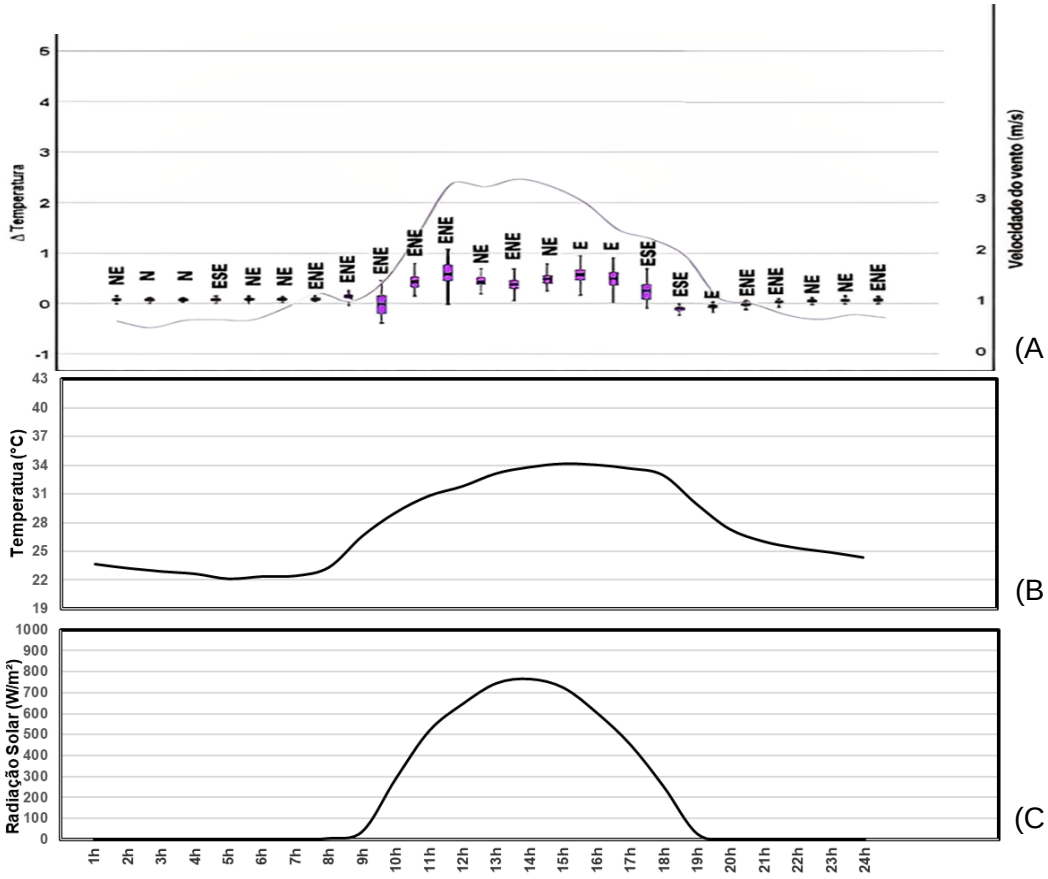


Figura 66- Média horária de: A) velocidade do vento com direção predominante e diferença de temperatura, B) temperatura do exterior, C) radiação solar, em função das horas do dia – quebra-sol

4.3 APLICAÇÃO DE PELÍCULA REFLETANTE NO DESVÃO DO TELHADO

A campanha 2, durante a qual se testou o efeito da película refletante no desvão do telhado, ocorreu entre os dias 15/07 e 07/08 de 2018. A técnica de arrefecimento foi apenas implementada na célula C1, permitindo o uso da célula C2 como controlo. A Figura 67 apresenta os resultados dos dados aferidos de temperaturas (em ºC) no ambiente exterior (Text) e nos ambientes interiores da célula C1 (Tint C1) e da célula C2 (Tint C2) para o período de campanha mencionado. O círculo a vermelho na figura destaca o comportamento da temperatura para um dia especifico da campanha, facilitando assim a interpretação dos dados, como pode ser visto na Figura 68. A Tabela 15 permite constatar que, das temperaturas aferidas, a mais elevada ocorreu na célula C1 (40,4 ºC) e a menor (18,1 ºC) ocorreu no exterior. Analisando as diferenças térmicas ao longo de um dia (representadas na Figura 68), percebe-se que no período do início da manhã a temperatura é menos crítica, enquanto a pior situação se verifica a meio da tarde.

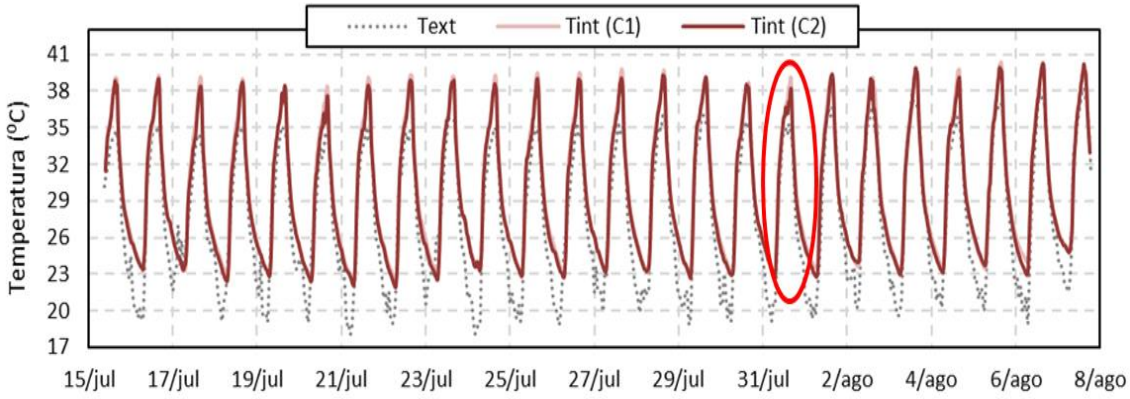


Figura 67- Temperatura ambiente – película refletante

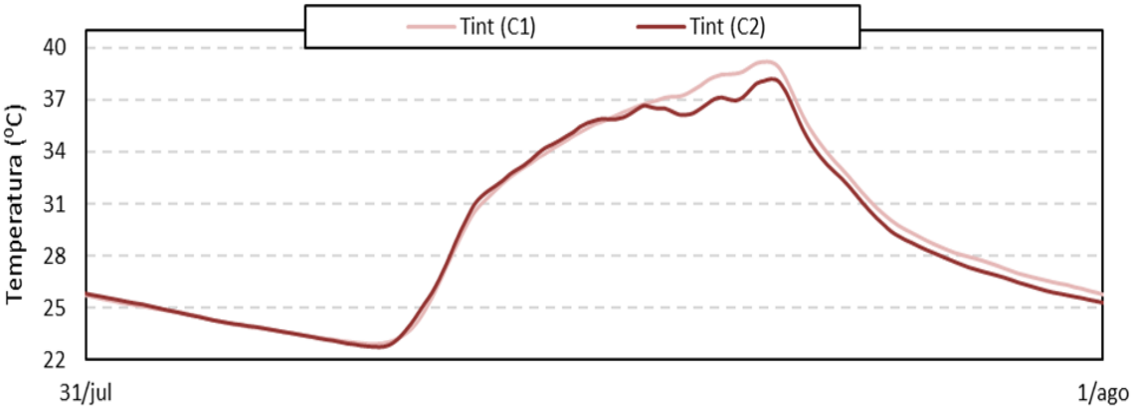


Figura 68- Temperatura ambiente entre os dias 31 e 1 de agosto– película refletante

Tabela 15 - Temperatura (ºC) – película refletante

	Tmédia	**Tmáx**	**Tmín**
Exterior	27,6	38,2	18,1
Interior (C1)	29,9	40,4	22,2
Interior (C2)	29,6	40,3	21,9

Perante os resultados obtidos, verificou-se variabilidade na diferença entre as temperaturas da célula C1 e da célula C2 para cada hora do dia, ao contrário do observado no caso do sombreamento. No entanto, essa variabilidade mantém-se semelhante para todas as horas do dia. Também se verifica, tal como já referido anteriormente, que as temperaturas na célula sem película refletante são genericamente inferiores às da célula com película, como comprovado no gráfico da Figura 69, que também não mostra uma tendência para os períodos de delta T positivo. Essas diferenças são em média de 0,4 ºC.

A baixa inclinação da cobertura, que ocasiona uma pequena abertura do desvão orientado no sentido este-oeste, somado ao EPS presente na telha utilizada nesta cobertura é a provável justificação para que a técnica não se apresente com resultados satisfatórios para arrefecimento. Nota-se que o calor ao longo

do dia vai acumulando dentro do desvão e não consegue fazer trocas com o ambiente pela cobertura, quando transferido para o interior da célula.

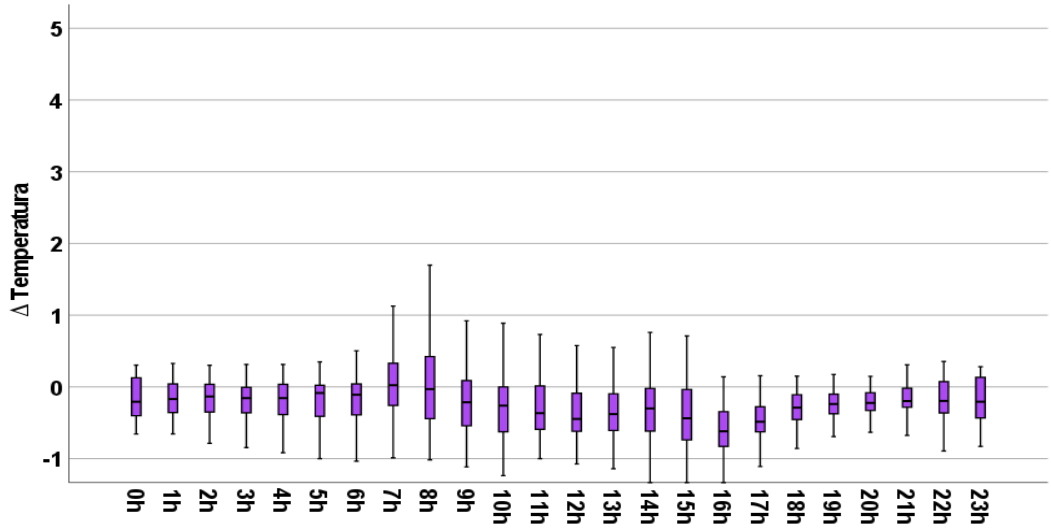


Figura 69- Diferença de temperatura ambiente (C2-C1) em média horária – película refletante

A fim de melhor interpretar as diferenças de temperatura obtidas, a Figura 70 expõe a variação diária para todo período da campanha da película refletante. Verifica-se que, durante alguns momentos, C1 apresenta temperaturas mais amenas do que C2, com pico de 1,6 ºC no dia 02 de agosto às 08h30m. No entanto, durante a campanha a célula C2 foi onde se registaram as menores temperaturas, obtendo uma dispersão de valores negativos na diferença das temperaturas, com ponto máximo obtido também no dia 02/08 às 16h, com valor de -2,1 ºC.

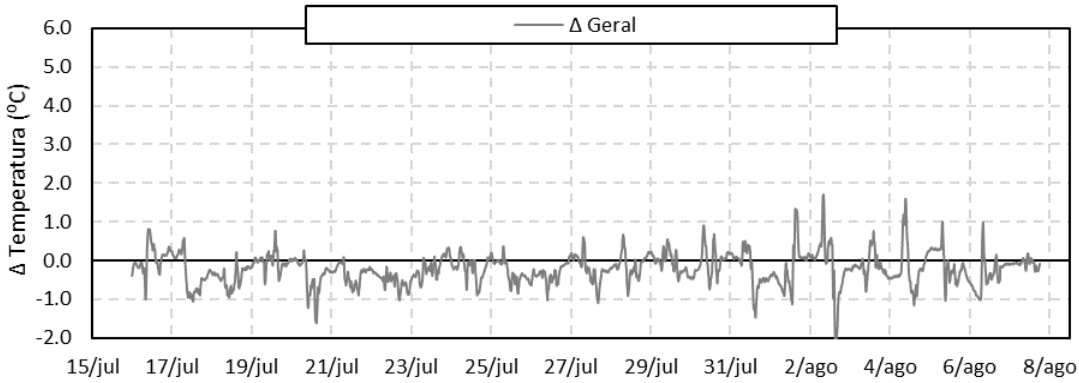


Figura 70- Diferença geral da temperatura ambiente diária de C2 e C1 durante a implementação do efeito – película refletante

O valor mais alto da humidade relativa ocorreu no ambiente exterior, com uma máxima de 85%. Em relação às médias, na célula C1 obteve-se um valor médio superior ao da célula C2, com uma diferença de 0,7%. No que diz respeito ao ambiente exterior, os valores médios das células apresentaram valores superiores, principalmente no início do período diurno (Tabela 16 e Figuras 71 e 72).

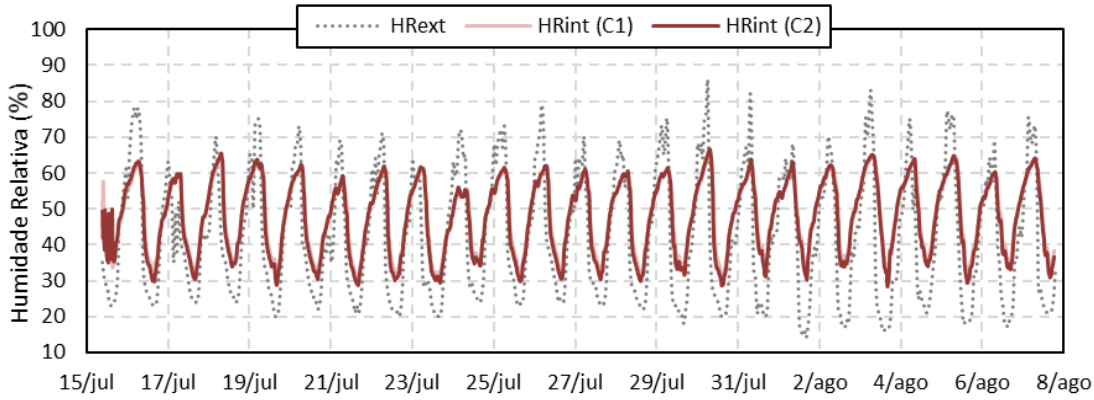


Figura 71 - Humidade relativa ambiente durante período de campanha – película refletante

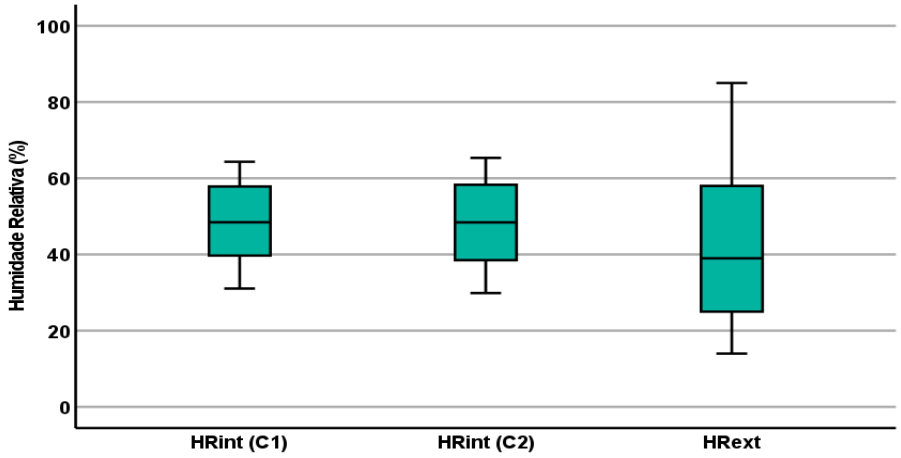


Figura 72 - Humidade relativa Ambiente – película refletante

Tabela 16 - Humidade relativa (%) – película refletante

	HRmédia	HRmáx	HRmín
Exterior	42,1	85,0	14,0
Interior (C1)	48,3	65,1	30,2
Interior (C2)	47,7	66,5	28,4

Os gráficos constantes da Figura 73, de forma semelhante à campanha anterior, demonstram a pouca relação da velocidade do vento com as alterações de temperatura entre as células. A velocidade regista um aumento no período do dia a partir das 9h, atingindo o ápice aproximadamente por volta das 11h e iniciando depois o seu declínio, o que não corresponde ao mesmo registado pelas variações de temperatura, que nesta campanha, também não apresenta aparente relação com a incidência solar e a temperatura exterior, sendo provável que a principal questão quanto à baixa eficiência desta técnica esteja mais relacionada com possíveis falhas de vedação que permitem a entrada do ar quente juntamente com a falta de ventilação e, consequentemente, maior retenção desse ar ao longo do dia.

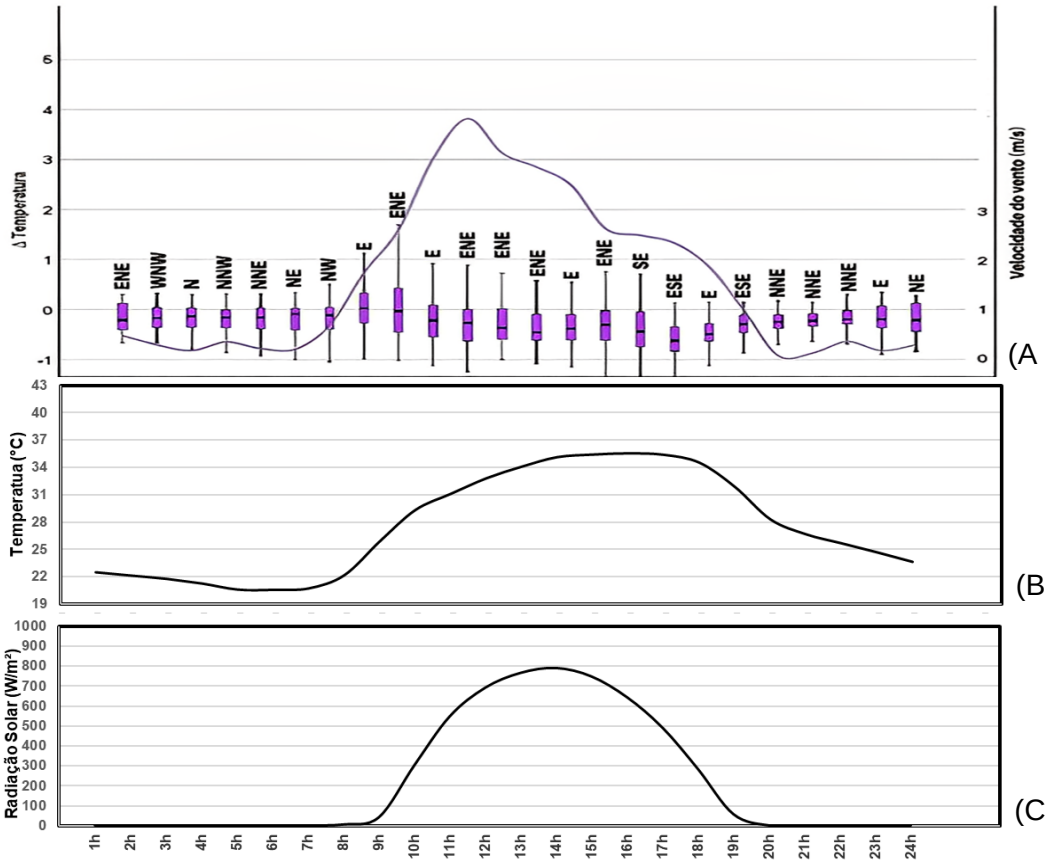


Figura 73 - Média horária de: A) velocidade do vento com direção predominante e diferença de temperatura, B) temperatura exterior, C) radiação solar, em função das horas do dia – película refletante

Comparando os resultados obtidos nas duas células, C1 apresentou uma média de temperatura superior em 0,2 ºC em comparação com a C2, demonstrando que esta técnica, da forma como foi implementada (sobre o forro, abaixo de um telhado metálico com EPS de baixo declive, que resulta em frestas de ventilação reduzidas), não permitiu trocas de ar no desvão suficientemente relevantes para garantir o arrefecimento deste espaço. Ao contrário do que se esperava, gerou um aumento da temperatura no interior da célula e não o seu arrefecimento, com ambas as células a apresentarem máxima, média e mínima superiores à temperatura exterior.

4.4 VENTILAÇÃO NATURAL CRUZADA POR AÇÃO DO VENTO

Os resultados da campanha 3 são exibidos na Figura 74, onde se apresenta a variação de temperaturas na célula C1 (com ventilação natural cruzada por ação do vento) e na célula C2, que não sofreu qualquer modificação. Esta campanha decorreu durante 21 dias, entre 8 e 28 de agosto de 2018, num período de temperaturas exteriores muito elevadas. O valor máximo da temperatura interior ocorreu na célula C2 e o mínimo na célula C1, onde tinha sido implementada a ventilação natural cruzada. A Figura 75 mostra a variação da temperatura nas células C1 e C2, num dos dias do período em estudo, verificando-se que na célula C2 o valor é em média 0,6 °C mais alto do que na célula C1, sendo esta média no período noturno de 0,8 ºC e no diurno 0,5 ºC (Tabela 17).

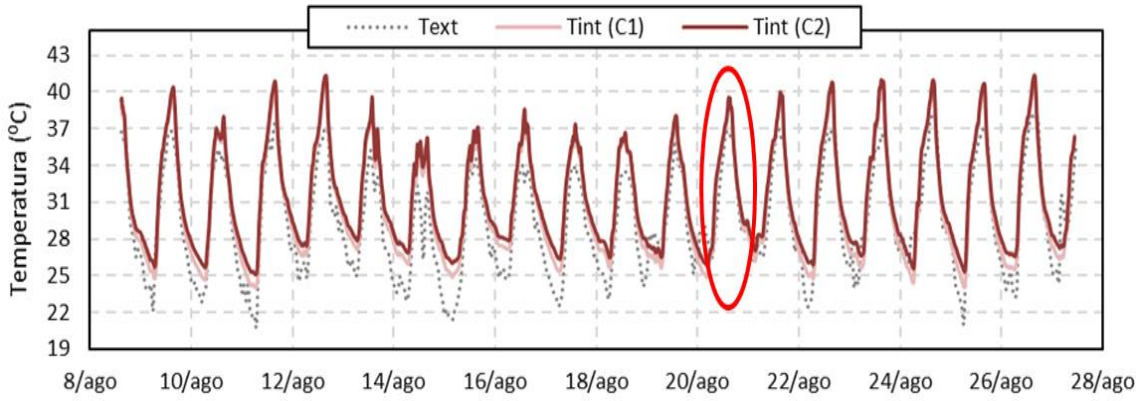


Figura 74- Temperatura ambiente – ventilação natural cruzada

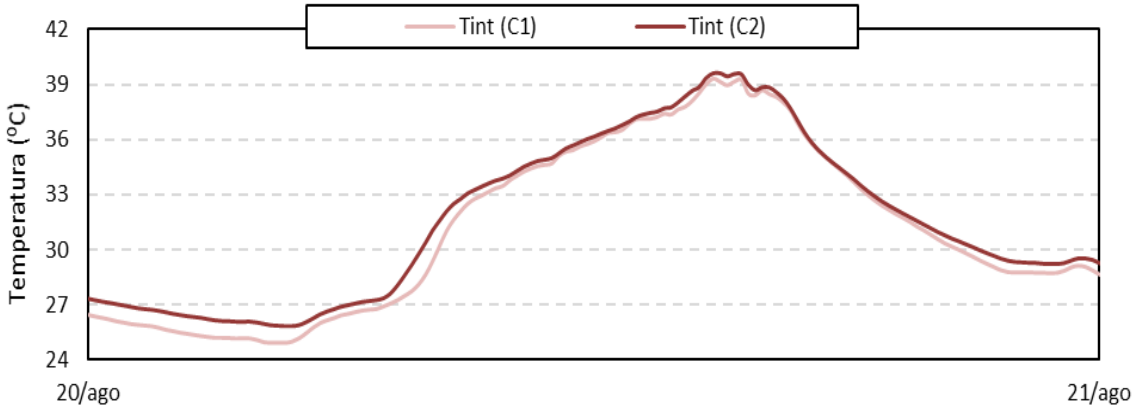


Figura 75- Temperatura ambiente entre os dias 20 e 21 de agosto – ventilação natural cruzada

Tabela 17 - Temperatura (ºC) – ventilação natural cruzada

	Tmédia	**Tmáx**	**Tmín**
Exterior	29,6	39,0	20,8
Interior (C1)	31,0	40,9	24,0
Interior (C2)	31,7	41,4	25,1

No gráfico da Figura 76 é possível observar a variação da temperatura ao longo do dia, com a máxima, mínima, média e mediana para cada hora. A célula C2, onde não foi implementada a medida de arrefecimento, apresenta sempre temperaturas mais elevadas, verificando-se a maior diferença de temperatura entre as células durante o período noturno, entre as 23h e as 8h, com variação próxima de 1,0 ºC em média

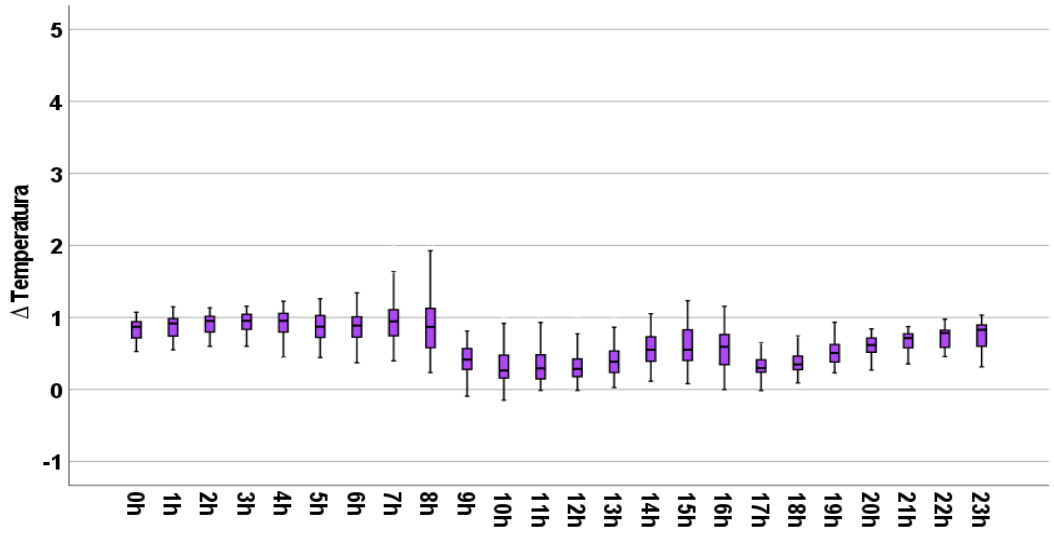


Figura 76- Diferenças de temperatura ambiente (C2-C1) em média horária - ventilação natural cruzada

Durante o uso da técnica de arrefecimento, a célula C2 apresentou temperatura mais elevada quase na totalidade do tempo da campanha de ventilação natural cruzada. A média e a mediana de alteração da temperatura foi de 0,6 ºC, enquanto a máxima atingida às 8h da manhã, foi de 2,0 ºC, no dia 22 de agosto. A célula C1 apresentou a temperatura mais elevada em frequência e variação irrelevante no decurso da campanha, como se percebe pelo gráfico da Figura 77.

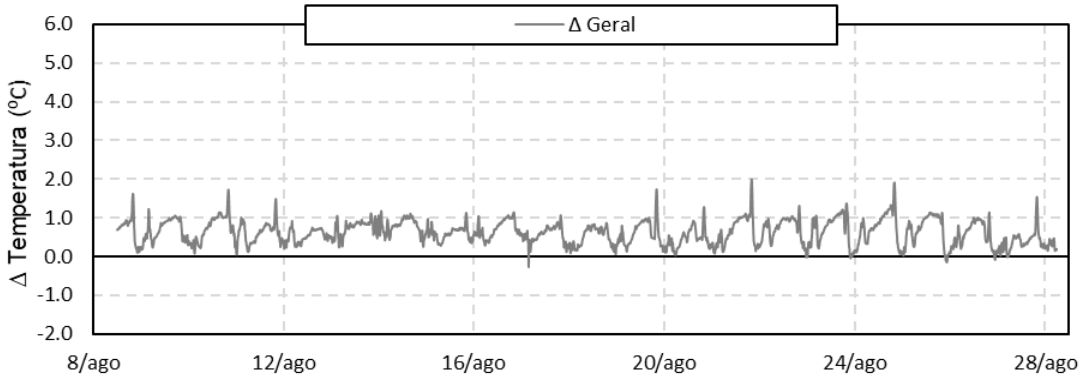


Figura 77- Diferença geral da temperatura ambiente diária de C2 e C1 durante a implementação do efeito – ventilação natural cruzada

Foram coletadas as percentagens de humidade relativa no meio externo (HRext) e nas células C1 (HRint C1) e C2 (HRint C2). As Figuras 78 e 79 e a Tabela 18, gerados a partir dos dados apurados, indicam que a célula C1 (na qual foi realizada a técnica de arrefecimento) apresentou valor médio superior ao da C2 e ao do ambiente externo, com a C1 a aproximar-se mais das características externas devido às aberturas nela presentes e obtendo humidades máxima, mínima e média superiores às da célula C2. A média máxima de 86,0%, na HRexterna, diferencia-se em 16,8% em relação à média da C2 (69,2%), enquanto diverge em 9,8% da C1.

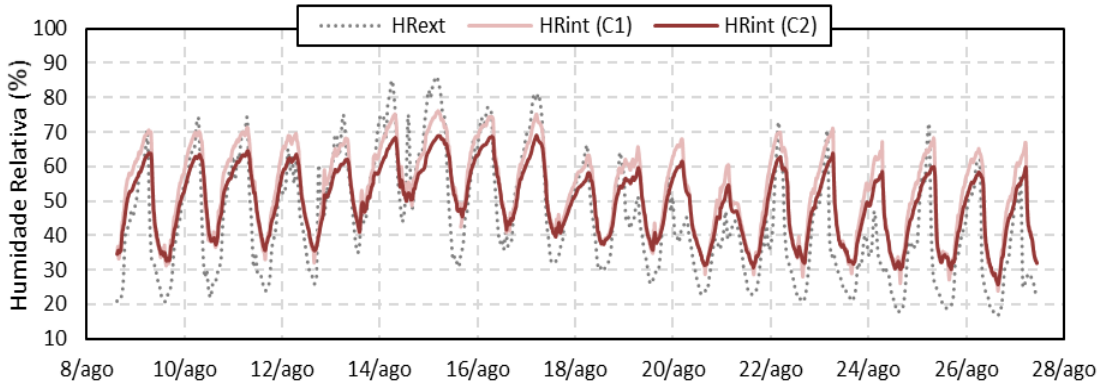


Figura 78- Humidade relativa ambiente – ventilação natural cruzada

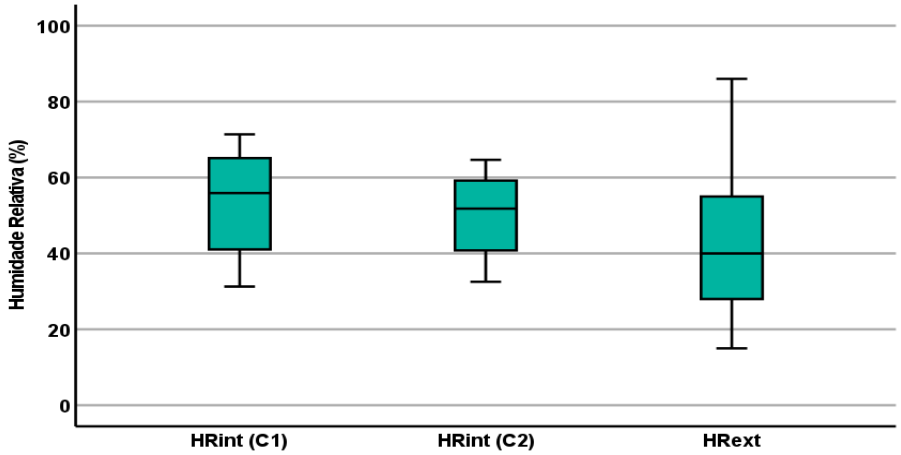


Figura 79- Humidade relativa ambiente para células e exterior - ventilação natural cruzada

Tabela 18 - Humidade relativa (%) – ventilação natural cruzada

	HRmédia	HRmáx	HRmín
Exterior	42,9	86,0	15,0
Interior (C1)	52,9	76,2	23,9
Interior (C2)	49,6	69,2	25,6

Na Figura 80 a média da velocidade e a direção do vento apresenta comportamento quase constante ao longo das 24h, sofrendo a velocidade um pequeno aumento no período diurno, coincidente com o momento de menor variação de temperatura entre as duas células. Assim, é possível afirmar que o efeito causado pela técnica não é interessante para o arrefecimento do espaço interior no período diurno, uma vez que permite a entrada de ar quente. No período noturno não fica evidente a relação entre a velocidade e direção do vento com as variações de temperatura entre as células, o que permite propor que as perdas de calor resultantes do fluxo de ar ocorrem por efeito chaminé ou que não são necessárias velocidades de vento elevadas. A maior variação da temperatura ocorreu quando o vento estava na direção este-nordeste (ENE). Quanto à incidência solar e a temperatura exterior, não foi observada semelhança

morfológica entre os gráficos que possa servir de base para aferir relação entre as variações e estes parâmetros.

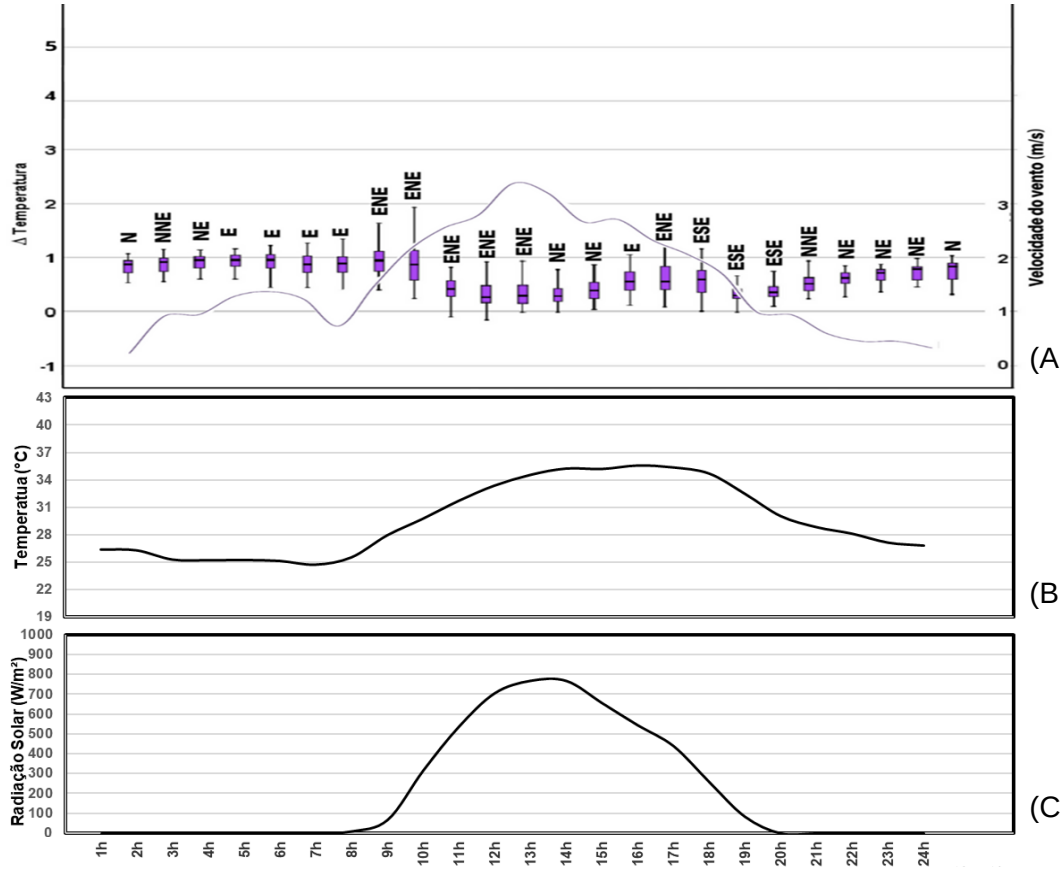


Figura 80- Média horária de: A) velocidade do vento com direção predominante e diferença de temperatura, B) temperatura exterior, C) radiação solar, em função das horas do dia – ventilação natural cruzada

Os resultados patentes na Figura 81 mostram que a média de renovação por hora (RPH) na célula C1, depois de abertos os orifícios para a ventilação cruzada, é de 6,96 renovações por hora. Quando comparados com os valores médios obtidos para C1 e C2 antes da implementação de qualquer medida (3.5.2), 2,29 e 2,42, respetivamente, verifica-se um aumento significativo na infiltração de ar dentro da célula C1 quando aplicadas as aberturas para a campanha de ventilação natural cruzada, comprovando que a aplicação desta técnica é adequada à finalidade de renovação do ar dentro da célula.

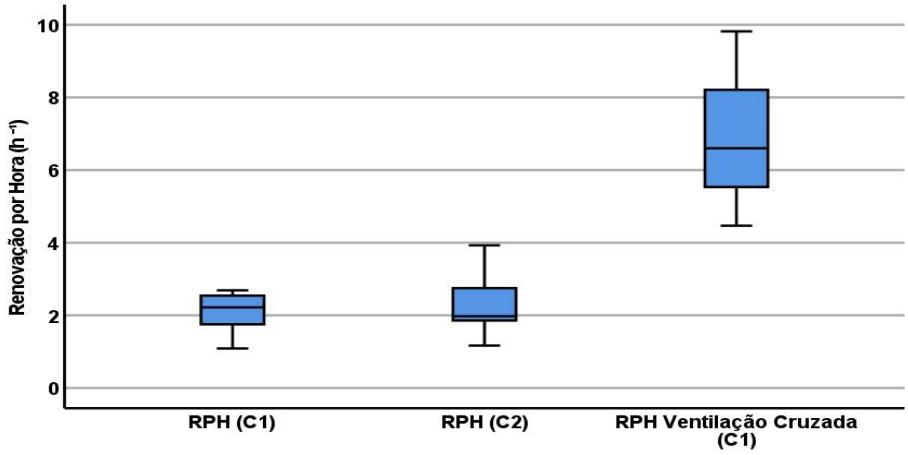


Figura 81- Renovação do ar por hora (h^{-1}) – ventilação natural cruzada

4.5 PINTURA DA ENVOLVENTE OPACA COM TINTA REFLETANTE

A campanha 4, durante a qual se testou o efeito da tinta refletante aplicada na envolvente opaca, tem os seus resultados apresentados na Figura 82 para todo período da campanha, ou seja, 27 dias, entre 1 e 27 de outubro de 2018. Já a Figura 83 remete apenas para um dia de ensaios (dia esse destacado com um círculo vermelho na Figura 82). Verifica-se que a aplicação da técnica garantiu uma diminuição máxima da temperatura em C1, face a C2, de 3,8 ºC. Em média, a redução da temperatura interior da célula C1, face a C2, foi de 1,1 ºC. Comparando os resultados da campanha 4 com os da campanha 3, verifica-se que a ventilação natural cruzada teve maior impacto durante a noite e a pintura com tinta refletante durante o dia, pois esta última apresentou 0,5 ºC de arrefecimento diurno e 1,7 ºC de arrefecimento noturno (Tabela 19).

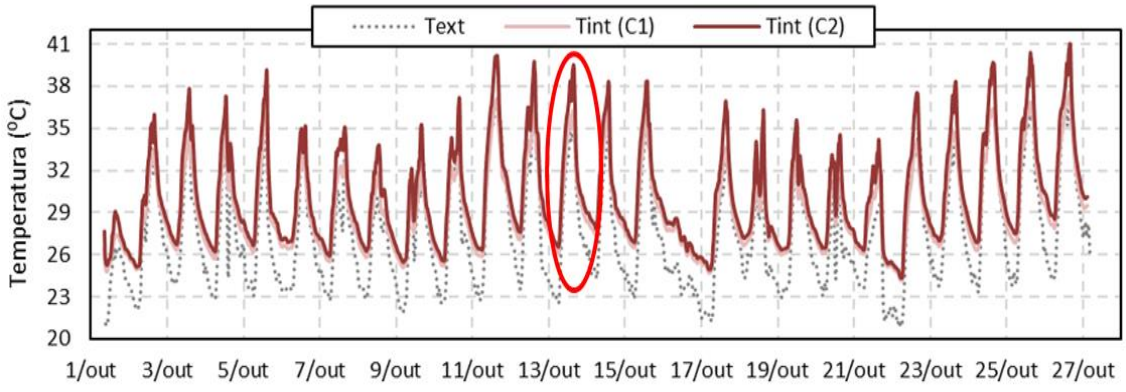


Figura 82- Temperatura ambiente – pintura com tinta refletante

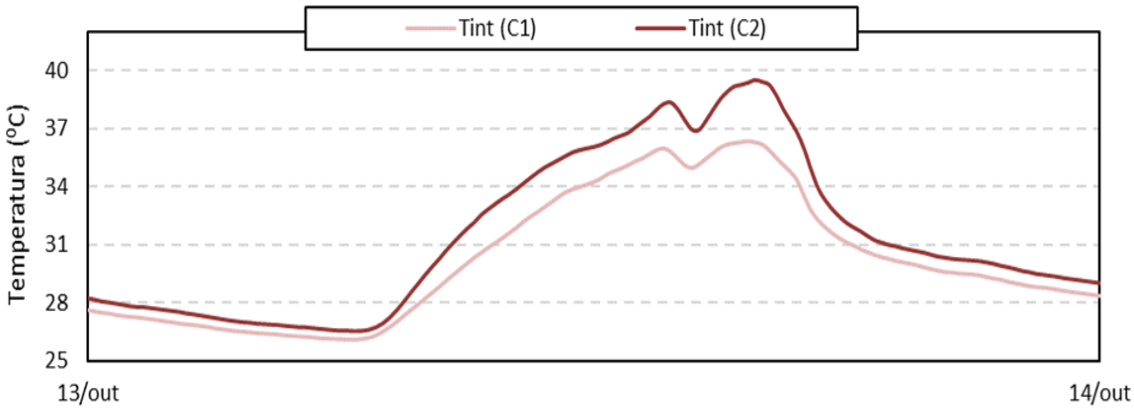


Figura 83- Temperatura ambiente entre os dias 13 e 14 de outubro– Pintura com tinta refletante

Tabela 19 - Temperatura (ºC) – pintura com tinta refletante

	Tmédia	**Tmáx**	**Tmín**
Exterior	27,5	37,5	20,9
Interior (C1)	29,2	37,6	24,1
Interior (C2)	30,2	41,0	24,3

O gráfico da Figura 84 ajuda a demonstrar a conclusão obtida sobre o uso da pintura refletante ao longo do dia. Assim, percebe-se que esta técnica tem impacto na temperatura interior da célula durante todas as 24h, mas de forma menos significativa no período noturno. Isto é, a variabilidade de temperatura é superior no período diurno, o que comprova a maior eficácia desta técnica neste período do dia. As diferenças de temperatura entre C1 e C2 são sempre positivas e atingiram o valor máximo de 3,8 ºC às 16h20m do dia 23 de outubro, com uma média de 1,1 ºC e a mínima de 0,1 ºC (Figura 85).

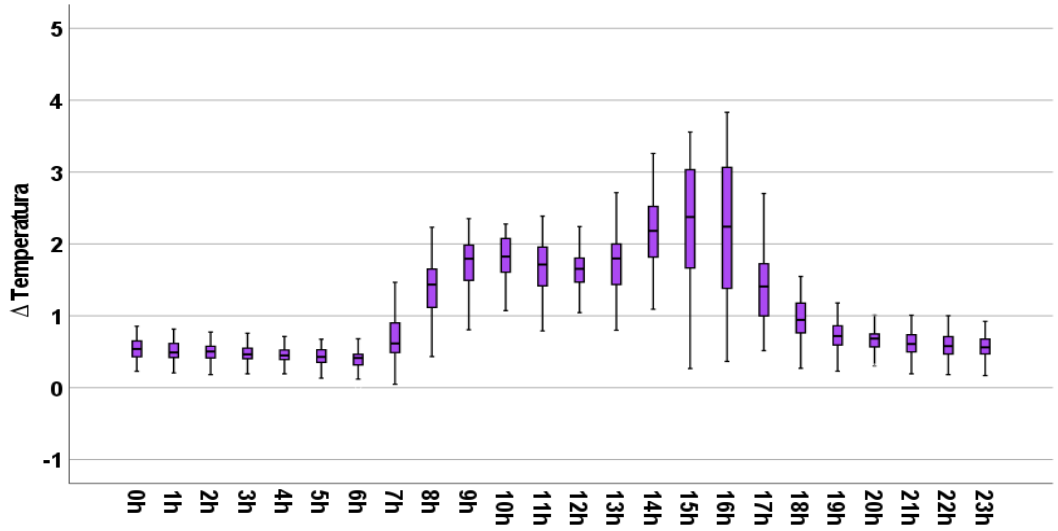


Figura 84- Diferenças de temperatura ambiente (C2-C1) em média horária – pintura com tinta refletante

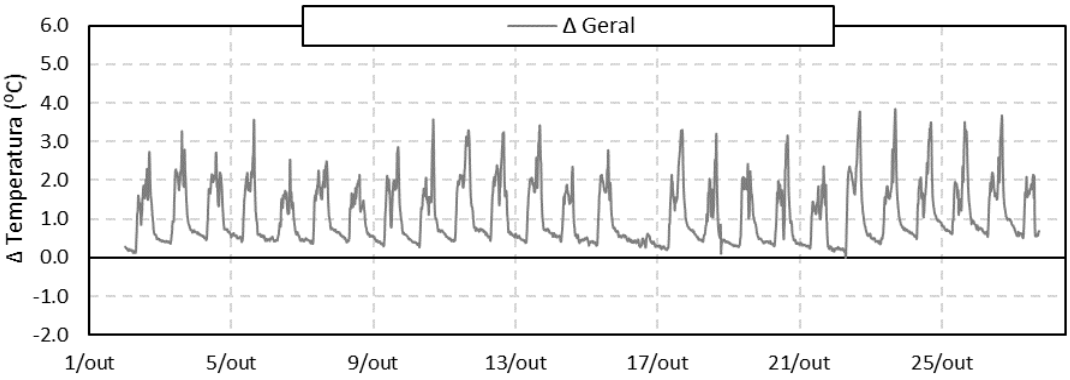


Figura 85- Diferença geral da temperatura ambiente diária de C2 e C1 durante a implementação do efeito – pintura com tinta refletante

Com HRmáx de 97,35%, assim como a maior média (78,5%), a célula C1 apresentou a humidade relativa de maior valor. O ambiente exterior apresentou os valores mais baixos de humidade (Tabela 20 e Figuras 86 e 87). O aumento contínuo da humidade relativa deve-se ao facto de a campanha se ter realizado na fase de transição da época seca para a chuvosa.

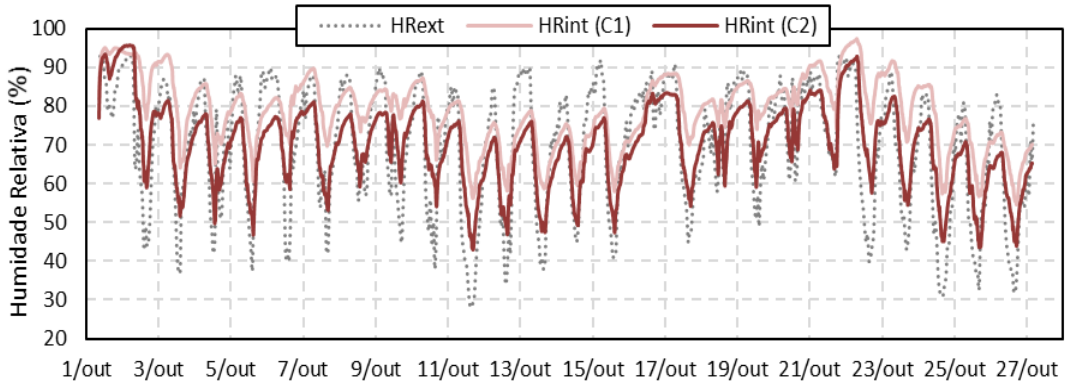


Figura 86- Humidade relativa ambiente – pintura com tinta refletante

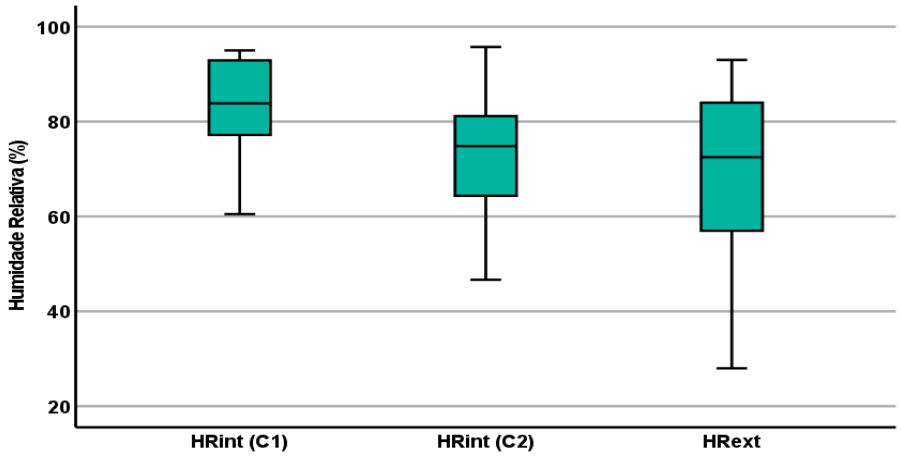


Figura 87- Humidade relativa ambiente para o interior das células e o exterior – pintura com tinta refletante

Tabela 20 - Humidade relativa (%) – pintura com tinta refletante

	Hrmédia	Hrmáx	Hrmín
Exterior	69,5	93,0	28,0
Interior (C1)	78,5	97,3	54,5
Interior (C2)	70,0	95,7	42,8

Na Figura 88, que apresenta a direção predominante e as médias da velocidade do vento e da variação de temperatura, a temperatura exterior e a radiação solar em relação às horas dos dias, é possível identificar que a variação de temperatura aumenta à medida que a velocidade do vento também aumenta, o que aparenta ser uma distorção face às conclusões das campanhas anteriores, que não apresentam tal relação. Quanto à temperatura externa, esta apresenta uma menor amplitude quando comparada aos gráficos anteriores, possivelmente justificada pelo início do período chuvoso. Já a radiação solar mantém a morfologia do gráfico, com pouca discrepância quando comparada à dos períodos anteriores. Aqui, é provável que o vento permita o arrefecimento da envolvente revestida com tinta refletante, o que tem impacto direto na temperatura interna, provavelmente independente da direção do vento.

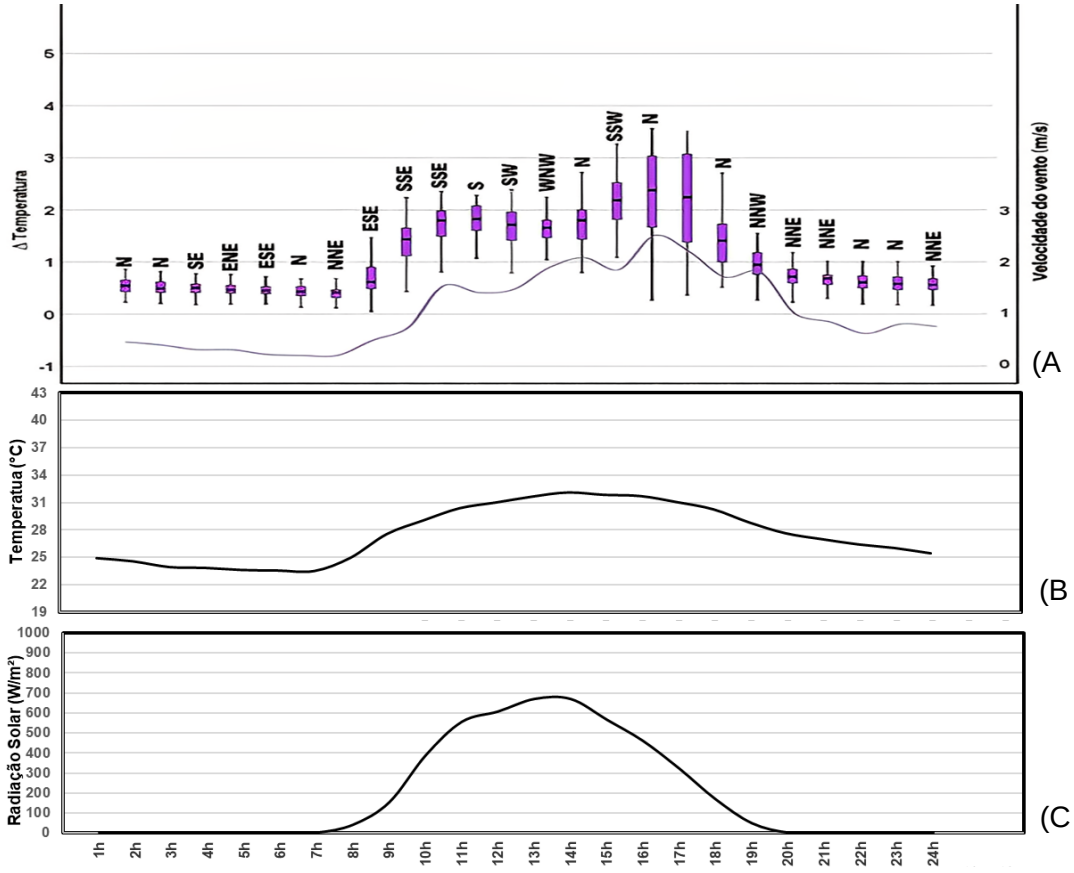


Figura 88- Média horária de: A) velocidade do vento com direção predominante e diferença de temperatura, B) temperatura exterior, C) radiação solar, em função das horas do dia – pintura com tinta refletante

4.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA FASE EXPERIMENTAL 1

A Tabela 21 apresenta a diferença da média das temperaturas em C2 (célula de controlo) e C1 (célula com medida de arrefecimento implementada), considerando as 24 horas do dia, o período noturno (das 19 horas às 6 horas) e o período diurno, como forma de resumir os resultados obtidos nas 4 campanhas experimentais em que se aplicaram as técnicas de arrefecimento passivo: (i) sombreamento com quebra-sol, (ii) aplicação de película refletante no desvão do telhado, (iii) ventilação natural cruzada por ação do vento e (iv) pintura da envolvente opaca com tinta refletante.

Verifica-se que o quebra-sol apresentou uma ligeira redução da temperatura no interior da célula C1 quando comparada à C2, com melhores resultados no período diurno, quando há radiação solar. Apesar da redução da temperatura, a eficácia desta técnica ficou abaixo do esperado, possivelmente devido à pequena área envidraçada nas células e à sua localização somente uma fachada. Com a aplicação da película refletante não se observou uma melhoria do desempenho, provavelmente devido à ventilação pouco eficaz do desvão na cobertura, resultante do baixo declive do telhado, o que provocou um armazenamento de ar quente no interior da célula. A ventilação natural cruzada comprovou ser a técnica mais eficaz no período noturno, quando se atingiu uma redução da temperatura média de aproximadamente 0,7 °C, em comparação com a célula de controlo. No entanto, ao permitir a entrada de ar quente do ambiente exterior para o interior da C1, com o fluxo de ar, o arrefecimento não foi eficaz durante o período diurno. A pintura com tinta refletante foi a técnica mais eficaz, sobretudo no período diurno, com redução de aproximadamente 1,7 °C da temperatura média interior da célula C1.

A única campanha em que o parâmetro velocidade e direção do vento pareceram intervir foi na 4, onde os gráficos demonstraram relação entre as alterações da velocidade do vento e as alterações de temperatura entre as células. Em todas as campanhas, como é óbvio e natural, as maiores temperaturas internas verificaram-se no período do dia com maior incidência de radiação solar e consequente aumento de temperatura externa.

Tabela 21 - Diferença entre a média de temperatura da célula C1 e da célula C2 em °C – fase 1

Campanhas	**Técnicas**	**ΔTmédia**		
		Geral	**Noturno**	**Diurno**
1	Sombreamento do vão envidraçado - quebra-sol	0,17	0,04	0,23
2	Aplicação de película refletante no desvão do telhado	-0,22	-0,15	-0,25
3	Ventilação natural cruzada por ação do vento	0,64	0,79	0,47
4	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante	1,06	0,53	1,73

5

RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL – FASE 2

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA EXTERIOR – FASE 2

De forma similar ao capítulo 4, inicia-se esta parte com uma breve caracterização do clima exterior, que serve como introdução aos resultados das campanhas de arrefecimento realizadas na fase 2. Foram coletados os mesmos dados das campanhas anteriores, nomeadamente temperatura ambiente do exterior, humidade relativa, radiação solar, velocidade e direção do vento, todos fornecidos pelo INMET, que permitem a análise do clima nos períodos em estudo. A temperatura externa manteve-se durante as campanhas sem grandes gradientes (Figura 89).

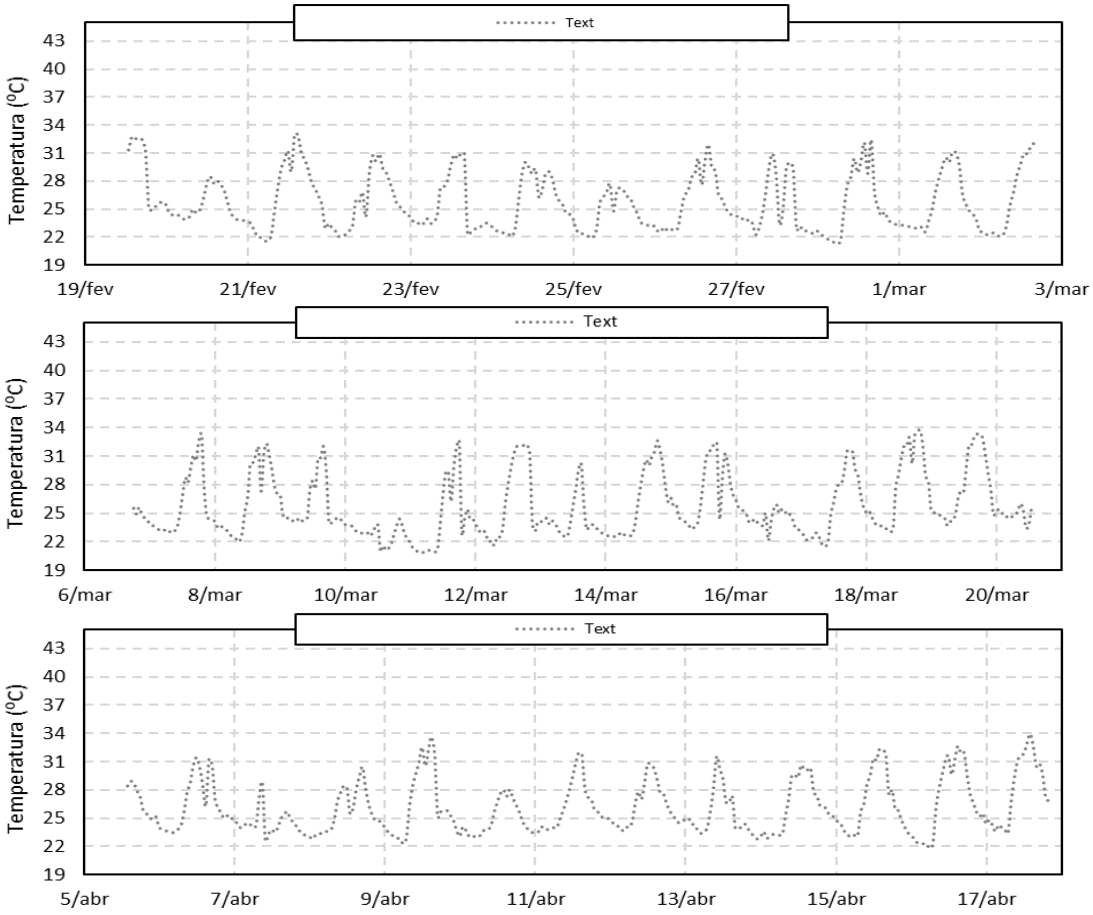


Figura 89- Temperatura exterior para as campanhas 5 a 7 (de cima para baixo) – fase 2

Os registos de temperatura externa indicaram que a máxima ocorreu na campanha 7, diferindo em apenas 0,9 ºC da menor temperatura máxima ocorrida na campanha 5. Já a maior e menor temperaturas mínimas, campanha 7 e campanha 6, respetivamente, diferiram de forma semelhante entre si (1,0 ºC) (Tabela 22).

Tabela 22 - Temperatura ambiente do exterior (ºC) – fase 2

Campanhas	Técnicas	Média	Máximo	Mínimo
5	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 1	25,8	33,0	21,3
6	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 2	25,7	33,7	20,8
7	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 3	26,1	33,9	21,8

Os gráficos elaborados com os dados da humidade relativa, presentes na Figura 90, demonstram que este parâmetro se manteve durante toda a fase 2 entre 44% a 94% (Tabela 23), sendo que durante os meses da campanha 6 ocorreu maior variação entre a mínima e a máxima humidade (51%).

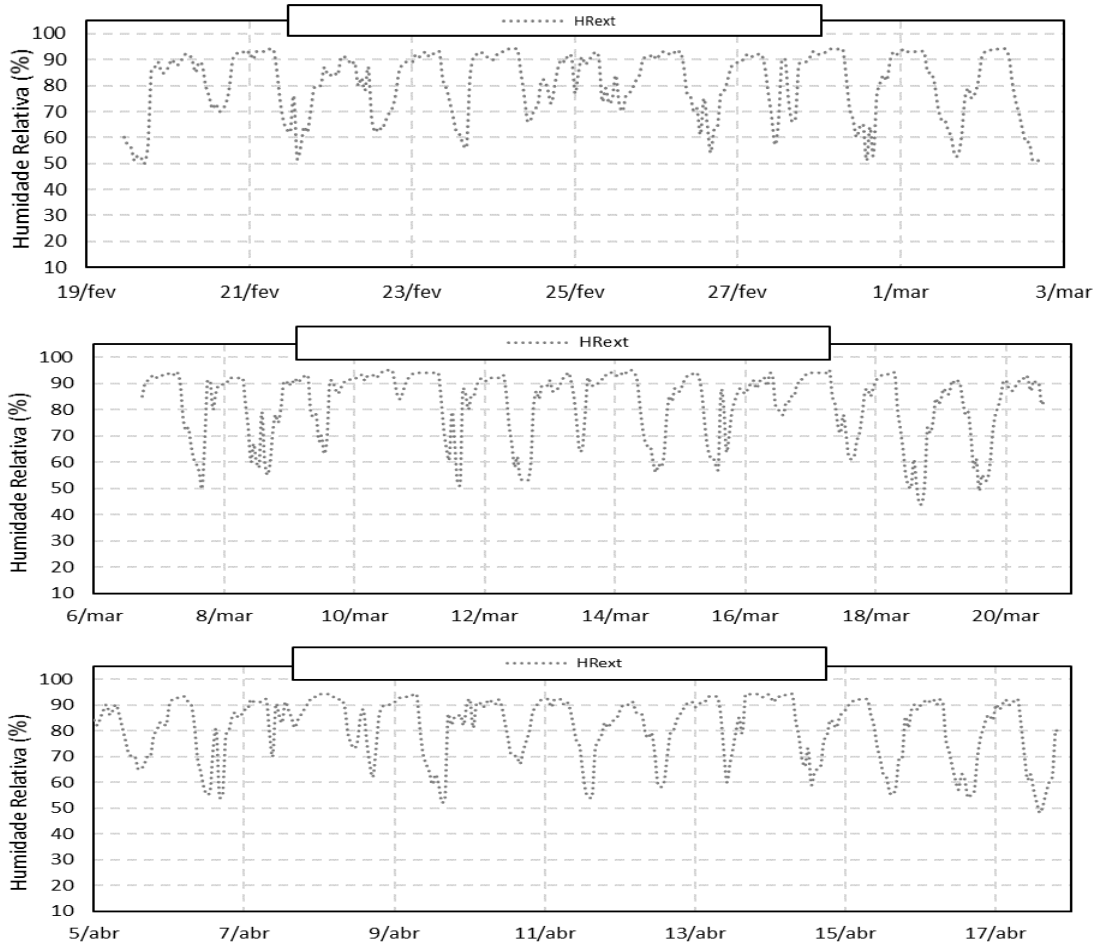


Figura 90- Humidade relativa exterior para as campanhas 5 a 7 (de cima para baixo) – fase 2

Tabela 23 – Humidade relativa no exterior (%) – fase 2

Campanhas	Técnicas	Média	Máximo	Mínimo
5	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 1	80,6	94,0	50,0
6	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 2	82,4	95,0	44,0
7	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 3	80,9	94,0	48,0

A radiação solar teve a máxima incidência durante a campanha 6, atingindo 996,7 W/m², a maior média diurna (08 ás 18hrs) ocorreu na campanha 5, com 454,4 W/m² (Tabela 24), os valores máximos das campanhas foram observados no início da tarde e não ocorreram variações consideráveis entre as campanhas no período da fase 2, como se pode observar nos gráficos da Figura 91.

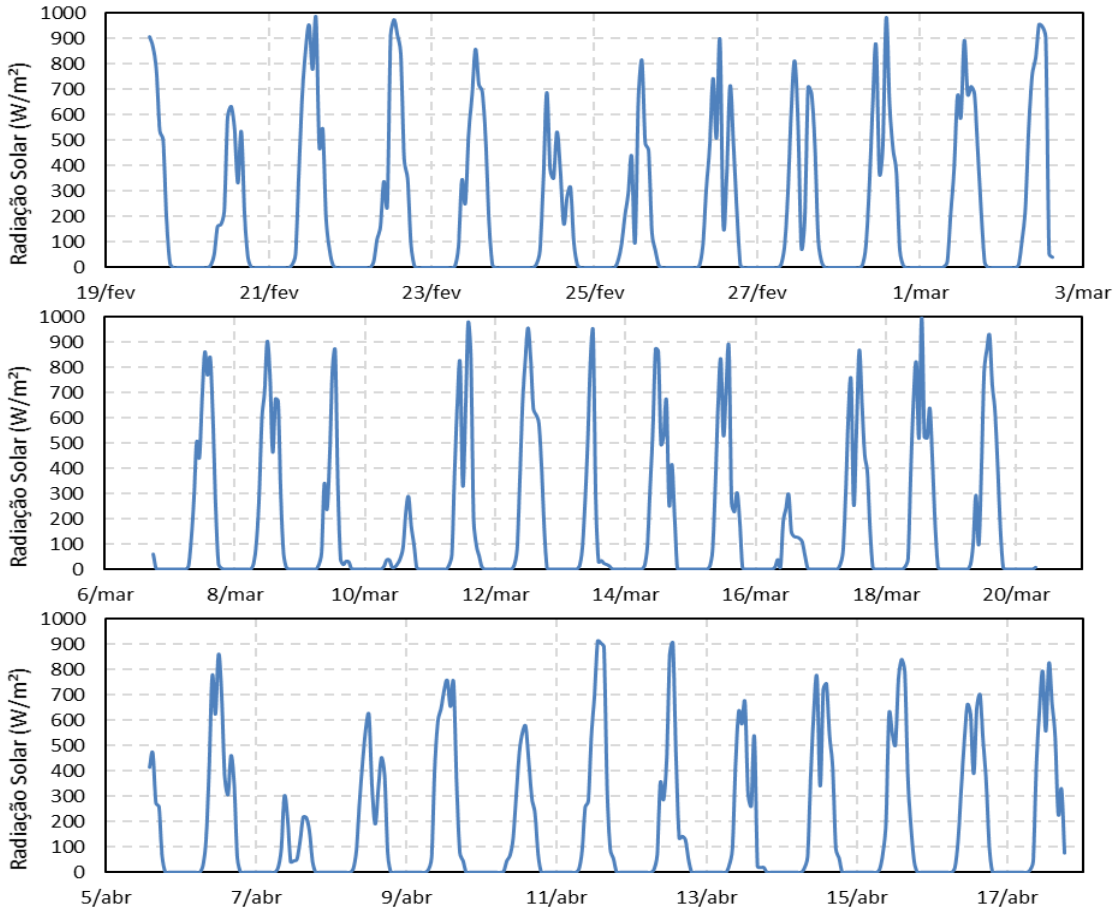


Figura 91- Radiação solar para as campanhas 5 a 7 (de cima para baixo) – fase 2

Tabela 24 - Radiação solar (W/m²) – fase 2

Campanhas	Técnicas	Média diurna	Máximo
5	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 1	454,4	980,8
6	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 2	386,9	996,7
7	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 3	379,5	912,5

Os gráficos da Figura 92 mostram que a variação entre as máximas de velocidade do vento durante as campanhas não apresentou um valor significativo (Tabela 25), sendo apenas de 0,8 m/s, logo o valor médio também se manteve próximo durante toda a fase aqui analisada. Na campanha 5 o valor máximo de velocidade alcançada pelo vento foi de 7,3 m/s no início e ao meio do dia, na campanha 6 chega aos 6,5 m/s ao entardecer e na campanha 7 atinge os 6,6 m/s ao meio do dia.

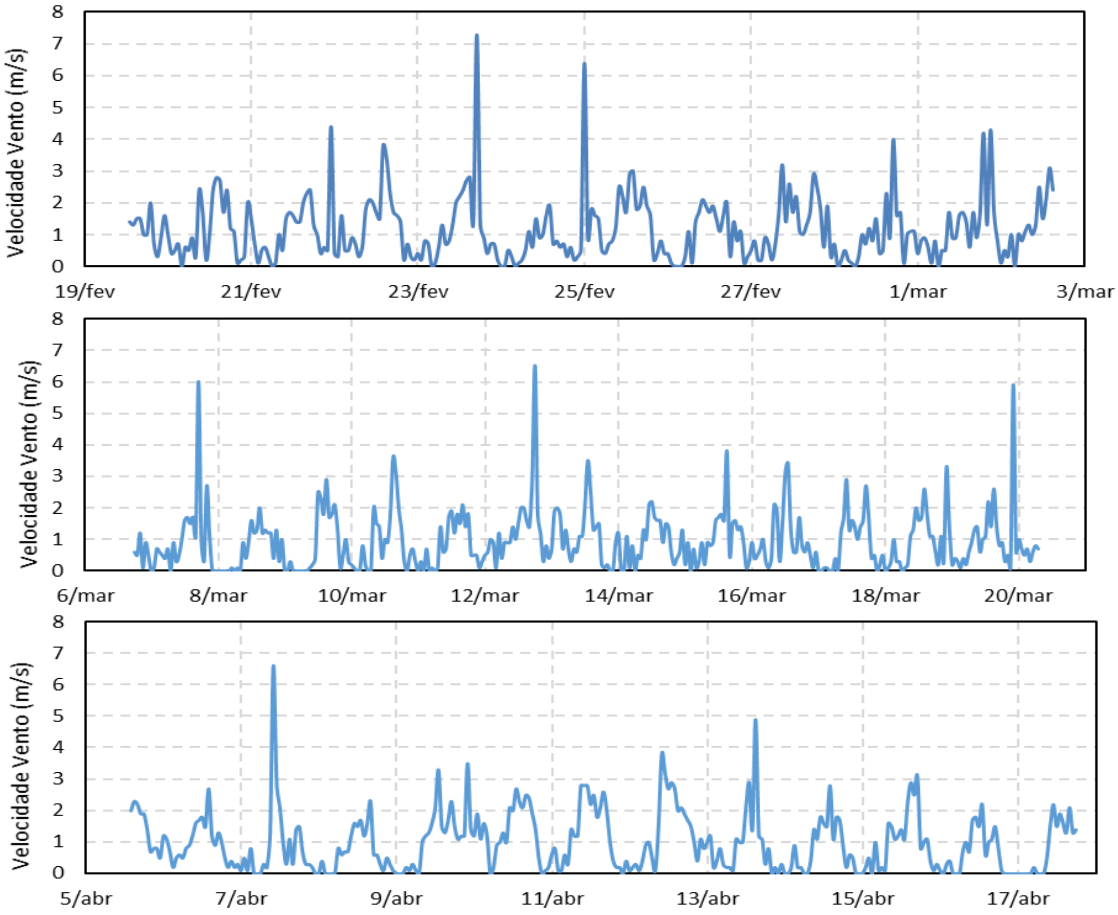


Figura 92- Velocidade do vento para as campanhas 5 a 7 (de cima para baixo) – fase 2

Tabela 25 - Velocidade do vento (m/s) – fase 2

Campanhas	Técnicas	Média	Máximo	Mínimo
5	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 1	1,2	7,3	0,0
6	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 2	1,0	6,5	0,0
7	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 3	1,0	6,6	0,0

Para a ventilação natural cruzada foi realizada uma abertura a leste e outra a oeste. Na campanha 5 a ação do vento permaneceu mais tempo na direção su-sudeste (10,5%), seguida por sudeste (9,4%), lés-sudeste (8,3%) e sul (7,5%). A direção do vento na campanha 6 permaneceu mais tempo na direção sudeste (9,5%), seguido por lés-sudeste (9,2%) e norte e nor-nordeste, com 8,3% cada, e na campanha 7 permaneceu mais tempo na direção nor-noroeste (10,7%), seguida por sudeste, lés-nordeste e nordeste, com 8,9 % cada, graficamente representadas na Figura 93.

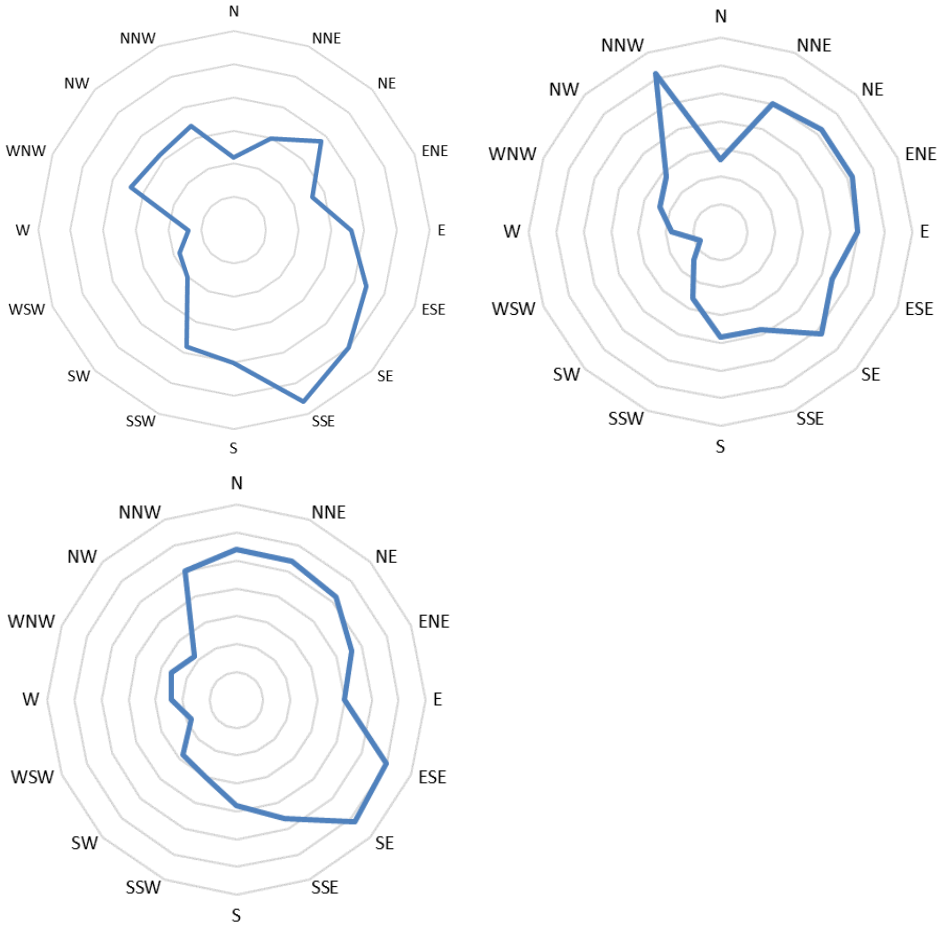


Figura 93- Direção do vento para as campanhas 5 e 6 (superior e inferior esq) e 7 (superior dir) fase 2

5.2 PINTURA DA ENVOLVENTE OPACA COM TINTA REFLETANTE ASSOCIADA À ESTRATÉGIA DE VENTILAÇÃO 1

Os resultados da campanha 5 (pintura com tinta refletante e ventilação cruzada durante as 24 horas do dia) traduzem a variação da temperatura do ar (exterior e células C1 e C2) ao longo do tempo e nos dias 26 a 28 de fevereiro (Figuras 94 e 95, respetivamente) e as diferenças entre as temperaturas medidas na célula C2 e na célula C1, em função das horas do dia (Figura 96) e ao longo do período de medição (Figura 97). As medições foram realizadas entre 19 de fevereiro e 02 de março de 2019. Observa-se que as temperaturas mais elevadas ocorreram sempre na célula sem as medidas de arrefecimento passivo (célula C2), verificando-se que a maior diferença de temperaturas entre as duas células ocorreu durante o dia, sendo em média superior a 2,5 ºC. Durante a noite, esta diferença não chega a 1,0 ºC, apresentando assim uma média geral de 1,7 ºC de arrefecimento (Tabela 26).

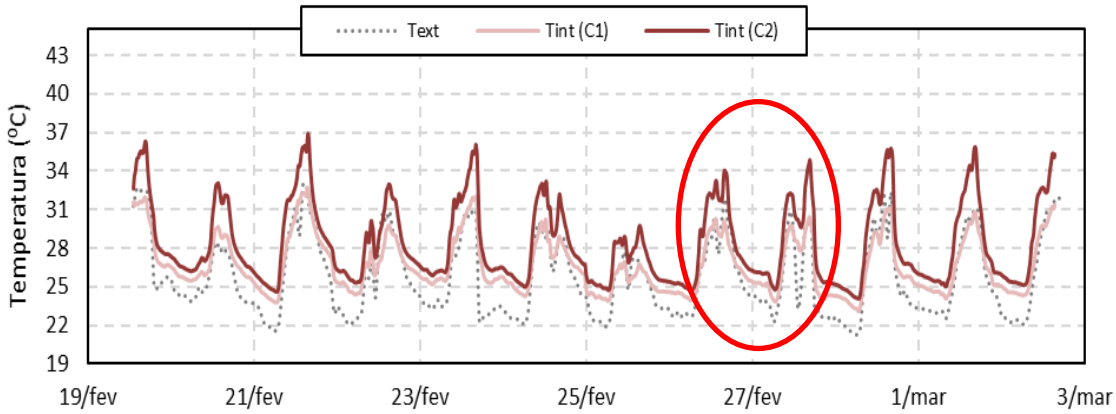


Figura 94- Temperatura ambiente – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 1

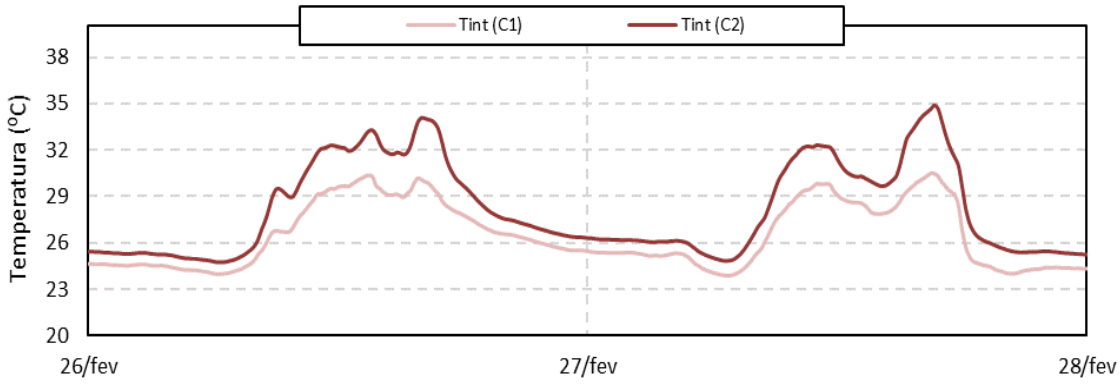


Figura 95- Temperatura ambiente entre os dias 26 e 28 de fevereiro - pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 1

Tabela 26 - Temperatura (ºC) – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 1

	Tmédia	Tmáx	Tmín
Exterior	25,8	33,0	21,3
Interior (C1)	26,7	32,7	23,2
Interior (C2)	29,0	36,9	24,1

Ao comparar os gráficos gerados pela variação de temperatura entre as células no uso conjunto das técnicas de pintura e ventilação - estratégia 1 (Figura 96), com os gráficos gerados pelos resultados das técnicas aplicadas separadamente, percebe-se um aumento da variação, justificado pela introdução da ventilação. No entanto, com o uso combinado não se verifica uma redução do efeito de arrefecimento no período diurno, como no cenário com a ventilação isolada, pois aqui a pintura compensa essa redução. A Figura 97 mostra a variação geral da temperatura ambiente diária durante a implementação conjunta das duas técnicas, entre 19 de fevereiro e 2 de março. Neste período, a variação atingiu um valor máximo de 5,1 ºC no dia 1 de março às 16h30m e teve um valor médio de 1,6 ºC.

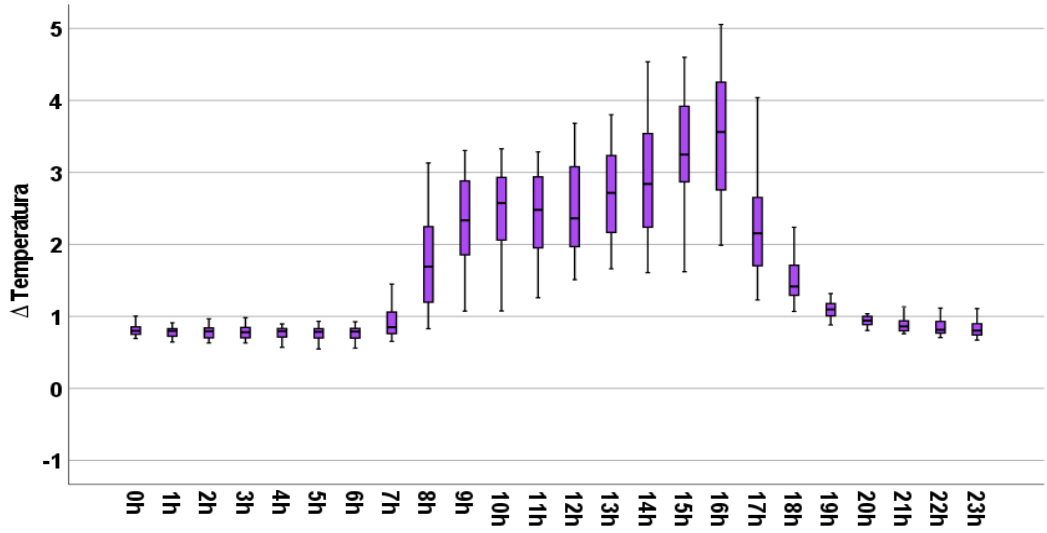


Figura 96- Diferenças de temperatura ambiente (C2-C1) em média horária – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 1

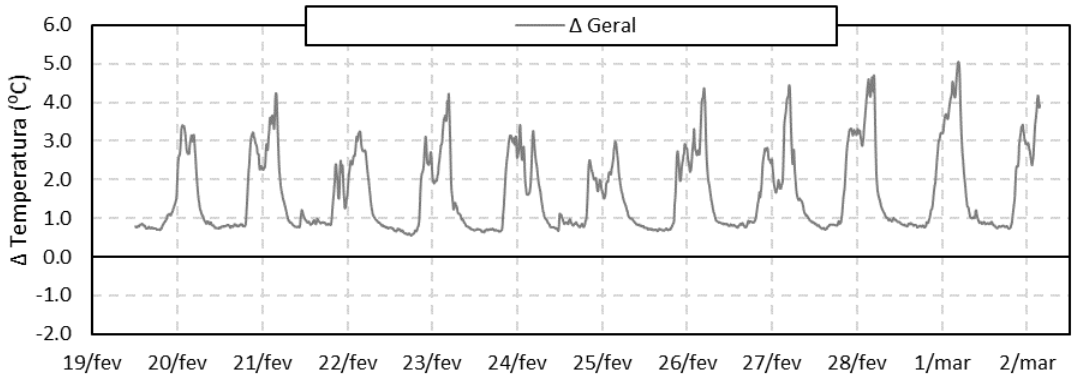


Figura 97- Diferença geral da temperatura ambiente diária de C2 e C1 durante a implementação do efeito – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 1

A Figura 98 apresenta a direção predominante e as médias da velocidade do vento e da variação de temperatura em relação às horas dos dias em que a campanha foi realizada. Nela é possível verificar que, ao contrário das campanhas 1, 2 e 3 e de forma semelhante à campanha 4, a variação da temperatura segue a mesma tendência de crescimento e declínio da velocidade média do vento. Comparando a

variação das temperaturas com a radiação solar média e com a temperatura exterior média para cada hora do dia, as maiores variações ocorrem nos momentos próximos ao pico de diferença de temperatura, logo, após a máxima incidência solar do dia. Quanto à direção do vento não foi observado relação direta com os ganhos e perdas de temperatura.

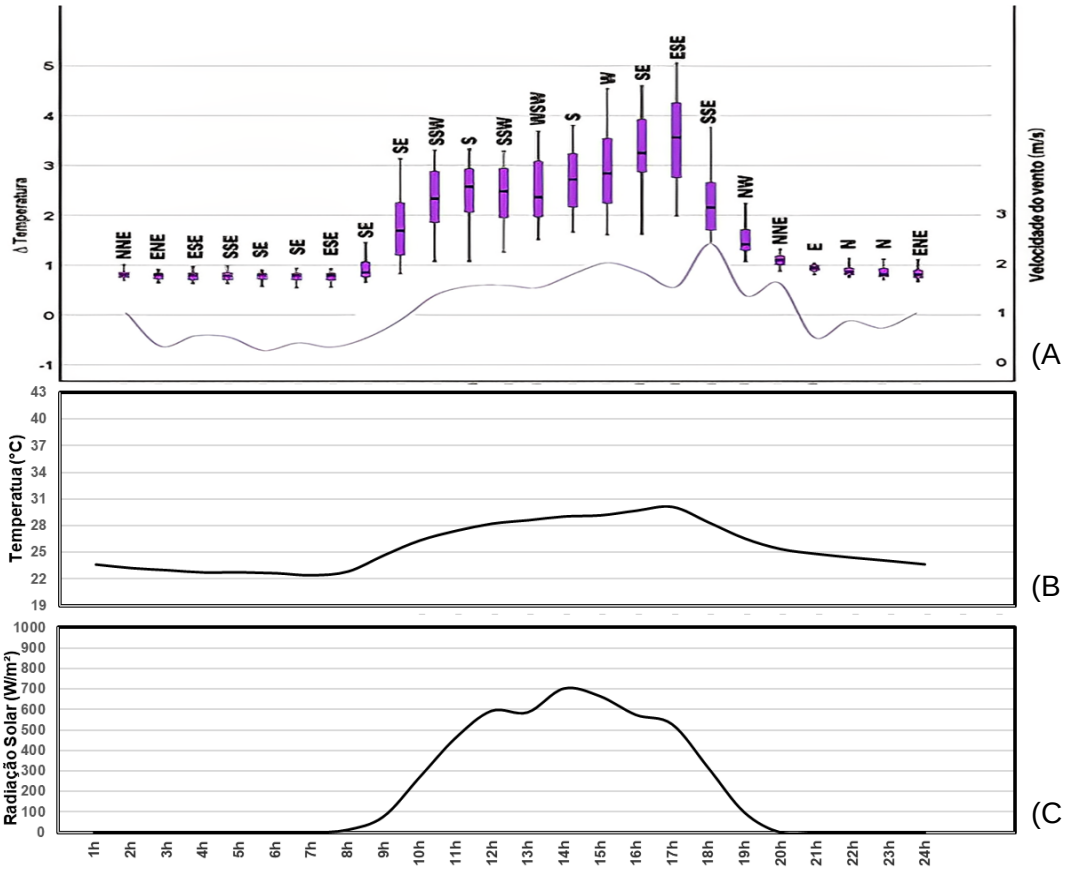


Figura 98- Média horária de: A) velocidade do vento com direção predominante e diferença de temperatura, B) temperatura do exterior, C) radiação solar, em função das horas do dia – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 1

5.3 PINTURA DA ENVOLVENTE OPACA COM TINTA REFLETANTE ASSOCIADA À ESTRATÉGIA DE VENTILAÇÃO 2

Quando a ventilação natural cruzada implementada apenas no período noturno foi associada à pintura com tinta refletante, durante a campanha 6, entre 6 e 20 de março de 2019, os resultados obtidos não diferiram de forma significativa dos da campanha 5 (Figuras 99 e 100). O valor de temperatura máximo registado neste período ocorreu no interior da célula C2, atingindo os 37,5 ºC e a diferença entre esta temperatura e a máxima exterior foi de 3,8 ºC. Quanto às temperaturas mínimas, C2 obteve a mais alta e a temperatura exterior a mais baixa, com uma diferença de 2,3 ºC entre elas. O valor máximo no interior de C1, comparado com a temperatura exterior no seu limite superior, apresentou diminuição de 0,7 ºC, enquanto nas mínimas a diferença foi de 1,6 ºC a mais para a célula, mais do dobro do valor anterior (Tabela 27).

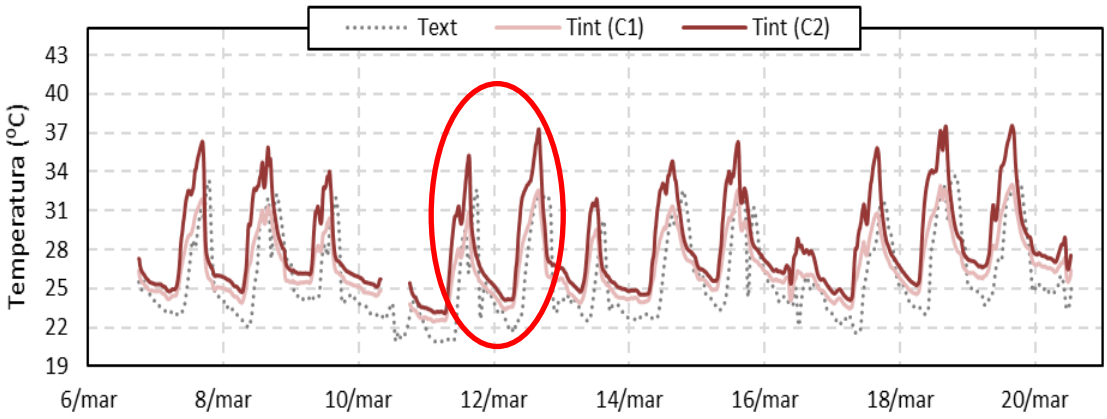


Figura 99- Temperatura ambiente – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 2

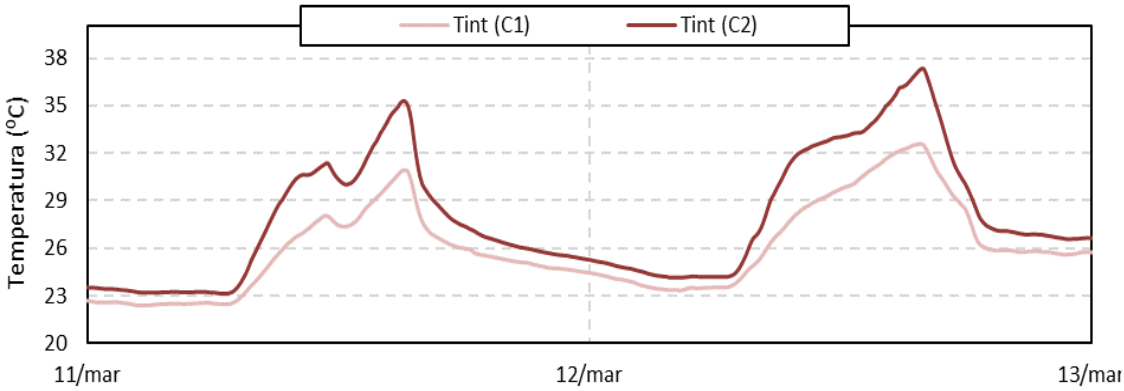


Figura 100- Temperatura ambiente entre os dias 11 e 13 de março – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 2

Tabela 27 - Temperatura (ºC) – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 2

	Tmédia	**Tmáx**	**Tmín**
Exterior	25,7	33,7	20,8
Interior (C1)	26,6	33,0	22,4
Interior (C2)	28,3	37,5	23,1

É possível constatar ainda que houve um ligeiro aumento das diferenças de temperatura, sobretudo no período diurno, uma vez que, estando a ventilação desativada quando as temperaturas exteriores eram mais elevadas, evitou-se a entrada de ar mais quente do exterior para o interior da célula, obtendo-se um arrefecimento mais significativo no período diurno (Figura 101).

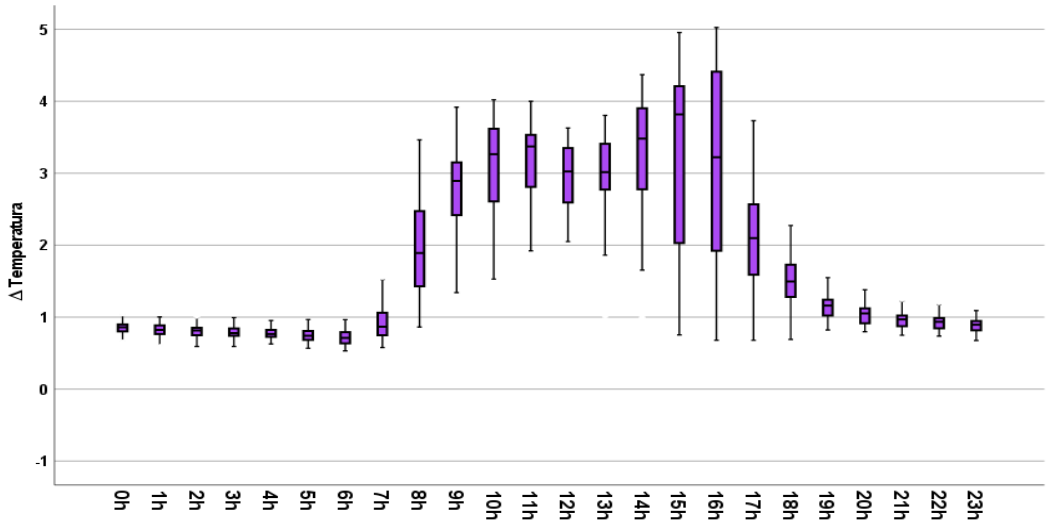


Figura 101- Diferenças de temperatura ambiente (C2-C1) em média horária – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 2

À semelhança da campanha anterior, a variação de temperatura foi sempre positiva (Figura 102), ou seja, a célula com arrefecimento passivo apresentou sempre temperatura mais amena, com um valor médio de 1,7 ºC e pico de 5,0 ºC, atingido no dia 17 de março às 16h.

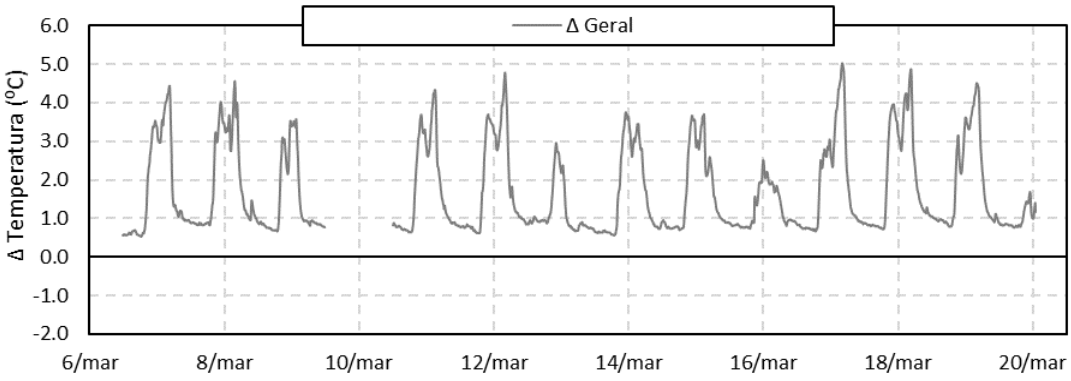


Figura 102- Diferença geral da temperatura ambiente diária de C2 e C1 durante a implementação do efeito – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 2

A Figura 103 mostra a direção do vento predominante, bem como as médias da velocidade do vento e variação de temperatura relacionadas com as horas do dia em que ocorreu a realização da campanha. Os registos permitem constatar que, à semelhança da campanha anterior, a variação da temperatura tende a aumentar em proporção à velocidade do vento. Como resultado, as oscilações das duas medidas são muito mais evidentes ao entardecer (entre as 16h e as 17h). Além disso, às 17h, quando a temperatura cai drasticamente, a velocidade do vento apresenta a sua menor intensidade. Assim, pelo facto de não ser utilizada a técnica de ventilação durante o dia, as variações entre as células neste período não são tão acentuadas como na campanha 5.

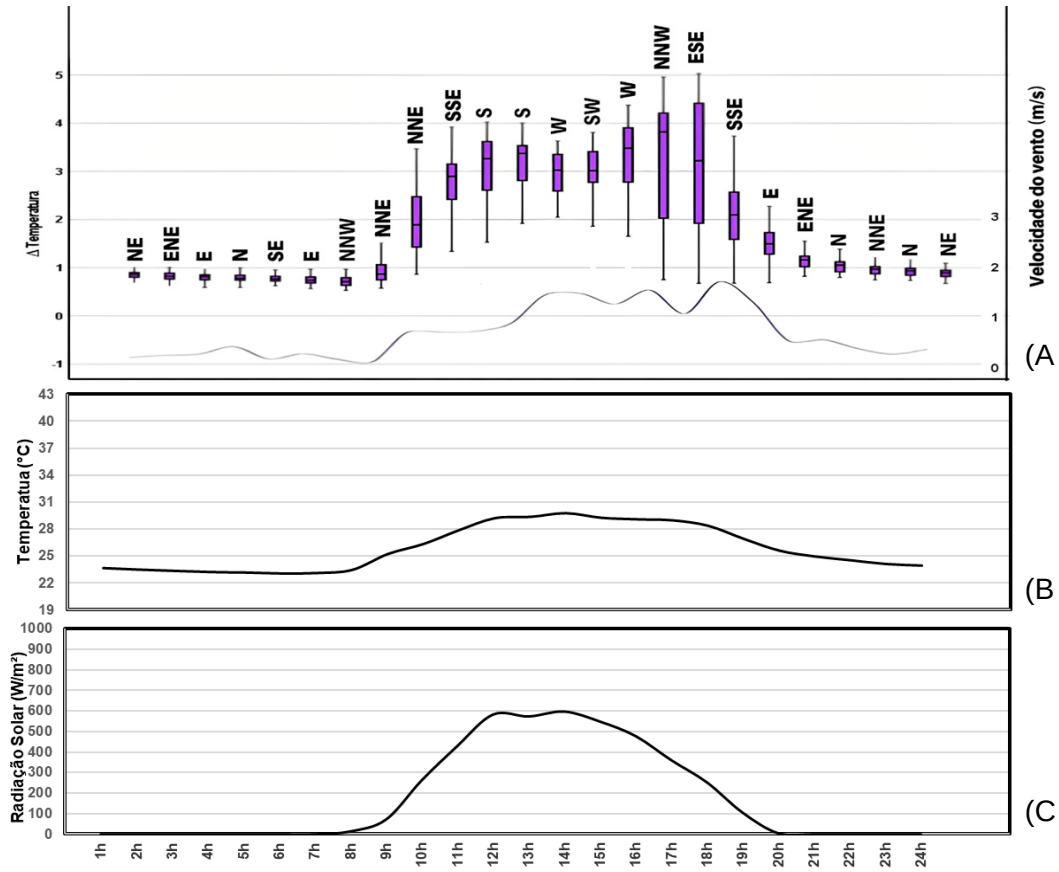


Figura 103- Média horária de: A) velocidade do vento com direção predominante e diferença de temperatura, B) temperatura do exterior, C) radiação solar, em função das horas do dia – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 2

5.4 PINTURA DA ENVOLVENTE OPACA COM TINTA REFLETANTE ASSOCIADA À ESTRATÉGIA DE VENTILAÇÃO 3

Na campanha 7, que decorreu de 7 a 17 de abril de 2019, procedeu-se à associação da pintura com tinta refletante com ventilação por efeito chaminé (estratégia de ventilação 3), implementadas na célula C1 (Figuras 104 e 105). Durante esta campanha as temperaturas registadas em C1 foram sempre inferiores às de C2, que atingiu o máximo de temperatura interna, 39,6 ºC. A variação entre as temperaturas máximas das duas células chegou aos 5,6 ºC (Tabela 28).

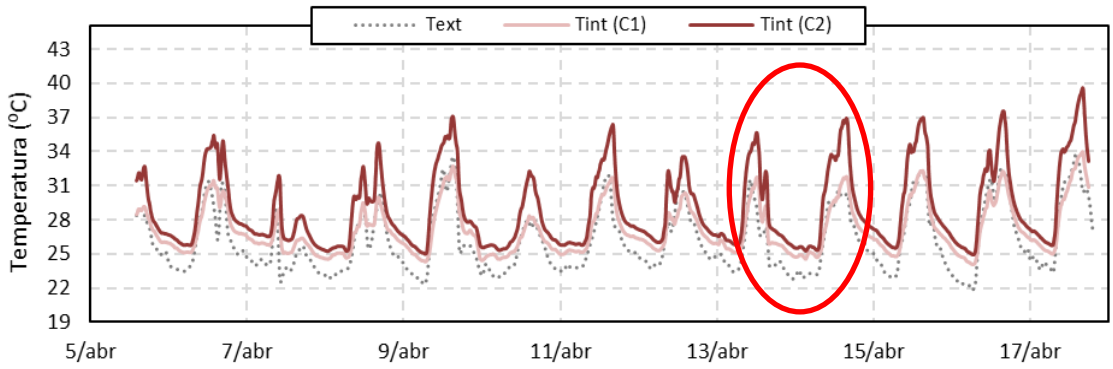


Figura 104- Temperatura ambiente – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 3

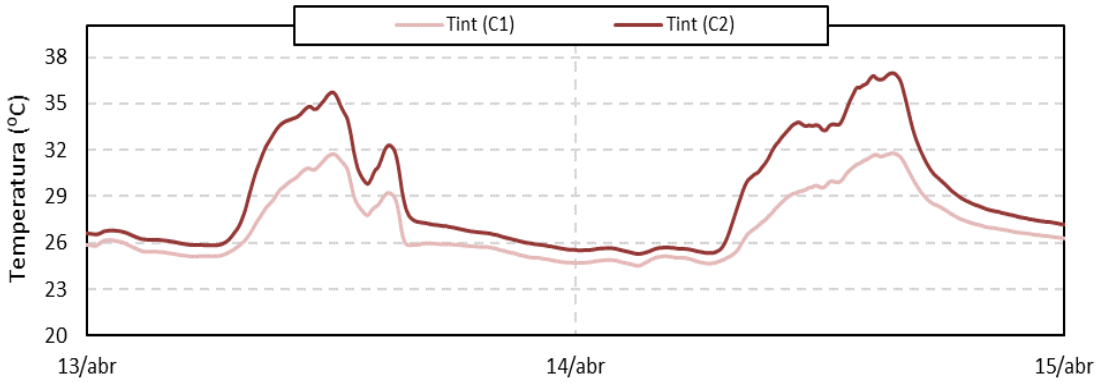


Figura 105- Temperatura ambiente entre os dias 13 e 15 de abril – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 3

Tabela 28 - Temperatura (ºC) – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 3

	Tmédia	**Tmáx**	**Tmín**
Exterior	26,1	33,9	21,8
Interior (C1)	27,1	34,0	24,1
Interior (C2)	29,0	39,6	25,0

No que respeita às variações de temperatura geradas pelo uso combinado das duas técnicas da campanha 7 (Figura 106), quando comparada às outras campanhas, foram as mais significativas de todas, com uma média de 1,8 ºC e máxima variação no dia 17 de abril às 16h (Figura 107). À semelhança das campanhas anteriores, a variação mínima foi de 0,5 ºC. Os valores ligeiramente superiores para o período diurno apontam para uma maior eficácia da ventilação por efeito chaminé face à ventilação cruzada.

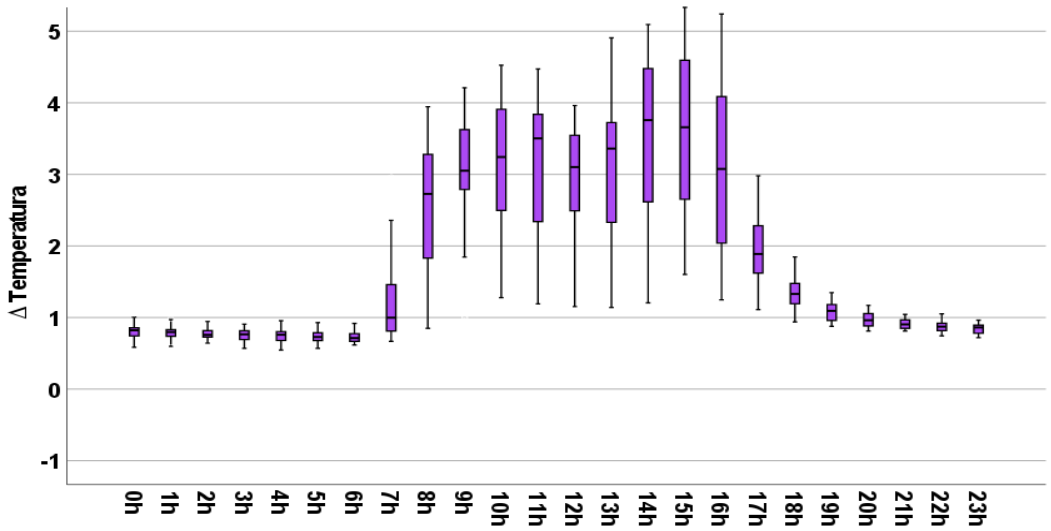


Figura 106- Diferenças de temperatura ambiente (C2-C1) em média horária – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 3

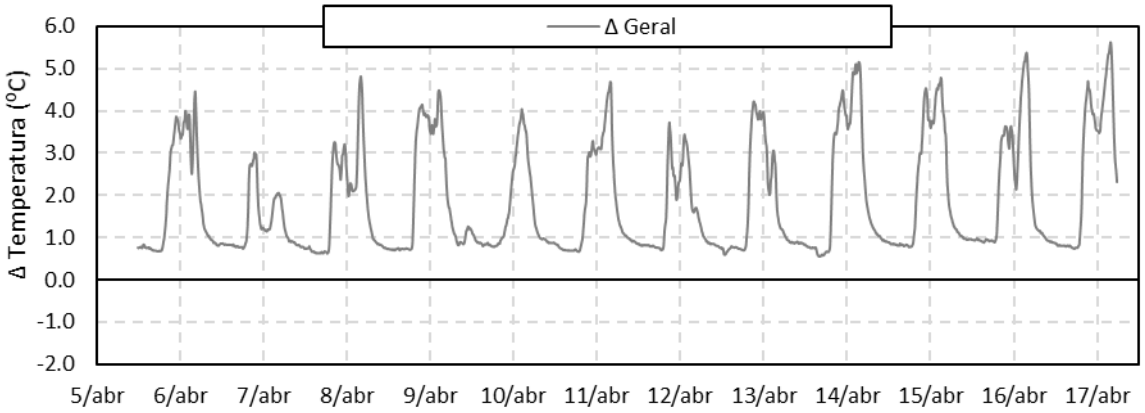


Figura 107- Diferença geral da temperatura ambiente diária de C2 e C1 durante a implementação do efeito – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 3

Como demonstrado nos gráficos da Figura 108, a velocidade, sem relação necessariamente com a direção do vento, teve influência na proporção do aumento da variação de temperatura entre as células, sendo este parâmetro externo diretamente proporcional ao aumento da variabilidade entre as temperaturas internas. A radiação solar e a temperatura externa apresentam picos máximos em momentos do dia em que o delta de temperatura estava elevado, mas, graficamente, não há relação considerável com a velocidade do vento.

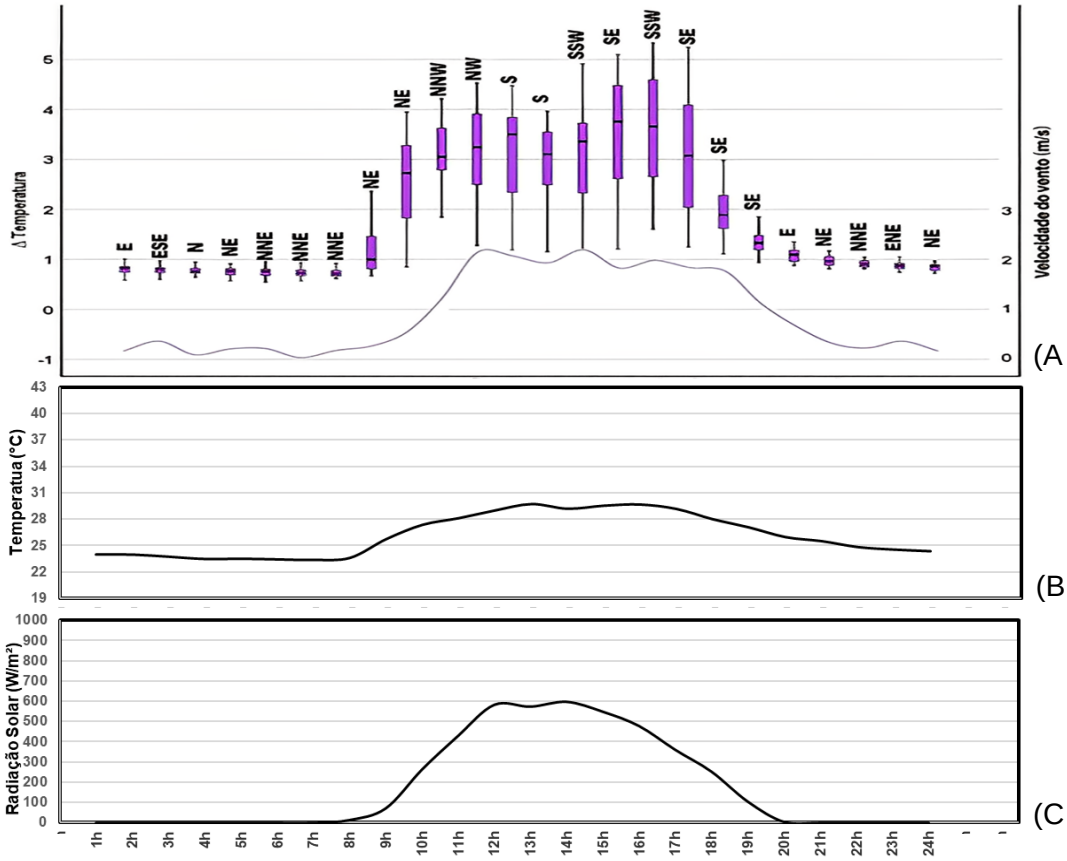


Figura 108- Média horária de: A) velocidade do vento com direção predominante e diferença de temperatura, B) temperatura exterior, C) radiação solar, em função das horas do dia – pintura com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 3

5.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA FASE EXPERIMENTAL 2

A Tabela 29 resume os resultados obtidos, como a temperatura média do interior das células, nas 7 campanhas experimentais realizadas. Quando aplicadas individualmente, a pintura da envolvente opaca com tinta refletante revelou-se a técnica mais eficaz, mostrando um bom desempenho no arrefecimento diurno e com uma média elevada quando comparada às outras duas campanhas. Com efeito, a ventilação cruzada por ação do vento durante 24 horas apresentou uma diferença de temperatura média de 0,64 °C entre a célula C1, onde a técnica foi implantada, e a célula C2. Contudo, a sua eficácia é maior no período noturno, com o aumento da diferença média para 0,79 °C. Verificou-se também que o sombreamento do vão envidraçado apresentou uma leve redução da temperatura no interior da célula C1 face à célula C2, com melhores resultados obtidos no período diurno devido a diminuição da incidência da radiação solar. Apesar da redução da temperatura, esta é inferior ao esperado, possivelmente devido à pequena dimensão da área envidraçada nas células e à sua localização somente numa fachada. A técnica menos eficaz foi a aplicação da película refletante no desvão do telhado, onde não houve uma melhoria do desempenho, provavelmente devido à ventilação pouco eficaz daquele espaço, resultante do baixo declive do telhado, que, por seu lado, ocasiona uma abertura pequena do desvão orientado no sentido leste-oeste, somado ao EPS presente na telha utilizada nestas coberturas. O calor acumulado ao longo do dia no interior do desvão, sem possibilidade de troca com o ambiente pela cobertura, acaba transferido para o interior da célula. Assim, este foi o único cenário em que a célula com a técnica de arrefecimento apresentou durante toda a campanha temperaturas maiores que a célula de controlo.

Tabela 29 - Diferença de temperatura entre a célula C1 e a célula C2 em °C

Campanha	Fase I	TMédia		
		Geral	Noturno	Diurno
1	Sombreamento do vão envidraçado – quebra-sol	0,17	0,04	0,23
2	Aplicação de película refletante no desvão do telhado	-0,22	-0,15	-0,25
3	Ventilação natural cruzada por ação do vento	0,64	0,79	0,47
4	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante	1,06	0,53	1,73
	Fase II			
5	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 1	1,65	0,84	2,67
6	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 2	1,64	0,86	2,78
7	Pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à estratégia de ventilação 3	1,84	0,83	3,10

Constatou-se que a combinação de técnicas originou maior diferença de temperatura face à célula de controlo do que a implementação de qualquer uma delas individualmente, tendo as médias de diferença de temperatura entre as células atingido valores maiores do que em qualquer campanha da fase 1. Na campanha 5 (pintura da envolvente opaca com tinta refletante e ventilação cruzada por ação do vento durante 24 horas) a maior variação de temperatura entre as células foi de 5,10 °C, tendo sido a diferença em média de 2,67 ºC no período diurno. Quando a ventilação natural cruzada por ação do vento ocorreu apenas durante a noite (campanha 6), o desempenho melhorou, uma vez que a diferença de temperatura máxima entre a célula C1 e a célula C2 foi de 5,03 °C e em média durante o período diurno de 2,78 ºC. Este subtil aumento das variações no período diurno resulta do facto de a ventilação ocorrer apenas no período noturno, evitando que, no período em que as temperaturas exteriores estavam elevadas, o ar quente do ambiente exterior se direcionasse para o interior da célula. Na campanha em que a estratégia de ventilação por efeito chaminé foi utilizada (campanha 7) a média de variação de temperatura foi a mais alta de todas as experiências, atingindo 1,84 ºC. As diferenças observadas, ligeiramente superiores às das campanhas 5 e 6 para o período diurno, servem para demonstrar uma maior eficácia da ventilação por efeito chaminé em relação à ventilação cruzada.

Quanto aos parâmetros externos, nesta fase ficou demonstrada a relação entre a velocidade do vento e a alteração das temperaturas entre as células. Considerando que esta relação só foi observada na campanha 3 da fase 1, em que foi aplicada a técnica de pintura da envolvente opaca com tinta refletante, e nas campanhas 5, 6 e 7, onde a técnica foi utilizada em conjunto com a ventilação, conclui-se que a pintura promove o arrefecimento da envolvente por ação do vento externo, de modo que o fluxo de calor para o interior da célula diminui e, consequentemente, a temperatura também diminui.

6
SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Muitos estudos utilizam simulações para testarem e preverem o comportamento térmico das construções. Para este fim, vários programas foram desenvolvidos e lançados no mercado, tais como o EnergyPlus, WufiPlus, Trnsys, Visual DOE e o ESP-r. A partir dos resultados da simulação, tornam-se percetíveis quais as características avaliadas que influenciam o comportamento térmico de forma mais ou menos significativa. Sendo assim, é possível verificar se um modelo alcança o nível de conforto térmico exigido pelas normativas e quais as estratégias que possibilitam alcançá-lo com maior facilidade, eficiência, economia e sustentabilidade.

Na presente tese, a simulação é utilizada com o objetivo de comparar o desempenho das técnicas de arrefecimento passivo implementadas. Para tal, o programa escolhido foi o EnergyPlus, na versão 8.6, associado ao DesignBuilder, na versão 5.5.2, que auxilia na precisão da modelação geométrica e construtiva.

6.1.1 ENERGYPLUS

O EnergyPlus é um programa de simulação computacional desenvolvido para auxiliar investigadores, engenheiros e outros técnicos da área da construção civil a verificarem as cargas térmicas, as necessidades energéticas e o comportamento térmico das edificações. O programa resultou da junção dos programas BLAST e DOE-2 e foi disponibilizado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América. O programa permite ler, gerir e comparar resultados de simulações e processa (entrada ou *input*) e produz (saída ou *output*) arquivos de texto com os dados simulados, podendo também ser acoplado a outras ferramentas computacionais (Figura 109).



Figura 109- Aplicações e serviços adicionais suportados pelo programa EnergyPlus

As informações processadas no EnergyPlus, no que diz respeito à entrada e à saída de dados, possuem formatos simples com o intuito de que outros programas os possam ler e interpretar sem dificuldade. O programa destaca-se dos demais programas de simulação por propiciar o progresso das técnicas e estruturas computacionais, possuir solução integrada e simultânea, funções de entrada e saída (*input* e *output),* além de fornecer relatórios padronizados e a possibilidade de relatórios definidos pelo usuário (Crawley, et al. 2001).

O modelo de cálculo do EnergyPlus baseia-se nas expressões matemáticas que traduzem a transferência de calor nos edifícios. Para calcular a temperatura interior a equação de balanço inclui as variáveis de transferência de calor na região estudada:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \Sigma_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_1 + \Sigma_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \Sigma_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p^{air} (T_{zi} - T_z) + \dot{m_{inf}} C_p^{air} (T_\infty - T_z) + \dot{Q_{sys}} \quad (19)$$

Em que:

$C_z - \rho_{air} C_p^{air} C_T$;

ρ_{air} – Massa volúmica do ar [kg/m³];

C_p^{air} – Calor Específico do ar da zona [J/kg.K];

C_T- Fator de ponderação da transferência de calor sensível [K/m³];

Q_{sys} – Taxa de troca de calor entre o ar interior da zona e o sistema de climatização [W/s];

Q_1- Ganhos internos por convecção [J/s];

$N_{surfaces}$- Número total de superfícies na zona;

N_{zones}- Número total de zonas;

m_{inf}- Massa de ar infiltrado [kg/s];

m_i- Fluxo de ar no nó i [kg/s];

C_p^{air}- Calor especifico do ar [J/(kg.K)];

Tz – Temperatura da zona [K];

Tzi – Temperatura das zonas vizinhas [K];

T∞ – Temperatura do ar infiltrado [K];

Tsi – Temperatura das superfícies existentes na zona [K];

hi – Coeficiente de troca de calor [W/m².K];

Ai – Área superficial [m²];

Para obter a energia total armazenada da zona ($C_z \frac{dT_z}{dt}$) é necessário somar os ganhos internos por convecção ($\Sigma_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_1$) à transmissão de calor por convecção, causados pelas superfícies da zona ($\Sigma_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$), mais a transferência de calor recebida pela combinação de ar das diferentes zonas ($\Sigma_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_\iota C_p^{air} (T_{zi} - T_z)$), com a transferência de calor advinda da infiltração do ar exterior ($\Sigma_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_\iota C_p^{air} (T_{zi} - T_z)$) e a troca de calor ocorrida entre o interior da zona e o sistema de climatização ($\dot{m_{inf}} C_p^{air} (T_\infty - T_z)$).

A equação de balanço é resolvida de forma iterativa através de *Conduction Transference Functions* (CTF) (EERE, 2021).

6.1.2 DESIGNBUILDER

O DesignBuilder é um programa que funciona como interface gráfica do EnergyPlus. O programa possui uma interface simples que permite a produção facilitada de blocos 3D por meio do OpenGL. Também importa a geometria do edifício segundo o plano do CAD 2-D, além de possibilitar a realização de modificações no nível, zona ou bloco da construção. A Figura 110 apresenta a interface do DesignBuilder.

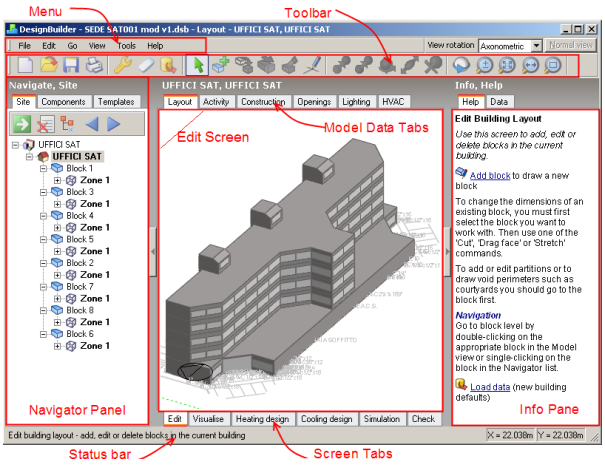


Figura 110- Interface do DesignBuilder

Por estas razões, o DesignBuilder foi a interface gráfica escolhida para ser usada com o EnergyPlus, com o objetivo de facilitar a criação dos modelos de simulação do comportamento térmico e do desempenho energético dos casos de estudo: inicialmente das células-teste e, num segundo momento, de uma casa de habitação social. O desempenho do DesignBuilder já foi comprovado através da aplicação da metodologia apresentada na norma ASHRAE 140-2004, o "Método de teste para avaliação da análise energética dos edifícios".

6.1.3 ESTRATÉGIA DE SIMULAÇÃO

Como o próprio nome sugere, o objetivo da simulação é aglutinar e/ou combinar variáveis para indicar e/ou sugerir resultados próximos daqueles que poderiam ser encontrados em casos reais. Uma vez encontrados tais resultados, permite adotar medidas efetivas ou verificar os resultados de possíveis

correções. Logo, apoiada em elementos metodológicos basilares, a simulação contribui com caminhos a seguir. Neste sentido, o objetivo da estratégia de simulação neste trabalho é avaliar o impacto da utilização de diferentes materiais e possíveis combinações de materiais, bem como da aplicação de distintas técnicas individualmente e/ou de forma combinada na maior eficácia de conforto térmico em regiões de climas quentes.

Com uma metodologia subdividida em 3 fases, as noventa e seis simulações foram realizadas na seguinte ordem: 1ª Fase – Validação da robustez do modelo, utilizando o Energyplus e modelando cenários nas células-teste com a inserção de parâmetros do clima exterior no mesmo período dos ensaios da fase experimental, comparando os resultados obtidos nas simulações com os obtidos nas campanhas experimentais; 2ª Fase – Modelagem de uma casa com geometria padrão de uma casa de habitação social, simulando cenários em que diferentes materiais e elementos construtivos eram utilizados, bem como a variação de técnicas de arrefecimento passivo e a aplicação de ambos em variadas combinações; 3ª Fase – Avaliação dos resultados obtidos nos vários cenários simulados, com definição de 4 indicadores para aferir que materiais/elementos construtivos juntamente com que técnicas de arrefecimento passivo apresentaram melhores resultados quanto a conforto térmico para regiões de clima quente, segundo as normas EN 16798 e ASHRAE 55.

6.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAS CÉLULAS-TESTE: COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS DAS CAMPANHAS EXPERIMENTAIS

6.2.1 MODELAÇÃO DAS CÉLULAS-TESTE

Tal como descrito detalhadamente na secção 3.1.2, o módulo de controlo possui paredes formadas por painéis *Oriented Stranded Boards* (OSB), isolados com lã de vidro, com 2,4 m de altura. Estes painéis estão assentes numa superfície de betão leve com dimensões de 2,4 x 2,4 m². O telhado possui duas águas com 10% de inclinação orientadas para o eixo norte-sul e é composto por telha acústica com isolamento de poliestireno expandido (EPS). Com o objetivo de fornecer espaços para ventilação natural não existem elementos de parede na cobertura. O módulo possui uma porta de OSB e uma janela de 0,6 x 0,6 m^2, posicionada a 1,5 m do solo, constituída por vidro simples de 8 mm, com fator solar de 83%, e caixaria de alumínio. A Figura 111 apresenta as características geométricas da célula de controlo e a Tabela 30 elenca as propriedades dos materiais utilizados.

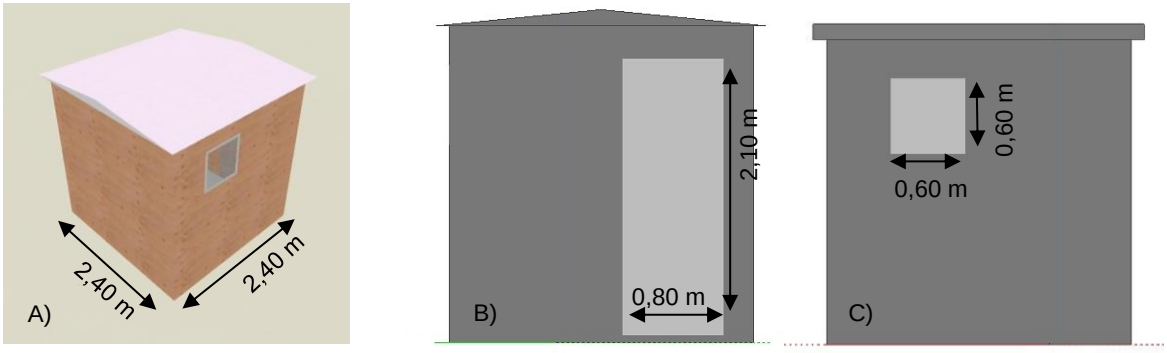


Figura 111- A) Perspetiva, B) alçado poente e C) alçado norte

Tabela 30 – Propriedades dos materiais

Elemento	Esp. (mm)	λ (W/m.K)	ρ (kg/m³)	Cp (J/kg.K)
Parede				
OSB	9,5	0,129	640	1552
Lã de Vidro	20,0	0,040	12	840
Cobertura				
Telha Metálica	5,0	55	7800	460
EPS	30,0	0,040	15	1400
Pavimento				
Betão leve	50,0	0,380	1200	1000
Teto				
OSB	9,5	0,129	640	1552
Lã de Vidro	20,0	0,040	12	840

Legenda:
Esp – Espessura [mm]
λ – Condutibilidade térmica [W/m.K]
ρ – Massa Volúmica [kg/m3]
Cp – Calor Específico [J/kg.K]

6.2.2 CRIAÇÃO DO FICHEIRO CLIMÁTICO

Para a verificação da robustez do modelo foi necessário criar um ficheiro com os dados climáticos reais medidos durante o período de monitorização. Para tal, foi utilizada a informação disponível num ficheiro climático fornecido pelo Instituto de Meteorologia do Brasil (INMET). O INMET disponibilizou arquivos originais que continham oito variáveis relevantes: temperatura do ar exterior, humidade relativa, temperatura do ponto de orvalho, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, pluviosidade e irradiância global sobre o plano horizontal.

Para a simulação térmica e energética os arquivos a serem elaborados deveriam apresentar o formato EPW, adotado pelo software EnergyPlus (U.S. Department of Energy, 2011). O formato EPW engloba 27 variáveis, além das 8 disponíveis na base do INMET, que foram estimadas por cálculo ou por meio da aplicação Weather-Converter, distribuído juntamente com o EnergyPlus e utilizado para conversão de arquivos climáticos. As variáveis calculadas foram: irradiâncias; luminância no zênite e iluminâncias; radiação sob céu limpo; nebulosidade; radiação direta, radiação difusa e radiação extraterrestre. Acrescente-se que as irradiâncias foram estimadas pelo método Munner (1997), a luminância no zênite e iluminâncias pelo método Perez, et al. (1990), a radiação sob céu limpo pelo método Haurwitz (1946), a nebulosidade pelo método Luo (2010), a radiação direta pelo método Louche (1991), a radiação difusa pelo método Lee (2013) e, por fim, a radiação extraterrestre pelo método Spencer (1971).

As restantes variáveis foram obtidas pela aplicação do Weather-Converter, uma vez que esses dados climáticos não foram medidos no local de estudo e o seu conjunto não é fornecido pelo INMET. Assim sendo, foi construído um ficheiro climático específico para o período de 26/06/2018 a 26/06/2019, tal como exemplificado na Figura 112.

LOCATION	Palmas	TO	BRA	-10,17	-48,33	-3	280														
DESIGN CONDITIONS	0																				
TYPICAL/EXTREME PERIODS	6	Summer	Extreme	Summer - We	Typical	10/17	10/23	Winter - Week Nearest Min Temperature For Period				Extreme	3/ 1	3/ 7	Winter - Week Nearest Average Temperature For Perioc		Typical	2/ 1	2/ 7	Autumn - Week Nearest Average Temperature For Period	
GROUND TEMPERATURES	3	0,5		29	28,67	28,02	27,41	26,26				25,66	25,51	25,82	26,53		27,42	28,29	28,86	2	
HOLIDAYS/DAYLIGHT SAVINGS	No	0	0																		
COMMENTS 1	Weather file created by Rayner Mauricio.																				
COMMENTS 2	Ground temps represent undisturbed earth temperatures - calculated with a standard soil diffusivity of 2.3225760E-03 (m2/day).																				
DATA PERIODS			Data	dec/31																	
2019	1	1	1	23,45	21,8	90,5	98105	9999	9999	9999	0	0	0	999999	999999	999999					
2019	1	1	2	23,55	21,8	89,5	98065	9999	9999	9999	0	0	0	999999	999999	999999					
2019	1	1	3	23,45	21,45	88	98000	9999	9999	9999	0	0	0	999999	999999	999999					
2019	1	1	4	23,3	21,4	89,5	97940	9999	9999	9999	0	0	0	999999	999999	999999					
2019	1	1	5	23,2	21,65	91	97915	9999	9999	9999	0	0	0	999999	999999	999999					
2019	1	1	6	23,15	21,55	91	97975	9999	9999	9999	0	0	0	999999	999999	999999					
2019	1	1	7	22,9	21,2	90	98055	9999	9999	9999	18,17	0,4	16,7	999999	999999	999999					
2019	1	1	8	23,25	21,5	90,5	98125	9999	9999	9999	52,61	1	48,4	999999	999999	999999					
2019	1	1	9	24,8	20,15	77,5	98135	9999	9999	9999	184,33	4	169,6	999999	999999	999999					
2019	1	1	10	27	18,85	61	98160	9999	9999	9999	334,72	10,9	307,1	999999	999999	999999					
2019	1	1	11	28,5	18,25	53,5	98105	9999	9999	9999	462,5	27,6	400,3	999999	999999	999999					
2019	1	1	12	30,05	19,3	53	98045	9999	9999	9999	838,33	299,7	446,4	999999	999999	999999					
2019	1	1	13	30,15	19,65	53	97990	9999	9999	9999	662,5	113,2	465,5	999999	999999	999999					
2019	1	1	14	30,55	20,5	55	97930	9999	9999	9999	624,17	88,3	461	999999	999999	999999					
2019	1	1	15	31,05	20,65	54	97850	9999	9999	9999	679,17	125,7	466,3	999999	999999	999999					
2019	1	1	16	31,1	20,45	54	97760	9999	9999	9999	411,94	18,9	367,7	999999	999999	999999					
2019	1	1	17	29,8	20,85	58	97740	9999	9999	9999	128,08	2,5	117,8	999999	999999	999999					
2019	1	1	18	28,75	20,7	61,5	97730	9999	9999	9999	60,58	1,1	55,7	999999	999999	999999					
2019	1	1	19	27,9	20,45	65,5	97825	9999	9999	9999	17,2	0,3	15,8	999999	999999	999999					
2019	1	1	20	25,2	18,9	69	97860	9999	9999	9999	0	0	0	999999	999999	999999					
2019	1	1	21	23,6	20,05	81	97930	9999	9999	9999	0	0	0	999999	999999	999999					
2019	1	1	22	23,15	20,95	87,5	97965	9999	9999	9999	0	0	0	999999	999999	999999					
2019	1	1	23	23,2	21,5	89,5	97970	9999	9999	9999	0	0	0	999999	999999	999999					
2019	1	1	24	22,85	21,05	89	97930	9999	9999	9999	0	0	0	999999	999999	999999					
2019	1	2	1	22,45	20,9	91	97900	9999	9999	9999	0	0	0	999999	999999	999999					
2019	1	2	2	22,15	20,75	91,5	97860	9999	9999	9999	0	0	0	999999	999999	999999					
2019	1	2	3	21,9	20,6	92,5	97845	9999	9999	9999	0	0	0	999999	999999	999999					
2019	1	2	4	21,55	20,35	92,5	97855	9999	9999	9999	0	0	0	999999	999999	999999					
2019	1	2	5	21,5	20,35	93	97925	9999	9999	9999	0	0	0	999999	999999	999999					
2019	1	2	6	21,45	20,3	93,5	97995	9999	9999	9999	0	0	0	999999	999999	999999					
2019	1	2	7	22,15	21,05	93,5	98075	9999	9999	9999	25,86	0,5	23,8	999999	999999	999999					
2019	1	2	8	24,05	21,7	85,5	98145	9999	9999	9999	117,83	2,3	108,4	999999	999999	999999					

Figura 112- Preparação do ficheiro em formato EPW

6.2.3 COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A fim de comparar os resultados experimentais com as simulações desenvolvidas pelo EnergyPlus procedeu-se à modelação das células-teste utilizadas nas aferições, em conjunto com o ficheiro climático para os anos 2018/2019. Para tal realizaram-se quatro simulações. A primeira (SI) corresponde à célula sem nenhuma técnica implementada (24 de maio a 3 de junho), enquanto as SII, SIII e SIV simulam as condições das campanhas de ventilação natural cruzada por ação do vento (8 a 15 de agosto), de pintura da envolvente opaca com tinta refletante (8 a 16 de setembro) e de pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à técnica de ventilação natural cruzada por ação do vento durante 24h (13 de fevereiro a 3 de março), respetivamente.

Com a análise da Figura 113, que estabelece a comparação com simulação SI, verificou-se que as temperaturas simuladas se encontram abaixo das temperaturas de medição na maior parte dos períodos considerados, principalmente nos períodos noturnos.

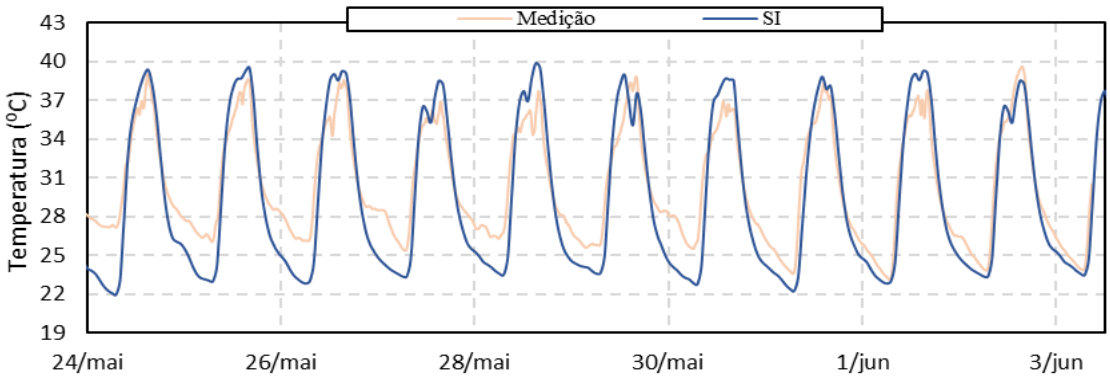


Figura 113- Comparação entre as temperaturas medidas e simuladas – SI

Já nas Figuras 114 e 115, referentes às simulações SII e SIII, respetivamente, é possível perceber uma menor variação da temperatura simulada com a temperatura aferida in situ, principalmente no período diurno, onde se verificam as temperaturas mais altas. Na simulação SIV (Figura 116) é possível observar uma maior diferença entre as temperaturas, com ênfase para os dias 25 e 28 de fevereiro e 1 de março, quando as temperaturas medidas diferiram mais das simuladas, facto possivelmente explicável pelo início do período chuvoso na região, o que demonstra que o modelo apresenta maiores discrepâncias com as medições *in loco* durante o período de chuvas. De qualquer modo, para melhor avaliar a robustez dos valores encontrados foram definidos alguns parâmetros estatísticos a fim de validar confiança no modelo.

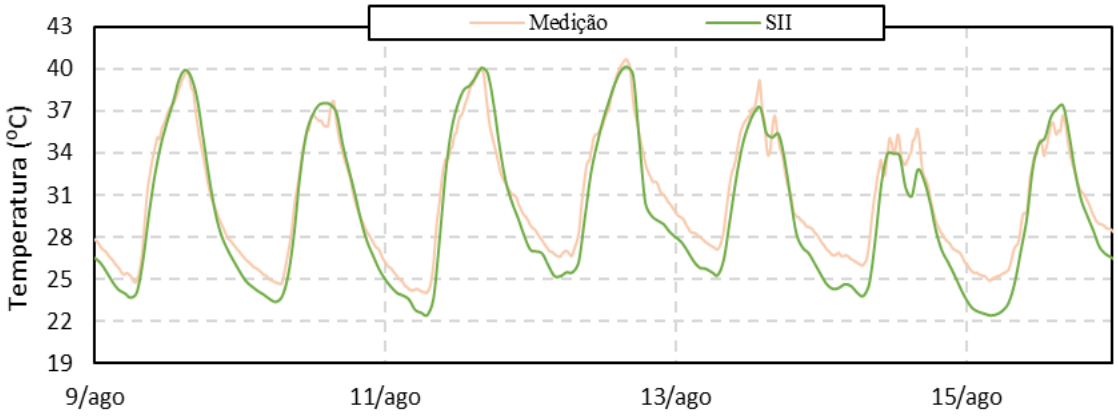


Figura 114- Comparação entre as temperaturas medidas e simuladas – SII

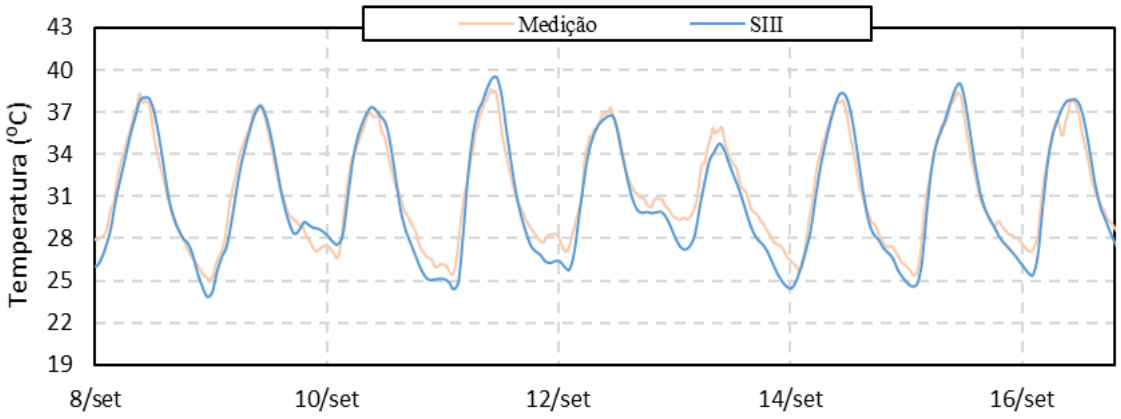


Figura 115- Comparação entre as temperaturas medidas e simuladas – SIII

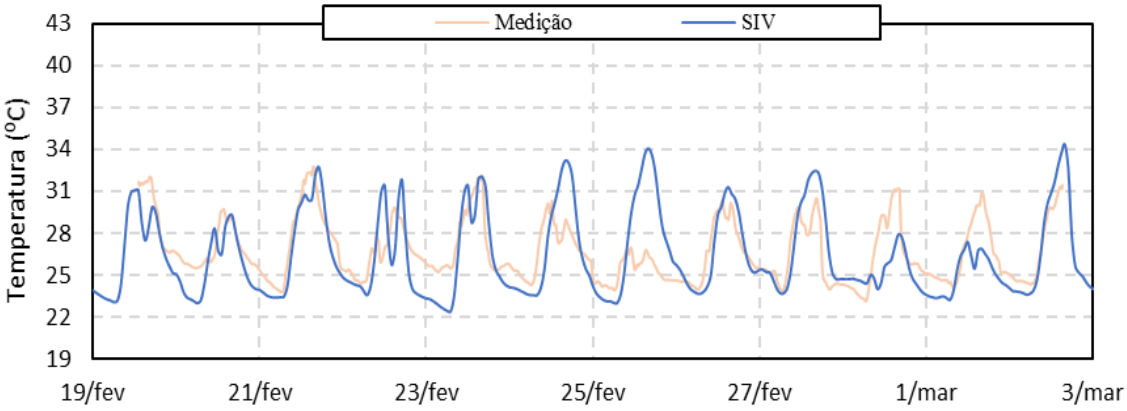


Figura 116- Comparação entre as temperaturas medidas e simuladas – SIV

6.2.4 DISCUSSÃO SOBRE A ROBUSTEZ DO MODELO

O processo de avaliação da robustez do modelo é realizado para diminuir incertezas e, consequentemente, dotar de maior fiabilidade os dados simulados. Para isso, torna-se necessário considerar e utilizar índices capazes de validar a eficácia do modelo. O índice RMSE estabelece compensações para os parâmetros de entrada, em concordância com as temperaturas de ar internas que foram monitorizadas. Da mesma forma, o índice CV RMSE regista possíveis erros de compensação entre as grandezas simuladas e medidas, devendo apresentar valores inferiores a 30%. O índice GOF, baseado nos valores de NMBE e CV RMSE, procura estabelecer a eficiência da regulação do modelo aos dados.

A Tabela 31 apresenta os dados gerais encontrados para cada parâmetro estatístico supracitado, enquanto as Tabelas 32 e 33 indicam os dados obtidos nos períodos diurno e noturno. A análise dessas tabelas permite perceber que os limites da ASHRAE Guideline 14 (2002) não foram ultrapassados. É importante destacar que, de forma geral, o coeficiente de determinação (R^2), estabelecido entre os dados reais coletados e os simulados, demonstra a robustez do modelo.

Tabela 31 - Dados gerais quanto à robustez do modelo

Geral				
	NMBE	CV RMSE	GOF	R^2
Limites (ASHRAE 14)	10,0	30,0	11,0	0,7
SI	3,3	7,6	5,9	0,9
SII	1,9	4,6	3,5	0,9
SIII	2,9	4,9	4,0	0,9
SIV	1,1	8,2	5,8	0,5

Tabela 32 **-** Dados diurnos quanto à robustez do modelo

DIURNO				
	NMBE	CV RMSE	GOF	R^2
Limites (ASHRAE 14)	10,0	30,0	11,0	0,7
SI	1,8	6,0	4,5	0,7
SII	0,4	3,9	2,8	0,8
SIII	0,9	4,1	2,9	0,8
SIV	1,2	9,9	7,1	0,1

Tabela 33 **-** Dados noturnos quanto à robustez do modelo

NOTURNO				
	NMBE	CV RMSE	GOF	R^2
Limites (ASHRAE 14)	10,0	30,0	11,0	0,7
SI	7,9	8,9	8,8	0,7
SII	3,4	5,3	4,4	0,8
SIII	4,5	5,6	5,1	0,8
SIV	2,9	6,0	4,7	0,3

6.3 MODELAÇÃO DE UMA CASA DE HABITAÇÃO SOCIAL

6.3.1 ENQUADRAMENTO

As Habitações de Interesse Social, pela importância e impacto na população com baixos rendimentos, devem ser avaliadas sob a perspetiva do conforto e bem-estar dos usuários desses ambientes. Portanto, é importante propor modelos e atentar na eficiência do desempenho térmico dessas casas. Assim, a demanda pelo baixo custo e bem-estar é o grande objetivo, sendo o arrefecimento passivo uma forma acessível e de longo prazo para garantir que um número maior de famílias beneficie de condições de saúde, comodidade e reduzido consumo de energia elétrica.

A ausência de habitação digna para a população mais carenciada do Brasil é uma preocupação constante. Porém, apesar de ser uma problemática antiga, somente recebeu maior atenção quando o poder político, no início do século XX, se preocupou com o surgimento de epidemias, doenças infecciosas e contagiosas. Com o passar dos anos, várias tentativas para melhorar as habitações sociais foram incentivas pelos governos e pelo mercado, entre elas algumas estabelecidas por programas de Habitação de Interesse Social (Siqueira, 2008).

Os programas de Habitação de Interesse Social (HIS) são oferecidos pelos governos federal e estaduais, que disponibilizam moradias apropriadas e satisfatórias com os objetivos de reduzir a desigualdade social e proporcionar apropriações de áreas urbanas de forma organizada e planeada (Caixa, 2021). Esses programas (Figura 117) são essenciais dado o grande défice habitacional do Brasil. Para que as construções sejam consideradas aptas para os moradores é importante que apresentem um bom comportamento térmico e desempenho energético, melhorando o nível de conforto e minimizando assim os gastos de energia com climatização. Por se tratar de projetos de construção padronizados, muitas vezes não é dada importância às condições climáticas locais, com consequências no conforto térmico e no desempenho energético. Desta forma, ainda que as construções sejam mais económicas, acabam muitas vezes por não garantir os níveis de salubridade necessários, com prejuízos para a saúde dos ocupantes, além de uso desnecessário ou excessivo de sistemas de climatização.



Figura 117 – Programa atual de habitação de interesse social do governo federal

Estudos como o dos pesquisadores Triana, et al. (2018) informam sobre os níveis de eficiência energética e desempenho térmico alcançados com planeamentos adequados. Estes autores desenvolveram um projeto com habitações de baixo custo com o intuito de apresentar a importância de se considerarem as mudanças climáticas na elaboração desses projetos. O estudo confirma que a observação da variação do clima é fundamental, permitindo assim a otimização dos projetos e a melhoria do conforto dos usuários. Num estudo anterior, Triana, et al. (2015) analisaram projetos a fim de

avaliarem a eficiência energética e o desempenho térmico de Habitação de Interesse Social. Nesse trabalho comprovou-se o baixo desempenho térmico destes edifícios, nomeadamente a falta de sombreamento, o alto coeficiente de absorção de calor, principalmente na cobertura e nas paredes, a não consideração dos parâmetros de transmissão térmica e o não cumprimento de requisitos de ventilação e de iluminação natural.

Mesquita e Kós (2017) criaram um projeto para melhorar a qualidade do espaço coletivo, procurando minimizar os problemas urbanos por meio do investimento fornecido pelo governo federal através dos programas sociais. Os autores propuseram estratégias para garantir o conforto e o desempenho energético, nomeadamente a reformulação dos projetos, tornando-os mais flexíveis de forma a melhor atenderem às necessidades de cada família. Também apresentam um conjunto de alterações que permitem a redução de gastos nas construções, com incremento em cerca de 50% do tamanho do ambiente interno das edificações com o mesmo valor de investimento e com melhorias na eficiência energética.

Com foco na melhoria da eficiência energética nas HIS, Tubelo, et al. (2018) acompanharam três construções em três diferentes cidades do Brasil e, por meio de simulações, analisaram o isolamento térmico das paredes e do telhado juntamente com as taxas de infiltração. Os resultados obtidos pelos autores indicaram que é possível melhorar a eficácia do conforto térmico em até 97%, porém, com um custo 50% superior. De forma semelhante, Dalbem, et al. (2019) verificaram a possibilidade de se transformar um projeto de Habitação de Interesse Social numa casa passiva, que cumprisse com o desempenho mínimo de conforto térmico determinado pelo Regulamento Brasileiro de Eficiência Energética (RTQ-R). Após as modificações de isolamento térmico e aprimoramento das janelas, constatou-se que a economia de energia foi de 69% para a cidade de Curitiba-PR, 55% no município de Santa Maria-RS e 47% na região de Florianópolis-SC. Contudo, as soluções a implementar sofreram um acréscimo de custo imediato de 39% e 42%.

6.3.2 GEOMETRIA

Para a realização do estudo utilizou-se como referência uma casa de habitação social (Figura 118). A habitação possui 4 divisões, nomeadamente 1 sala de estar, 2 quartos e 1 casa de banho. A sala de estar possui 14,99 m² de área, o banheiro 2,25 m², o primeiro quarto (Quarto 1) 9,09 m² e o segundo (Quarto 2) 9,52 m². Existe ainda um espaço de 1,26 m² destinado à circulação, totalizando 37,11 m² de área total.



Figura 118 - Perspetivas da casa de habitação social modelada como caso de estudo

A Figura 119 mostra os alçados frontal, posterior e laterais, possibilitando uma observação externa da construção. A cobertura é composta por telhas cerâmicas assentes numa estrutura metálica, com duas águas com inclinação de 35%. A laje de piso é em betão regularizado.

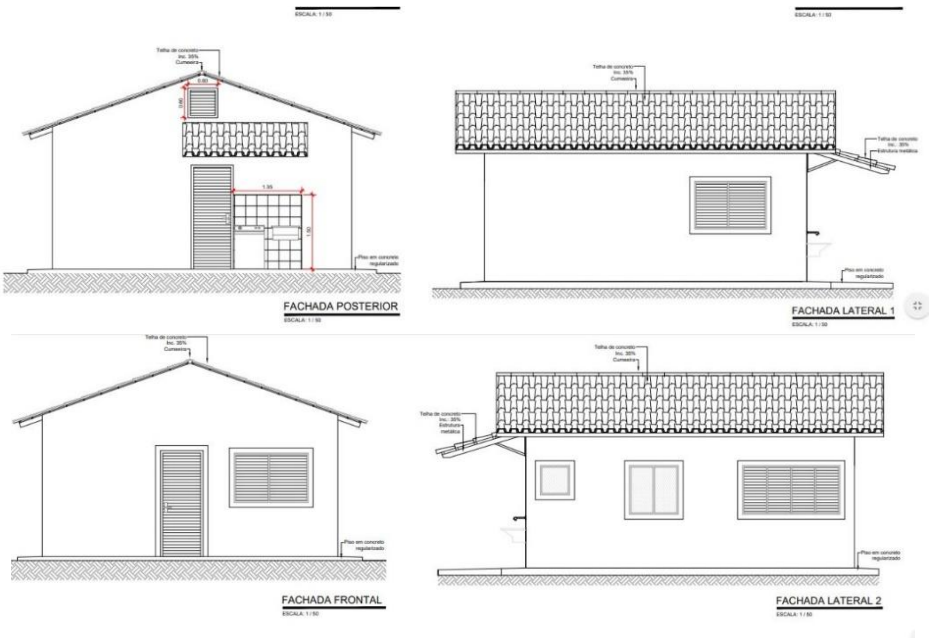


Figura 119- Alçados frontal, posterior e laterais

A casa de habitação social foi modelada no DesignBuilder, seguindo as mesmas características do projeto apresentado anteriormente (Figura 120), sendo necessário incluir 2 blocos. O primeiro bloco inclui o ambiente interior da residência subdividido em quatro zonas: sala, casa de banho, quarto 1 e quarto 2. Já o segundo bloco corresponde à cobertura do imóvel com a definição de inclinação, cumeeira, beiral e materiais. A inclusão deste bloco permite a modelação do desvão como uma zona não aquecida.

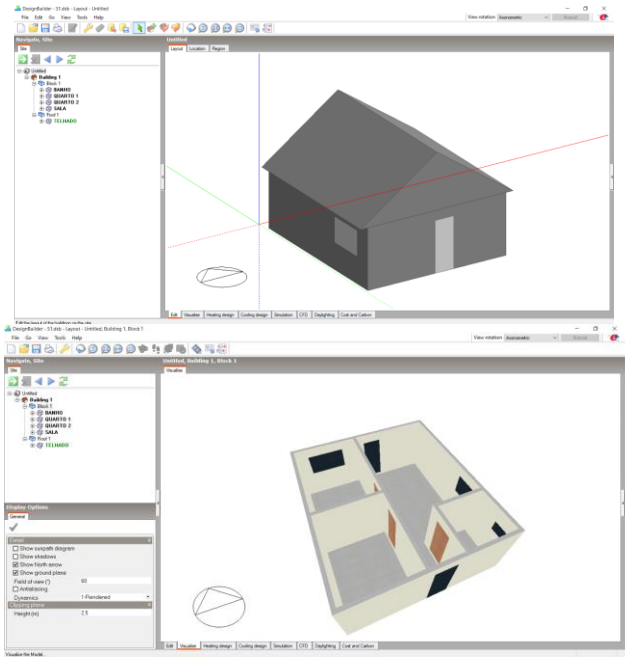


Figura 120 - Modulação no DesignBuilder da casa de habitação social com as suas divisões internas

6.3.3 MATERIAIS E ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

A metodologia adotada neste trabalho inclui a avaliação de diferentes alternativas construtivas, selecionadas entre aquelas que são as mais habituais no contexto da construção de casas de habitação social. Assim, foram realizadas simulações nas quais se aplicaram diferentes materiais e elementos construtivos, com o objetivo de realizar uma análise de sensibilidade que permita avaliar as soluções que mais impactam na temperatura interna dos ambientes da casa de habitação social.

Relativamente às paredes, são estudados quatro tipos diferentes de blocos, diferenciados quanto ao material e à sua dimensão - blocos cerâmicos e de betão, com espessura de 9 cm ou de 19 cm, todas com acabamento interior e exterior em argamassa de cimento. Nas coberturas, foram consideradas três variações, uma com telhas cerâmicas do tipo "Plan", uma termoacústica e outra ondulada em fibrocimento. Para as janelas admitiram-se 2 tipos: janela em aço do tipo veneziana e a janela em vidro temperado. A Tabela 34 sintetiza a descrição dos elementos construtivos que foram simulados.

Tabela 34 – Tipos de elementos construtivos

Paredes	
Parede 1	Bloco cerâmico com espessura de 9 cm, com reboco em argamassa de cimento nas faces internas e externas
Parede 2	Bloco em betão com espessura de 9 cm, com reboco em argamassa de cimento nas faces internas e externas
Parede 3	Bloco cerâmico com espessura de 19 cm, com reboco em argamassa de cimento nas faces internas e externas
Parede 4	Bloco em betão com espessura de 19 cm, com reboco em argamassa de cimento nas faces internas e externas
Coberturas	
Cobertura 1	Telhado com telhas cerâmicas tipo "Plan"
Cobertura 2	Telhado com telhas termoacústicas, com faces internas e externas em chapa de aço galvanizado e preenchimento interno em EPS.
Cobertura 3	Telhado com telhas onduladas em fibrocimento
Janelas	
Janela 1	Janela em aço do tipo veneziana
Janela 2	Janela em vidro temperado

A Tabela 35 mostra as propriedades dos materiais dos diferentes elementos construtivos usados na simulação (espessura, condutibilidade térmica, calor específico e massa volúmica), bem como o coeficiente de transmissão térmica, sem incluir as resistências térmicas superficiais. A janela 2 corresponde a uma solução de vidro simples com 8 mm de espessura (fator solar de 83%).

Tabela 35 – Propriedades térmicas dos materiais utilizados

Elemento	Esp. (mm)	λ (W/m.K)	ρ (kg/m³)	Cp (J/kg.K)
Parede 1				
Reboco externo	20	1,15	2000	1000
Bloco cerâmico	90	0,90	1600	920
Reboco interno	20	1,15	2000	1000
Parede 2				
Reboco externo	20	1,15	2000	1000
Bloco em betão	90	1,75	2400	1000
Reboco interno	20	1,15	2000	1000
Parede 3				
Reboco externo	20	1,15	2000	1000
Bloco cerâmico	190	0,90	1600	920
Reboco interno	20	1,15	2000	1000
Parede 4				
Reboco externo	20	1,15	2000	1000
Bloco em betão	190	1,75	2400	1000
Reboco interno	20	1,15	2000	1000
Cobertura 1				
Telha cerâmica	7	1,00	1800	920
Cobertura 2				
Telha aço galvanizado externa	5	55,00	7800	460
EPS	30	0,046	10	1400
Telha aço galvanizado interna	5	55,00	7800	460
Cobertura 3				
Telha fibrocimento	6	0,95	1900	840
Janela				
Aço	2	72,00	7900	530

Legenda:

Esp – Espessura [mm]

C_p – Calor Específico [J/kg.K]

λ – Condutibilidade térmica [W/m.K]

ρ – Massa volúmica [kg/m³]

6.3.4 GANHOS INTERNOS E INFILTRAÇÃO DE AR

Os ganhos internos foram agrupados num único valor constante de 4,0 W/m^2. Esta simplificação segue as recomendações de vários regulamentos e normas internacionais para a simulação térmica e energética de edifícios residenciais.

Para estimar os caudais de ventilação numa casa de habitação social foi realizado um estudo de caso numa edificação com essas características, tendo sido realizados cinco ensaios, permitindo assim avaliar a variabilidade e aumentar a fiabilidade nos resultados.

O edifício selecionado como caso de estudo foi uma casa de habitação social localizada em Palmas-TO (10° 15’ 50” S, 48° 20’ 12” W) (Figura 121 A). Seguindo a arquitetura típica de uma casa de habitação social, a mesma possui uma área total de 37,11 m², dividida em 4 compartimentos: 1 sala de estar/cozinha, 2 quartos e 1 casa de banho. Apesar de a metodologia adotada para a realização dos ensaios (método gás traçador – técnica do declive) ser adequada apenas a espaços que podem ser considerados como uma única zona, considera-se que a reduzida dimensão do espaço e o facto de as portas interiores estarem sempre abertas durante o ensaio permitem aplicá-la nesta fração.

Uma vez que o gás traçador foi o dióxido de carbono (CO_2), as medições decorreram com a residência sem qualquer ocupante. O gás traçador (CO_2) foi libertado no local, uniformemente em todos os comportamentos, por recurso a um extintor, procurando-se sempre obter uma mistura o mais homogénea possível. Para tal, a liberação do gás foi feita perto dos três ventiladores de teto, localizados um em cada quarto e outro na sala de estar, para facilitar a mistura, como evidenciado na Figura 121 (B).

O equipamento para a medição da concentração de CO_2 (medidor / sensor portátil) ficou posicionado na sala de estar, próximo do centro geométrico da casa e das portas de ligação entre divisões. A posição do equipamento está representada na Figura 121 (B).

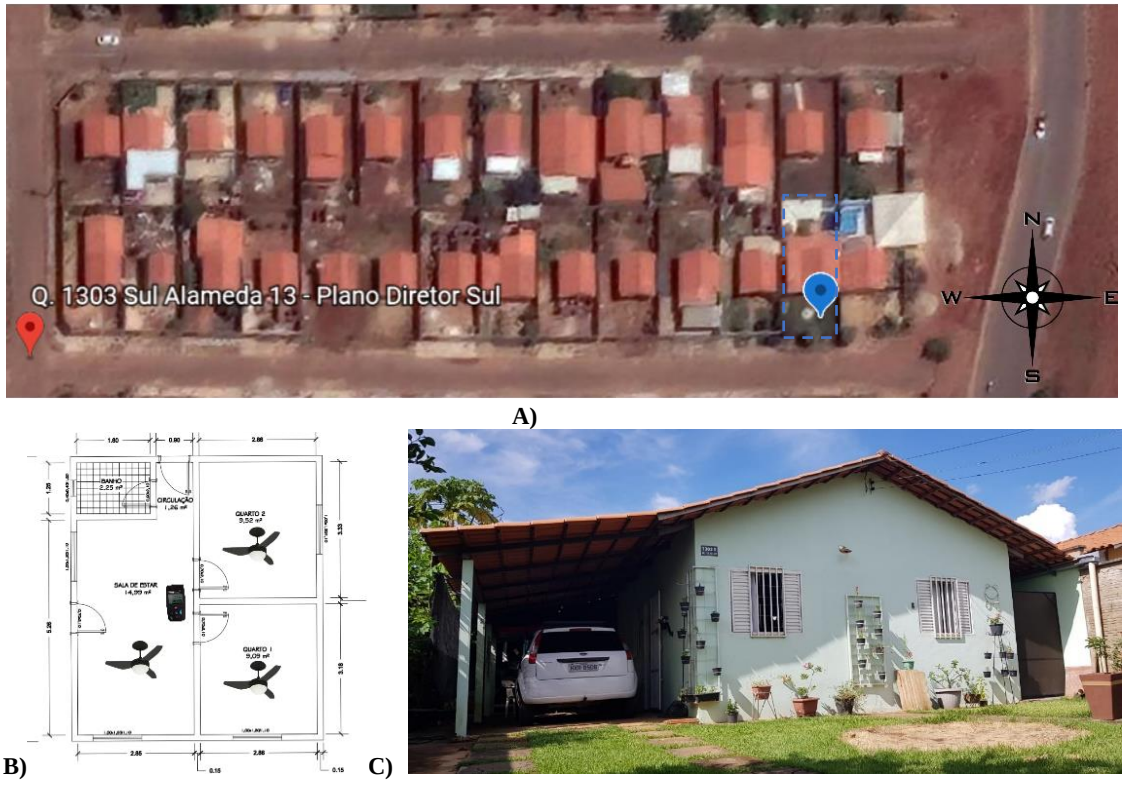


Figura 121 - Local do ensaio: A) localização da casa (Google Earth); B) planta; C) habitação *in loco*

Em termos construtivos, as paredes exteriores da casa são construídas com uma alvenaria convencional. Os pisos são de materiais cerâmicos e os forros do tipo PVC. Relativamente aos vãos, as janelas são do modelo venezianas de correr de aço e as portas batentes, com veneziana de aço (Figura 122).

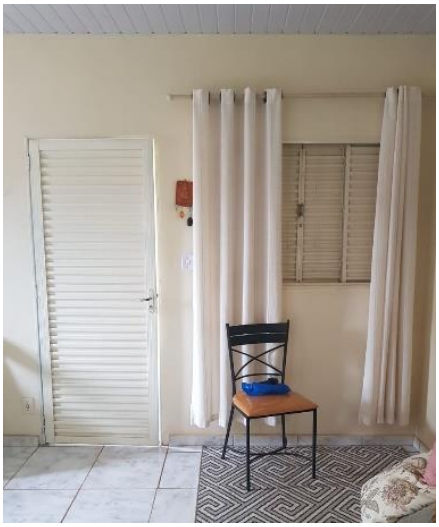


Figura 122 - Porta, janela, piso e forro da construção.

A metodologia adotada inclui a realização de cinco ensaios em condições idênticas, permitindo, assim, avaliar uma eventual variabilidade associada quer às condições de ensaio, quer ao próprio procedimento, incluindo o facto de se estar a assumir uma única zona. Deste modo, aumenta-se a robustez da metodologia e o consequente grau de fiabilidade dos resultados.

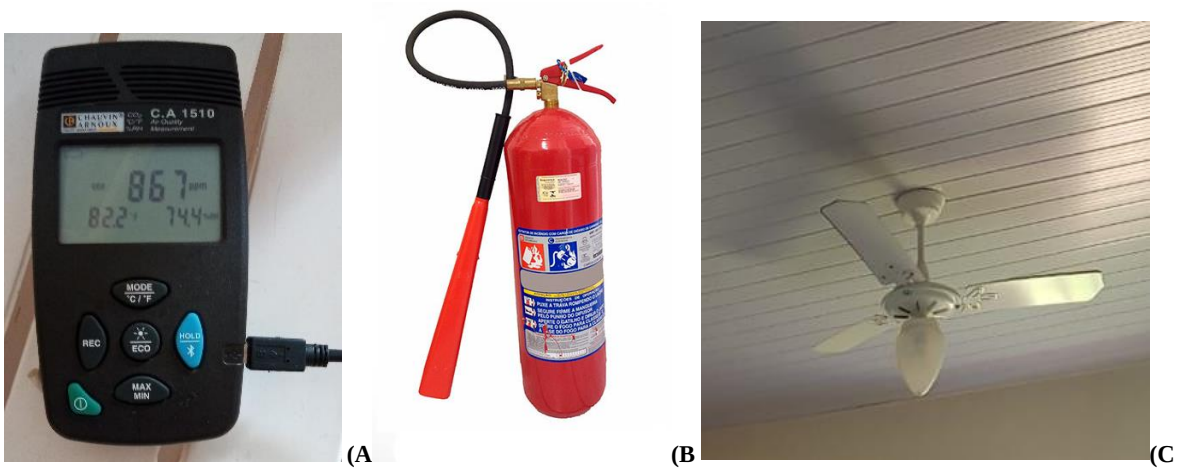
Durante os cinco ensaios foi também registada a temperatura e a humidade relativa do ar. A temperatura média em todos os ensaios foi de 28,4 °C, enquanto a humidade relativa média foi de 75%. A Tabela 36 mostra os valores médios da temperatura e da humidade relativa por ensaio, verificando-se que as condições são muito semelhantes nos cinco ensaios.

Tabela 36 - Níveis de temperatura e humidade relativa conforme horário e ensaio realizado.

Ensaio	Horário	Méd. Temperatura (°C)	Méd. Humidade Relativa (%)
1	9h17	28,5	74
2	9h14	27,0	75
3	11h50	28,1	74
4	13h34	29,1	75
5	15h46	29,1	75
	Méd. Total	28,4	75

Para o presente estudo foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Medidor da concentração de dióxido de carbono, temperatura e humidade relativa / sensor portátil – Modelo Chauvin Arnoux CA 1510. Este equipamento foi usado para medir a concentração de CO_2, a temperatura e a humidade relativa do ar (Figura 123 A). O equipamento apresenta as seguintes precisões: ± 50 ppm ou ± 3% do valor medido, ± 0,5 °C e ± 2%, respetivamente para a medição da concentração de CO_2, da temperatura e da humidade relativa do ar. Já as resolução são de 1 ppm, 0,1 ºC e 0,1%, respetivamente.
- Extintor de CO_2 – utilizou-se um equipamento portátil para libertar dióxido de carbono (Figura 123 B).
- Ventiladores de teto – foram utilizados os três ventiladores de teto já existentes na casa para facilitar a distribuição do gás traçador nos ambientes, garantindo-se, desta forma, uma mistura homogénea do ar (Figura 123 C).



(A **(B** **(C**

Figura 123 - Equipamentos utilizados: A) sensor portátil / Data-logger (concentração de CO_2, temperatura e humidade relativa); B) extintor de CO_2; C) ventilador de teto.

Todos os ensaios tiveram uma duração superior a uma hora, seguindo as recomendações da norma ASTM E 741 (ASTM, 2000). A Figura 124 mostra o decaimento do logaritmo da concentração de dióxido de carbono ao longo dos cinco ensaios. Destaca-se, desde logo, que em todos os ensaios se obteve um bom ajuste linear ao decaimento do logaritmo da concentração de dióxido de carbono, sempre com um coeficiente de determinação, R^2, superior a 0.97. A partir do valor das renovações horárias, foi ainda estimado o caudal de ventilação, sabendo que o volume interior da casa é de 111,3 m^3.

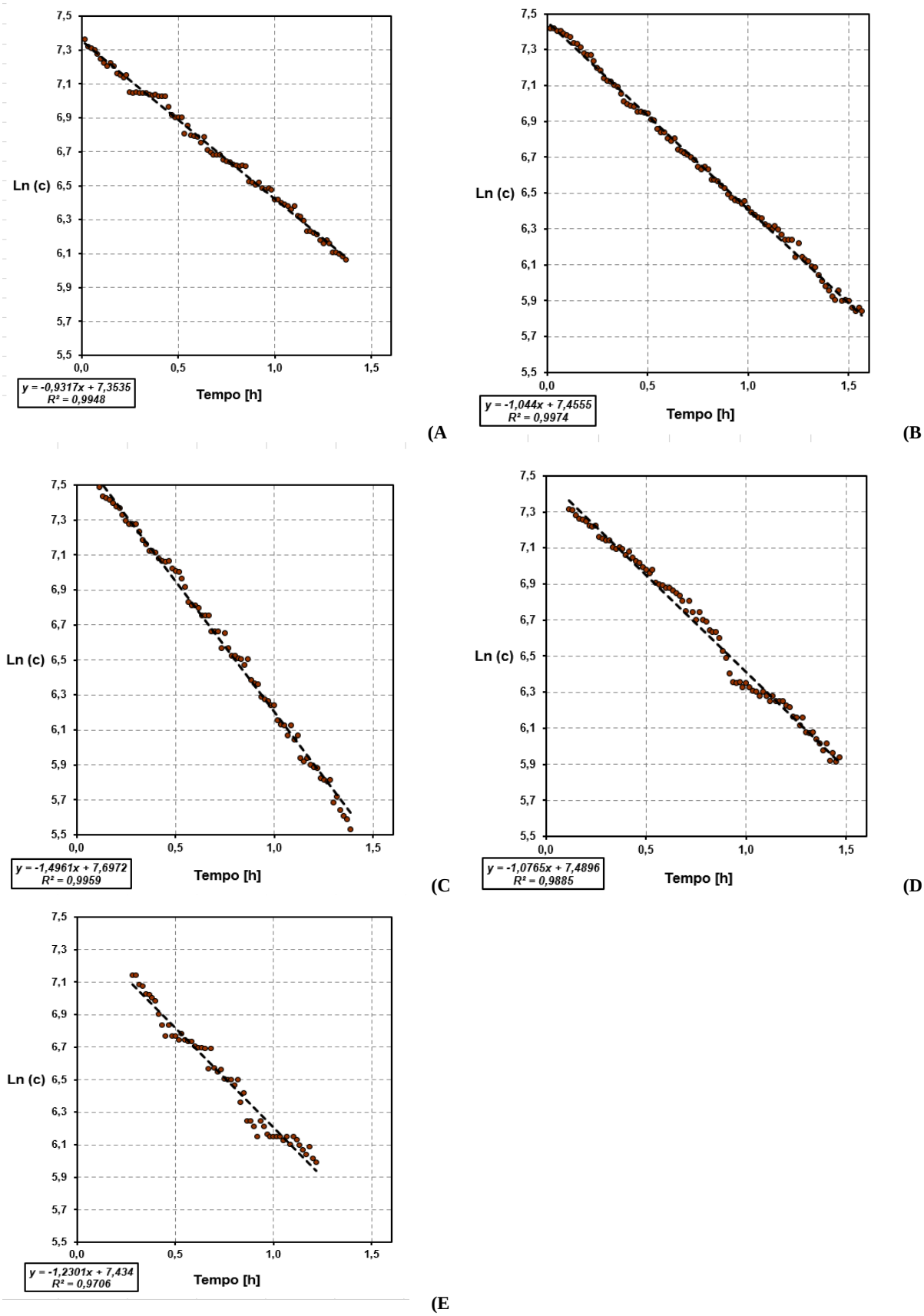


Figura 124- Variação do logaritmo da concentração de dióxido de carbono ao longo do período de ensaio: A) ensaio 1; B) ensaio 2; C) ensaio 3; D) ensaio 4; e E) ensaio 5.

A Tabela 37 mostra os resultados obtidos nos cinco ensaios, incluindo a taxa de renovação horária e o respetivo caudal de ventilação. Apresenta-se, ainda, o valor da média, desvio-padrão e coeficiente de variação das duas grandezas.

Tabela 37- Resultados da taxa de renovação horária (RPH) e do caudal de ventilação de todos os ensaios realizados

	RPH (h^{-1})	**Caudal (m^3/h)**
Ensaio 1	0,93	103,5
Ensaio 2	1,04	115,8
Ensaio 3	1,50	167,0
Ensaio 4	1,08	120,2
Ensaio 5	1,23	136,9
Média	1,16	128,7
Desvio Padrão	0,22	24,5
Coef. de variação	19%	

O valor médio das renovações horárias foi de 1,16 h^{-1}. Trata-se de um valor médio elevado, tendo em conta que se trata exclusivamente de infiltração de ar, uma vez que a casa não dispõe de nenhum dispositivo específico de ventilação (quer para a admissão, quer para a extração de ar). Este valor foi considerado posteriormente nas simulações como sendo a taxa de renovação de ar. Embora num clima quente como o de Palmas-TO uma taxa de renovação de ar elevada possa até ser benéfica, especialmente se ocorrer durante a noite, o mesmo não acontece no caso da utilização de um sistema de climatização. Nesse caso, poderá ocorrer uma perda de eficiência dos sistemas de climatização que venham a ser instalados, por ação da infiltração de ar não controlada.

Por outro lado, confirmou-se que a confiança nos resultados está dependente do número de ensaios realizados, uma vez que a variabilidade encontrada tem alguma expressão. O coeficiente de variação dos resultados dos cinco ensaios foi de 19%. Diferentes aspetos podem ter contribuído para esta variabilidade, nomeadamente: diferenças em termos de condições-fronteira, ou seja, no gradiente de temperatura entre o interior e o exterior e variações na direção e velocidade do vento; dificuldades em homogeneizar a mistura do ar no interior da fração, devido às condições geométricas do espaço que condicionam os fluxos de ar, podendo resultar num comportamento diferente do de uma única zona; a combinação destes dois fatores.

6.3.5 BASE DE DADOS CLIMÁTICOS

Para o tratamento dos dados é necessário a identificação do ano climático de referência para cada localidade. Entre os diversos conceitos e métodos existentes sobre o tema, considerou-se que o ideal seria o TMY (Typical Meteorological Year). Resumidamente, dispondo-se de uma sequência de dados históricos de vários anos, o método consiste em, para cada estação e cada mês, excluir-se sucessivamente os anos mais quentes e mais frios, até que reste apenas um, considerado como o mês típico do local. O TMY será composto pelos 12 meses selecionados, podendo estes serem de diferentes anos.

Assim, nas simulações realizadas para comparação de técnicas de arrefecimento passivo em casas de habitação social em Palmas – TO utilizaram-se as tabelas geradas por Roriz (2012), por, segundo levantamento bibliográfico anterior, serem estas as que dispõem de mais informação (Figura 125).

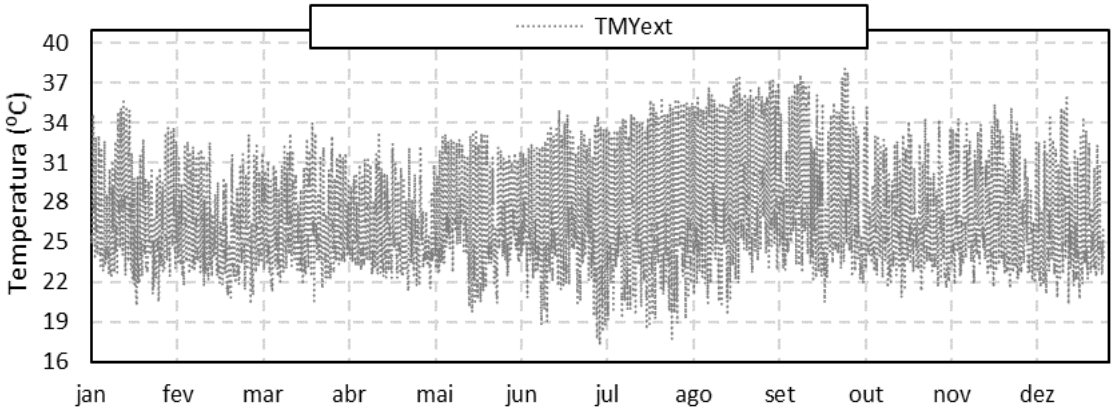


Figura 125- Temperatura exterior do TMY

6.4 ESTRATÉGIA PARA A AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UMA CASA DE HABITAÇÃO SOCIAL

6.4.1 CENÁRIOS SIMULADOS

Para avaliar o comportamento térmico da casa de habitação social foram realizadas 24 simulações, nas quais se aplicaram diferentes tipos de materiais e elementos construtivos, selecionados em função dos testes realizados anteriormente para identificação das alternativas que mais impacto causam no desempenho do edifício. O objetivo é avaliar as soluções mais interessantes em termos de contributo passivo para o conforto térmico interior da habitação. A Tabela 38 apresenta a codificação adotada para as simulações e respetivas opções de elementos construtivos.

Tabela 38 – Parâmetros variáveis relevantes das simulações

SIMULAÇÃO	Bloco de Vedação		Espessura de Bloco		Janela		Cobertura		
	Cerâmico	Betão	9cm	19cm	Aço	Vidro	Cerâmica	Termoacústica	Fibrocimento
S1-BcE9JaCc	X		X		X		X		
S2-BbE9JaCc		X	X		X		X		
S3-BbE19JaCc		X		X	X		X		
S4-BcE19JaCc	X			X	X		X		
S5-BcE9JvCc	X		X			X	X		
S6-BbE9JvCc		X	X			X	X		
S7-BbE19JvCc		X		X		X	X		
S8-BcE19JvCc	X			X		X	X		
S9-BcE9JaCt	X		X		X			X	
S10-BbE9JaCt		X	X		X			X	
S11-BbE19JaCt		X		X	X			X	
S12-BcE19JaCt	X			X	X			X	
S13-BcE9JvCt	X		X			X		X	
S14-BbE9JvCt		X	X			X		X	
S15-BbE19JvCt		X		X		X		X	
S16-BcE19JvCt	X			X		X		X	
S17-BcE9JaCf	X		X		X				X
S18-BbE9JaCf		X	X		X				X
S19-BbE19JaCf		X		X	X				X
S20-BcE19JaCf	X			X	X				X
S21-BcE9JvCf	X		X			X			X
S22-BbE9JvCf		X	X			X			X
S23-BbE19JvCf		X		X		X			X
S24-BcE19JvCf	X			X		X			X

Legenda:

Bc	Bloco Cerâmico	Jv	Janela de Vidro
Bb	Bloco de Betão	Cc	Cobertura Cerâmica
E9	Espessura de 9cm	Ct	Cobertura Termoacústica
E19	Espessura de 19cm	Cf	Cobertura Fibrocimento
Ja	Janela de Aço		

Cada uma das 24 simulações descritas anteriormente foi combinada com a aplicação de três técnicas de arrefecimento passivo: "P", pintura da envolvente opaca com tinta refletante; "V", ventilação natural cruzada; e "P+V", junção das duas anteriores, conforme indica a Tabela 39. Consequentemente, foram realizadas um total de 96 simulações.

Tabela 39 – Técnicas de arrefecimento passivo utilizadas nas simulações

Técnica de Arrefecimento Passivo	**Legenda**
Pintura da envolvente opaca com tinta refletante	P
Ventilação natural cruzada por ação do vento	V
Pintura com tinta refletante + Ventilação natural cruzada	P+V

Para as simulações em que se aplicou a técnica de arrefecimento passivo de pintura da envolvente opaca com tinta refletante foram considerados valores de emissividade igual a 0,9 ($\varepsilon = 0,9$) e de absortância igual a 0,2 ($\alpha = 0,2$) em toda a envolvente (paredes e cobertura). Para a técnica de ventilação natural cruzada por ação do vento foi alterado o valor de renovação de ar por hora, de 1,16h^{-1} (valor utilizado para simulações sem a técnica de ventilação) para um rph de 4,0 h^{-1}. Em todos os casos foi considerado um ganho energético interno de 4 W/m^2. Quando se associaram a duas técnicas de arrefecimento passivo (P+V) adotaram-se ambos os procedimentos anteriores, ou seja, considerou-se emissividade e absortância de 0,9 e 0,2, respetivamente, e rph de 4,0 h^{-1}.

6.4.2 NORMAS UTILIZADAS

6.4.2.1 Norma ASHRAE standard 55 – método adaptativo

Atualmente existem duas formas de abordar a questão do conforto térmico interior. A tradicional, que corresponde a uma abordagem analítica do problema, baseada em resultados experimentais obtidos em câmaras climáticas e que utiliza a equação de balanço térmico do organismo, considerando regime estacionário (ISO, 2005). A segunda abordagem encara este processo em regime dinâmico, no qual um indivíduo pode interagir física e psicologicamente com o ambiente térmico que o rodeia. Este método considera que o indivíduo tem um papel fundamental na criação do seu próprio ambiente térmico através da forma como interage com o meio ambiente ou como modifica os seus comportamentos e hábitos para adaptar gradualmente as suas expectativas às condições ambientais existentes. Desta última abordagem resultam os modelos adaptativos de conforto.

A norma ASHARAE 55 (2017) refere uma metodologia adaptativa para avaliação do conforto em espaços interiores aplicável quando os ocupantes têm a possibilidade de ajustar as condições térmicas através do abrir e fechar das janelas, a sua atividade metabólica encontra-se entre 1,0 a 1,3 met e podem modificar o seu vestuário em função das condições térmicas internas e externas dentro do intervalo de 0,5 a 1,0 clo. Outra condição de aplicação deste modelo é que a temperatura exterior esteja entre os 10 °C e os 33,5 °C.

O modelo define uma gama de temperaturas operativas aceitável (Figura 126), definida em função da temperatura média exterior. A temperatura operacional interna (t_0) pode ser estabelecida para 80% de aceitabilidade ou para 90% quando for exigido um padrão elevado de eficiência térmica. Neste trabalho foi considerado o intervalo que permite maior flexibilidade (80% de aceitabilidade), por ser o mais

adequado ao caso de estudo (casa de habitação social). A temperatura média do ar exterior ($t_{mda(out)}$) pode ser calculada a partir da temperatura exterior registada num intervalo entre 7 e 30 dias.

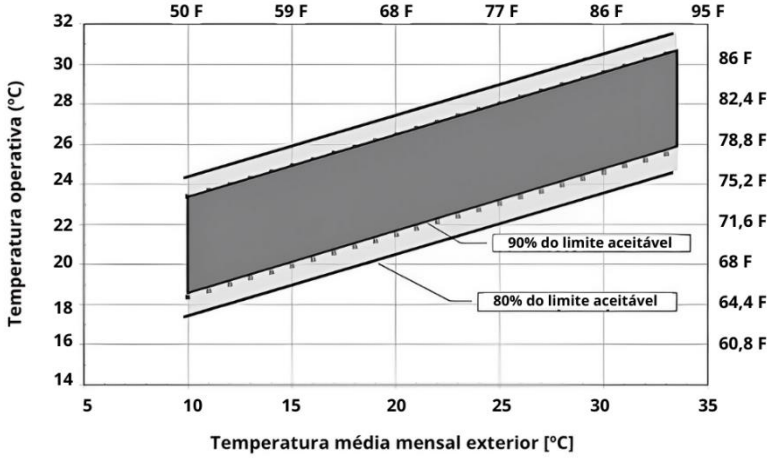


Figura 126- Temperatura operativa aceitável para os espaços naturalmente condicionados. Fonte: ASHRAE 55, 2017, p. 15.

Os limites de temperaturas admissíveis para uma aceitabilidade de 80% podem ser calculados a partir das seguintes equações:

$$\text{Limite superior de aceitabilidade de 80\% (°C)} = 0{,}31.\overline{t_{mda(out)}} + 21{,}3 \quad (21)$$

$$\text{Limite inferior de aceitabilidade de 80\% (°C)} = 0{,}31.\overline{t_{mda(out)}} + 14{,}3 \quad (22)$$

6.4.2.2 Norma EN 16798 – método adaptativo

A norma EN 16798-2 (2019) também apresenta um modelo de conforto adaptativo (Figura 127), aplicável a edifícios sem sistemas mecânicos de arrefecimento.

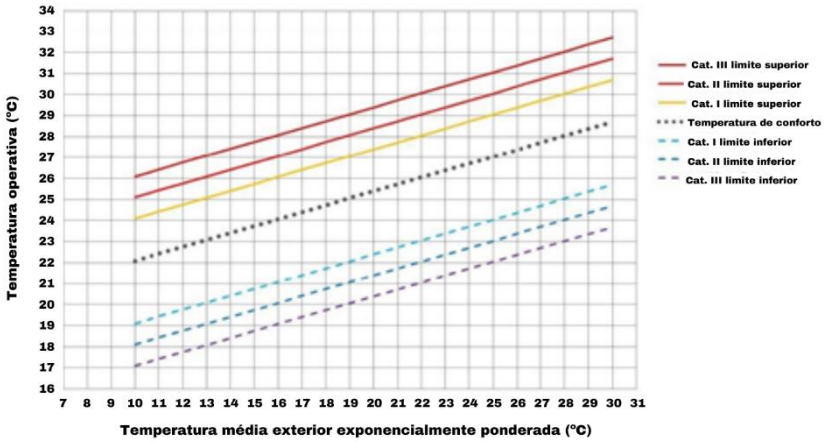


Figura 127 - Temperatura operativa interior em função da temperatura média exterior exponencialmente ponderada, em edifícios sem sistemas de arrefecimento mecânico. Fonte: EN 16798-1, 2019, p. 32

O modelo adaptativo da norma EN 16798-2 (2019) define os limites para a temperatura operativa interior, Θ_0, em função da temperatura média exterior exponencialmente ponderada, Θ_{rm}. Este modelo á aplicável em espaços em que os utilizadores podem operar a abertura de janelas e em que não existem equipamentos de ar condicionado. Além disso, a utilização do modelo restringe-se a situações em que os ocupantes apresentam um metabolismo entre 1,0 e 1,3 met.

A norma EN 16798-2 (2019) estabelece três categorias (I, II e III) para os edifícios, correspondendo-lhes limites de aceitabilidade distintos, nomeadamente:

I. Alto nível de expectativa. Recomendada para locais cujos ocupantes são muito sensíveis e frágeis e necessitam de cuidados especiais;

II. Nível normal de expectativa. Recomendada para edifícios novos e reabilitados;

III. Nível de expectativa aceitável e moderado. Recomendada para edifícios existentes.

As equações que traduzem os limites de aceitabilidade para cada categoria (I, II e III) estão sintetizadas na Tabela 40.

Tabela 40 – Limites de temperatura operativa. Fonte: EN 16798, 2019.

Categoria I	Limite superior:	$\Theta_{i\,max} = 0{,}33\Theta_{rm} + 18{,}8 + 2$
	limite inferior:	$\Theta_{i\,min} = 0{,}33\Theta_{rm} + 18{,}8 - 3$
Categoria II	Limite superior:	$\Theta_{i\,max} = 0{,}33\Theta_{rm} + 18{,}8 + 3$
	limite inferior:	$\Theta_{i\,min} = 0{,}33\Theta_{rm} + 18{,}8 - 4$
Categoria III	Limite superior:	$\Theta_{i\,max} = 0{,}33\Theta_{rm} + 18{,}8 + 4$
	limite inferior:	$\Theta_{i\,min} = 0{,}33\Theta_{rm} + 18{,}8 - 5$

Em que:

Θ_i = valor limite da temperatura operativa interior, (ºC)

Para o presente trabalho utilizou-se a categoria II como referência dos limites superior e inferior da faixa de conforto. Apesar do contexto de habitação com custos controlados poder ter enquadramento na categoria III, optou-se pela categoria II para privilegiar o conforto interior.

6.4.3 Definição de indicadores de desempenho

A Fundação Nacional de Qualidade (FNQ, 2018) define os indicadores como sendo uma forma matemática de quantificar e qualificar o desempenho ou resultado de um processo, analisando a sua eficiência e comparando-o com as suas metas. Os indicadores são importantes para a avaliação do conforto térmico, pois, através deles, é possível comparar o desempenho de diferentes alternativas construtivas e estabelecer valores de referência, eventualmente associando-os a diferentes níveis de exigência/desempenho.

Desta forma, foram estabelecidos quatro indicadores de desempenho (Figura 128) para a avaliação das alternativas construtivas que foram simuladas:

- Indicador 1: média em graus (ºC) da diferença dos valores fora da zona de conforto relativamente aos limites da zona de conforto (Equação 23);
- Indicador 2: percentagem (%) de valores que se encontram nas zonas de desconforto (Equação 24);
- Indicador 3: média em graus (ºC) da diferença dos resultados contidos dentro da zona de conforto até ao limite superior (Equação 25);
- Indicador 4: média em horas (h) consecutivas fora da faixa de conforto (Equação 26).

$$Indicador\ 1\ (°C) = \frac{\Sigma Td}{\Sigma Nd} \tag{23}$$

$$Indicador\ 2\ (\%) = \frac{\Sigma Nd}{Nt} \times 100 \tag{24}$$

$$Indicador\ 3\ (°C) = \frac{\Sigma (Tf - Tc)}{\Sigma Nc} \tag{25}$$

$$Indicador\ 4\ (Hrs) = \frac{\Sigma Qd}{\Sigma Hd} \tag{26}$$

em que:

Td	[°C]	Temperatura fora da faixa de conforto (desconforto)
Nd	[-]	Número de vezes que ocorreu desconforto
Nt	[-]	Número total de medições
Nc	[-]	Número de vezes dentro da faixa de conforto
Tc	[°C]	Temperatura dentro da faixa de conforto
Tf	[°C]	Temperatura sobre a faixa limítrofe de conforto
Qd	[h]	Quantidade de horas consecutivas em desconforto
Hd	[-]	Número de vezes de horas consecutivas em desconforto

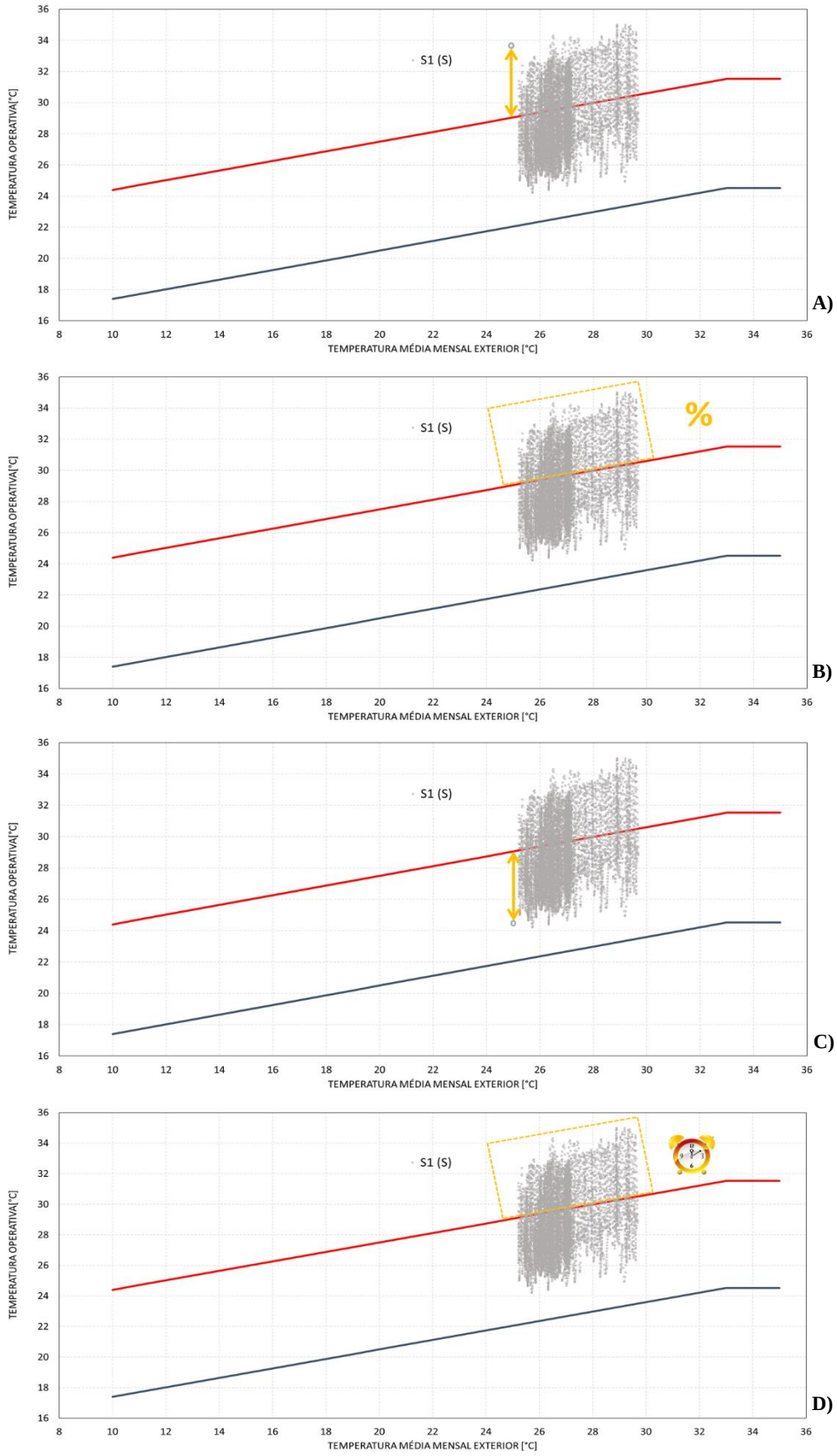


Figura 128 – Indicadores de desempenho: A) indicador 1; B) indicador 2; C) indicador 3 e D) indicador 4

6.5 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA CASA DE HABITAÇÃO SOCIAL

6.5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO REFERÊNCIA (S)

6.5.1.1 Metodologia de interpretação dos resultados

Para apresentar a metodologia implementada e os resultados das simulações de uma forma lógica e compreensiva, esta secção detalha apenas os procedimentos para a simulação S1 (bloco de vedação cerâmica, espessura de blocos de 9 cm, janela em aço e cobertura com telha cerâmica). Os resultados completos para todas as 24 simulações podem ser consultados no Anexo I deste trabalho.

A metodologia implementada inclui três etapas fundamentais: 1) avaliação das variações de temperatura interna no período analisado; 2) avaliação dos resultados de acordo com a norma de conforto europeia EN 16798 (2019); 3) avaliação dos resultados de acordo com a norma de conforto americana ASHRAE 55 (2017).

Para a primeira etapa, a Figura 129 apresenta os resultados da simulação da temperatura interna ao longo do ano. A primeira evidência que resulta da análise da figura prende-se com a estabilidade da temperatura ao longo do ano, não se percebendo nenhum efeito sazonal. Neste cenário, a temperatura média alcançada foi de 28,94 ºC. A menor temperatura obtida foi 24,21 ºC, enquanto a máxima foi 35,01 ºC. No dia de maior temperatura a amplitude foi de 6,6 ºC. Estes dados reforçam a necessidade e a pertinência dos estudos realizados, sobretudo pelas altas temperaturas registadas no interior, que evidenciam a urgência da investigação de meios, técnicas e ferramentas que possam contribuir no sentido de melhorar o conforto dos usuários e/ou minimizar o consumo de energia para arrefecimento.

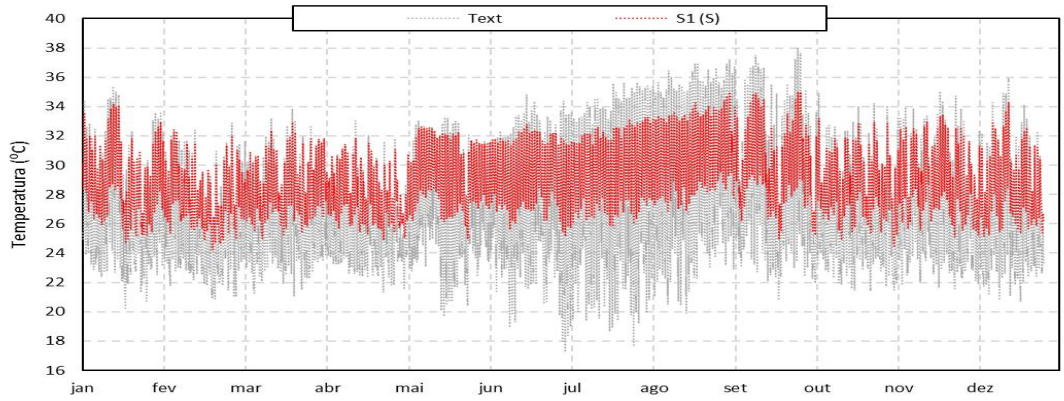


Figura 129 – Variação anual da temperatura operativa interior para a simulação S1 (S) e a temperatura exterior

Nas etapas 2 e 3 procedeu-se à avaliação do conforto térmico interior, aplicando-se a metodologia adaptativa proposta na EN 16798 e na ASHRAE 55, respetivamente. Para tal, os resultados das simulações foram comparados com os respetivos limites de conforto e foram calculados os 4 indicadores descritos na secção 6.4.3, nomeadamente: Indicador 1 (média em graus celsius (ºC) da diferença dos valores fora da zona de conforto relativamente aos limites da zona de conforto (Equação 23)); Indicador 2 (percentagem (%) de valores que se encontram nas zonas de desconforto (Equação 24)); Indicador 3 (média em graus celsius (ºC) da diferença dos resultados entre a zona de conforto até ao limite superior (Equação 25)); Indicador 4 (média em horas (h) consecutivas fora da faixa de conforto (Equação 26)).

A avaliação foi realizada para os limites correspondentes à categoria II de conforto, na norma europeia, e para o critério de aceitabilidade de 80%, na norma americana ASHARE 55. Os resultados e os limites

de conforto definidos pelas normas estão graficamente representados na Figura 130 para a simulação S1 (S). Como era expectável, os resultados evidenciam coerência entre os dois modelos. Ambos confirmam que o controlo e/ou minimização do sobreaquecimento é o grande desafio nestes edifícios.

A Tabela 41 sintetiza a informação relativamente ao cálculo dos 4 indicadores de desconforto:

Tabela 41 – Resultado dos indicadores para simulação S1 (S)

S1 (S)	**I_1 (ºC)**	**I_2 (%)**	**I_3 (ºC)**	**I_4 (h)**
EN 16798	1,09	22,1	2,53	7,32
ASHRAE 55	1,55	36,0	1,94	10,01

O indicador 1 reflete a diferença média da temperatura na zona de desconforto face aos limites de conforto. Os resultados mostram que a norma europeia é mais tolerante, resultando num indicador de desconforto de 1,09 ºC, enquanto a ASHRAE 55 apresenta um valor de 1,55ºC, ou seja 0,46 ºC superior ao da norma europeia. Esta diferença é visível na representação gráfica na Figura 130 em que a mancha de desconforto no modelo da ASHRAE está claramente mais afastada do limite de conforto.

Por sua vez, o indicador 2 avalia a percentagem de tempo em que se está na zona de desconforto. Mais uma vez, a norma americana aponta para um maior desconforto, quando comparado com EN 16798, já que 36% dos valores simulados estão na zona de desconforto, contra 22% da norma europeia.

O indicador 3 quantifica quanto o conforto se aproxima da linha ótima, ou seja, a diferença média entre as temperaturas dentro da zona de conforto e a linha limite. Com base no modelo da EN 16798 existe mais conforto no interior da habitação uma vez que indicador I3 vale 2,53 ºC, enquanto no modelo da ASHRAE 55 é de 1,94 ºC, ou seja, está mais próximo do limite a partir do qual se considera existir desconforto por sobreaquecimento.

Por último, o indicador 4 avalia a média do número de horas consecutivas fora da faixa de conforto, ou seja, permite quantificar quão prolongado é o período de desconforto. Este indicador apresenta um valor de 7,3h para a norma europeia e de 10,0h para a ASHRAE. Mais uma vez o modelo da ASHRAE mostra-se mais exigente, mas ambos sugerem períodos muito prolongados de desconforto no interior do edifício.

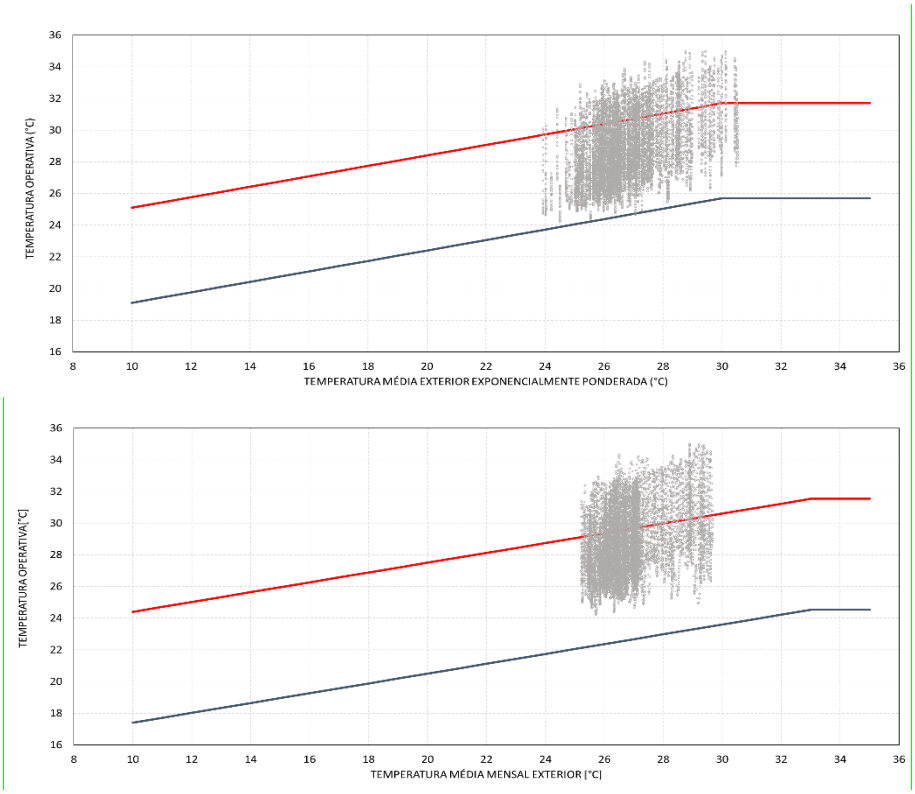


Figura 130 – Resultados da temperatura operativa para a simulação S1 (S) com as linhas limite de conforto para as normas EN 16798 (superior) e ASHRAE 55 (inferior).

6.5.1.2 Análise dos parâmetros construtivos do edifício

Nesta secção tecem-se comentários quanto aos parâmetros construtivos do edifício: 1) a vedação, 2) a espessura dos blocos de vedação, 3) o tipo de janela e 4) o tipo de cobertura. Utilizando a simulação S1(S) como referência, analisou-se as temperaturas internas no período de janeiro a dezembro em relação às simulações: S2 (S), S4 (S), S5 (S), S9 (S) e S17 (S), por estas possuírem apenas um parâmetro distintivo em relação à simulação de referência. Como critério de comparação, além das diferenças de temperaturas internas, foram utilizados os 4 indicadores de conforto térmico descritos na secção 6.4.3. Os indicadores seguiram as diretrizes das normas EN 16798 e ASHRAE 55 e os valores obtidos foram comparados entre si. As tabelas e gráficos que apoiaram as conclusões apontadas neste capítulo podem ser consultados no Anexo I deste trabalho.

Quanto à vedação, esta é subdividida em dois tipos: a vedação por bloco de betão e a vedação por bloco cerâmico, que foram comparadas para as simulações S1 (S) e S2 (S), já que a única diferença entre elas é o bloco utilizado para vedar. O bloco de betão foi mais eficiente no período diurno para o preconizado nas duas normas (Tabela 42). O gráfico que demonstra as temperaturas obtidas no período de um ano com o uso do bloco de betão e de cerâmico está exposto na Figura 131. No período noturno o bloco cerâmico revelou uma eficiência superior, mas pouco relevante, observável pelo indicador 3, indicador este que enfatiza melhorias no período da noite e que foi o único indicador no qual o bloco cerâmico obteve melhores resultados, mesmo assim com valores menos expressivos do que a melhoria que o betão apresenta durante o dia.

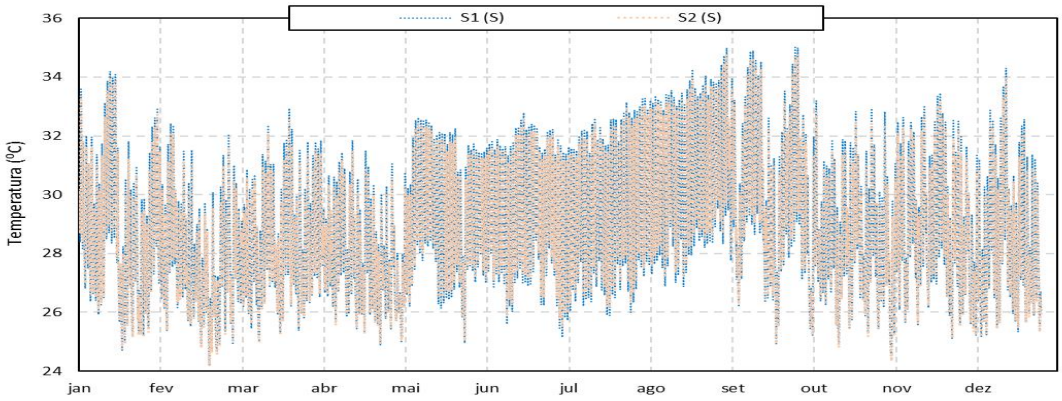


Figura 131 – Variação anual da temperatura operativa interior para S1 (S) e S2 (S)

Considerando as adequações de cada norma, pelos seus métodos de determinação de conforto por parâmetros e limites da zona de conforto, ambas as vedações obtiveram melhores resultados na norma europeia (EN 16798).

Tabela 42 – Resultado dos Indicadores para S1 (S) e S2 (S) segundo as normas EN 16798 e ASHRAE 55

Simulação	**EN 16798**				**ASHRAE 55**			
	I_1 (ºC)	**I_2 (%)**	**I_3 (ºC)**	**I_4 (h)**	**I_1 (ºC)**	**I_2 (%)**	**I_3 (ºC)**	**I_4 (h)**
S1 (S)	1,09	22,1	2,53	7,32	1,55	36,0	1,94	10,01
S2 (S)	0,97	20,4	2,48	7,10	1,43	34,6	1,90	9,98

Para a comparação entre a espessura dos blocos é utilizada a simulação S1 (S) como referência e a simulação S4 (S), já que a única alteração entre estes cenários é a espessura do bloco cerâmico, sendo S1 (S) 9 cm e S4 (S) 19 cm.

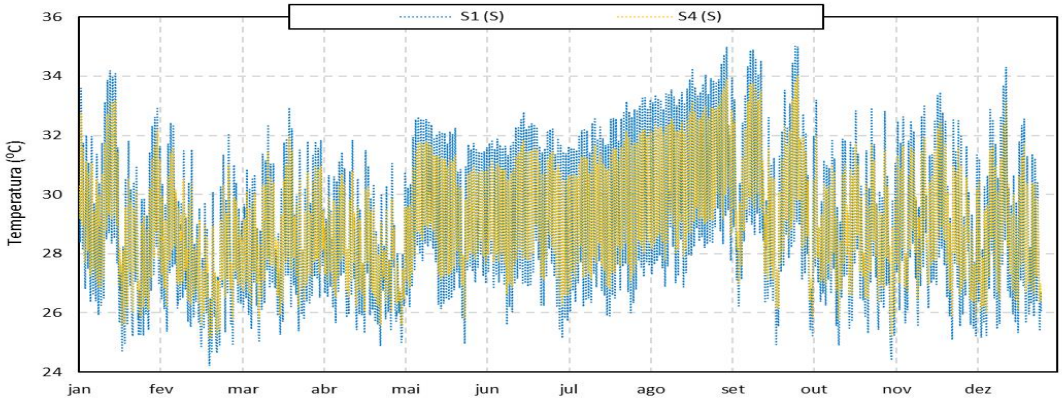


Figura 132 – Variação anual da temperatura operativa interior para S1 (S) e S4 (S)

Com o bloco de 9 cm as temperaturas máximas foram superiores no período diurno e inferiores no noturno (Figura 132). Os indicadores, com resultados apontados na Tabela 43, mostram que as vedações com blocos de 19 cm são consideravelmente superiores às de 9 cm no tocante a diminuir a taxa de desconforto para as duas normas aplicadas, obtendo o melhor desempenho no período diurno. A adequação normativa foi melhor nos parâmetros europeus (EN 16978).

Tabela 43 – Resultado dos indicadores para S1 (S) e S4 (S), segundo as normas EN 16798 e ASHRAE 55

Simulação	EN 16798				ASHRAE 55			
	I_1 (ºC)	I_2 (%)	I_3 (ºC)	I_4 (h)	I_1 (ºC)	I_2 (%)	I_3 (ºC)	I_4 (h)
S1 (S)	1,09	22,1	2,53	7,32	1,55	36,0	1,94	10,01
S4 (S)	0,66	15,0	2,07	6,07	1,09	33,8	1,51	10,16

Na comparação entre os tipos de janela as simulações utilizadas foram a S1 (S), com janelas de aço, e a S5 (S), com janelas de vidro. No registo das temperaturas diárias obtidas, a janela de aço obteve temperaturas máximas menores no período diurno e temperaturas mínimas inferiores no período noturno (Figura 133). O aço também foi mais eficaz do que o vidro quanto à melhoria de conforto, tanto no período diurno como noturno, conforme os indicadores (Tabela 44).

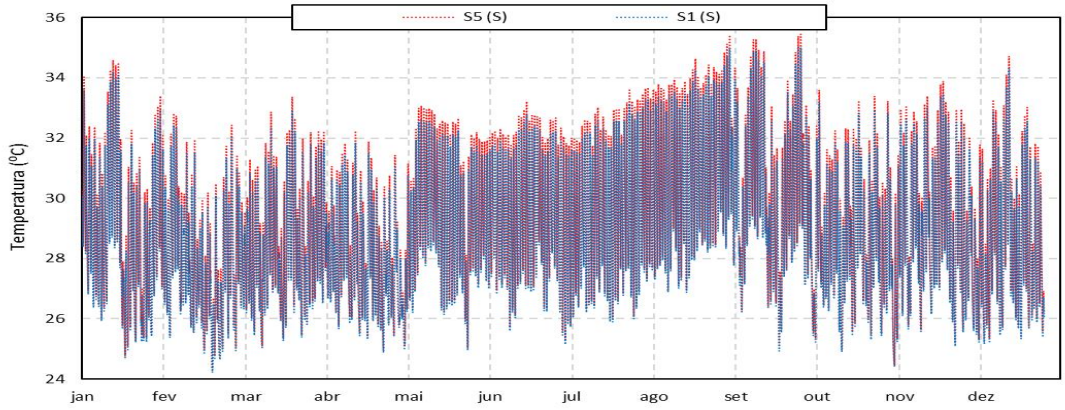


Figura 133 – Variação anual da temperatura operativa interior para S1 (S) e S5 (S)

Importante ressaltar que o aço, quando comparado ao vidro, foi o único componente que superou em todos os indicadores nas diversas combinações, demonstrando mais eficiência. No que concerne aos resultados obtidos pelos indicadores para cada norma, a EN 16798 apresentou resultados que indicam maior conforto, quando comparados aos da norma ASHRAE 55.

Tabela 44 – Resultado dos indicadores para S1 (S) e S5 (S), segundo as normas EN 16798 e ASHRAE 55

Simulação	EN 16798				ASHRAE 55			
	I_1 (ºC)	I_2 (%)	I_3 (ºC)	I_4 (h)	I_1 (ºC)	I_2 (%)	I_3 (ºC)	I_4 (h)
S1 (S)	1,09	22,1	2,53	7,32	1,55	36,0	1,94	10,01
S5 (S)	1,27	25,9	2,44	7,95	1,71	39,5	1,87	10,50

Por último, na comparação dos três tipos de cobertura analisaram-se os resultados das seguintes simulações: a) cobertura de telha cerâmica, simulação S1 (S), b) cobertura de telha termoacústica, simulação S9 (S) e c) cobertura de telha fibrocimento, simulação S17 (S). A maior temperatura foi atingida no período diurno com o uso da cobertura cerâmica e a menor no período noturno com o uso da cobertura de telha de fibrocimento, como mostra o gráfico na Figura 134. Com base nos indicadores (Tabela 45), o elemento construtivo de cobertura que apresentou melhor desempenho na melhoria de conforto geral foi a telha termoacústica (principalmente no período diurno). No entanto, a telha de fibrocimento obteve os melhores resultados do indicador 3, sugerindo assim melhor eficiência na

obtenção de condições de conforto durante a noite. A cobertura com telha cerâmica foi a que apresentou menor eficiência quanto ao conforto térmico.

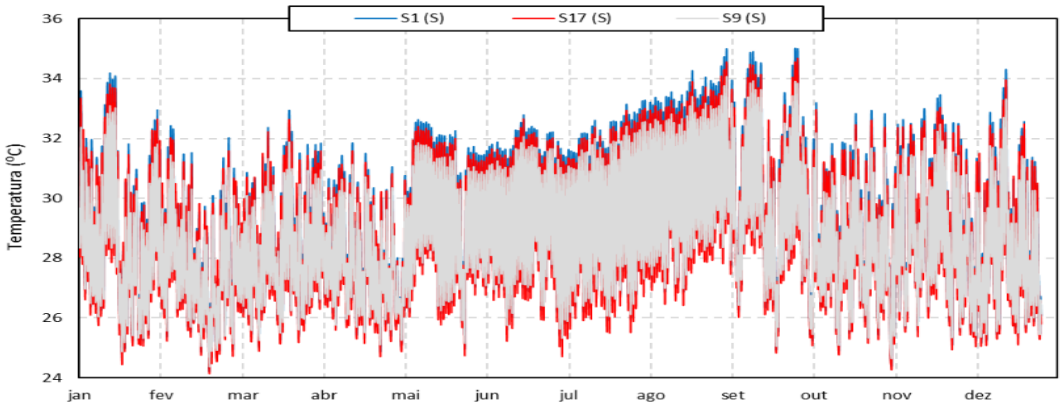


Figura 134 – Variação anual da temperatura operativa interior para S1 (S), S9 (S) e S17 (S)

Em relação às normas, novamente, os parâmetros e limites da europeia apresentaram melhores índices do que a norma americana em todas as simulações.

Tabela 45 - Resultado dos Indicadores de S1 (S), S9 (S) e S17 (S), segundo as normas EN 16798 e ASHRAE 55

Simulação	EN 16798				ASHRAE 55			
	I_1 (ºC)	I_2 (%)	I_3 (ºC)	I_4 (h)	I_1 (ºC)	I_2 (%)	I_3 (ºC)	I_4 (h)
S1 (S)	1,09	22,1	2,53	7,32	1,55	36,0	1,94	10,01
S9 (S)	0,73	15,1	2,45	6,09	1,19	30,2	1,86	9,50
S17 (S)	0,99	20,42	2,66	6,78	1,48	33,0	2,05	9,17

Para uma comparação final nesta secção, foram selecionadas a simulação que obtinha os melhores parâmetros de desempenho, S11 (S) – bloco de vedação em betão com espessura de 19 cm, janela de aço e cobertura termoacústica – e a que contemplava os materiais que apresentaram o pior desempenho, S5 (S) – bloco de vedação cerâmico com espessura de 9 cm, janela de vidro e cobertura cerâmica.

No gráfico da Figura 135, que representa as temperaturas de cada simulação de janeiro a dezembro, S5 (S) apresentou a temperatura mais alta durante o dia e a mais baixa durante a noite, ou seja, uma maior amplitude quando comparada à S11 (S). As maiores diferenças de temperatura registadas ocorreram no período diurno. Em relação à essas duas simulações a máxima variação de temperatura entre elas foi de 3,4 ºC e em média S11 (S) apresentou 0,5 ºC abaixo de S5 (S).

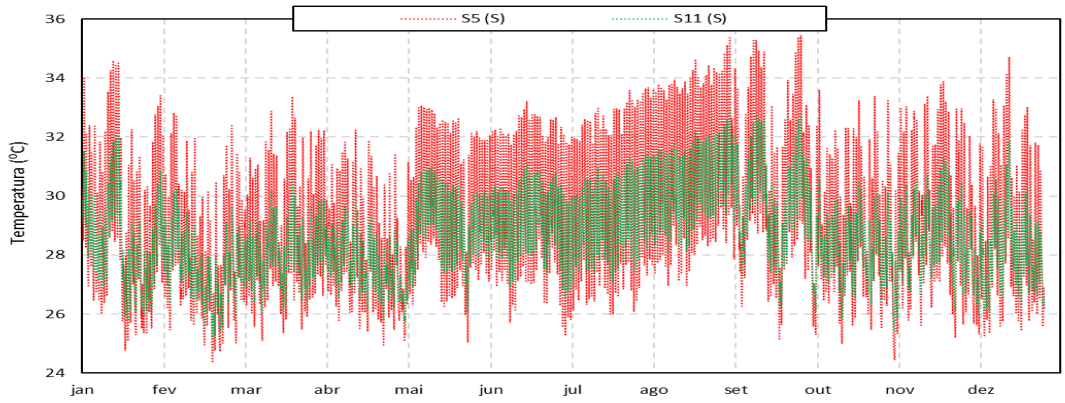


Figura 135 – Variação anual da temperatura operativa interior para S5 (S) e S11 (S)

A Tabela 46 apresenta os resultados dos indicadores, em que S11 (S) obtém melhores valores de conforto em todos e em ambas as normas, com exceção do indicador 3, como já explicado, atinente às temperaturas noturnas. A avaliação dos índices segundo a norma europeia apresenta resultados mais satisfatórios do que a americana nas duas simulações. Os resultados que estiveram mais e por mais tempo dentro dos parâmetros foram os obtidos pela S11 (S) na norma EN 16798, como demonstrado graficamente nas Figuras 136 e 137.

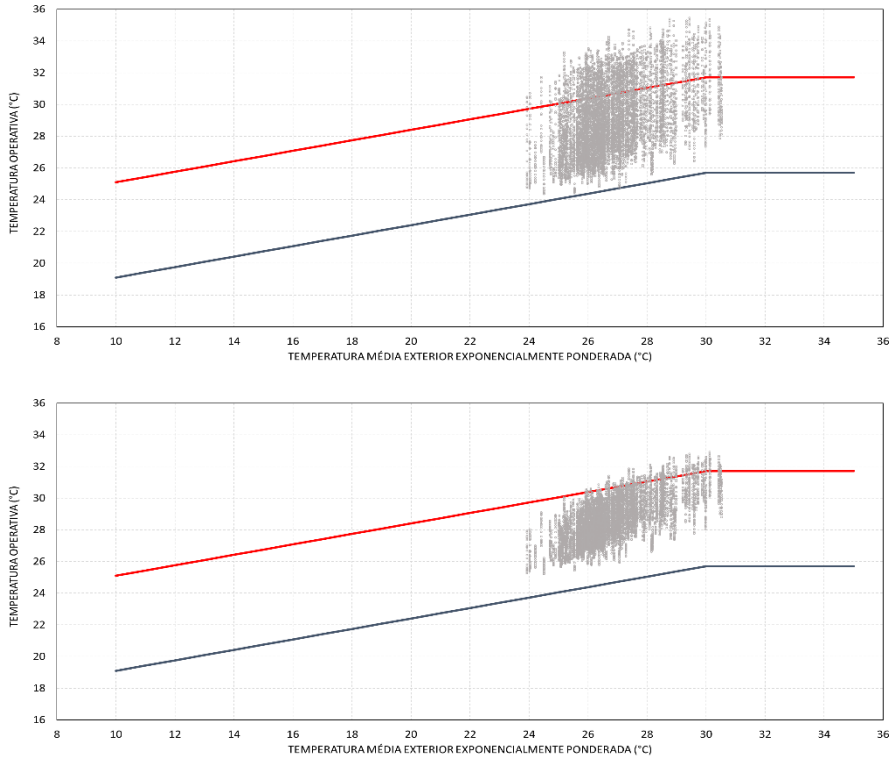


Figura 136 – Resultados da temperatura operativa para S5 (S) (superior) e S11 (S) (inferior) com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

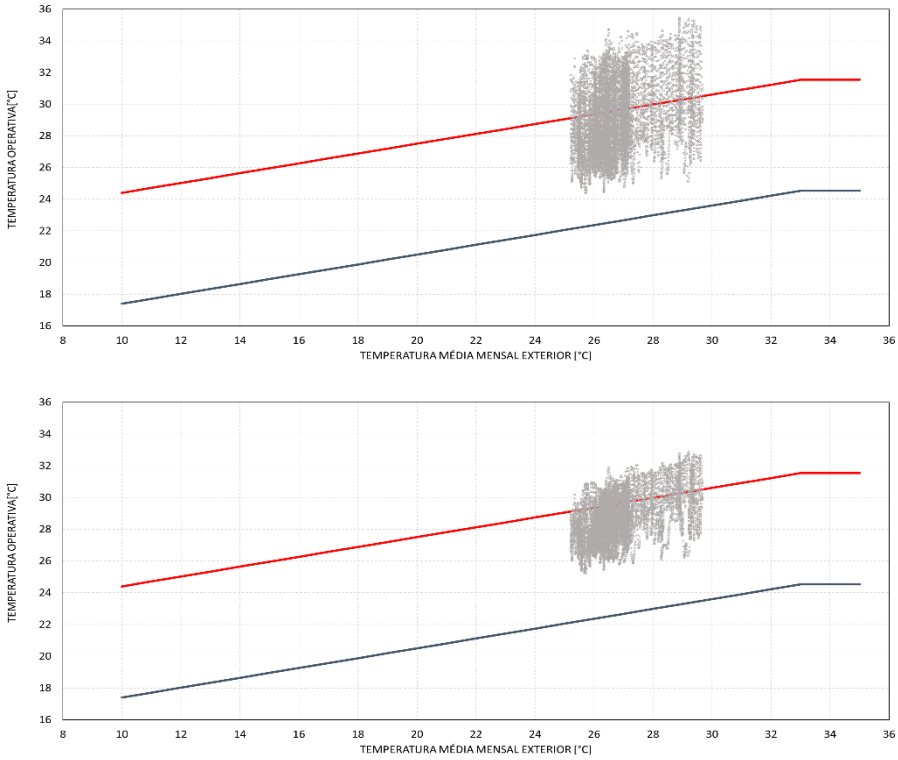


Figura 137 – Resultados da temperatura operativa para S5 (S) (superior) e S11 (S) (inferior) com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Tabela 46 – Resultado dos Indicadores para S5 (S) e S11 (S), segundo as normas EN 16798 e ASHRAE 55

Simulação	EN 16798				ASHRAE 55			
	I_1 (ºC)	I_2 (%)	I_3 (ºC)	I_4 (h)	I_1 (ºC)	I_2 (%)	I_3 (ºC)	I_4 (h)
S5 (S)	1,27	25,9	2,44	7,95	1,71	39,5	1,87	10,50
S11 (S)	0,37	5,2	2,13	5,14	0,76	23,7	1,51	9,71

6.5.2 APLICAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE ARREFECIMENTO PASSIVO (P), (V) E (P+V)

6.5.2.1 Simulação da estratégia com pintura da envolvente opaca com tinta refletante (P)

Nesta secção, os comentários são relativos à comparação entre a simulação S1 (S) e a simulação S1 (P), com definição da estratégia de pintura da envolvente opaca com tinta refletante. As avaliações apresentadas seguirão a ordem: 1) o gráfico das variações de temperatura interna de S1 (S) e S1 (P) no período analisado (Figura 138); 2) resultados quanto às normas de conforto europeia EN 16798 (2019) e americana ASHRAE 55 (2017), com recurso aos mesmos indicadores da secção anterior, apresentados na Tabela 47, bem como o intervalo definido de aceitabilidade de 80% na norma americana ASHARE 55 e a categoria II como faixa de conforto para a norma europeia, com resultados e limites graficamente expostos na Figura 139.

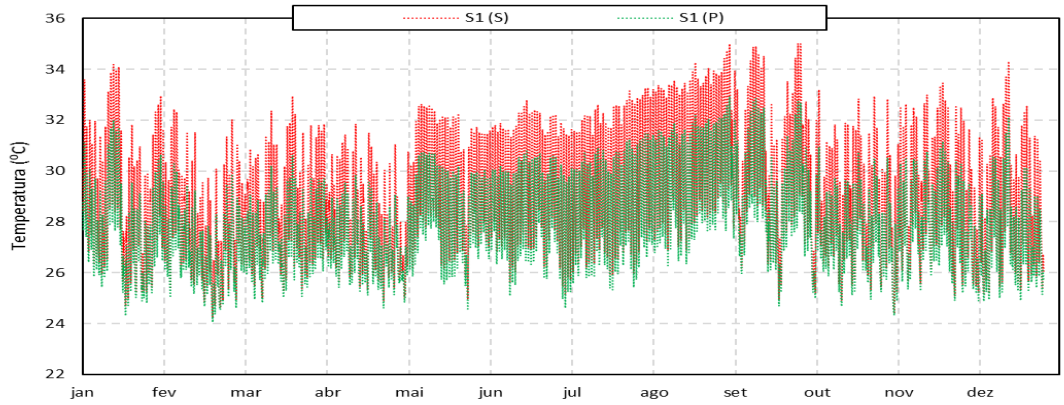


Figura 138 – Variação anual da temperatura operativa interior para S1 (S) e S1 (P)

No gráfico da Figura 138, em que se compara a temperatura interna da simulação S1 (P) e da S1 (S) durante um ano, é visível uma redução significativa nas temperaturas da simulação onde foi aplicada a tinta refletante (P), quando comparada a S1 (S) que não tem nenhuma técnica aplicada. Na S1 (P) a temperatura máxima obtida foi de 32,93 ºC e a mínima de 24,06 ºC, ambas menores do que as apresentadas pela S1 (S), a temperatura média foi de 27,88 ºC e a amplitude para o dia de maior temperatura foi de 4,4 ºC. Esta diminuição da amplitude em S1 (P) ocorreu devido a uma considerável diminuição dos picos máximos de temperatura com aplicação desta técnica, sendo o período diurno o de maior eficácia da técnica de pintura da envolvente opaca com tinta refletante (P).

Tabela 47 – Resultado dos indicadores para simulação S1 (P)

S1 (P)	I_1 (ºC)	I_2 (%)	I_3 (ºC)	I_4 (h)
EN 16798	0,40	3,8	2,90	4,35
ASHRAE 55	0,77	15,6	2,21	6,99

Com base no indicador 1, esta técnica é melhor avaliada considerando as exigências da norma europeia e apresentou um desempenho melhor em ambas as normas quando comparado com S1 (S), considerando que com a pintura os valores fora do conforto diminuíram 0,69 ºC nas referências da norma EN 16798 e 0,78 ºC da norma ASHRAE 55, quando comparados aos valores obtidos para S1 (S) presentes na Tabela 41.

Quanto ao percentual nas zonas de desconforto apontados pelo indicador 2, semelhante à S1(S), a norma americana foi a que determinou maior desconforto. No entanto, os valores do indicador 2 foram consideravelmente menores para S1 (P), atingindo apenas 3,8% pela norma europeia e 15,6% pela norma americana, quando comparadas com os valores do I_2 de S1 (S).

Os valores de 2,90 ºC e 2,21 ºC obtidos através do indicador 3 para as normas EN 16798 e ASHRAE 55, respetivamente, demonstram que a técnica S1 (P) confere também um melhor desempenho de conforto térmico no período noturno, quando comparado a S1 (S), também devido ao facto de o indicador 3, nas condições que se estão a analisar, refletir melhor o período noturno. Já o indicador 4 demonstrou que com a técnica de arrefecimento passivo (P) se obtiveram menos horas seguidas em desconforto, quando comparada a S1 (S), e que a norma europeia possui menor valor fora da faixa, com uma média de 4,35h seguidas em desconforto, enquanto a americana apresenta 6,99h. As tabelas e

gráficos que contribuíram para todas conclusões apontadas neste capítulo podem ser consultados no Anexo I deste trabalho.

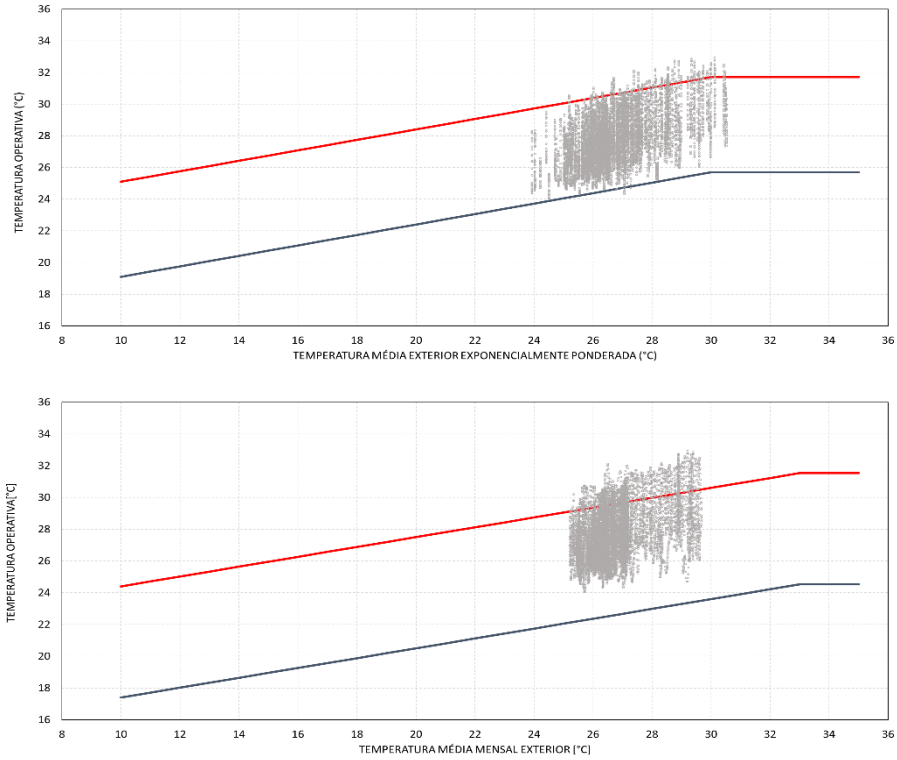


Figura 139 – Resultados da temperatura operativa para S1 (P) com as linhas limite de conforto para as normas EN 16798 (superior) e ASHRAE 55 (inferior).

6.5.2.2 Simulação da estratégia com ventilação natural (V)

A Figura 140 contempla as temperaturas internas obtidas na simulação da estratégia de ventilação natural S1 (V) comparadas com as temperaturas internas de S1 (P), nos mesmos intervalos dos gráficos anteriores. Os indicadores de acordo com cada norma estão elencados na Tabela 48, bem como a representação gráfica da faixa limite de conforto e o desempenho da técnica de ventilação para cada norma (Figura 141).

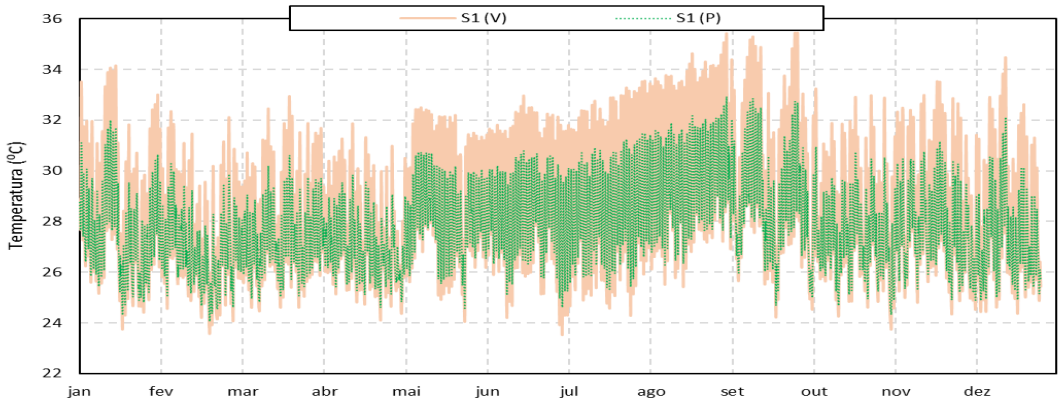


Figura 140 – Variação anual da temperatura operativa interior para S1 (V) e S1 (P)

Com a técnica S1 (V) a temperatura interna atingiu uma máxima de 35,45 ºC, uma mínima de 23,52 ºC e temperatura média de 28,40 ºC. No dia de maior temperatura a amplitude foi de 7,24 ºC. Estes valores, quando comparados a S1 (P) demonstram que a técnica de ventilação se mostra ligeiramente mais eficaz no período noturno, devido à maior redução das temperaturas nesse período, mas que no período diurno S1 (P) se apresenta significativamente mais eficiente, com maior redução da temperatura, evidente na morfologia do gráfico (Figura 140), que mostra S1 (V) com as temperaturas máximas mais elevadas e as mínimas mais baixas, e consequentemente, uma maior amplitude.

Tabela 48 – Resultado dos indicadores para simulação S1 (V)

S1 (V)	I_1 (ºC)	I_2 (%)	I_3 (ºC)	I_4 (h)
EN 16798	1,18	18,4	3,03	6,24
ASHRAE 55	1,63	28,9	2,39	8,07

Analisando a técnica de ventilação natural com base nos indicadores 1, 2, 3 e 4, a norma EN 16798, como nas anteriores simulações, obteve: um menor valor fora da zona de conforto (1), um menor percentual em zona de desconforto (2), uma melhoria dentro da faixa de conforto (3) e menos horas seguidas fora da faixa de conforto (4), comparativamente à norma americana ASHRAE 55 (Tabela 48).

Comparando as técnicas de pintura e ventilação, com base nos indicadores, a pintura S1 (P) consegue melhor avaliação, apresentando valores menores que S1 (V) em ambas as normas e em todos os indicadores, com exceção do indicador 3, no qual a ventilação apresenta melhores resultados de conforto, mostrando-se mais eficaz no período noturno. Como já referido, este facto advém de o indicador 3 representar melhor evolução no período noturno.

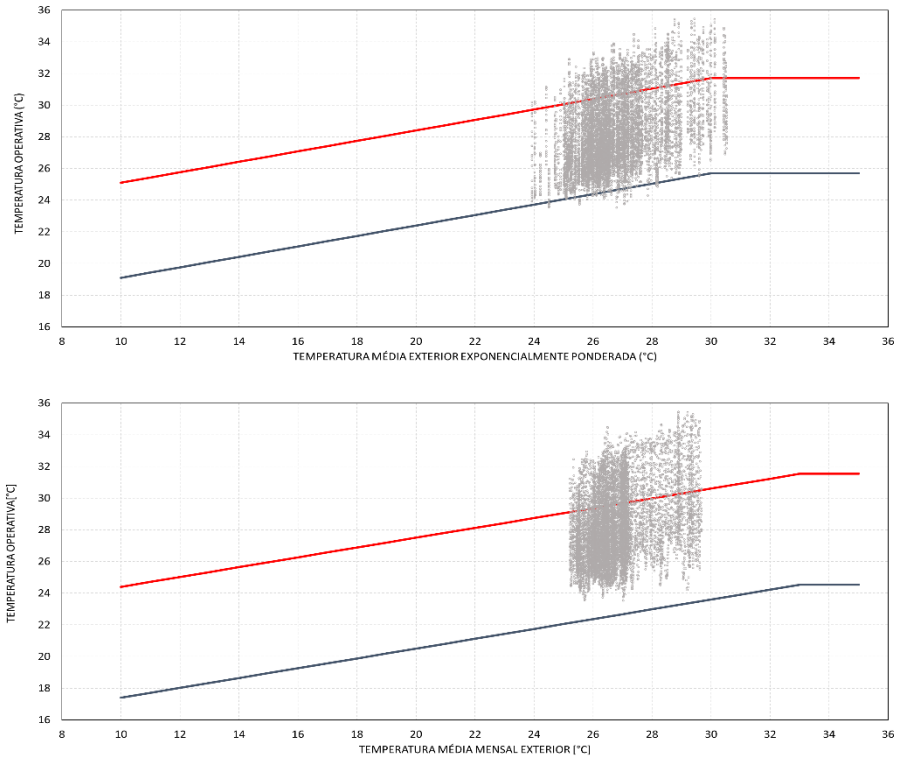


Figura 141 – Resultados da temperatura operativa para S1 (V) com as linhas limite de conforto para as normas EN 16798 (superior) e ASHRAE 55 (inferior).

6.5.2.3 Simulação da estratégia com pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada a ventilação natural (P+V)

Associando as técnicas de pintura da envolvente com tinta refletante e ventilação natural a S1 (P+V) obteve-se as temperaturas internas anuais representadas na Figura 142, comparativamente a S1 (V). Quando analisada a temperatura máxima de S1 (P+V) (33,84 ºC), verificou-se uma redução de 1,61 ºC em relação a S1 (V). A temperatura mínima também diminuiu, porém com menor diferencial, atingindo 23,13 ºC contra 23,52 ºC. A temperatura média foi de 27,60 ºC e a amplitude no dia de maior temperatura foi de 6,1 ºC. Com o uso simultâneo das técnicas (P+V) ocorreu uma redução significativa das altas temperaturas obtidas no período diurno quando comparado com aplicação somente da ventilação (V), resolvendo assim a faixa na qual se mostrava menos eficaz. Já no período noturno o sucesso quanto à diminuição da temperatura manteve-se quando se utilizaram as duas técnicas de arrefecimento conjuntamente.

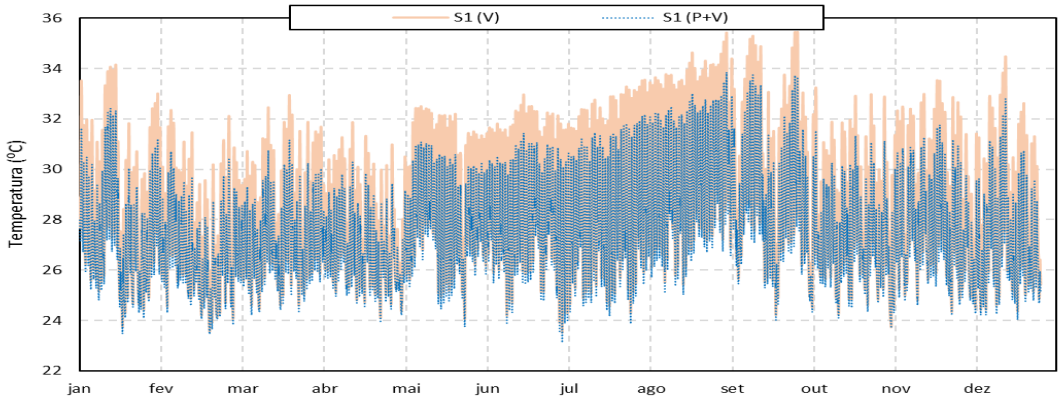


Figura 142 – Variação anual da temperatura operativa interior para S1 (V) e S1 (P+V)

Utilizando os mesmos indicadores para a avaliação da eficiência das técnicas anteriores, os resultados para a simulação S1 (P+V) são apresentados na Tabela 49. Já a Figura 143 representa graficamente os resultados comparados às linhas limite para zona de conforto de cada norma em estudo.

Tabela 49 – Resultado dos indicadores para simulação S1 (P+V)

S1 (P+V)	I_1 (ºC)	I_2 (%)	I_3 (ºC)	I_4 (h)
EN 16798	0,65	6,5	3,31	4,43
ASHRAE 55	1,03	16,5	2,63	6,25

Nesta simulação, assim como nas demais comentadas anteriormente, os melhores resultados obtiveram-se frente às exigências da norma EN 16798. Este cenário é comum a todas as 24 simulações efetuadas e podem ser consultados no Anexo I deste trabalho.

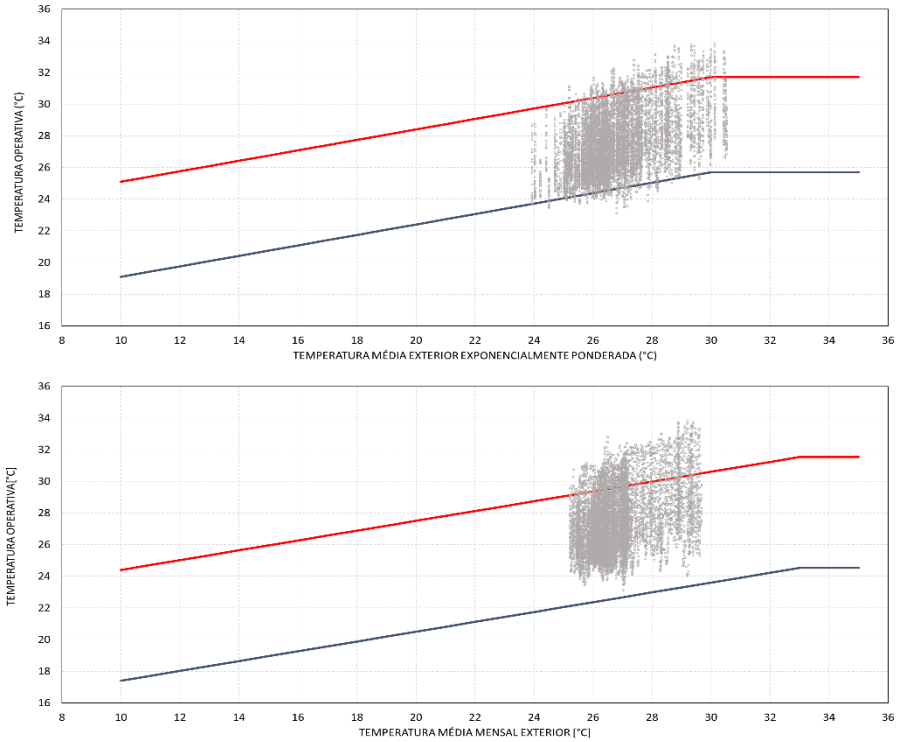


Figura 143 – Resultados da temperatura operativa para S1 (P+V) com as linhas limite de conforto para as normas EN 16798 (superior) e ASHRAE 55 (inferior).

6.5.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE CONFORTO TÉRMICO

Nesta secção estabelece-se a comparação entre as técnicas de arrefecimento passivo estudadas, tendo como referência a simulação S1, de forma a destacar quais as simulações que apresentam maior e menor eficácia com base nos 4 indicadores preconizados.

Com base nos valores constantes da Tabela 50, a simulação sem nenhuma técnica implementada (S) foi a pior quanto ao conforto, mostrando que todas as técnicas foram eficientes na melhoria do conforto térmico, com ênfase para a técnica de pintura da envolvente opaca com tinta refletante (P), que apresentou maior eficácia para o período diurno, e para a ventilação natural (V), mais eficaz no período noturno. Com a junção das duas técnicas (P+V) há melhoria da eficiência no período noturno, o mesmo não ocorrendo no período diurno. Esta ausência de melhoria dever-se-á à ventilação, pois permite a entrada de ar quente na habitação no período em que a temperatura externa é superior à interna.

Tabela 50 – Resultado dos indicadores para simulação S1, segundo as normas EN 16798 e ASHRAE 55

S1	EN 16798				ASHRAE 55			
	I_1 (ºC)	I_2 (%)	I_3 (ºC)	I_4 (h)	I_1 (ºC)	I_2 (%)	I_3 (ºC)	I_4 (h)
S1 (S)	1,09	22,1	2,53	7,32	1,55	36,0	1,94	10,01
S1 (P)	0,40	3,8	2,90	4,35	0,77	15,6	2,21	6,99
S1 (V)	1,18	18,4	3,03	6,24	1,63	28,9	2,39	8,07
S1 (P+V)	0,65	6,5	3,31	4,43	1,03	16,5	2,63	6,25

No cômputo geral, verificam-se os melhores desempenhos quando se associa as técnicas de arrefecimento passivo às melhores opções construtivas, como na simulação S11 (P+V) e (P) (bloco de betão com espessura de 19 cm, janela de aço e cobertura termoacústica) seguida de S12 (P) e (P+V) (bloco cerâmico com espessura de 19 cm, janela de aço e cobertura termoacústica). Já as simulações que indicam maior desconforto foram as simples, sem aplicação de técnicas de arrefecimento passivo, como a simulação S5 (S) (bloco cerâmico com espessura de 9 cm, janela de vidro e cobertura cerâmica) e S21 (S) (bloco cerâmico com espessura de 9 cm, janela de vidro e cobertura de fibrocimento). As tabelas e gráficos que permitem retirar estas e as demais conclusões deste capítulo podem ser consultados no Anexo I deste trabalho.

7
DESENVOLVIMENTO DE UMA APLICAÇÃO MÓVEL

7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No capítulo anterior da presente dissertação foi descrito o procedimento de modelação de uma casa de habitação social, procedimento necessário para a simulação do seu comportamento térmico. A metodologia adotada incluiu a modelação de várias alternativas construtivas correntemente aplicadas nestas habitações. Estas soluções comuns foram ainda combinadas com a utilização de técnicas de arrefecimento passivo. Os diferentes cenários foram simulados no clima de Palmas-TO e os resultados das simulações foram interpretados, incluindo a quantificação de indicadores de desempenho relacionados com o conforto térmico interior.

Os resultados das simulações constituem uma importante base de informação cujo interesse prático é imediato para os técnicos que trabalham na projeção destes edifícios. No entanto, o formato dissertação poderá não ser o mais apelativo e intuitivo, dificultando a divulgação de informação e consequente utilização. Neste sentido, optou-se pelo desenvolvimento de uma aplicação móvel que permita aos projetistas avaliar de forma simples o impacto da introdução de estratégias de arrefecimento passivo nos seus projetos de casas de habitação social.

Nas secções seguintes apresentam-se os pressupostos para o desenvolvimento da aplicação móvel, seguindo-se uma descrição detalhada da aplicação, incluindo os dados de entrada necessários e os dados de saída obtidos pelo utilizador.

7.2 ESCOLHA DOS PROGRAMAS ANGULAR E IONIC

O desenvolvimento de software e aplicações para apoio e solução de problemas no dia a dia da população tem-se tornado cada vez mais comum. Atualmente, é habitual a utilização de frameworks para acelerar o processo de desenvolvimento. Estas ferramentas possibilitam a partilha de parcelas de determinados códigos, que podem ser aplicados a diversos fins, desde que estes sejam semelhante aos pré-estabelecidos. De acordo com Fayad (1997), as frameworks são classificadas em frameworks de infraestrutura de sistema, de integração de middleware e de aplicação. As frameworks de infraestrutura de sistema administram temas relacionados ao projeto como sistemas operativos, campo de interação gráfico e linguagem de programação. As frameworks de integração de middleware integram diferentes tipos de aplicações e estruturas na mesma arquitetura. Já as frameworks de aplicação são responsáveis por temas de projetos comandados por aplicação. Atualmente, existem várias frameworks disponíveis no mercado, sendo que para desenvolver a aplicação se recorreu à Angular e à Ionic.

A framework Angular é desenvolvida e mantida pela Google, com licença de código aberto escrito em TypeScript, que funciona como uma complementação de sintaxe para o JavaScript, capaz de proporcionar suporte ao editor (Figura 144). Por meio do conjunto completo de recursos da Angular é possível a elaboração de aplicações eficientes. Os seus recursos e benefícios consistem em estabelecer diferentes ferramentas para a produção da estrutura das aplicações, o que os torna provedores de ambiente de desenvolvimento organizado. Dentro das vantagens é interessante destacar a operação de plataforma cruzada que usa mecanismos modernos da plataforma da Web com alto desempenho de instalação e offline. Além de possibilitar a execução de aplicações móveis nativas com metodologias do Cordova, NativeScript ou Ionic, a framework Angular fornece ao programador os benefícios do código escrito à mão com a velocidade e o desempenho de uma estrutura, carregando de forma rápida e dividindo o código de forma automática, a fim de que o usuário carregue somente o necessário para renderizar. Outros benefícios respeitam à produtividade, pois é possível criar visualizações de interface do usuário com um modelo simples e ágil e também adicionar ferramentas de linha de comando juntamente com comentários de editores e conclusões de código inteligente. A Angular é uma excelente forma crossplatform de desenvolver aplicações nativas, desenvolvidas com a linguagem admitida para a plataforma. Apesar dos evidentes benefícios, cabe destacar que para utilizar esta framework é necessário ter conhecimentos básicos de WebPack, Node.js, NPM e TypeScript (Angular.io, 2022). Na aplicação para desempenho do conforto térmico, a framework Angular foi utilizada para implementar as regras de negócio e a lógica de execução.

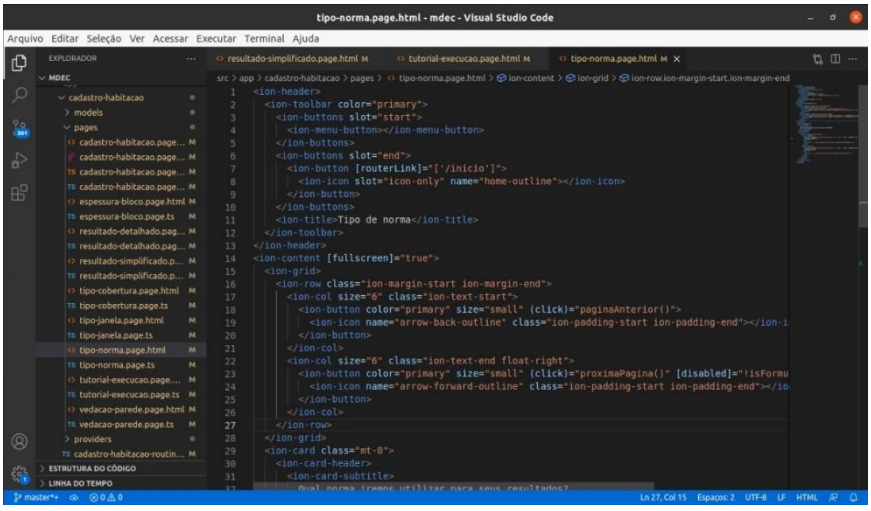


Figura 144- Ambiente de trabalho angular.io

A outra framework utilizada na aplicação foi o Ionic. Trata-se de um conjunto de ferramentas de interfaces de usuário, também com licença de código aberto, que cria aplicações web, originado de plataforma cruzada de excelente qualidade. As suas ferramentas de desenvolvimento apoiam-se nas tecnologias da Web, como o CSS, HTML5 e o JavaScript. As aplicações desenvolvidas com a Ionic são produzidas a partir de componentes, blocos bem executados de construção, que viabilizam com rapidez e facilidade a elaboração da interface do usuário da aplicação. O principal destaque desta framework é a organização da interface pelo método intuitivo de arrastar e soltar. Após concluídas, as aplicações são lançadas por app stores e permitem a instalação em qualquer dispositivo. Ou seja, a Ionic foi manipulada para encapsular a aplicação e torná-la portável, tornando uma multiplataforma e executável tanto em Android como em IOS (Figura 145).

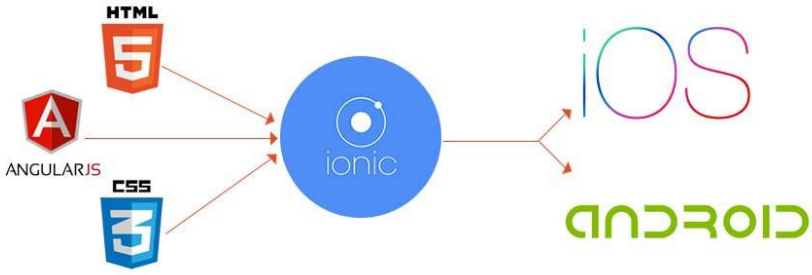


Figura 145- Esquema da atribuição da Ionic. Fonte: Joram, 2020

7.3 AMBIENTE GRÁFICO DA APLICAÇÃO MÓVEL

7.3.1 JANELAS DE ABERTURA, CADASTRO DO USUÁRIO, LOGIN E SENHA

A aplicação apresenta uma interface intuitiva e simples, começando pelo cadastro dos usuários, disponível na janela de abertura através de login e senha. Assim, ao ser inicializada, a aplicação encaminha o usuário para a janela inicial, conforme apresentado na Figura 146. A janela inicial é o mecanismo utilizado para a identificação do usuário, mediante autenticação. As janelas de login são exibidas para ativação do reconhecimento do utilizador. No primeiro contacto, é necessário a análise de identidade e a atuação como um novo usuário ou usuário já cadastrado. Caso o usuário seja recém-chegado e ainda não tiver realizado o cadastro, é exigido que selecione "Cadastro usuário". Contudo, se o cadastro já existir, pode avançar para o preenchimento dos campos relacionados ao login direto, ou seja, a inserção do nome de usuário e da senha já cadastrados. Os dados requeridos são o nome completo, a formação, a cidade, a área de atuação, o telefone ou o e-mail de contacto e a definição de nome de usuário e de senha para que futuramente seja possível consultar as análises já realizadas pelo utilizador e que, entretanto, foram gravadas. É ainda nesta janela que é apresentada a confirmação de aceitação do termo de responsabilidade quanto ao uso da aplicação, confirmando a não publicação de informações pessoais a terceiros.

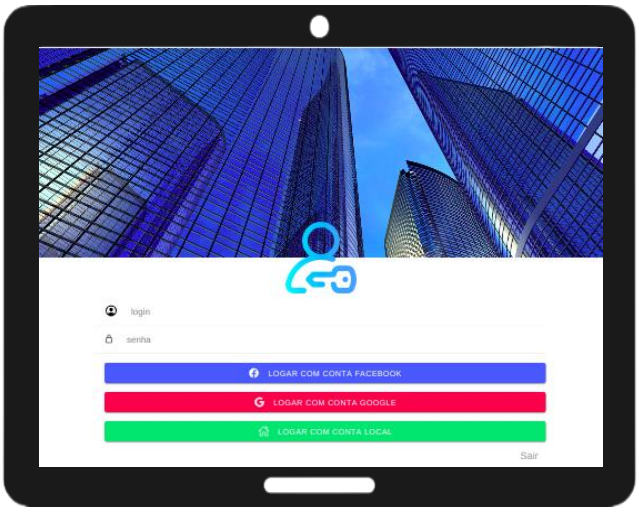


Figura 146- Apresentação da janela inicial da aplicação

Após autenticação, a segunda janela a ser exibida é a de cadastro das habitações, por meio da qual se registam e coletam informações referentes a habitações que o usuário deseja simular, conforme se exibe na Figura 147. Nesta janela é possível registar uma nova habitação ou selecionar uma habitação previamente guardada pelo utilizador. Na interface são apresentados os nomes e referências de todas as edificações já cadastradas, possibilitando ao usuário selecionar aquela que irá trabalhar.



Figura 147- Apresentação da segunda janela da aplicação - cadastro das Habitações

A terceira janela da aplicação surge a quem selecionou na janela anterior a intenção de realizar o cadastro de uma nova habitação, tal como apresentado na Figura 148. Inicialmente questiona-se o nome da habitação, campo que posteriormente será utilizado para identificação na análise. Em seguida, solicita-se o endereço, incluindo o CEP, a finalidade e funcionalidade da edificação, e, por fim, as coordenadas de latitude e longitude.

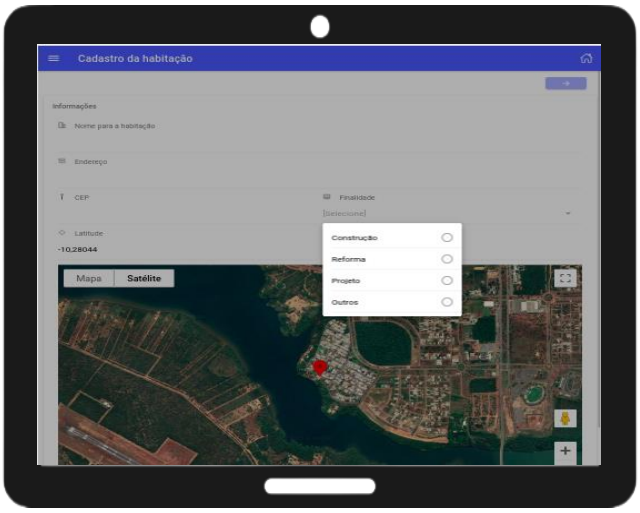


Figura 148- Apresentação da terceira janela da aplicação – opção de cadastro de habitação

7.3.2 DADOS DE ENTRADA - INPUT

Após os registos do utilizador e das habitações, solicitam-se os dados de *input* necessários à caracterização construtiva da habitação. Para esse efeito, optou-se por uma metodologia de escolha múltipla, onde, de forma simples e organizada, são disponibilizadas ao utilizador as alternativas possíveis em termos de tipologia e de características próprias da construção.

A Figura 149 mostra a primeira definição de *input*, relacionada com o material utilizado na construção das paredes da envolvente exterior, sendo possível selecionar alvenaria em blocos de betão ou alvenaria em blocos cerâmicos.

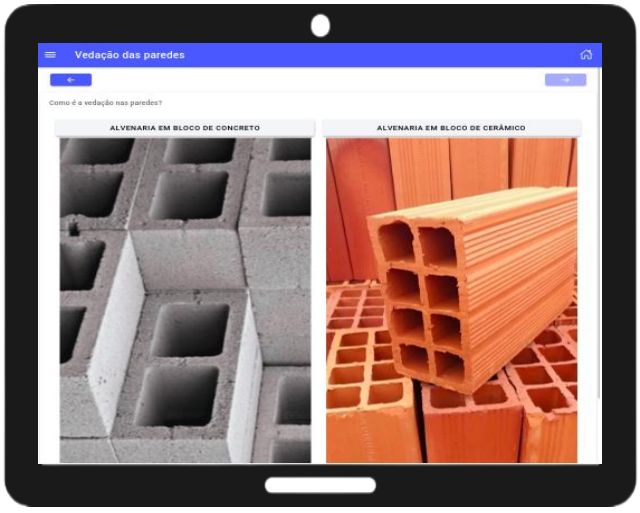


Figura 149- Dados de entrada de material utilizado na construção das paredes da envolvente exterior

Após a seleção do material das paredes da envolvente exterior, a aplicação encaminha para outro janela (Figura 150) em que é definida a dimensão dos blocos, sendo possível escolher entre bloco com espessura de 19 cm deitado ou bloco de 9 cm de espessura em pé.

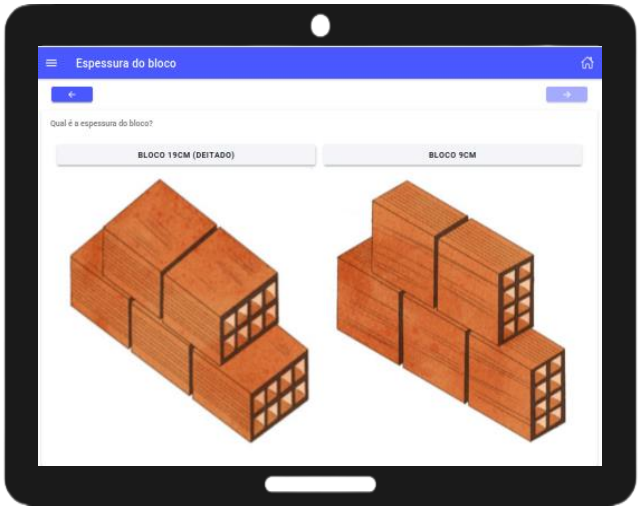


Figura 150- Dados de entrada relacionados com a posição dos blocos das paredes da envolvente exterior

A definição da envolvente exterior inclui ainda a informação sobre os vãos, cujo impacto é fundamental para o comportamento térmico da habitação. A Figura 151 mostra as duas opções disponíveis para o utilizador: janela com vidro temperado e com aço galvanizado.

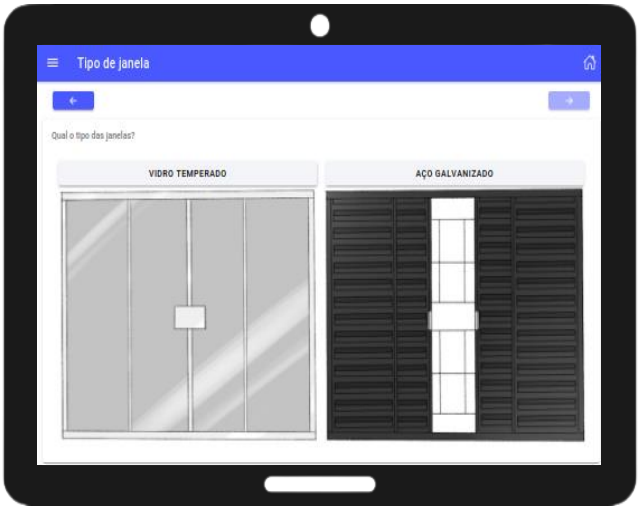


Figura 151- Dados de entrada relacionados com o tipo de janelas

A janela seguinte destina-se à definição do tipo de cobertura, sendo apresentadas três opções diferentes, telha cerâmica, telha de fibrocimento e telha termoacústica, conforme mostra a Figura 152.

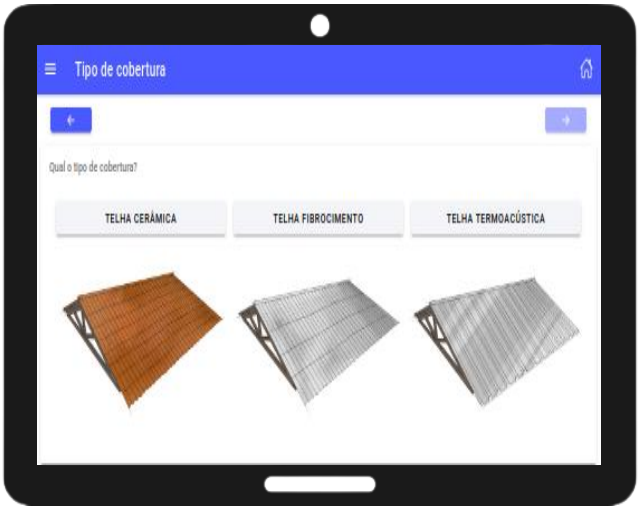


Figura 152- Dados de entrada relacionados com o tipo de cobertura

Por fim, o último dado de entrada corresponde à seleção da norma pretendida para a avaliação do conforto térmico, estando disponível a norma ASHRAE 55 e a EN 16798 (Figura 153). A seleção da norma tem impacto na forma como os resultados são apresentados.

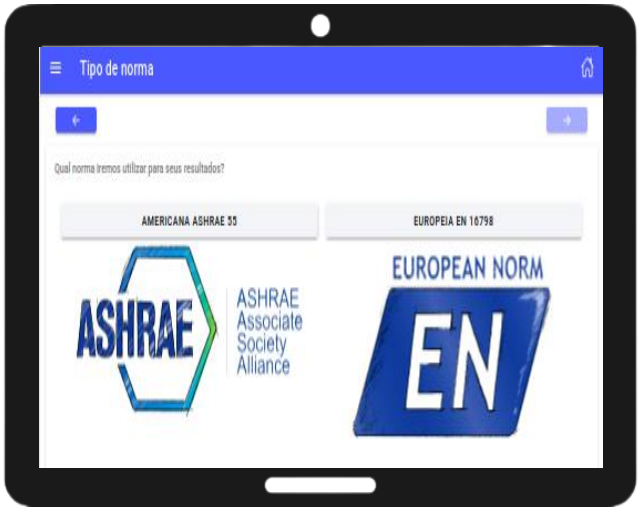


Figura 153- Dados de entrada relacionados com a norma utilizada na avaliação do conforto térmico

7.3.3 DADOS DE SAÍDA - OUTPUT

Os dados de saída (output) correspondem a uma avaliação do impacto da utilização das estratégias de arrefecimento passivo no edifício em estudo. Assim, a aplicação avalia o efeito da utilização de pintura da envolvente opaca com tinta refletante, da ventilação natural cruzada por ação do vento e da combinação de ambas as estratégias.

O impacto de cada estratégia é avaliado de forma qualitativa, tendo-se optado por um sistema de medalhas: bronze, prata e ouro. Para atribuição das medalhas foram considerados os resultados obtidos nas respetivas simulações para os quatro indicadores de conforto, calculados com o procedimento descrito detalhadamente no capítulo anterior. Desta forma, foram definidos critérios para a atribuição das medalhas em função de uma pontuação associada a cada indicador de desempenho. Ou seja, compara-se o valor de cada indicador de conforto para o edifício original e para o edifício com a técnica de arrefecimento passivo e calcula-se a respetiva variação percentual. Assim, uma variação percentual mais elevada corresponde a um maior impacto positivo da estratégia. A Tabela 51 sintetiza a pontuação definida para cada indicador.

Tabela 51 – Critérios de pontuação

Variação percentual	Pontuação			
	5	3	1	0
Indicador 1	> 50%	20% a 50%	0% a 20%	< 0%
Indicador 2	> 50%	20% a 50%	0% a 20%	< 0%
Indicador 3	> 40%	20% a 40%	0% a 20%	< 0%
Indicador 4	> 30%	20% a 30%	0% a 20%	< 0%

Em função da pontuação total obtida das somas dos indicadores para uma determinada estratégia, atribui-se a respetiva medalha em função dos intervalos estabelecidos na Tabela 52.

Tabela 52 – Critérios de pontuação para a atribuição das medalhas

	Ouro	Prata	Bronze
Geral	18 a 20	13 a 17	0 a 12

As medalhas correspondem às técnicas avaliadas individualmente, sendo possível que exista repetição do tipo de medalha para técnicas distintas. A Figura 154 mostra um exemplo do resultado da aplicação desta metodologia.



Figura 154- Resultado com a apresentação das técnicas mais eficientes de acordo com a metodologia de atribuição de medalhas

Na janela de resultados, abaixo de cada técnica, é disponibilizado um link que direciona para um tutorial de execução das técnicas. O tutorial (Figura 155) será uma grande ajuda, pois fornecerá ao utilizador da aplicação informação detalhada sobre a forma de executar a técnica de arrefecimento passivo. O tutorial de execução pode ser consultado no Anexo II deste trabalho.

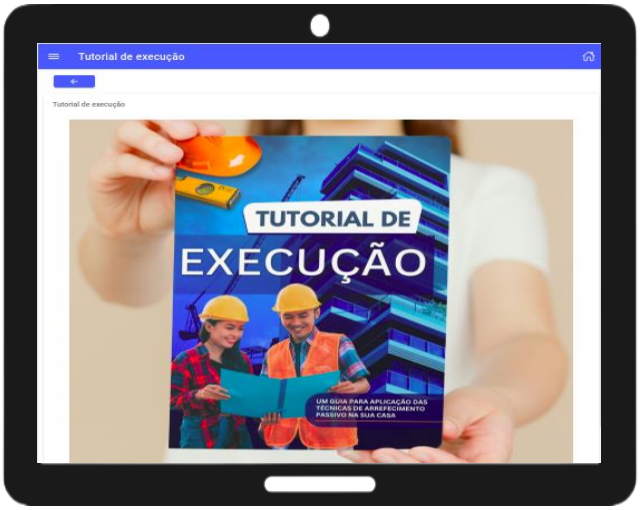


Figura 155- Apresentação da janela da aplicação para descarregar o tutorial de execução

8
CONCLUSÕES

8.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas de arrefecimento passivo podem contribuir significativamente para o conforto térmico dos utilizadores dos edifícios, minimizando o consumo de energia em climatização artificial. Os benefícios do arrefecimento passivo para o desempenho energético dos edifícios estão bem documentados na literatura. O impacto e consequente eficiência destas técnicas depende, obviamente, do contexto climático onde se insere o edifício. Num clima quente ao longo de todo o ano, como é o caso de Palmas-TO, a utilização isolada destas técnicas pode não ser suficiente para garantir as condições de conforto térmico no interior das habitações, mas contribui para minimizar o desconforto e o consumo energético.

Com base numa revisão bibliográfica exaustiva, começaram por se identificar as técnicas de arrefecimento passivo cuja aplicação é mais compatível com a realidade construtiva de Palmas-TO. Nesse sentido, selecionaram-se as seguintes técnicas de arrefecimento passivo: aplicação de quebra-sol, película refletante, ventilação natural cruzada e pintura refletante.

Para a análise e avaliação do impacto destas técnicas foram construídas duas células-teste de características idênticas. A semelhança entre as células-teste foi confirmada antes da aplicação das técnicas. Assim, a metodologia adotada passou pela aplicação sucessiva das técnicas de arrefecimento passivo numa das células-teste, utilizando-se a outra célula como elemento de controlo.

A primeira campanha experimental realizada incidiu sobre a avaliação isolada de cada técnica, tendo-se concluído o seguinte:

- a aplicação de quebra-sol não se mostrou muito eficaz, provavelmente devido à dimensão reduzida do vão existente nas células de ensaio. Consideram-se inconclusivos dos resultados obtidos com esta técnica, sendo necessário avaliar o seu efeito noutros casos de estudo, com áreas de envidraçado mais generosas e com orientações que favoreçam o aquecimento por incidência solar;
- a película refletante também não teve um impacto significativo, resultando mesmo num aumento da temperatura interior e, consequentemente, no desconforto por sobreaquecimento. Este resultado é consequência da solução construtiva definida para a cobertura das células, que limitou o potencial da película. Assim, tal como no caso do quebra-sol, consideram-se também os resultados inconclusivos, recomendando-se a utilização de película refletante na cobertura como hipótese de ensaio em estudos futuros;
- a ventilação natural cruzada foi a técnica mais eficaz no período noturno, com um impacto que resultou numa redução de temperatura face à célula de controlo de 0,8 ºC. Durante o período diurno a ventilação perde, obviamente, a sua eficácia na redução da temperatura, devido à

elevada temperatura do ar exterior que entra na habitação. Note-se que também não deve ser ignorado o efeito da velocidade do ar na sensação de conforto;
- a aplicação de uma pintura com tinta refletante nas paredes e na cobertura teve um impacto positivo no desempenho da célula-teste, especialmente no período diurno, garantindo uma diminuição da temperatura de cerca de 1,5 ºC.

A partir dos resultados da primeira campanha experimental, foi delineada uma segunda campanha, onde se analisou o efeito combinado das técnicas de arrefecimento passivo. Assim, foram monitorizadas as seguintes condições: pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à ventilação natural cruzada por ação do vento durante 24 horas (estratégia 1), pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à ventilação natural cruzada por ação do vento durante o período noturno (estratégia 2), pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à ventilação natural por efeito chaminé durante 24 horas (estratégia 3). A partir dos resultados é possível tecer as seguintes considerações:

- a aplicação de uma pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à ventilação natural cruzada por ação do vento apresenta dois resultados distintos nas experiências realizadas. Assim, quando se avaliaram as 24 horas do dia (estratégia 1) obteve-se uma variação de 5,06 °C, com uma diferença média de 2,67 ºC no período diurno - impacto positivo. Por sua vez, quando a avaliação foi realizada exclusivamente durante o período noturno (estratégia 2), a diferença máxima entre as células atingiu os 5,03 °C, com média durante o período diurno de 2,78 ºC, consequentemente, aponta para um melhor desempenho da segunda estratégia;
- da mesma forma, quanto à avaliação da aplicação de uma pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à ventilação natural por efeito chaminé 24 horas (estratégia 3), obteve-se um valor médio de diferença de temperatura entre as células na ordem dos 3,10 ºC, o que novamente indica valores satisfatórios já que responde ao objetivo de redução da temperatura interna.

Na segunda parte deste trabalho utilizaram-se ferramentas de simulação para avaliar o desempenho térmico de uma casa de habitação social, considerando diferentes condições-fronteira da envolvente exterior, combinadas com a aplicação de técnicas de arrefecimento passivo. O objetivo foi criar uma base de dados que servisse de suporte ao desenvolvimento de uma aplicação móvel para avaliar o impacto de técnicas de arrefecimento passivo no conforto térmico de uma casa de habitação social.

A primeira tarefa após seleção do caso de estudo foi caracterizar o edifício real de forma a criar um simulacro fiável de casa de habitação social. O levantamento geométrico e construtivo foi simples, recorrendo-se aos projetos do edifício e à inspeção *in-situ*. Relativamente à ventilação, cujo impacto direto na saúde dos utilizadores e no conforto térmico das habitações é decisivo, realizou-se uma campanha experimental para a medição da taxa de ventilação através do método do gás traçador e da técnica do declive. Este procedimento encontra-se devidamente caracterizado nas normas internacionais e tem resultados validados por vários autores. Neste trabalho realizaram-se cinco ensaios. A partir dos resultados é possível tecer as seguintes considerações:

- a técnica do declive pode ser utilizada para determinar as renovações horárias em casas de habitação social, embora, tendo em conta a variabilidade encontrada, devam ser realizados vários ensaios para aumentar o nível de fiabilidade dos resultados;
- a variabilidade dos resultados pode resultar de diferenças em termos de condições-fronteira que não permanecem constantes ao longo dos ensaios (gradiente de temperatura interior/exterior e vento), de dificuldades em homogeneizar a mistura do ar no interior da fração, podendo resultar num comportamento diferente do de uma única zona, ou da combinação destes dois fatores;

- o valor médio de renovações horárias é elevado (1,16 h^{-1}), tendo em conta que se trata de infiltração de ar, apontando para uma eventual perda de eficiência dos sistemas de climatização que venham a ser instalados.

As simulações realizadas permitiram caracterizar o desempenho do edifício construído com as técnicas habituais (edifício de referência) e com a aplicação das técnicas de arrefecimento passivo. A partir dos resultados obtidos nas simulações é possível concluir o seguinte:

- a temperatura no interior da casa é genericamente elevada, incompatível com as condições estabelecidas para o conforto térmico, resultado de uma alta temperatura exterior. No cenário de referência o período de desconforto por sobreaquecimento corresponde a cerca de 22% para a norma EN 16798 e 36% para a norma ASHRAE 55. Este valor pode ser reduzido para 18% e 29% respetivamente, se for aplicada uma estratégica de ventilação intermitente, com taxas mais elevadas no período noturno;
- nos dias em que a temperatura exterior é especialmente elevada, observam-se vários períodos em que a entrada de ar é prejudicial ao conforto térmico. Assim, o incremento da taxa de renovação de ar pode ser útil para minimizar o desconforto, mas para se otimizar o seu desempenho, requer a capacidade de selecionar em que períodos do dia se tira partido do seu efeito benéfico;
- a pintura refletante mostrou ser a técnica mais eficaz durante o dia, uma vez que oferece uma maior resistência ao aumento da temperatura, repelindo parte dos raios solares, principalmente quando ocorrem picos de temperatura no período diurno. Em relação a parâmetros de conforto térmico, esta técnica apresentou os melhores resultados, mesmo não apresentando a mesma diminuição de temperatura dos cenários com a combinação de duas técnicas. Além disso, no cenário de referência, o período de desconforto por sobreaquecimento corresponde a cerca de 22% na norma EN 16798 e 36% na norma ASHRAE 55. Este valor pode ser reduzido para 4% e 16%, respetivamente, com a aplicação desta técnica;
- por sua vez, a pintura da envolvente opaca com tinta refletante associada à técnica de ventilação natural, mostrou-se mais eficaz na redução da temperatura interna durante o período noturno. No entanto, para o período diurno esta combinação de técnicas, embora apresente valores adequados para a redução da temperatura, não se mostra tão eficaz como no período noturno, uma vez que a ventilação natural permitiu também a entrada de ar quente do exterior para o interior da edificação e, consequentemente, um aumento das temperaturas internas. No cenário de referência, o período de desconforto por sobreaquecimento corresponde a cerca de 22% na norma EN 16798 e 36% na norma ASHRAE 55. Este valor pode ser reduzido para 7% e 17%, respetivamente, com a associação das duas técnicas.

8.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os resultados obtidos com esta tese contribuíram para o conhecimento do impacto das técnicas de arrefecimento passivo num clima quente do norte do Brasil. No entanto, o trabalho desenvolvido não esgota a temática, sendo possível apontar vários caminhos para desenvolvimentos futuros nesta temática. Nomeadamente:

- Avaliar experimentalmente o impacto dos elementos de sombreamento (quebra-sol) e da película refletante noutros casos de estudo. Os resultados obtidos para estas técnicas foram fortemente condicionados pelas características intrínsecas das células-teste, pelo que se considera fundamental avaliar estas técnicas noutros contextos;

- Procurar implementar e monitorizar o impacto da pintura refletante e da ventilação cruzada num caso de estudo real. Os resultados obtidos na célula-teste são animadores, mas o efeito de escala pode ser significativo;
- Desenvolver novos modelos de simulação, alargando a metodologia a outras tipologias construtivas e a outros contextos climáticos. Desta forma, tirar-se-á partido da metodologia aqui seguida e da aplicação móvel desenvolvida para alargar o seu potencial de utilização a outras regiões do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] AKEIBER, HUSSEIN *ET AL*. (2016) *A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 60, p. 1470-1497.

[2] ALLARD, F; GHIAUS, C; MANSOURI, Y. (2003) *Natural Ventilation for Health, Comfort and Energy Efficiency*. In: VII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, Curitiba/PR, Anais do IV ENCAC. 2003, P5.

[3] AMORIM, R.; PEDROSA, M.; CARVALHO, H. (2014) *Monitoramento Térmico da biblioteca Nilo Peçanha localizada em João Pessoa/Pb*. Alagoas - Brasil.

[4] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. ANSI/ASHRAE Standard 55: *thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta, 2017.

[5] ASHRAE. 2002. ASHRAE Guideline 14, *Measurement of energy and demand savings, American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers*, Atlanta, Georgia.

[6] ANGULAR.IO (2022). *What is Angular?* 28 fev. 2022. Disponível em: <https://angular.io/guide/what-is-angular> Acesso em 05 de mar. 2022.

[7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (2005). *NBR-15220: Desempenho Térmico de Edificaçõe***s**. Rio de Janeiro, Brasil.

[8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (2013). *NBR-15575: Edificações Habitacionais* - Desempenho. Rio de Janeiro, Brasil.

[9] ASTM D6245-12. (2012) *Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation*, American Society for Testing and Materials USA.

[10] ASTM E741-00 (2000). *Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution*, American Society for Testing and Materials. USA.

[11] BARCLAY, M., HOLCROFT, N., & SHEA, A. D. (2014). *Methods to determine whole building hygrothermal performance of hemp – lime buildings*. Building and environment, 80, p. 204-212.

[12] BARREIRA, E. (2010) *Degradação biológica de fachadas com sistemas de isolamento térmico pelo exterior devida ao desempenho higrotérmico.* Tese de Doutorado. FEUP, Porto, Portugal.

[13] BHAMARE, DNYANDIP K.; RATHOD, MANISH K.; BANERJEE, JYOTIRMAY. (2020) *Selection of phase change material and establishment of thermophysical properties of phase change material integrated with roof of a building using Measure of Key Response index: Proposal of a new parameter*. Journal of Energy Storage, v. 32, p. 101812.

[14] BLONDEAU, PATRICE; SPÉRANDIO, MAURICE; ALLARD, FRANCIS. (1997) *Night ventilation for building cooling in summer*. Solar energy, v. 61, n. 5, pp. 327-335.

[15] BOYANO, A., HERNANDEZ, P., & WOLF, O. (2013). *Energy demands and potential savings in European office buildings: Case studies based on EnergyPlus simulations*. Energy and Buildings, 65, p. 19-28.

[16] BRASIL, MINISTERIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO: INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (2011). *Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET.* Nota Técnica nº 001/2011. 2011. 11 p.

[17] BRASIL, MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE (2018). *Projeto E3 – Projetando edificações energeticamente eficientes.* http://www.projeteee.mma.gov.br/ (07/11/2018)

[18] CAMPANIÇO, HUGO; HOLLMULLER, PIERRE; SOARES, PEDRO MM. (2014*) Assessing energy savings in cooling demand of buildings using passive cooling systems based on ventilation*. Applied Energy, v. 134, p. 426-438.

[19] CAMPOS, A.; ALVES, E.; SPEZIALI, N. (2007) Física Experimental Básica na Universidade. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

[20] CARVALHO, S. (2012) *Propriedades térmicas do painel aglomerado de bagaço de canade-açúcar (Saccharum officinarum L.)* – Lavras: UFLA, 2012. 73 p.: il

[21] CATALANOTTI, S., CUOMO, V., PIRO, G., RUGGI, D., SILVESTRINI, V., & TROISE, G. (1975). *The radiative cooling of selective surfaces*. Solar Energy,17(2), p. 83-89

[22] CATTARIN, G., CAUSONE, F., KINDINIS, A., & PAGLIANO, L. (2016). *Outdoor test cells for building envelope experimental characterization – A literature review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, p. 606-625.

[23] CEN 16798-2:2019. *Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 2: Interpretation of the requirements in EN 16798-1 - Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics (Module M1-6)* European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2019.

[24] ÇENGEL, Y.; GHAJAR, A. (2012) *Transferência de calor e massa – uma abordagem prática.* The McGraw-Hill Companies, Inc., 4ª edição, New York, USA.

[25] CERNE TECNOLOGIA E TREINAMENTO LTDA. *Tutorial da Placa Datalogger para Termopar de 20 canais*. SD. 13 p.

[26] CHAN, H.; RIFFAT, S; ZHU, J. (2010) *Review of passive solar heating and cooling technologies.* Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 14 (2010) pp. 781-789.

[27] CHAUVIN ARNOUX GROUP. (2014) *Guia de início rápido do C.A 1510*. Ed. 01. 04/2014. 23 p.

[28] CORRADO, V., & FABRIZIO, E. (2007). *Assessment of building cooling energy need through a quasi-steady state model: Simplified correlation for gain-loss mismatch*. Energy and buildings, 39(5), p. 569-579.

[29] COSTANZO, V; EVOLA, G; GAGLIANO, A; MARLETTA, L; NOCERA, F. (2013) *Study on the Application of legal paints for the passive cooling of existing buildings in Mediterranean climates*, Mechanical Engineering. Artigo 413675 (2013).

[30] CRAWLEY, D. B., LAWRIE, L. K., WINKELMANN, F. C., BUHL, W. F., HUANG, Y. J., PEDERSEN, C. O., ... & GLAZER, J. (2001). *EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program*. Energy and buildings, 33(4), p. 319-331.

[31] CVETKOVIĆ, D., & BOJIĆ, M. (2014). *Optimization of thermal insulation of a house heated by using radiant panels*. Energy and Buildings, 85, p. 329-336.

[32] DABAIEH, M., WANAS, O., HEGAZY, M. A., JOHANSSON. E., (2015) *Reducing cooling demands in a hot dry climate: A simulation study for non-insulated passive cool roof thermal performance in residential buildings.* Energy and Buildings, v. 89, p. 142-152.

[33] DA SILVA, Mariana Guedes *et al.* (2015) *Desempenho térmico de tipos de coberturas no interior de modelos reduzidos de galpões avícolas*. Energia na agricultura, v. 30, n. 3, p. 269-275, Brasil.

[34] DALBEM, R., DA CUNHA, E. G., VICENTE, R., FIGUEIREDO, A., OLIVEIRA, R., & DA SILVA, A. C. S. B. (2019). *Optimisation of a social housing for south of Brazil: From basic performance standard to passive house concept*. Energy, 167, p. 1278-1296.

[35] DEFOREST, N., SHEHABI, A., SELKOWITZ, S., & MILLIRON, D. J. (2017). *A comparative energy analysis of three electrochromic glazing technologies in commercial and residential buildings*. Applied energy, 192, p. 95-109.

[36] DE MOURA, Magna Soelma Beserra *et al.* (2011) *Monitoramento dos fluxos de radiação, energia, CO_2 e vapor d'água em superfícies vegetadas*. Embrapa Semiárido-Capítulo em livro científico. Brasil.

[37] DEKAY, M.; BROWN, G. (2004) *Sol, Vento e Luz. Estratégias para o projeto de arquitetura*. Trad. Alexandre F. da Silva. 2a.ed. Ed. Bookman. Porto Alegre, Brasil.

[38] DORNELLES, K. A.; CARAM, R. M.; SICHIERI, E.P. (2013). *Absortância solar e desempenho térmico de tintas frias para uso no envelope construtivo*. In: ENCAC E VII ELACAC, 12., 2013, Brasília. Anais... Búzios: ANTAC.

[39] DORNELLES, K. A.; RORIZ, M.; RORIZ, V., CARAM, R. M. (2011). *Desempenho térmico de tintas brancas com microesferas cerâmicas para uso em coberturas de edifícios*. In: ENCAC E VII ELACAC, 11., 2011, Búzios. Anais... Búzios: ANTAC.

[40] DOS SANTOS, C.; MATIAS, L. (2007) *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios.* ICT informação técnica - Edifícios ITE 50. Lisboa. Portugal.

[41] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – CEN (2007) *EN 15026:2007 – Hygrothermal performance of building componets and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation.* CEN, Brussels, Belgica.

[42] FERREIRA, M. (2017) *Isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade – Desempenho, aplicações, otimização e comparação com outros isolamentos.* Tese de Doutorado. FEUP, Porto, Portugal.

[43] EERE, (2021) *EnergyPlus auxiliary programs manual.* Versão 9.6.0, U.S Departament of energy, University of Illinois, Estados Unidos.

[44] ETHERIDGE, DAVID W.; SANDBERG, MATS. (1996) *Building ventilation: theory and measurement*. Chichester, UK: John Wiley & Sons.

[45] FAYAD, M., & SCHMIDT, D. C. (1997). *Object-oriented application frameworks. Communications of the ACM*, 40(10), p. 32-38.

[46] FEDERAL, Caixa Econômica. *Habitação de Interesse Social*. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/sustentabilidade/negocios-sustentaveis/habitacao-sustentavel/habitacao-social/Paginas/default.aspx

[47] FERREIRA, M. (2017) *Isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade – Desempenho, aplicações, otimização e comparação com outros isolamentos.* Tese de Doutorado. FEUP, Porto, Portugal.

[48] FIGUEIREDO, C. (2007) *Ventilação natural em edifícios de escritórios na cidade de São Paulo: limites e possibilidades do ponto de vista do conforto térmico.* Dissertação de Mestrado. USP, São Paulo, Brasil.

[49] FRIGER, J. A., BIANCHI, M., BACKES, R. G. (2007). *Um estudo sobre o Uso das Técnicas de Simulação no processo de Elaboração e Execução dos Planejamentos Estratégico e Operacional*. ConTexto, Porto Alegre, v. 7, n. 12, 2º semestre 2007. pp. 1-24.

[50] FUMO, NELSON; MAGO, PEDRO; LUCK, ROGELIO. (2010) *Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models*. Energy and Buildings, v. 42, n. 12, p. 2331-2337, 2010.

[51] FROTA, A. B., SCHIFFER, S. R. (2001). *Manual de conforto térmico : arquitetura, urbanismo*. 5. Ed. – São Paulo: Studio Nobel, 2001.

[52] GAVIRA, M. O. (2003). Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos para obtenção de título de Mestre em Engenharia de Produção. (2003), pp. 1-163.

[53] GEETHA, N; VELRAJ, R. (2012) *Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage – A review*, Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research. Vol. 29 (2012) pp. 913–946.

[54] GIESTA, M. C. A. (2019). *Simulação de Técnicas Passivas de Arrefecimento com Recurso ao EnergyPlus*. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade Do Porto. pp. 1-71.

[55] GONÇALVES, H; GRAÇA, J. (2004) *Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal.* Editora: DGGE/IP-3E, Lisboa, Novembro, 2004.

[56] GONÇALVES, L. (2014) *Avaliação do desempenho térmico de tintas refletantes em fachadas por análise termográfica*. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Brasil.

[57] GUPTA, N; TIWARI, G. (2016) *Review of passive heating/cooling systems of buildings*, Energy science and Engineering. Vol. 5 (2016), pp. 305–333.

[58] HAGENTOFT, C.-E. (2011) *Introduction to building physics.* Studentlitteratur, Lund, Sweden.

[59] HARMON e HOFF. (2005) *Designing natural ventilation systems*.

[60] M. HASSAN, A., LEE, H., & OH, S. (2016) *Challenges of Passive Cooling Techniques in buildings: A critical review for identifying the resilient technique*. Journal Teknologi, 78(6). <https://doi.org/10.11113/jt.v78.5748>.

[61] HAN, D., NG, B. F., & WAN, M. P. (2020). *Preliminary study of passive radiative cooling under Singapore's tropical climate*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 206, p. 110270.

[62] HAURWITZ, B. (1946) *Insolation in relation to cloud type*, Journal Meteorology 3 (1946), p. 123–124.

[63] HE, JIANG E HOYANO, AKIRA (2009). The 3D CAD-based simulation tool for prediction and evaluationof the thermal improvement effect of passive cooling walls in thedeveloped urban locations. Solar Energy 83 (2009), pp. 1064–1075.

[64] HENS, H (2007) *Building Physics – Heat, air and moisture. Fundamentals and engineering methods with examples and exercises.* Ernst e Sohn – Wiley, Leuven, Belgica.

[65] HOLLMULLER, P. (2002) *Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments- Measures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique*. Tese de doutorado, Centro Universitário de Estudos dos Problemas da Energia., Instituto de Física, Faculdade de Ciências, Universidade de Genebra. Itália.

[66] HOLLMULLER, P., LAMBERTS, R., WESTPHAL, F. S., Ordenes, M. M., Carlo, J.C. (2015). *Potencial da ventilação inercial para resfriamento passivo em climas brasileiros. In: Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído*, ENCAC 2005, pp. 1-11.

[67] IBGE. *Censo demográfico: 2021*. (2021) Rio de Janeiro: IBGE, Brasil.

[68] IBRAHIM, M., NOCENTINI, K., STIPETIC, M., DANTZ, S., CAIAZZO, F. G., SAYEGH, H., & BIANCO, L. (2019). *Multi-field and multi-scale characterization of novel super insulating panels/systems based on silica aerogels: Thermal, hydric, mechanical, acoustic, and fire performance.* Building and Environment, 151, p. 30-42.

[69] INCROPERA, P.; DeWITT, D.; BERGMAN, T.; LAVINE, A. (2008) *Fundamentos de transferência de calor e de massa.* Livros Técnicos e Científicos, 6ª edição, Rio de Janeiro, Brasil.

[70] INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/>. Acesso em: 19 jun. 2018.

[71] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. (2010) *Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos***.** RTQ-C. Portaria n. °372, de 17 de Setembro de 2010. INMETRO, Brasil.

[72] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. (2012) *Regulamento Técnico de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais***.** RTQ-R. Portaria n. °18, de 16 de Janeiro de 2012. INMETRO, Brasil.

[73] INSTRUTHERM, (2016) *Manual de Instruções do Medidor de Stress Térmico Digitátil modelo TGD-200*. Dezembro, 2016. 6 p.

[74] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (1996) *Ergonomics of the thermal environments – Instruments for measuring physical quantities*, ISO 7726. Genebra, 1996, 39p.

[75] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (2005). *Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*, ISO 7730. Genebra, 2005.

[76] JAFFAL, I; OULDBOUKHITINE, S; Belabi, R. (2012) *A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance Renew*. Energy, 43 (2012), pp. 157-164

[77] JIÃO, F., XU, P. (2015). *Simulation and feasibility analysis of PCM based passive cooling technique in residential house*. Procedia Engineering 121 (2015), p. 1969 – 1976.

[78] KACHKOUCH, S; AIT-NOUH, F; BENHAMOU, B; LIMAM, K. (2018) *Experimental assessment of thermal performance of theree passive cooling techniques for roofs in a semi-arid climate,* Journal: Energy and Buildings. Vol. 164 (2018), pp. 153–164.

[79] KAMAL, MOHAMMAD ARIF. (2012) *An overview of passive cooling techniques in buildings: design concepts and architectural interventions*.Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture, v. 55, n. 1, p. 84-97, 2012.

[80] KUNZEL, H. (1995) *Simultaneous heat and moisture transport in building components – One and two-dimensional calculation using simple paramenters.* IRB Verlag, Stuttgart, Alemanha.

[81] LEE, K., YOO, H., & LEVERMORE, G. J. (2013). Quality control and estimation hourly solar irradiation on inclined surfaces in South Korea. *Renewable energy*, *57*, p. 190-199.

[82] LEITE, J; ARAÚJO, V. (2004) *Análises de elementos arquitetônicos de proteção solar em edificações institucionais na cidade de Natal/RN – Diretrizes projetuais,* Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável, São Paulo, ISBN 85-89478-08-4 (2004), Brasil.

[83] LIZ, D; MIZGIER, M; GÜTHS, S. (2016) *Análise experimental do comportamento térmico do telhado verde extensivo para Florianópolis*. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. Anais... Porto Alegre: ANTAC, Brasil.

[84] LOUCHE, A., NOTTON, G., POGGI, P., & SIMONNOT, G. (1991). *Classification of direct irradiation days in view of energetic applications*. *Solar Energy*, *46*(4), p. 255-259.

[85] LOUTZENHISER, P.; MANZ, H.; MOOSBERGER, S.; MAXWELL, G. (2009) *An empirical validation of window solar gain models and the associated interac-tions, International* Journal of Thermal Sciences 48 vol.1 (2009), pp. 85–95.

[86] LU, X., XU, P., WANG, H., YANG, T., & HOU, J (2016) *Cooling potential and applications prospects of passive radiative cooling in buildings: The current state-of-the-art.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 65, p. 1079-1097.

[87] LUO, L., HAMILTON, D., & HAN, B. (2010). *Estimation of total cloud cover from solar radiation observations at Lake Rotorua, New Zealand*. Solar Energy, *84*(3), p. 501-506.

[88] MAURÍCIO, R., MACHADO, S., VAGHETTI, M. A. O., & SOARES, R. M. D. (2014) *Casa popular eficiente: a confiabilidade do desempenho térmico obtido através de simulação computacional casa popular eficiente: the reliability of thermal performance was obtained from computacional simulation.*

[89] MARAGOGIANNIS, KONSTANTINOS; KOLOKOTSA, DIONYSIA; MARIA, EFPRAXIA-AITHRA. (2011) *Study of night ventilation efficiency in urban environment: technical and legal aspects*. Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti, v. 6, pp. 49.

[90] MARINOSCI, C.; STRACHAN, G.; SEMPRINI, P.; MORINI, G. (2011). *Empirical validation and modelling of a naturally ventilated rainscreen fac¸ ade building*. Energyand Buildings Vol. 4 (2011), pp. 853–886.

[91] MATEUS, N.; PINTO, A.; DA GRAÇA, G. (2014) *Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturallyand mechanically ventilated test cell*. Energy and Buildings vol. 75 (2014), pp. 511–522.

[92] MALEKI, B. AHMADKHANI. (2011) *Shading: Passive cooling and energy conservation in buildings.* International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE), v. 3, n. 4, pp. 72-79, 2011.

[93] MENDES, J; RIBEIRO, F; SILVEIRA, F; CAVALCANTI, S; OLIVEIRA, L. (2012). *Isolante térmico à base de fibra vegetal*, CONEM, São Luís, Maranhão, Brasil.

[94] MESQUITA, L, KÓS, J. R., (2017). *Towards more resilient and energy efficient social housing in Brazil*. Energy Procedia 121 (2017), pp. 65-70.

[95] MONTEIRO, L. M. (2008) *Modelos preditivos de conforto térmico: quantificação de relações entre variáveis microclimáticas e de sensação térmica para avaliação e projeto de espaços abertos.* FAUUSP, São Paulo, 2008, 378p.

[96] MORENO, A; SOUZA, R. (2010) *Análise de desempenho térmico em habitação de interesse social em Montes Claros–MG*. Monografia (Especialização em Sistemas Tecnológicos e Sustentabilidade Aplicados) -Escola de Arquitetura da UFMG-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

[97] MUNEER, T., & KINGHORN, D. (1997). Luminous efficacy of solar irradiance: Improved models. *International Journal of Lighting Research and Technology*, *29*(4), p. 185-191.

[98] NAHAR, N; SHARMA, P; PUROHIT, (1999) *Studies on solar passive cooling techniques for arid areas*, Energy Conversion and Management. Vol. 40 (1999), pp. 89–95.

[99] NAVROSKI, M; LIPPERT, D; CAMARGO, L; PEREIRA, M; HASELEIN, C. (2010) *Avaliação do isolamento térmico de três diferentes materiais usados na construção e preenchimento de paredes externas*, Ciência da Madeira, Pelotas, Vol. 01 (2010), pp. 41–51.

[100] NIKOLIĆ, D., DJORDJEVIĆ, Z., BOJIC, M., RADULOVIĆ, J., & SKERLIĆ, J. (2013). *Optimization of photovoltaics panels area at Serbian zero-net energy building*. Journal of renewable and sustainable energy, 5(4), p. 041819.

[101] O' DONOVAN, A., MURPHY, M. D., O'SULLIVAN, P. D. (2021). *Passive control strategies for cooling a non-residential nearly zero energy office: Simulated comfort resilience now and in the future*. Energy & Buildings 231 (2021) 110607, pp. 1-20.

[102] OLIVEIRA, A. C. F. C., (2022). *Transferência de calor: um guia para resolução de problemas práticos*

[103] ONSET COMPUTER CORPORATION. (2009) *A Manual – U12011: Hobo U12 Temp/RH Data Logger.* Doc 13127. 2009, 02 p.

[104] PERALTA, G. (2006). *Desempenho térmico de telhas: Análise de monitoramento e normalização específica.* Dissertação Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos – São Paulo. 2006. 128 p. Brasil.

[105] PEREZ, I.; OSTERGAARD, P. (2018) *Active and passive cooling methods for dwellings: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 82 (2018), pp. 531-544.

[106] PEREZ, R., INEICHEN, P., SEALS, R., MICHALSKY, J., & STEWART, R. (1990). *Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance.* Solar energy, 44(5), p. 271-289.

[107] PFAFFEROT, J., HERKEL, S., JASCHKE, M. (2003). *Design of passive cooling by night ventilation: evaluation of a parametricmodel and building simulation with measurements*. Energy and Buildings 35 (2003), pp. 1129–1143.

[108] PITTALUGA, M. (2013). *The electrochromic wall*. Energy and Buildings, 66, p. 49-56.

[109] POCKETT, J; BELUSKO, M. (2010) *A Review of Heat-Reflective* Inks, Journal: ResearchGate. Vol. 48 (2010).

[110] PRIETO, A; KNAACK, U; AUER, T. (2018) *Passive cooling & climate responsive façade design: Exploring the limits of passive cooling strategies to improve the performance of commercial buildings in warm climates,* Journal: Energy and Buildings. Vol. 175 (2016), pp. 30–47.

[111] PROUSSARD, E; GREPMEIER, K; MEERSSEMAN, X; TRIM, M. (2003) *Guide for a building energy label. Promoting bioclimatic and solar constructon and renovation*. Ed. Moutot, Paris, França.

[112] QINGYUAN, Z., & YU, L. (2014). *Potentials of passive cooling for passive design of residential buildings in China. Energy Procedia, 57*, p. 1726-1732.

[113] RALEGAONKAR, R.; GUPTA, R. (2010) *Review of intelligent building construction: A passive solar architecture approach.* Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 14 (2010), pp 2238-2242.

[114] RAMAN, A. P., ANOMA, M. A., ZHU, L., REPHAELI, E., & FAN, S. (2014). *Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight*. Nature, *515*(7528), p. 540-544.

[115] RBC, (2017) *Certificado de Calibração: Cabo de extensão tipo T – simples*. 2017. 1 p.

[116] RCCTE (2006) *Regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios.* n° 80/2006. RCCTE, Lisboa, Portugal.

[117] REDA, C. H. (2021). *Melhoria do desempenho energético de edifícios através de técnicas de arrefecimento passivo – caso de estudo do campus Pato Branco da Universidade Tecnológica Federal do Paraná*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação.

[118] ROMERO, M. A. B. (2019). *Mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas*. Brasília: Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo; ETB, 2019, pp. 1-151 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.18830/ISBN.978-85-67405-25-4>

[119] ROQUE, EDUARDO; VICENTE, ROMEU; ALMEIDA, RICARDO MSF. (2021) *Opportunities of Light Steel Framing towards thermal comfort in southern European climates: Long-Term monitoring and comparison with the heavyweight construction.* Building and Environment, v. 200, p. 107937.

[120] RORIZ, M. (2008). *Conforto e desempenho térmico de edificações*. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, São Carlos, Brasil.

[121] RORIZ, M. *Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros*. ANTAC: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. São Carlos, SP. 2012.

[122] ROSSO, F., PISELLO, A. L., CASTALDO, V. L., COTANA, F., FERRERO, M. (2017). *Smart cool mortar for passive cooling of historical and existing buildings: experimental analysis and dynamic simulation*. ScienceDirect Energy Procedia 134 (2017), pp. 536–544.

[123] SÁ, A. V., AZENHA, M., DE SOUSA, H., & SAMAGAIO, A. (2012). *Thermal enhancement of plastering mortars with Phase Change Materials: Experimental and numerical approach*. Energy and Buildings, 49, p. 16-27.

[124] SADINENI, S.; MADALA, S; BOEHM, R. (2011) *Passive building energy savings: A review of building envelope components.* Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 15 (2011), pp. 3617-3631.

[125] SAFFARI, M; GRACIA, A; USHAK, S; CABEZA, L. (2016) *Economic impact of integrating PCM as passive system in buildings using Fager comfort model*, Journal: Energy and Buildings. Vol. 112 (2016), pp. 159–172.

[126] SANTAMOURIS, M.; KOLOKOTSA, D. (2013) *Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures:The state of the art.* Jornal of Energy and Buidings. Vol. 57 (2013), pp. 74-94.

[127] SANTAMOURIS, M; PAVLOU, K; SYNNEFA, A; NIACHOU, K; KOLOKOTSA, D. (2007) *Recente progress on passive cooling techniques: Advanced technological developments to improve survivability levels in low-income households*, Journal: Energy and Buildings. Vol. 39 (2007), pp. 859–866.

[128] SANTANA, M.; *et al*. (2008) *Rastreabilidade Metrológica e os Critérios de Aceitação para a Instrumentação Meteorológica/Ambiental*. Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia, v. 32, n. 1, Brasil.

[129] SANTOS, F; SILVEIRA, A. (2013) *Avaliação do desempenho térmico de painéis de buriti, de resíduos da casca do coco e do babaçu como isolante térmico em edificações*, Universidade Federal do Piauí, Brasil.

[130] SANTOS, L. M. (2012). Avaliação do Potencial de Arrefecimento Passivo de um Edifício de Serviços. Dissertação Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil no Ramo de edifícios. INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA.

[131] SARAIVA, L. (2011). *Transferência de calor*. Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Brasil.

[132] SCHOSSIG, P. *et al*. (2005) *Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials.* Solar energy materials and solar cells, v. 89, n. 2-3, p. 297-306.

[133] SEPLAN. Secretaria de Planejamento e da Modernização da Gestão Pública. (2012) *Atlas do Tocantins: subsídios ao planejamento da gestão territorial*. Palmas: SEPLAN, 2012. 79 p. Tocantins, Brasil.

[134] SILVA, J; AMORIM, C. (2013) *O Brise-soleil como elemento de controle solar: estudo de caso em um edifício no Plano Piloto de Brasília*, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

[135] SILVA, K; *et al*. (2015) *Identificação eletrônica para avaliação do comportamento dos suínos na fase de gestação*. Engenharia Agrícola, Brasil.

[136] SILVA, N. (2011) *Telhado verde: sistema construtivo de maior eficiência e menor impacto ambiental* – 2011. 60 f., enc.: il.

[137] SILVA, T; VICENTE, R; AMARAL, C; FIGUEIREDO, A. (2016) *Thermal performance of a window shutter containing PCM: Numerical validation and experimental analysis,* Applied Energy. Vol. 179 (2016), pp. 64–84.

[138] SIQUEIRA, M. P. S. (2008). *Popular housing: the materialization of the houseown in Brazil*. Dimensions, vol. 21, pp. 221-239.

[139] SOUSA, D. (2014) *Estudo da utilização de tintas com alta refletância na envolvente exterior dos edifícios.* Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, Portugal.

[140] SPENCER, J. W. (1982). *A comparison of methods for estimating hourly diffuse solar radiation from global solar radiation.* Solar Energy, 29(1), p. 19-32.

[141] TALEB, H. (2014) *Using passive cooling strategies to improve thermal performance and reduce energy consumption of residential buildings in U.A.E. buildings,* ScienceDirect Frontiers of Achitectural Reserarch. Vol. 3 (2014), pp. 154–165.

[142] TAVARES, P. F., GASPAR, A. R., MARTINS, A. G., & FRONTINI, F. (2014). *Evaluation of electrochromic windows impact in the energy performance of buildings in Mediterranean climates.* Energy Policy, 67, p. 68-81.

[143] TRIANA, M. A., LAMBERTS, R, SASSI, P. (2015). *Characterization of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance*. Energy Policy 87 (2015), pp. 524 – 541.

[144] TRIANA, M. A., LAMBERTSA, R, SASSIB, P. (2018). *Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures*. Energy and Buildings 158 (2018), pp. 1379–1392.

[145] TUBELO, R., RODRIQUES, L., GILLOTT, M., SOARES, J. C. G. (2018). *Cost-effective envelope optimization for social housing in Brazil's moderateclimate zones.* Building and Environment 133 (2018), pp. 213–227. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.038>. Acesso em: 03 de ago. de 2021.

[146] VIEIRA, L; DE CARLI, É. (2017) *Desenvolvimento e implementação de um datalogger de temperatura para utilização em pesquisas na área da secagem artificial de grãos*. Brasil.

[147] WUFI (2008) *WUFI Pro 4.2.* Fraunhofer – IBP, Holzhirchen, Alemanha.

[148] ZHAI, Z; JOHNSON, M; KRARTI, M. (2011) *Assessment of natural and hybrid ventilationmodels in whole-building energy simulations.* Energy and Buildings 43, volume 9 (2011), pp. 2251–2261.

[149] ZINZI, M; AGNOLI, S. (2012) *Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region,* Journal: Energy and Buildings. Vol. 55 (2012), pp. 66–76.

ANEXO I

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA CASA DE HABITAÇÃO SOCIAL

AI.1. VALORES OBTIDOS PARA OS 4 INDICADORES DE CONFORTO TÉRMICO PRECONIZADOS NESTE ESTUDO SEGUNDO AS NORMAS EUROPEIA EN 16798 E AMERICANA ASHRAE 55

AI.2. TEMPERATURA OPERATIVA DAS 24 SIMULAÇÕES E SEUS CENÁRIOS, APRESENTADOS ATRAVÉS DAS LINHAS LIMÍTROFES DE CONFORTO PARA AS NORMAS EN 16798 E ASHRAE 55

AI.3. VARIAÇÃO ANUAL DA TEMPERATURA OPERATIVA INTERIOR PARA AS 24 SIMULAÇÕES E SEUS CENÁRIOS

AI.1. VALORES OBTIDOS PARA OS 4 INDICADORES DE CONFORTO TÉRMICO PRECONIZADOS NESTE ESTUDO SEGUNDO AS NORMAS EUROPEIA EN 16798 E AMERICANA ASHRAE 55

Tabela AI.1 – Indicador 1 segundo EN 16798

SIMULAÇÃO	INDICADOR 1 (ºC)			
	S	P	V	P+V
S1	1,09	0,40	1,18	0,65
S2	0,97	0,37	1,09	0,62
S3	0,64	0,19	0,81	0,40
S4	0,66	0,22	0,82	0,43
S5	1,27	0,50	1,31	0,74
S6	1,12	0,45	1,22	0,69
S7	0,74	0,27	0,90	0,49
S8	0,80	0,29	0,94	0,51
S9	0,73	0,38	0,90	0,63
S10	0,68	0,35	0,86	0,58
S11	0,37	0,14	0,60	0,38
S12	0,36	0,18	0,58	0,40
S13	0,88	0,48	1,04	0,71
S14	0,80	0,42	0,97	0,67
S15	0,46	0,25	0,68	0,46
S16	0,47	0,27	0,68	0,47
S17	0,99	0,41	1,11	0,65
S18	0,89	0,39	1,05	0,63
S19	0,59	0,20	0,77	0,43
S20	0,61	0,26	0,78	0,45
S21	1,20	0,53	1,30	0,77
S22	1,04	0,47	1,17	0,72
S23	0,69	0,30	0,85	0,51
S24	0,73	0,31	0,90	0,53
Média	0,78	0,33	0,94	0,56
Máxima	1,27	0,53	1,31	0,77
Mínimo	0,36	0,14	0,58	0,38

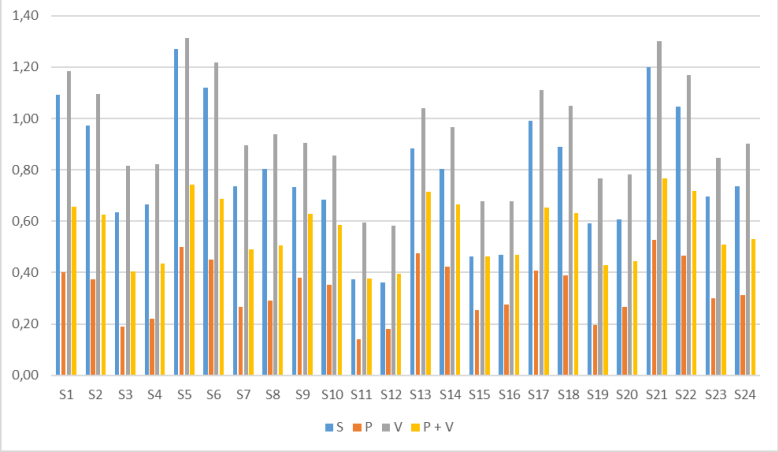


Figura AI.1 – Indicador 1: EN 16798

Tabela AI.2 - Indicador 1 segundo ASHRAE 55

SIMULAÇÃO	INDICADOR 1 (ºC)			
	S	P	V	P+V
S1	1,55	0,77	1,63	1,03
S2	1,43	0,73	1,54	0,98
S3	1,06	0,52	1,24	0,77
S4	1,09	0,53	1,26	0,78
S5	1,71	0,89	1,75	1,14
S6	1,56	0,83	1,65	1,07
S7	1,17	0,61	1,33	0,85
S8	1,23	0,62	1,37	0,89
S9	1,19	0,74	1,36	1,01
S10	1,12	0,70	1,30	0,96
S11	0,76	0,49	1,00	0,75
S12	0,74	0,49	0,98	0,76
S13	1,34	0,87	1,49	1,12
S14	1,24	0,81	1,40	1,05
S15	0,87	0,59	1,09	0,82
S16	0,87	0,59	1,10	0,87
S17	1,48	0,78	1,59	1,05
S18	1,38	0,75	1,53	1,02
S19	1,00	0,55	1,20	0,81
S20	1,03	0,54	1,23	0,81
S21	1,67	0,93	1,76	1,19
S22	1,51	0,85	1,64	1,10
S23	1,12	0,62	1,31	0,88
S24	1,19	0,65	1,37	0,92
Média	1,22	0,68	1,38	0,94
Máxima	1,71	0,93	1,76	1,19
Mínimo	0,74	0,49	0,98	0,75

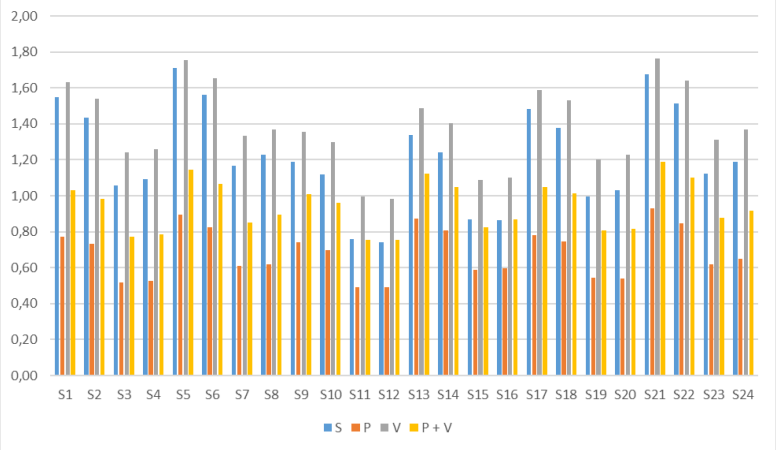


Figura AI.2 - Indicador 1: ASHRAE 55

Tabela AI.3 - Indicador 2 segundo EN 16798

SIMULAÇÃO	INDICADOR 2 (%)			
	S	P	V	P+V
S1	22,5	3,8	18,4	6,5
S2	20,4	2,7	17,0	5,5
S3	13,1	0,5	12,3	2,9
S4	15,0	0,6	13,5	3,1
S5	25,9	6,5	20,8	8,7
S6	23,6	4,7	19,0	7,4
S7	17,5	1,2	15,1	4,1
S8	20,0	1,7	16,4	5,0
S9	15,1	3,5	13,8	6,3
S10	13,2	2,5	12,7	5,4
S11	5,2	0,4	7,4	2,6
S12	5,3	0,5	7,5	2,8
S13	19,3	6,4	16,2	8,6
S14	17,0	4,6	15,0	7,2
S15	8,5	1,0	9,8	4,0
S16	9,5	1,4	10,4	4,9
S17	20,4	3,5	18,1	6,7
S18	18,6	2,9	16,7	6,1
S19	10,6	0,6	11,8	3,2
S20	12,3	0,7	12,9	3,7
S21	24,2	7,0	20,2	9,5
S22	21,8	5,0	18,8	7,8
S23	15,1	1,3	14,6	4,6
S24	17,6	2,0	15,9	5,7
Média	16,3	2,7	14,8	5,5
Máxima	25,9	7,0	20,8	9,5
Mínimo	5,2	0,4	7,4	2,6

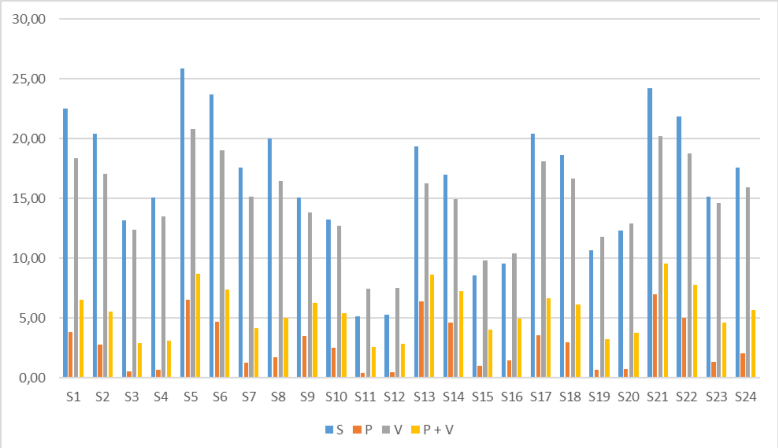


Figura AI.3 – Indicador 2: EN 16798

Tabela AI.4 - Indicador 2 segundo ASHRAE 55

SIMULAÇÃO	INDICADOR 2 (%)			
	S	P	V	P+V
S1	36,0	15,6	28,9	16,5
S2	34,6	13,6	27,9	15,3
S3	31,7	8,7	25,0	12,1
S4	33,8	9,6	26,1	13,0
S5	39,5	19,7	31,4	19,0
S6	38,3	17,1	30,1	17,7
S7	36,8	11,9	27,9	14,7
S8	39,5	14,4	29,4	15,8
S9	30,2	15,8	24,7	16,4
S10	29,1	13,9	24,0	15,3
S11	23,7	8,7	20,0	11,9
S12	24,6	9,7	20,3	12,9
S13	34,5	20,3	27,3	19,2
S14	33,2	17,6	26,4	17,9
S15	29,1	12,4	23,1	15,0
S16	31,4	15,1	23,8	16,1
S17	33,0	14,4	28,3	16,3
S18	32,0	13,8	27,1	15,9
S19	28,2	8,7	24,3	12,6
S20	29,9	10,2	25,3	13,8
S21	36,7	19,6	30,3	19,7
S22	35,5	17,1	29,2	18,2
S23	33,1	12,3	26,9	15,3
S24	34,9	14,6	28,0	16,8
Média	32,9	14,0	26,5	15,7
Máxima	39,5	20,3	31,4	19,7
Mínimo	23,7	8,7	20,0	11,9

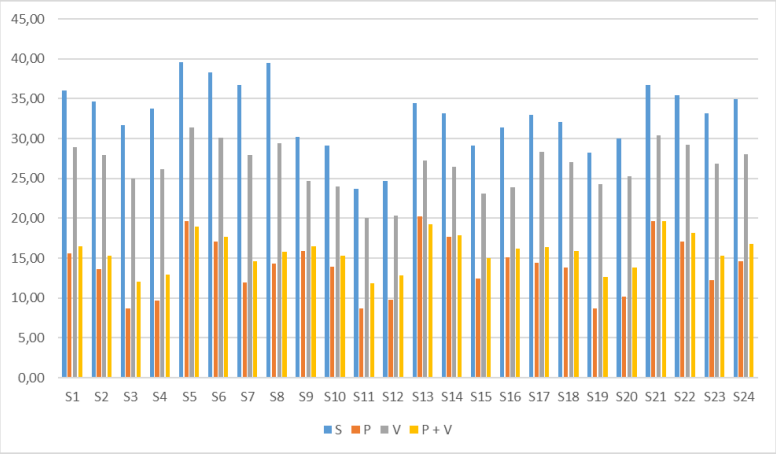


Figura AI.4 – Indicador 2: ASHRAE 55

Tabela AI.5 – Indicador 3 segundo EN 16798

SIMULAÇÃO	INDICADOR 3 (ºC)			
	S	P	V	P+V
S1	2,53	2,90	3,03	3,31
S2	2,48	2,94	2,98	3,32
S3	2,10	2,84	2,68	3,18
S4	2,07	2,74	2,67	3,12
S5	2,44	2,77	2,97	3,24
S6	2,39	2,80	2,92	3,24
S7	1,99	2,64	2,60	3,05
S8	1,95	2,53	2,58	2,99
S9	2,45	2,78	3,00	3,23
S10	2,42	2,83	2,97	3,25
S11	2,13	2,72	2,71	3,10
S12	2,08	2,61	2,69	3,02
S13	2,36	2,64	2,93	3,15
S14	2,32	2,69	2,90	3,16
S15	1,97	2,51	2,60	2,97
S16	1,91	2,38	2,58	2,90
S17	2,66	3,01	3,12	3,39
S18	2,59	2,99	3,08	3,36
S19	2,22	2,89	2,79	3,21
S20	2,21	2,80	2,79	3,16
S21	2,58	2,85	3,09	3,30
S22	2,51	2,87	3,03	3,28
S23	2,12	2,70	2,71	3,10
S24	2,11	2,60	2,71	3,05
Média	2,27	2,75	2,84	3,17
Máxima	2,66	3,01	3,12	3,39
Mínimo	1,91	2,38	2,58	2,90

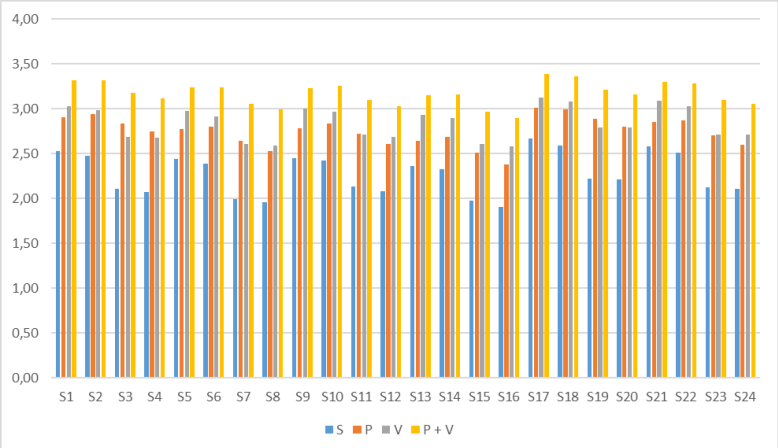


Figura AI.5 - Indicador 3: EN 16798

Tabela AI.6 - Indicador 3 segundo ASHRAE 55

SIMULAÇÃO	INDICADOR 3 (ºC)			
	S	P	V	P+V
S1	1,94	2,21	2,39	2,63
S2	1,90	2,22	2,35	2,63
S3	1,54	2,01	2,04	2,43
S4	1,51	1,93	2,03	2,39
S5	1,87	2,13	2,34	2,57
S6	1,83	2,13	2,28	2,57
S7	1,44	1,87	1,96	2,35
S8	1,42	1,80	1,95	2,29
S9	1,86	2,09	2,35	2,54
S10	1,84	2,11	2,32	2,55
S11	1,51	1,89	2,05	2,35
S12	1,46	1,79	2,02	2,29
S13	1,78	2,00	2,28	2,48
S14	1,76	2,01	2,26	2,49
S15	1,39	1,74	1,96	2,26
S16	1,35	1,65	1,93	2,20
S17	2,05	2,31	2,48	2,70
S18	1,99	2,28	2,44	2,68
S19	1,64	2,07	2,15	2,48
S20	1,63	2,00	2,16	2,45
S21	1,98	2,20	2,45	2,64
S22	1,92	2,19	2,38	2,62
S23	1,55	1,95	2,07	2,40
S24	1,53	1,88	2,08	2,37
Média	1,70	2,02	2,20	2,47
Máxima	2,05	2,31	2,48	2,70
Mínimo	1,35	1,65	1,93	2,20

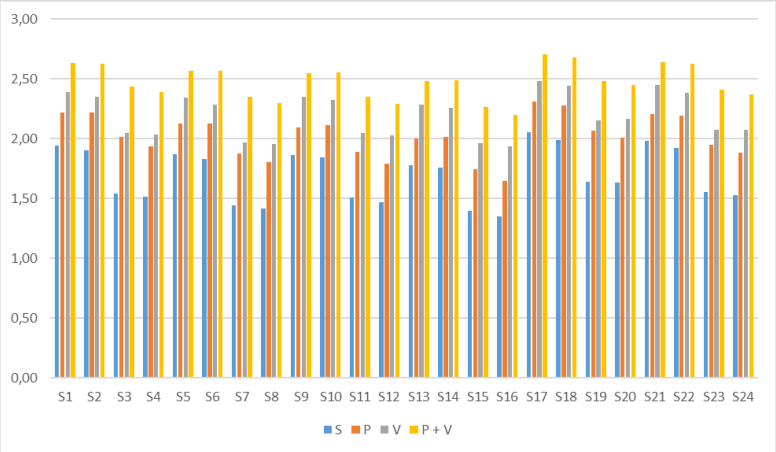


Figura AI.6 – Indicador 3: ASHRAE 55

Tabela AI.7 – Indicador 4 segundo EN 16798

SIMULAÇÃO	INDICADOR 4 (h)			
	S	P	V	P+V
S1	7,32	4,35	6,24	4,43
S2	7,10	4,48	6,02	4,42
S3	6,19	3,67	5,36	4,06
S4	6,07	4,07	5,37	3,93
S5	7,95	4,85	6,61	4,67
S6	7,67	4,65	6,37	4,61
S7	6,65	4,28	5,73	4,53
S8	7,04	4,14	5,97	4,28
S9	6,09	4,31	5,42	4,44
S10	6,14	4,49	5,31	4,35
S11	5,14	3,09	4,99	3,96
S12	5,32	3,42	4,88	4,07
S13	6,81	4,79	5,76	4,74
S14	6,58	4,71	5,70	4,57
S15	5,94	4,19	5,29	4,43
S16	5,81	3,85	4,99	4,27
S17	6,78	4,13	6,00	4,39
S18	6,58	4,08	5,82	4,48
S19	5,65	3,80	5,17	4,21
S20	5,75	4,06	5,07	4,23
S21	7,33	4,68	6,21	4,63
S22	7,10	4,49	6,12	4,77
S23	5,79	4,03	5,30	4,46
S24	6,06	4,00	5,47	4,28
Média	6,45	4,19	5,63	4,38
Máxima	7,95	4,85	6,61	4,77
Mínimo	5,14	3,09	4,88	3,93

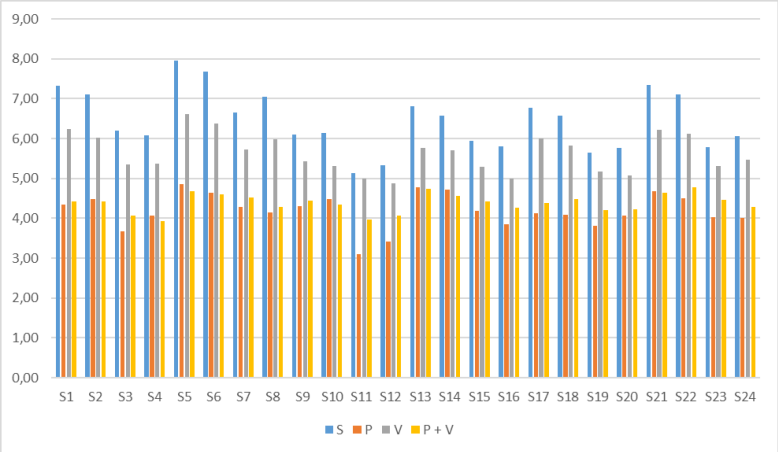


Figura AI.7- Indicador 3: EN 16798

Tabela AI.8 - Indicador 4 segundo ASHRAE 55

SIMULAÇÃO	INDICADOR 4 (h)			
	S	P	V	P+V
S1	10,01	6,99	8,07	6,25
S2	9,98	6,95	8,03	6,08
S3	10,10	6,86	7,85	6,01
S4	10,16	6,70	7,73	6,04
S5	10,50	7,27	8,60	6,60
S6	10,48	7,39	8,25	6,54
S7	10,39	6,93	7,91	6,26
S8	10,68	6,99	8,00	6,38
S9	9,50	7,12	7,54	6,29
S10	9,76	7,13	7,65	6,14
S11	9,71	7,12	7,13	6,12
S12	9,50	6,99	7,10	6,16
S13	9,96	7,55	7,86	6,67
S14	10,06	7,77	7,82	6,58
S15	10,68	7,34	7,48	6,47
S16	10,26	7,33	7,51	6,52
S17	9,17	6,49	7,82	6,15
S18	9,17	6,63	7,67	6,14
S19	8,80	6,20	7,33	5,94
S20	8,69	6,19	7,39	6,00
S21	9,68	7,05	8,34	6,58
S22	9,68	6,99	7,97	6,46
S23	9,21	6,60	7,65	6,23
S24	9,41	6,72	7,71	6,15
Média	9,81	6,97	7,77	6,28
Máxima	10,68	7,77	8,60	6,67
Mínimo	8,69	6,19	7,10	5,94

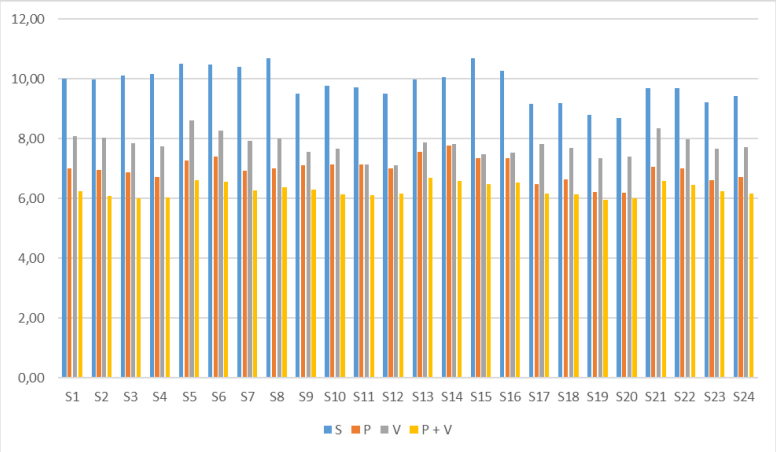


Figura AI.8 – Indicador 4: ASHRAE 55

AI.2. TEMPERATURA OPERATIVA DAS 24 SIMULAÇÕES E SEUS CENÁRIOS, APRESENTADOS ATRAVÉS DAS LINHAS LIMÍTROFES DE CONFORTO PARA AS NORMAS EN 16798 E ASHRAE 55

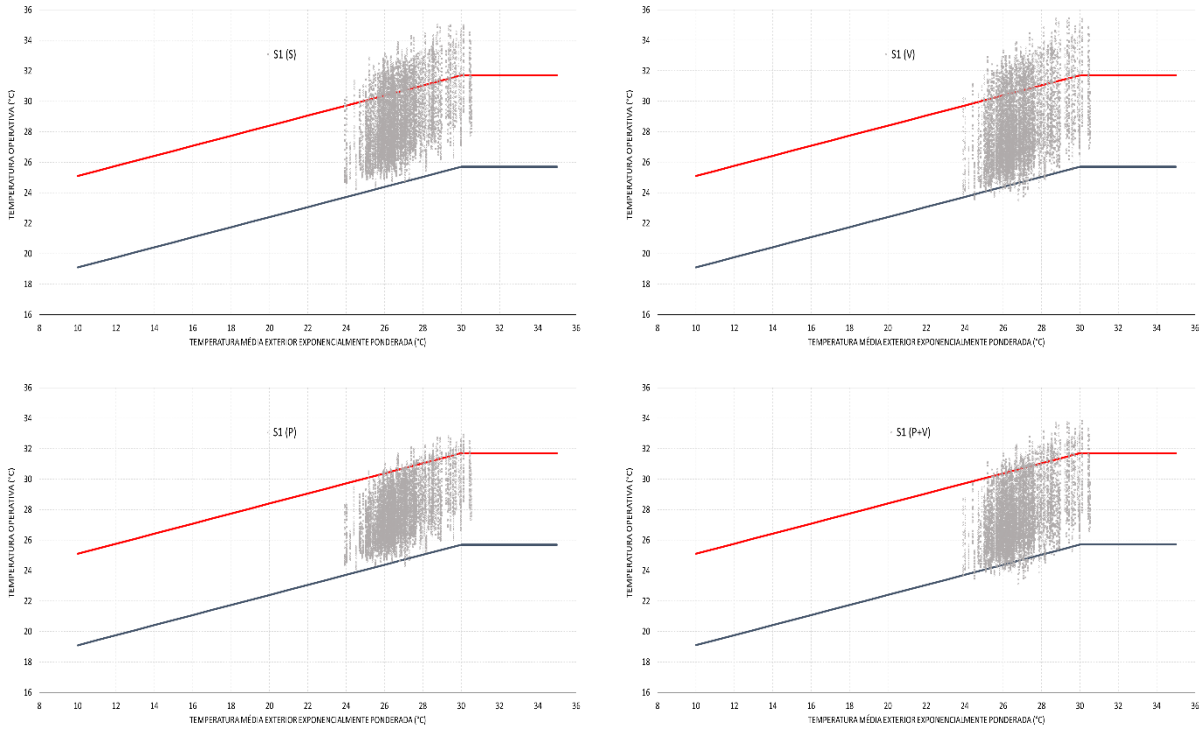


Figura AI.9 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S1 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

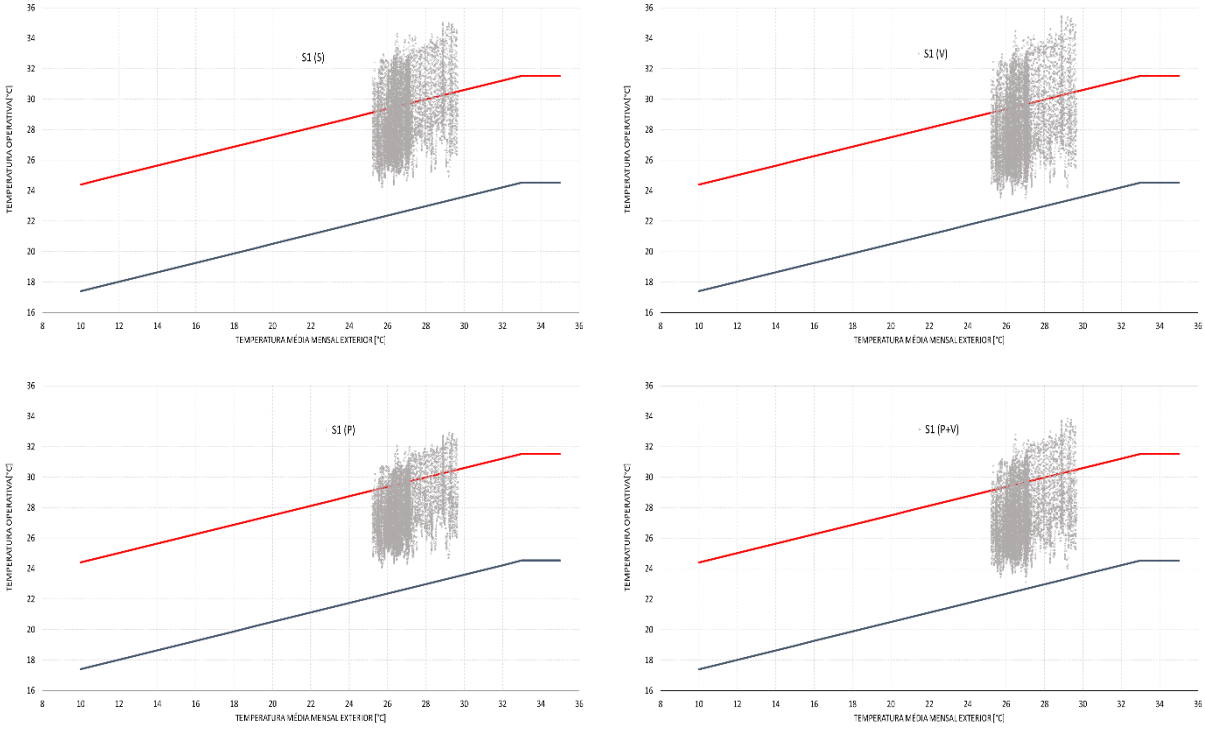


Figura AI.10 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S1 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S2

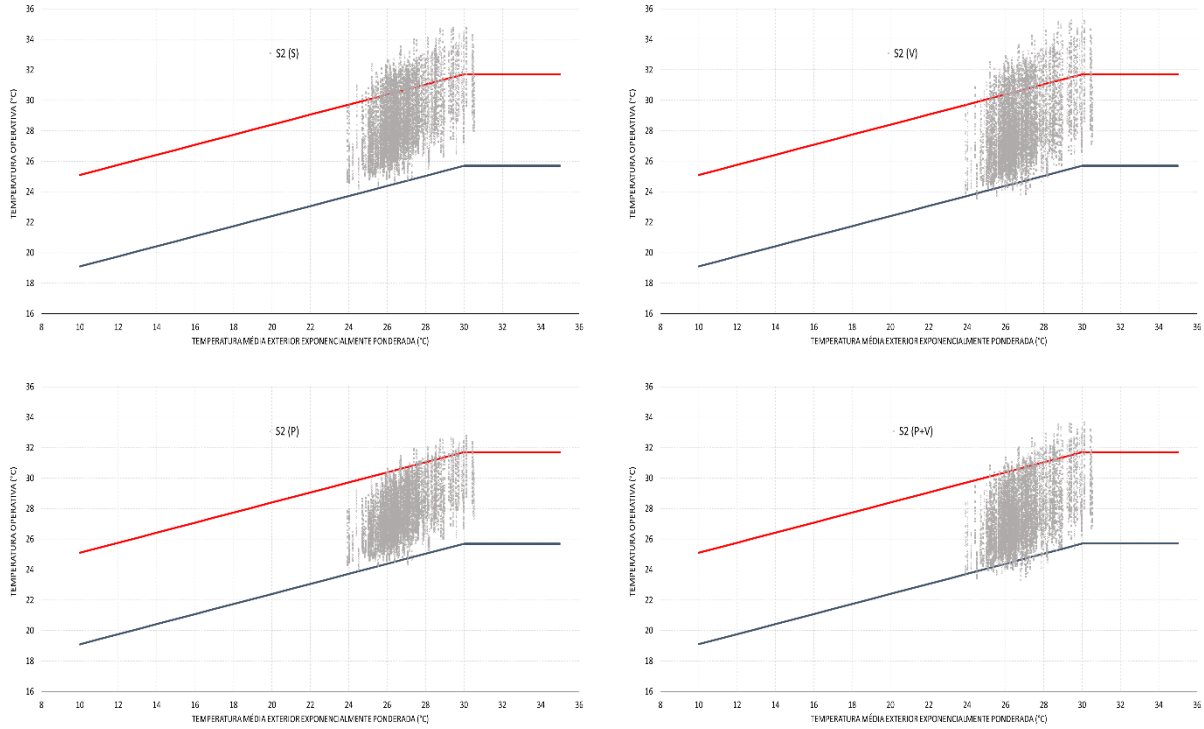


Figura AI.11 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S2 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

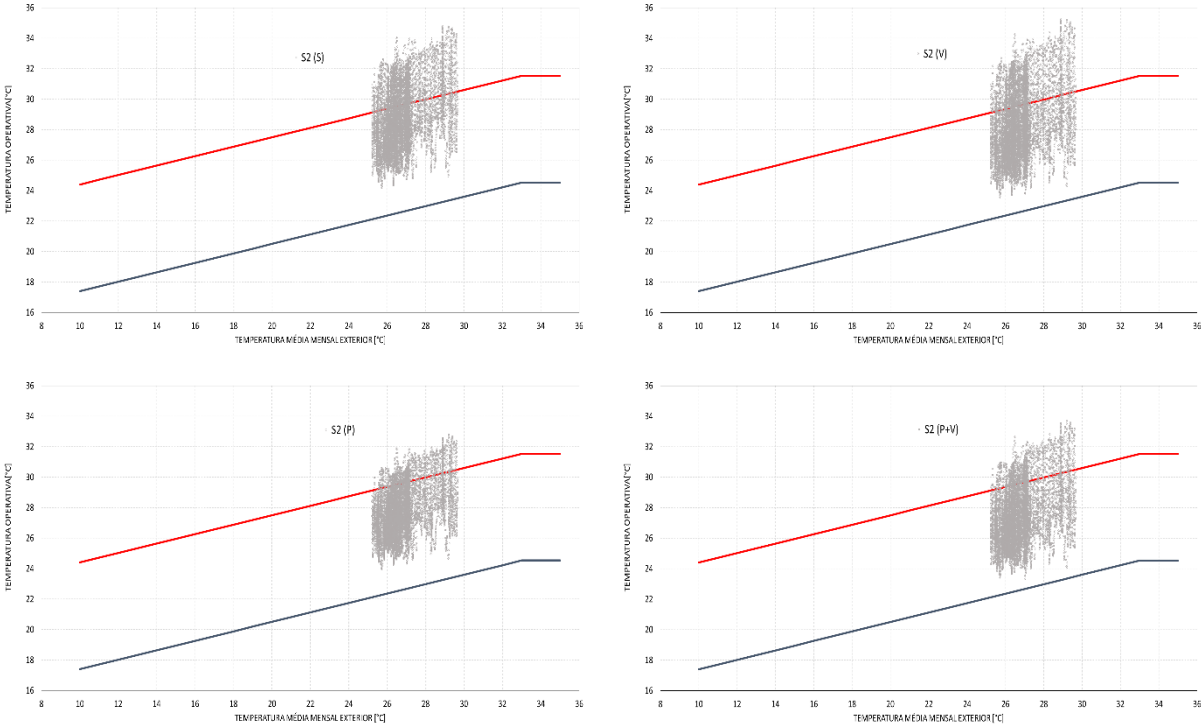


Figura AI.12 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S2 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S3

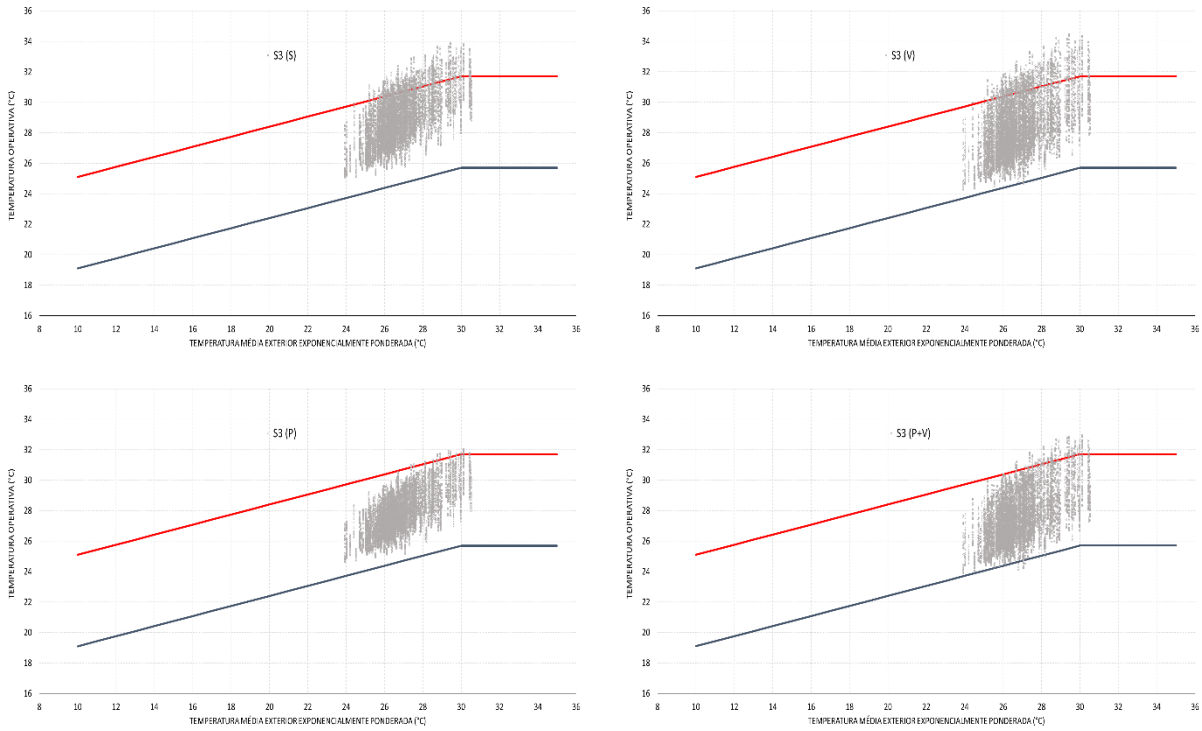


Figura AI.13 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S3 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

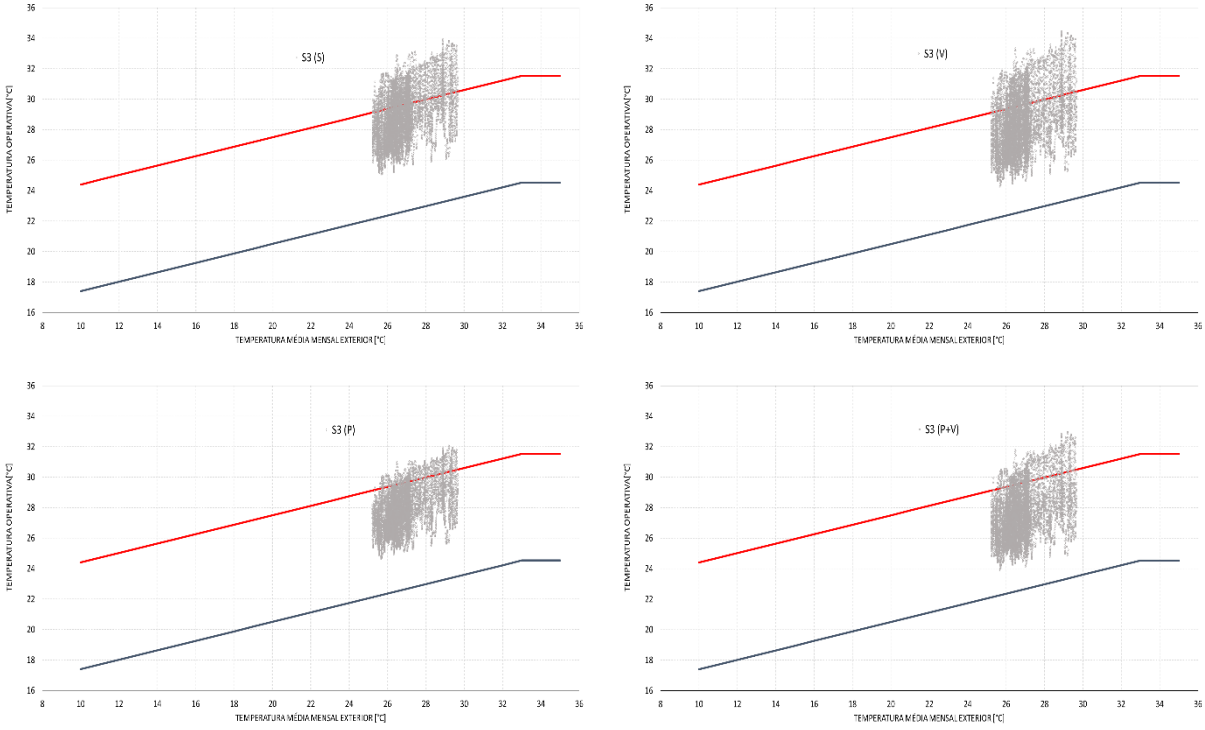


Figura AI.14 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S3 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S4

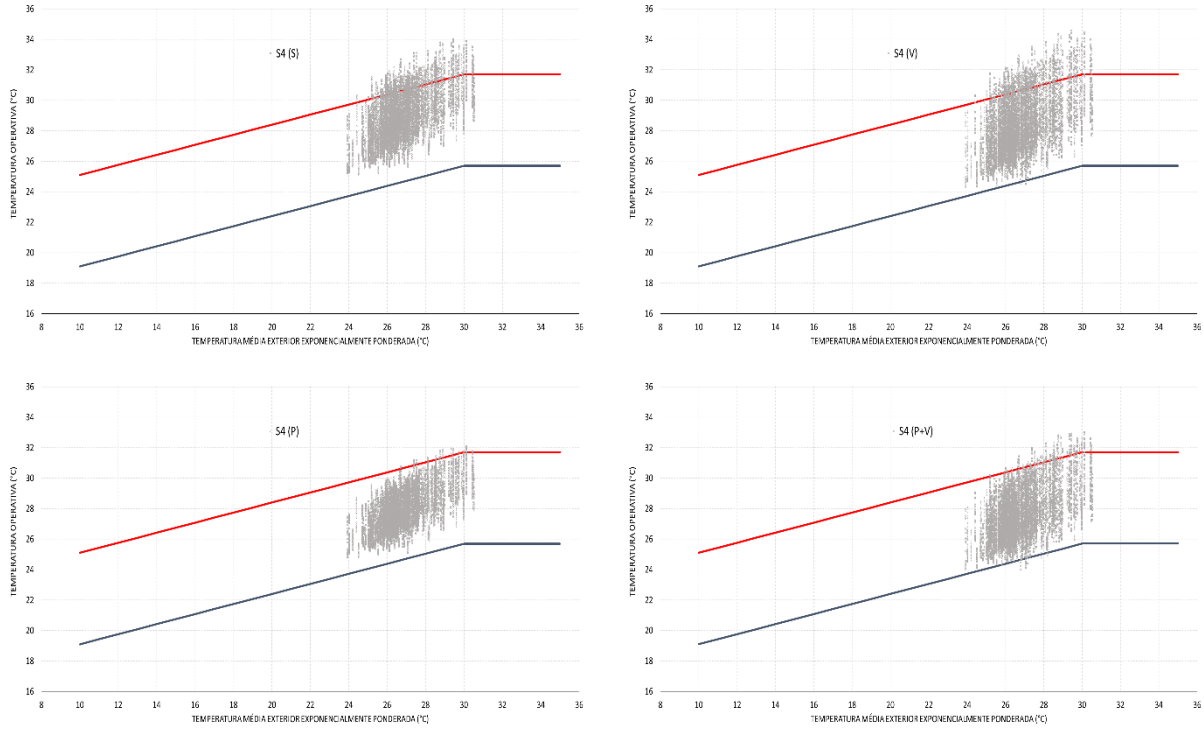


Figura AI.15 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S4 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

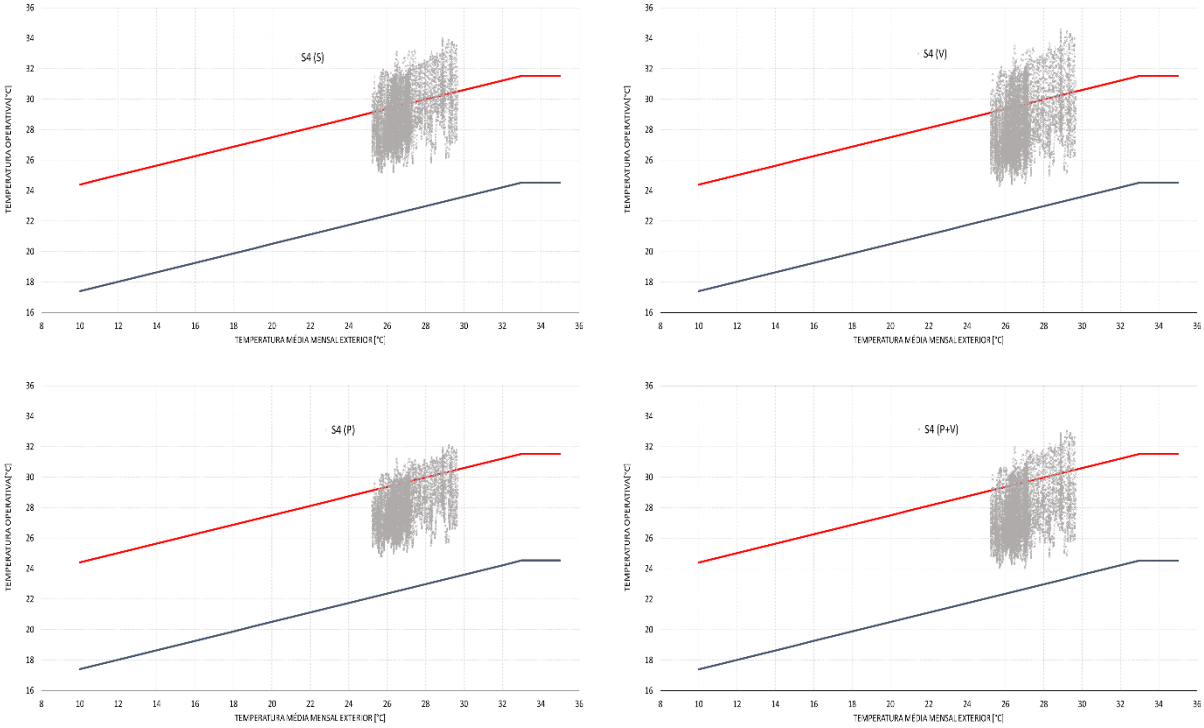


Figura AI.16 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S4 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S5

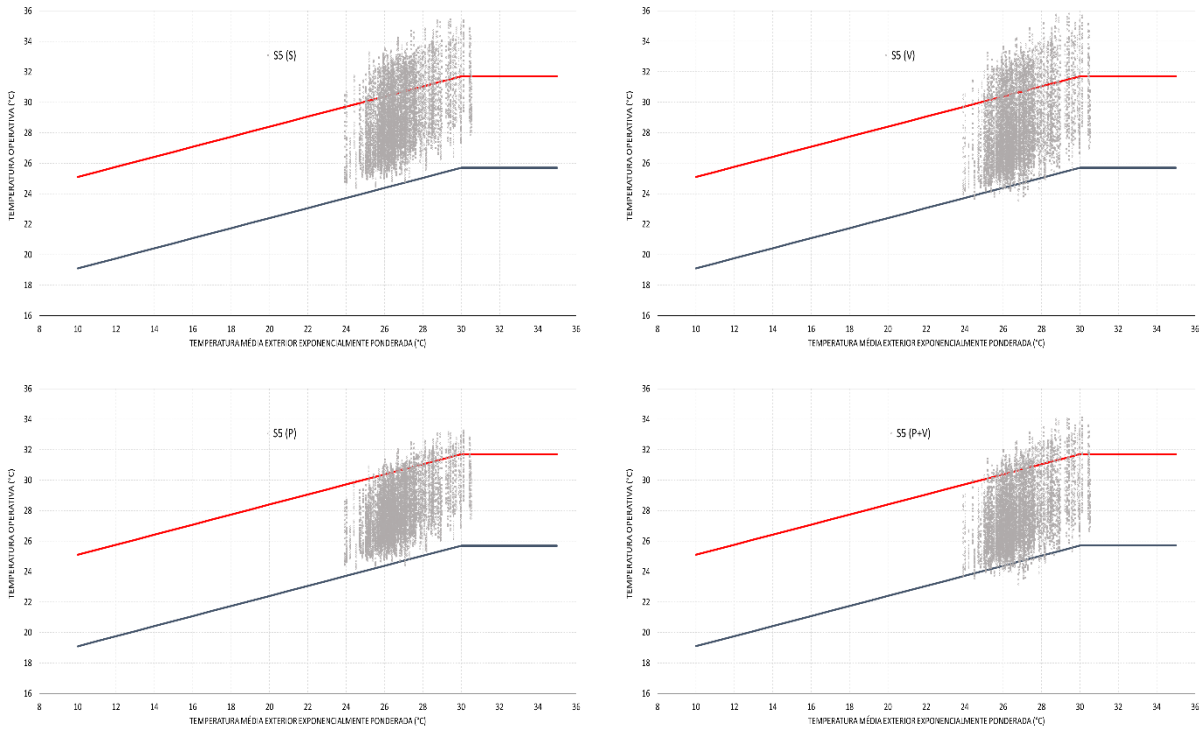


Figura AI.17 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S5 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

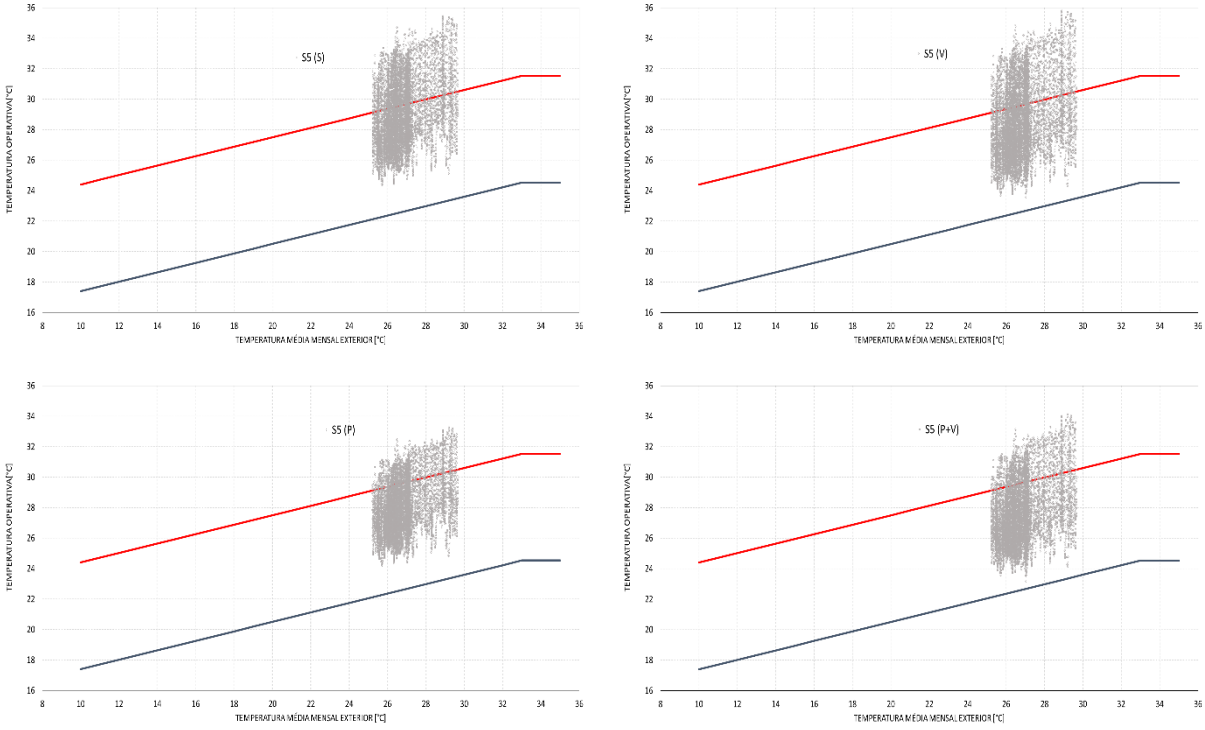


Figura AI.18 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S5 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S6

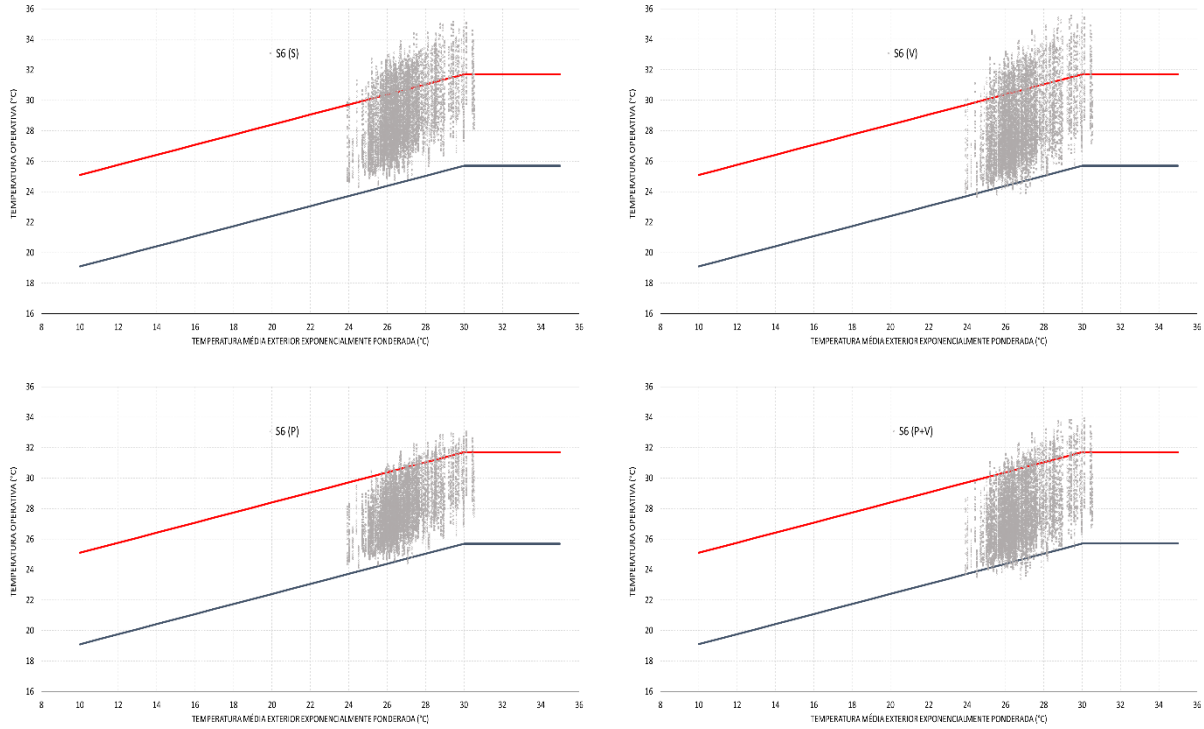


Figura AI.19 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S6 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

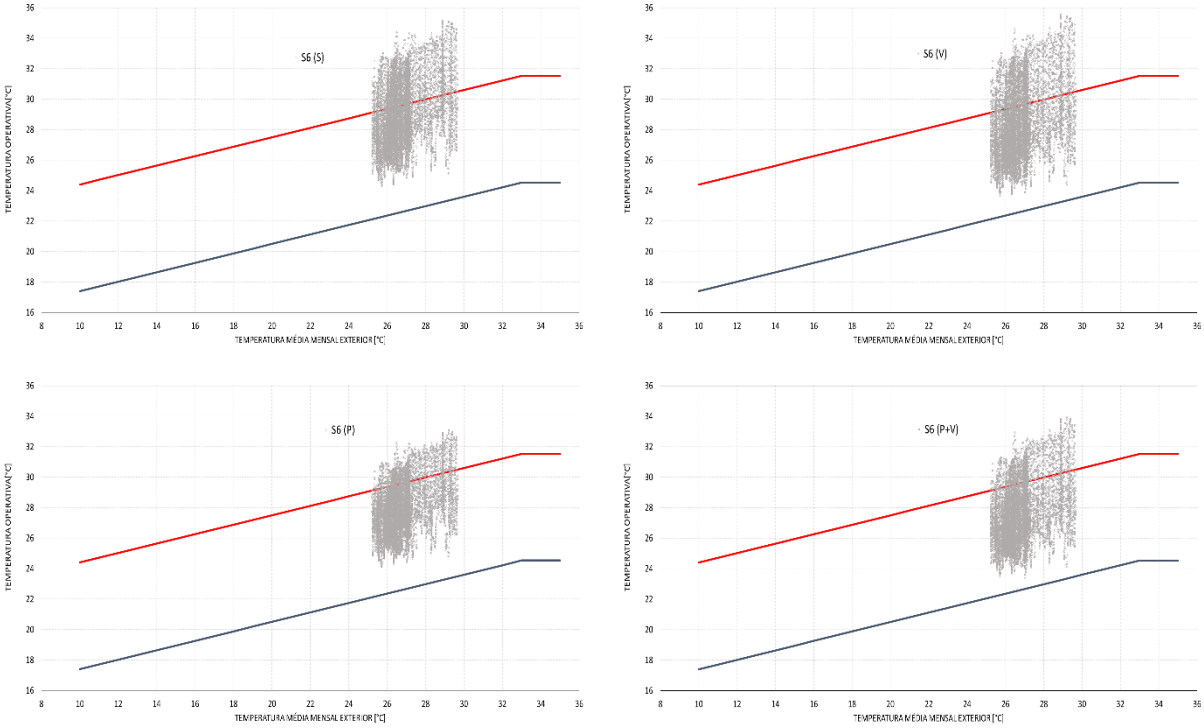


Figura AI.20 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S6 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S7

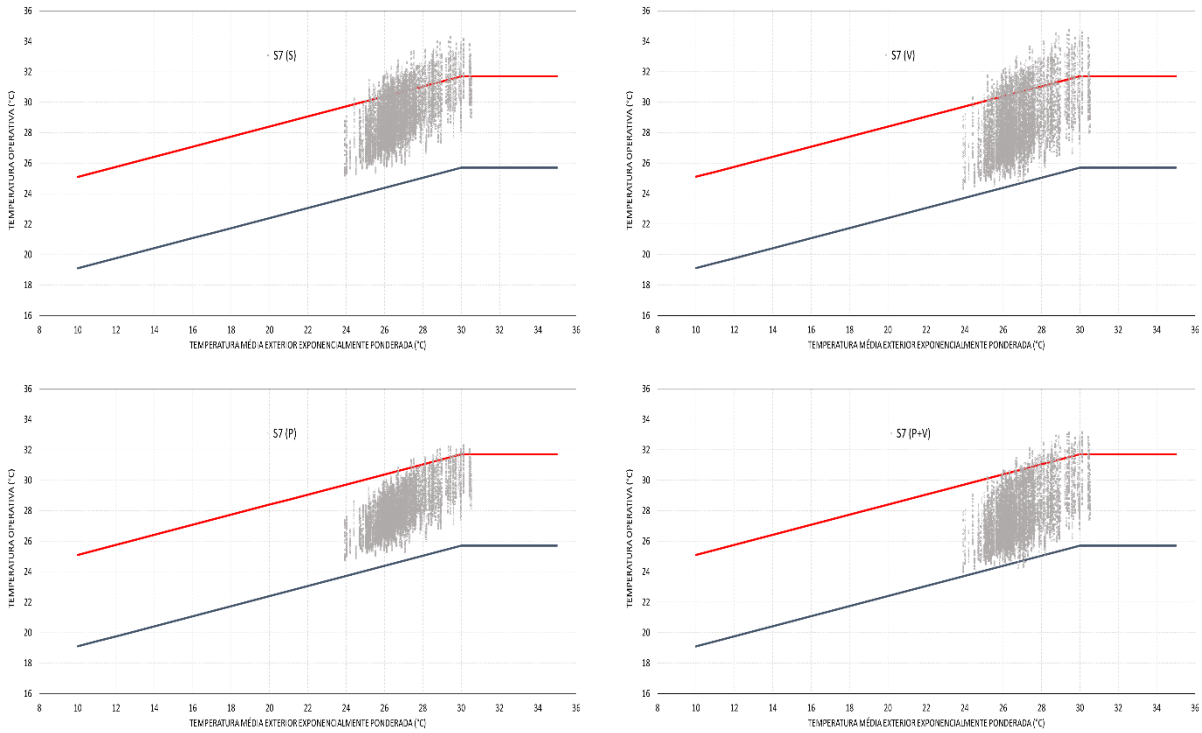


Figura AI.21 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S7 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

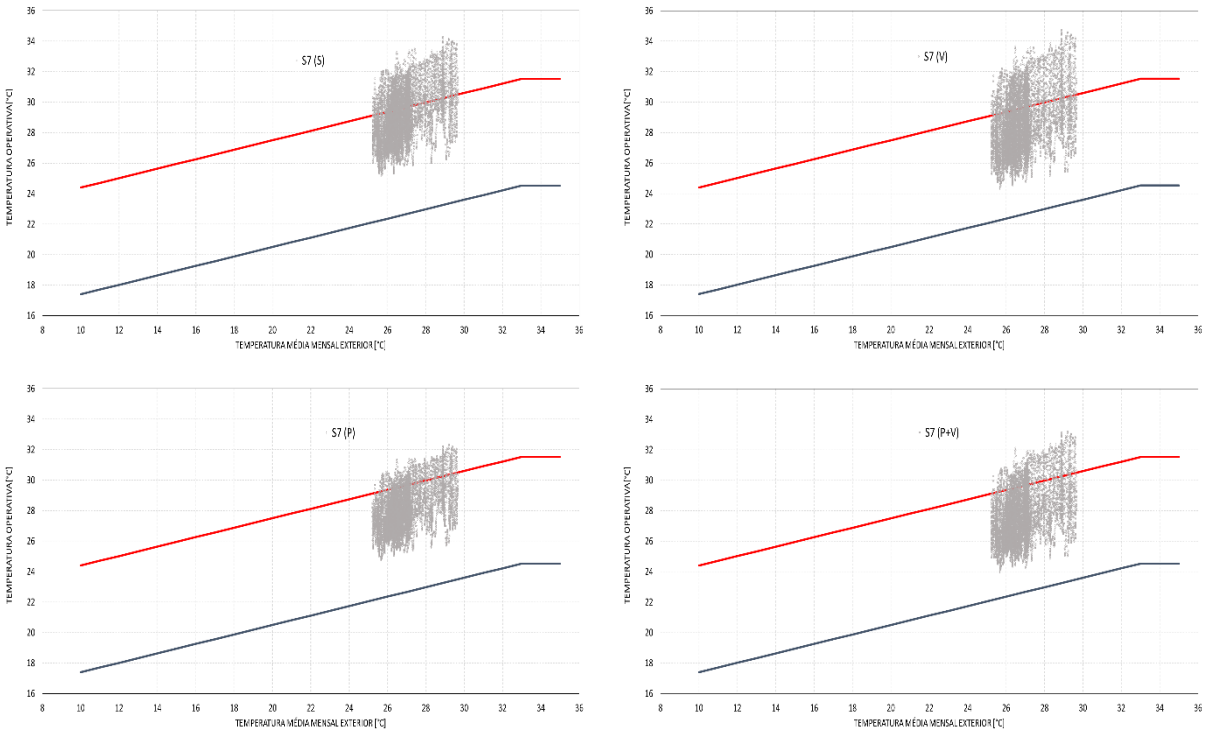


Figura AI.22 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S7 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S8

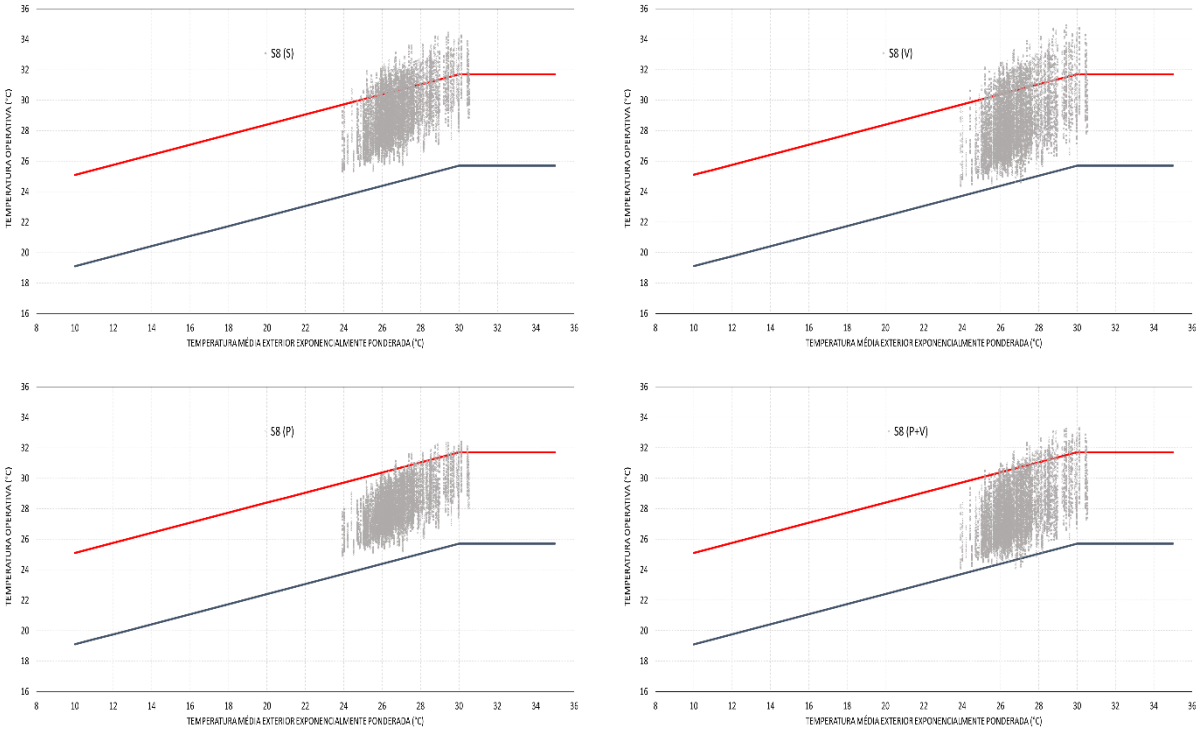


Figura AI.23 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S8 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

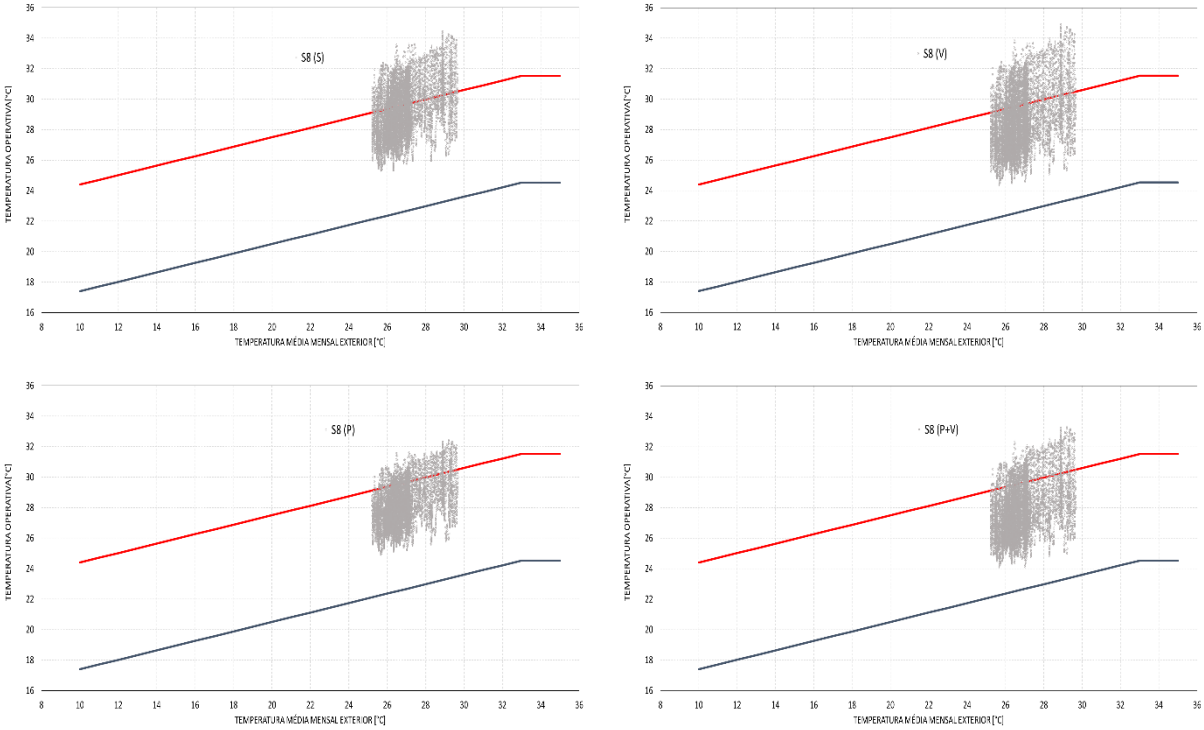


Figura AI.24 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S8 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S9

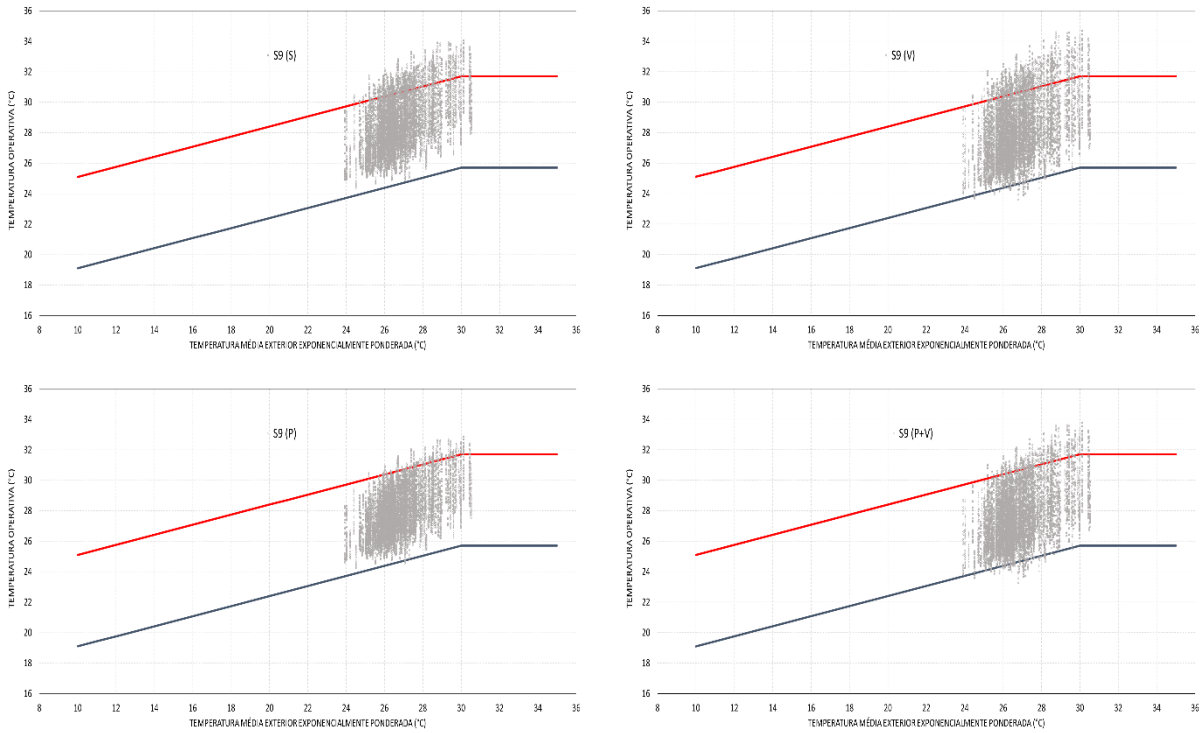


Figura AI.25 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S9 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

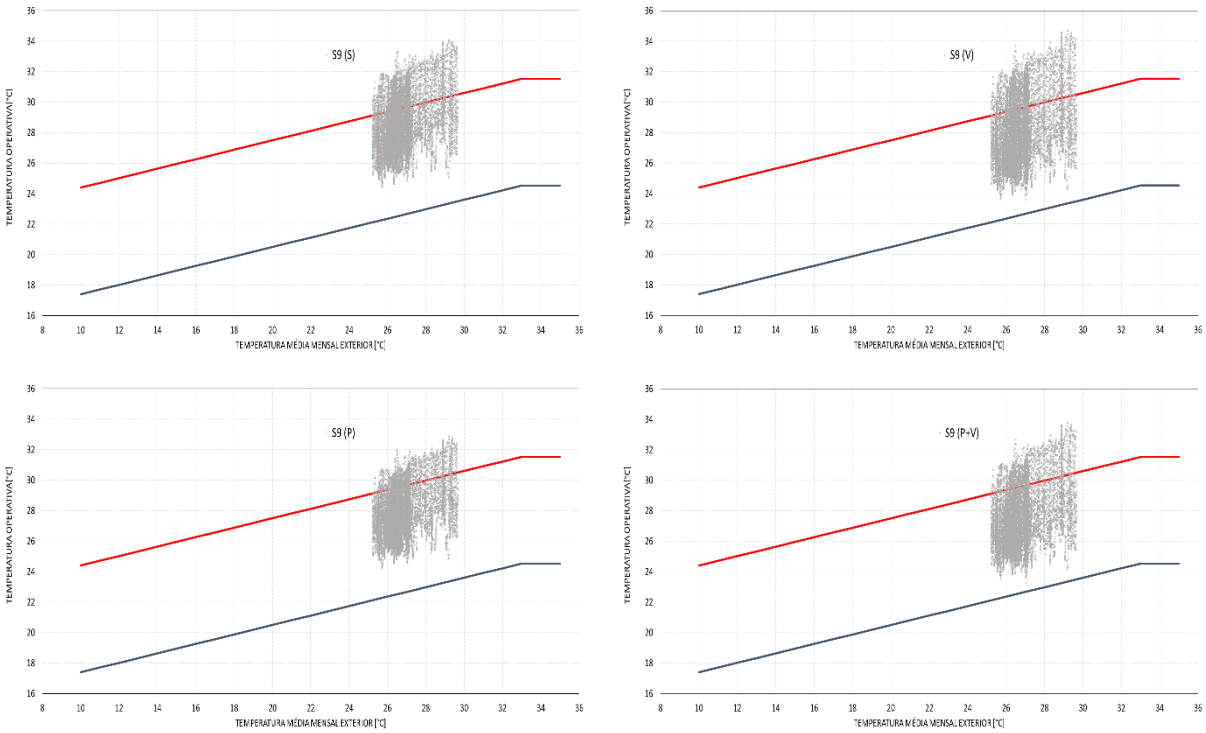


Figura AI.26 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S9 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S10

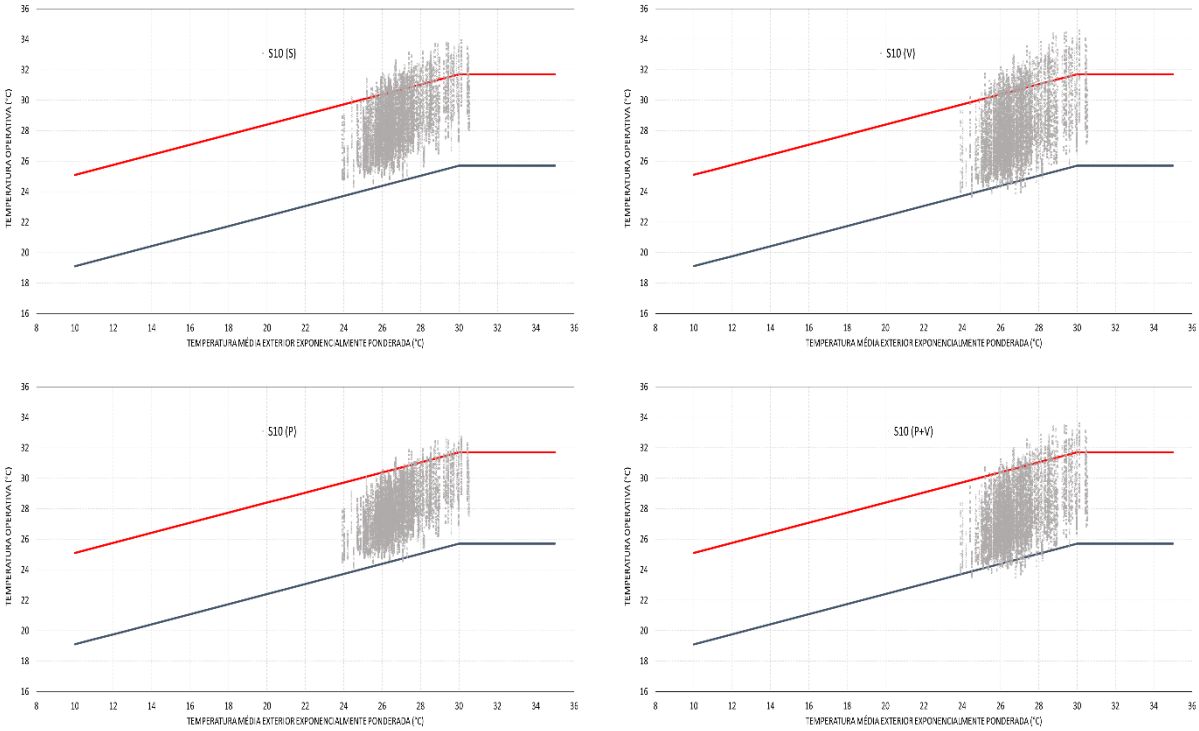


Figura AI.27 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S10 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

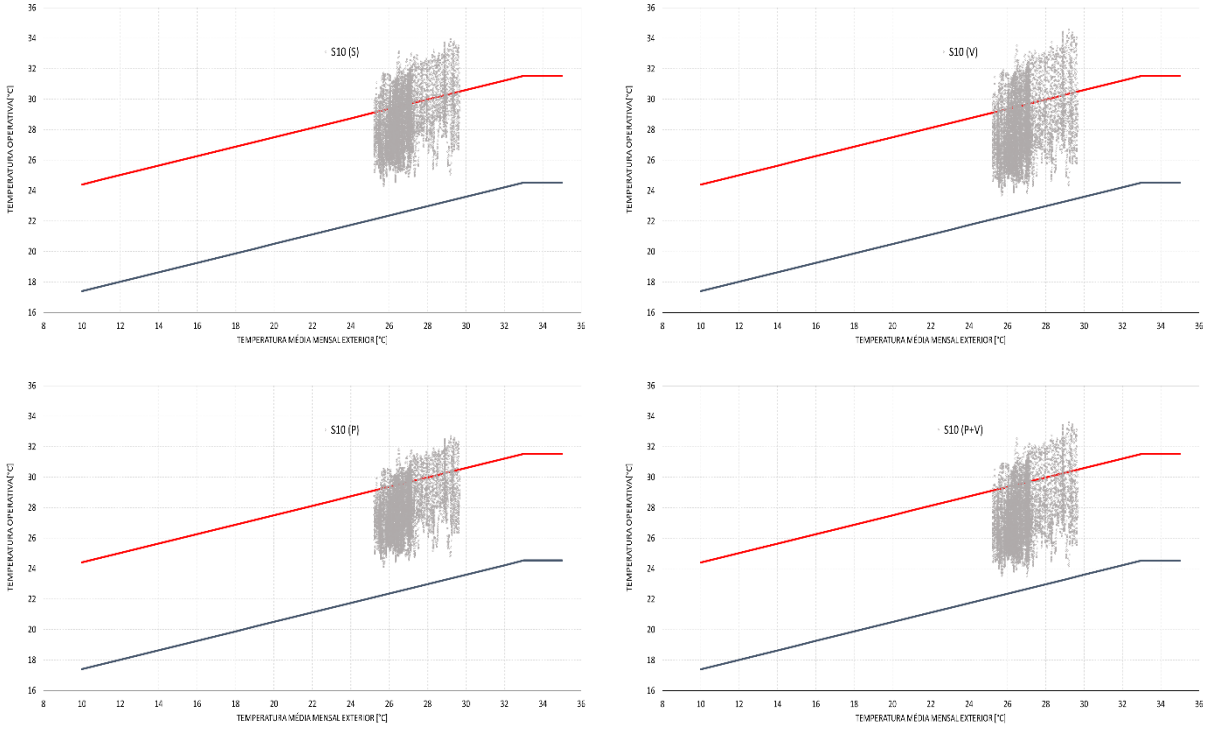


Figura AI.28 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S10 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S11

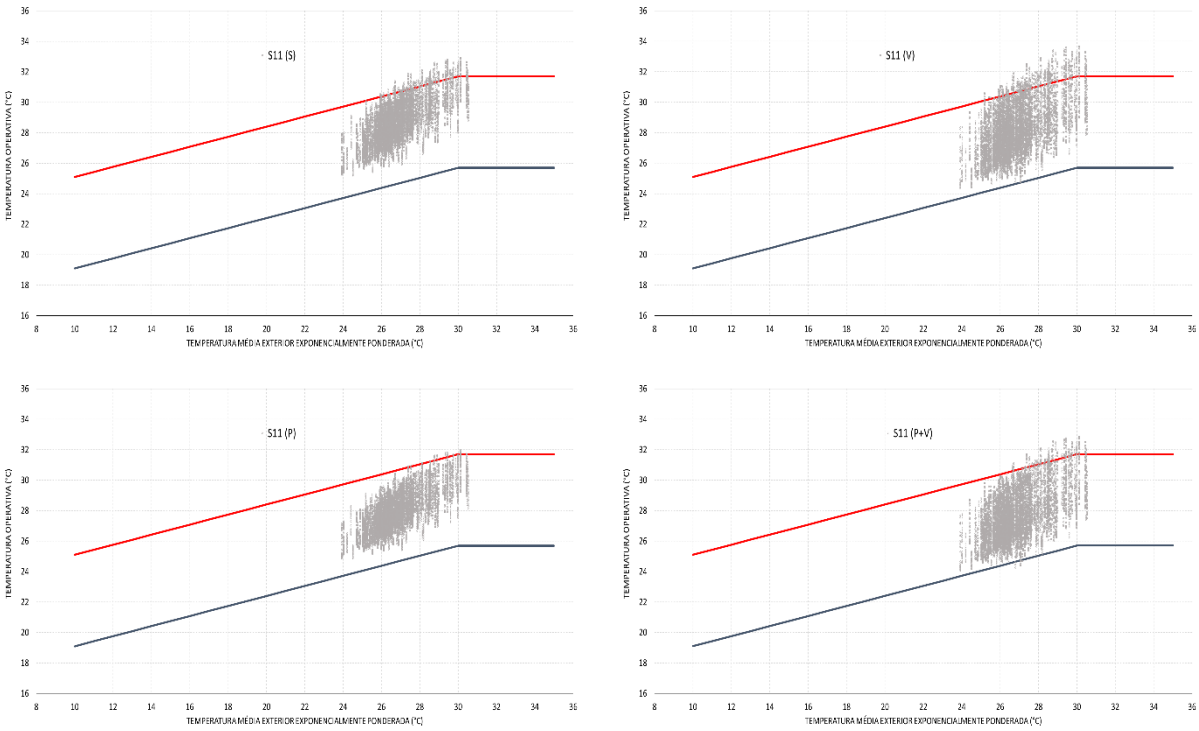


Figura AI.29 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S11 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

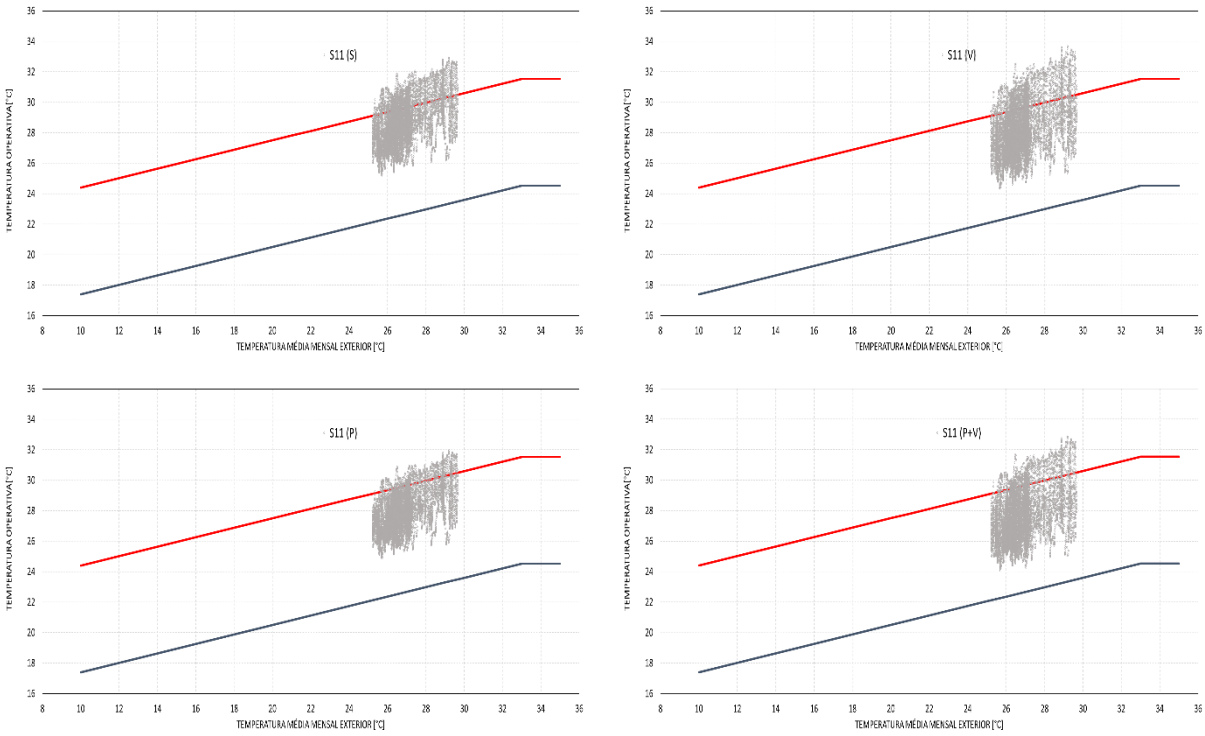


Figura AI.30 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S11 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S12

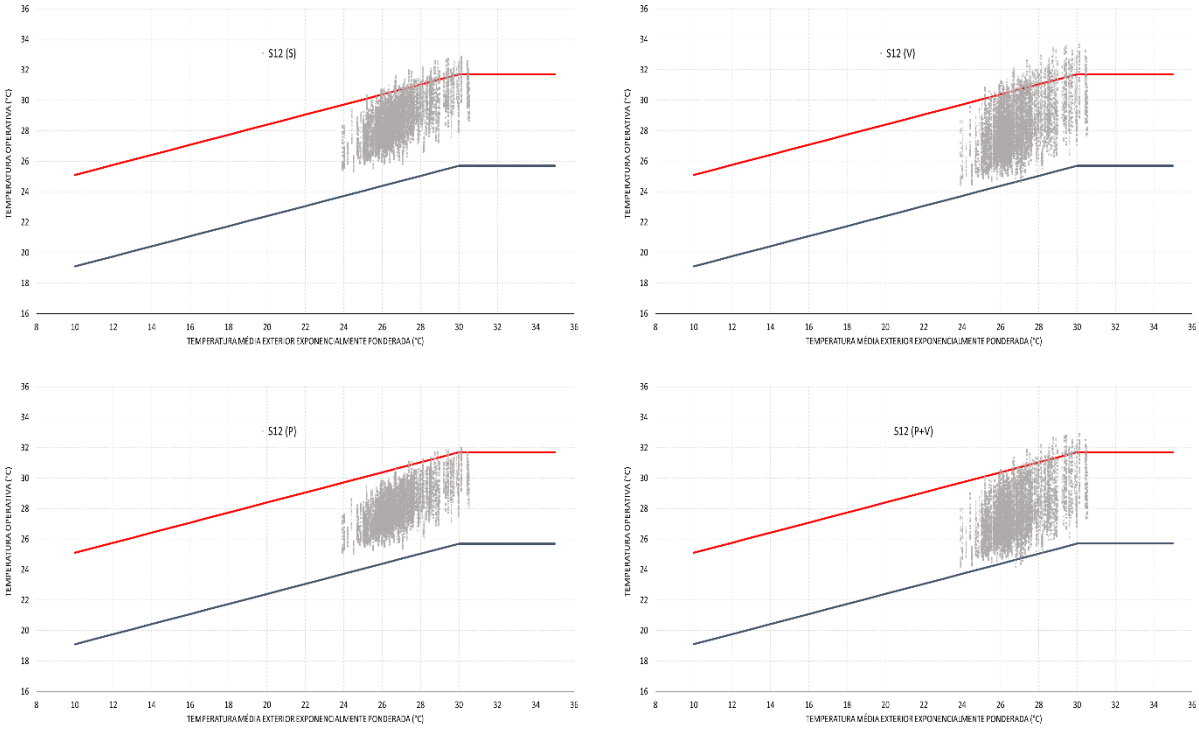


Figura AI.31 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S12 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

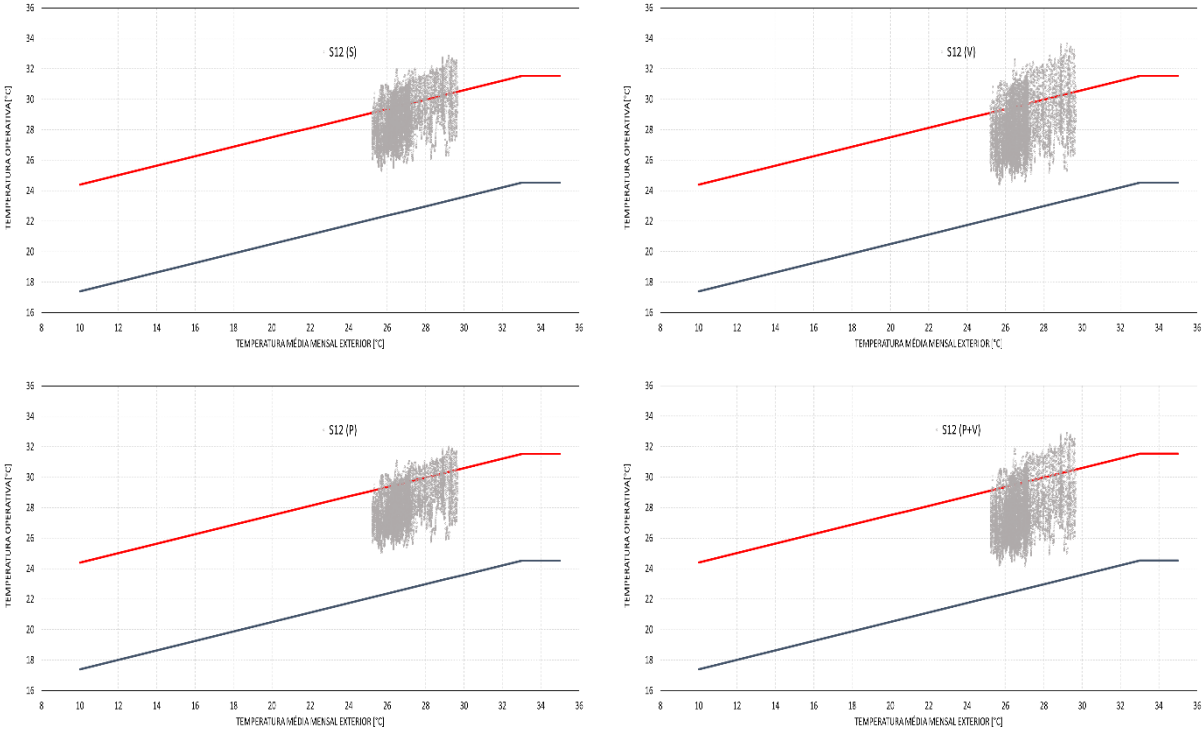


Figura AI.32 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S12 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S13

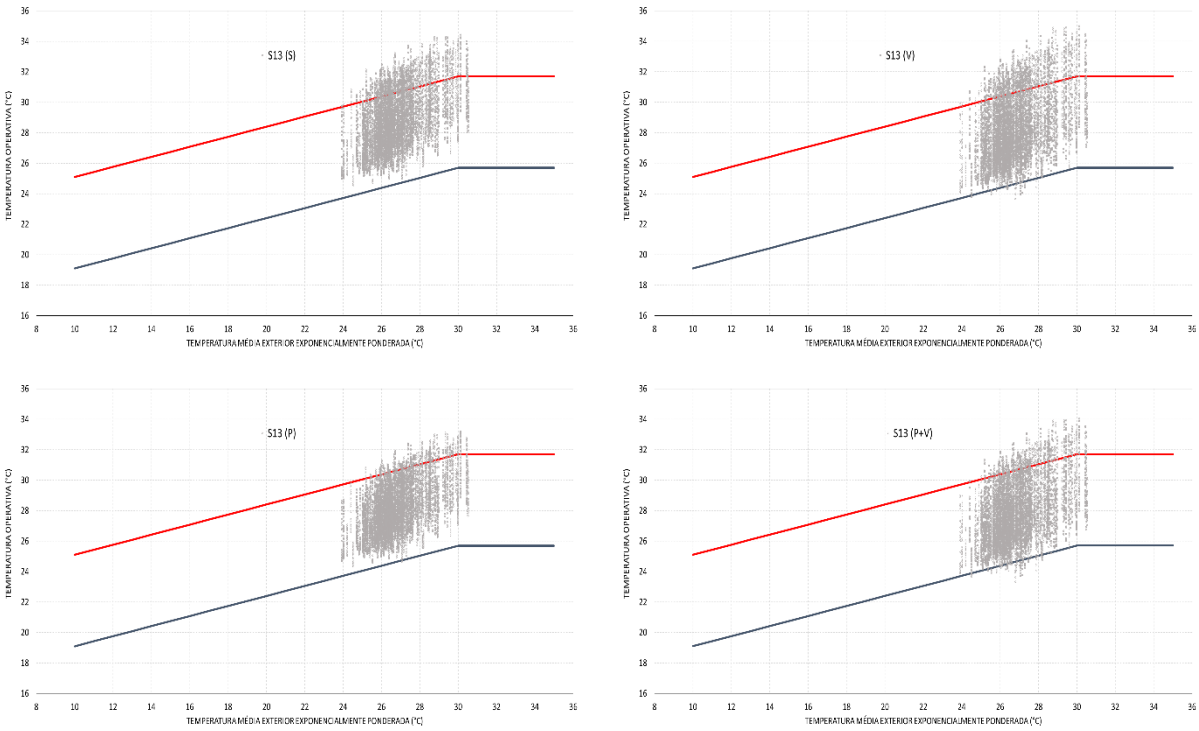


Figura AI.33 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S13 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

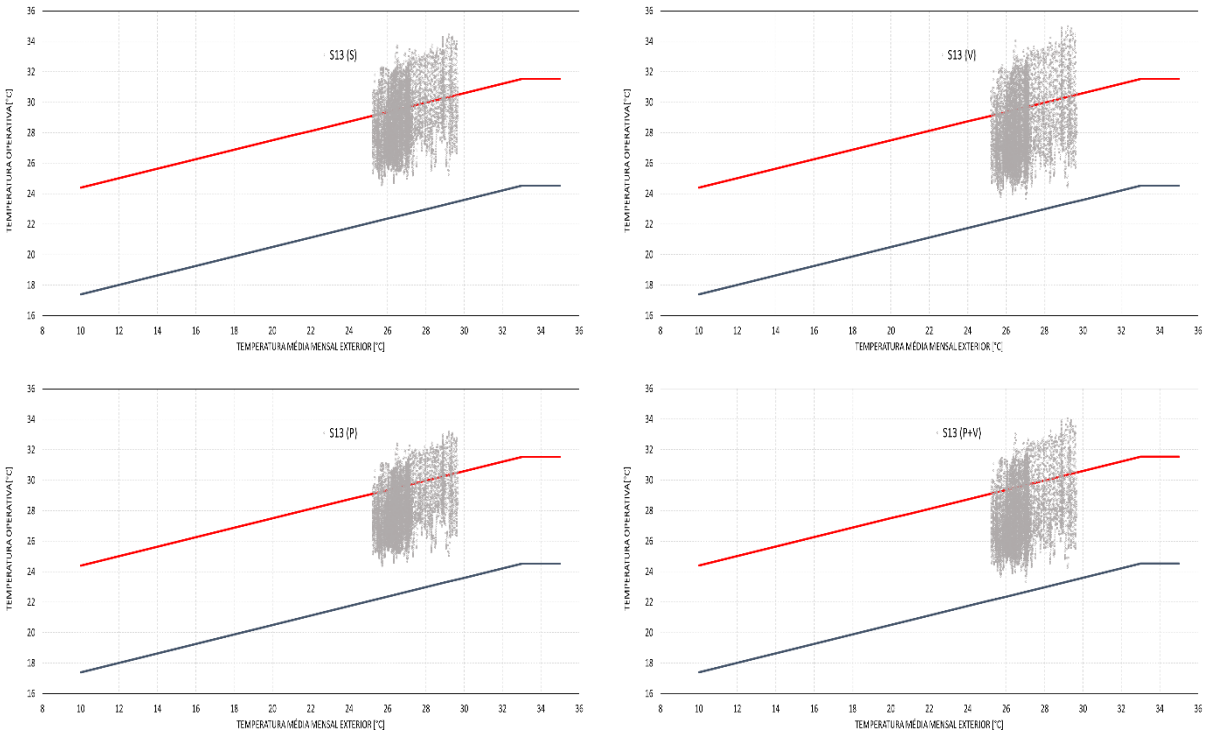


Figura AI.34 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S13 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S14

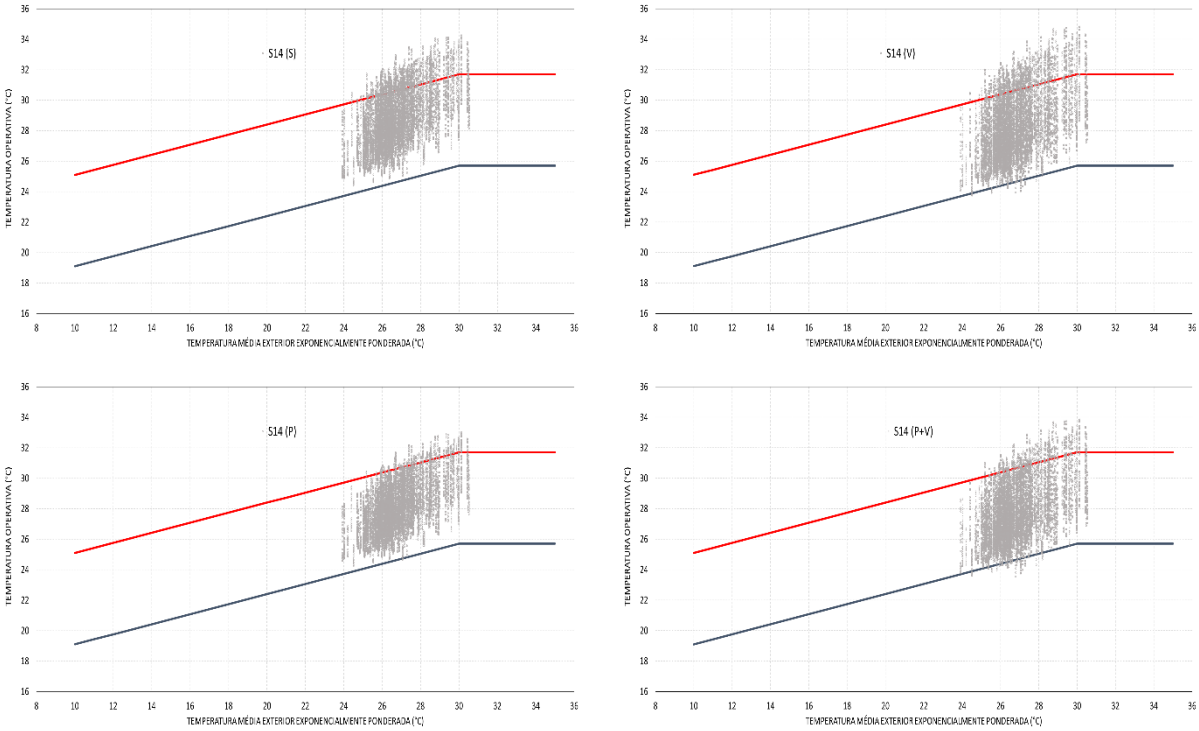


Figura AI.35 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S14 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

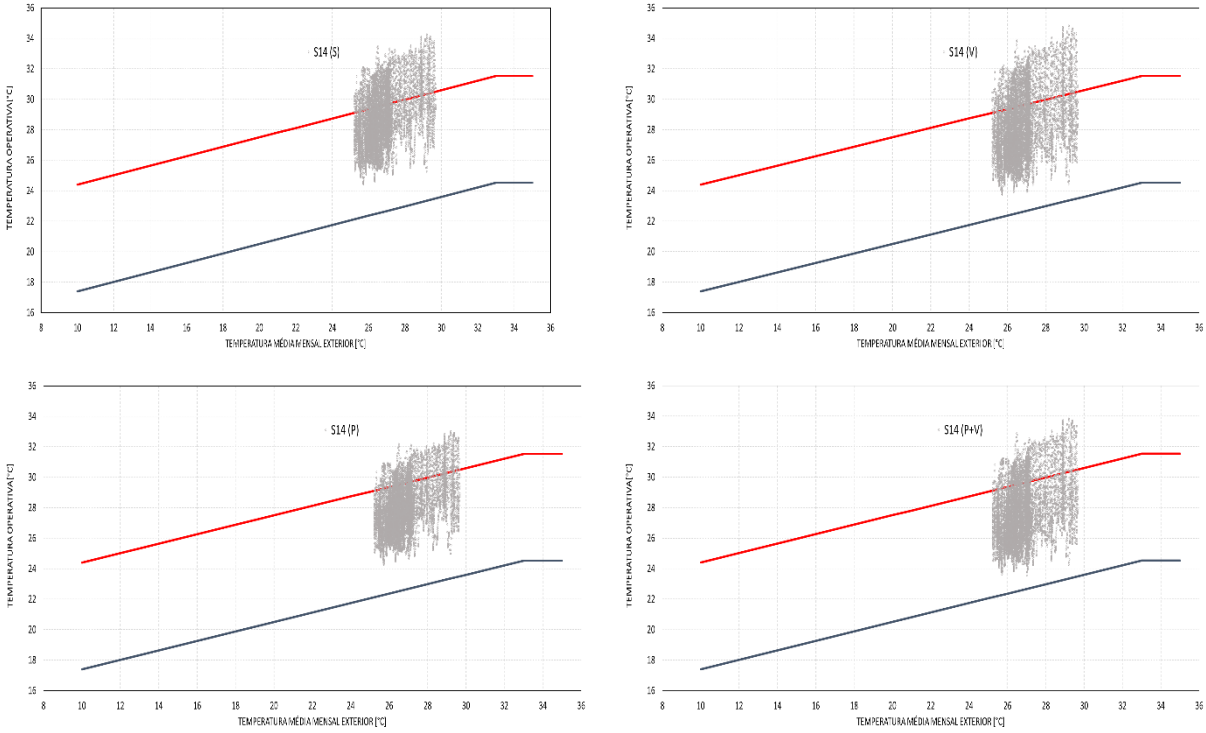


Figura AI.36 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S14 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S15

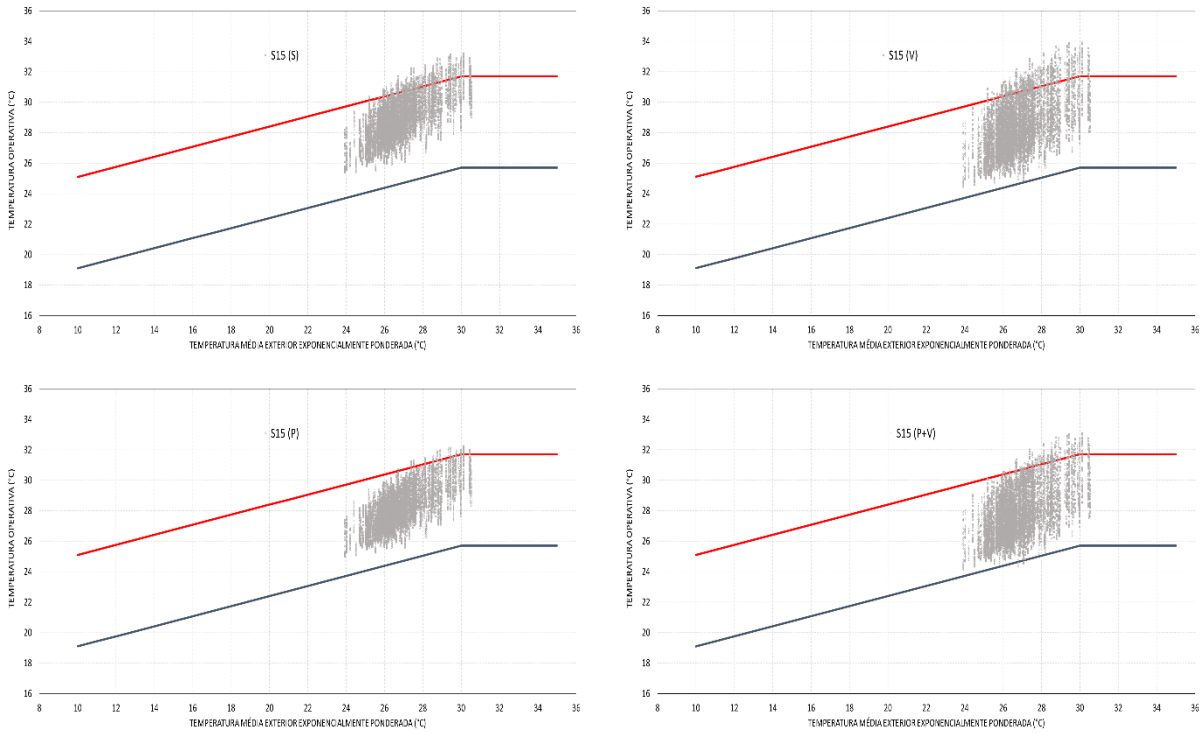


Figura AI.37 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S15 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

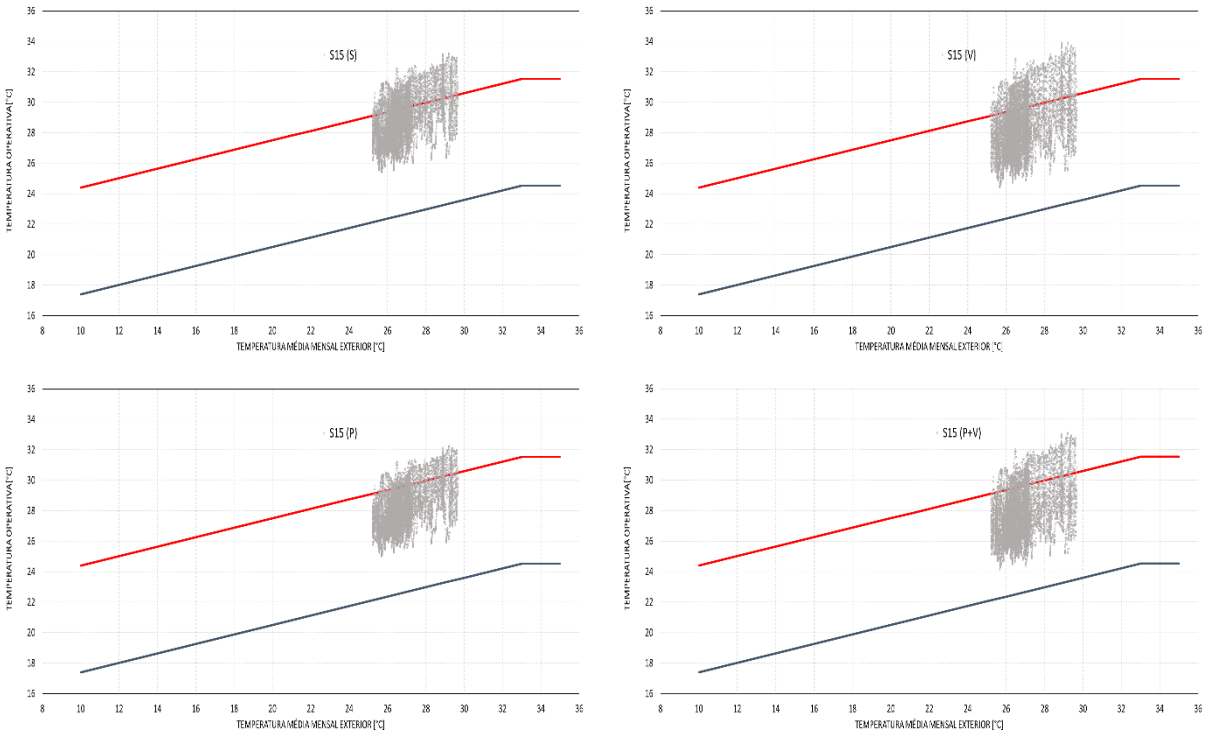


Figura AI.38 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S15 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S16

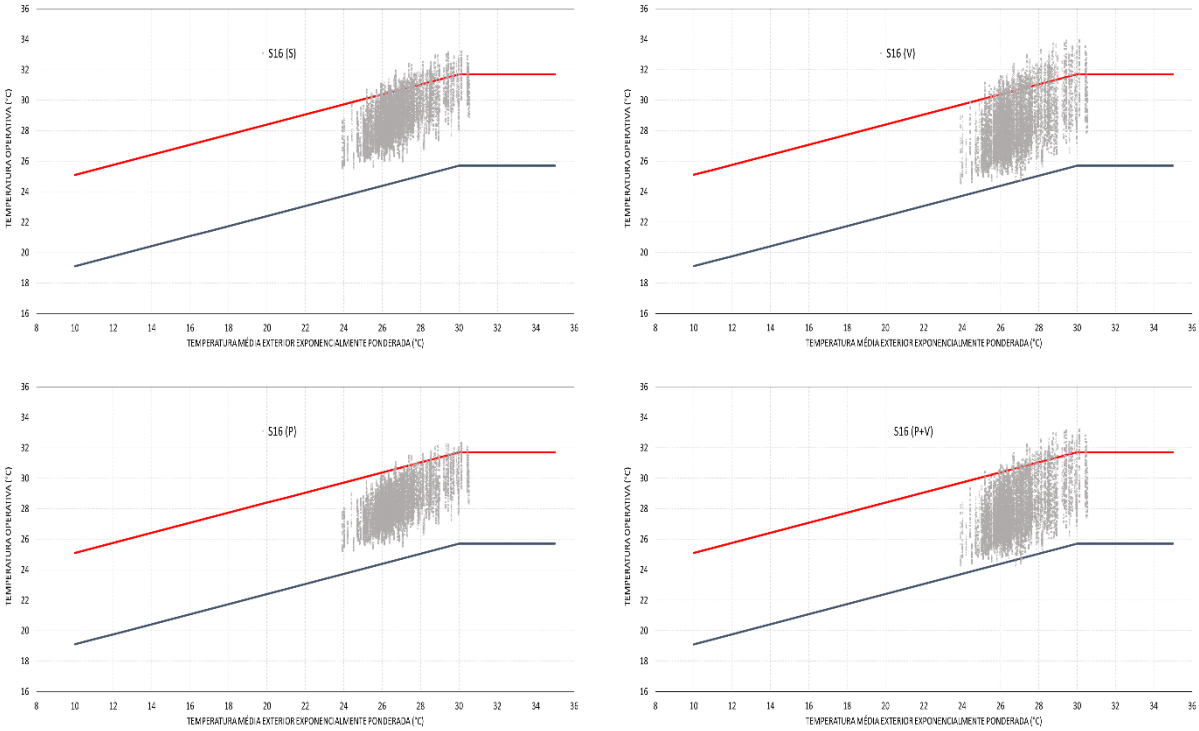


Figura AI.39 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S16 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

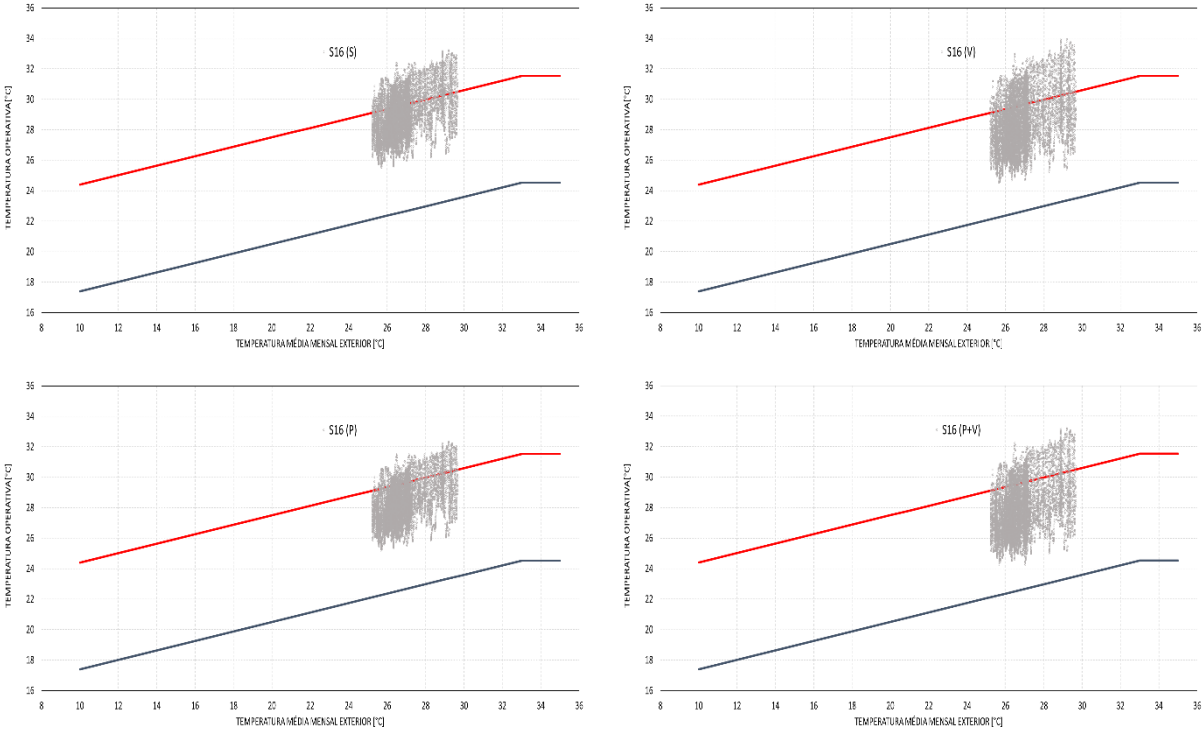


Figura AI.40 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S16 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S17

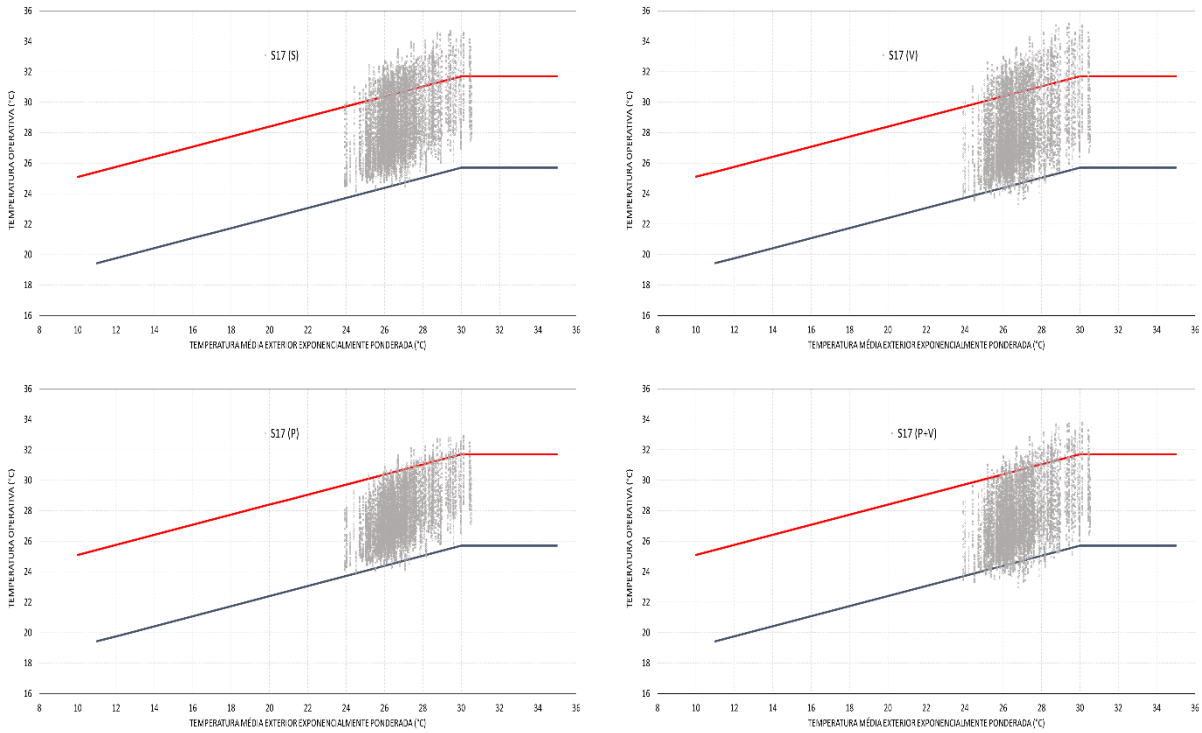


Figura AI.41 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S17 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

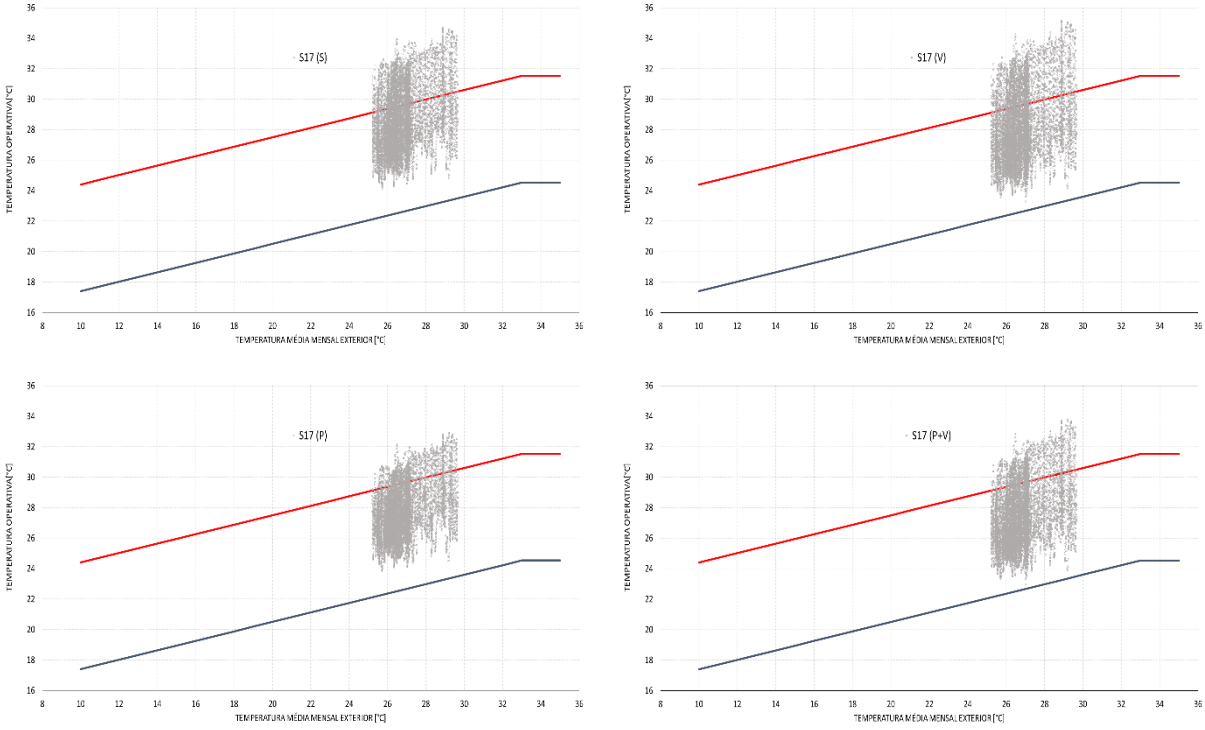


Figura AI.42 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S17 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S18

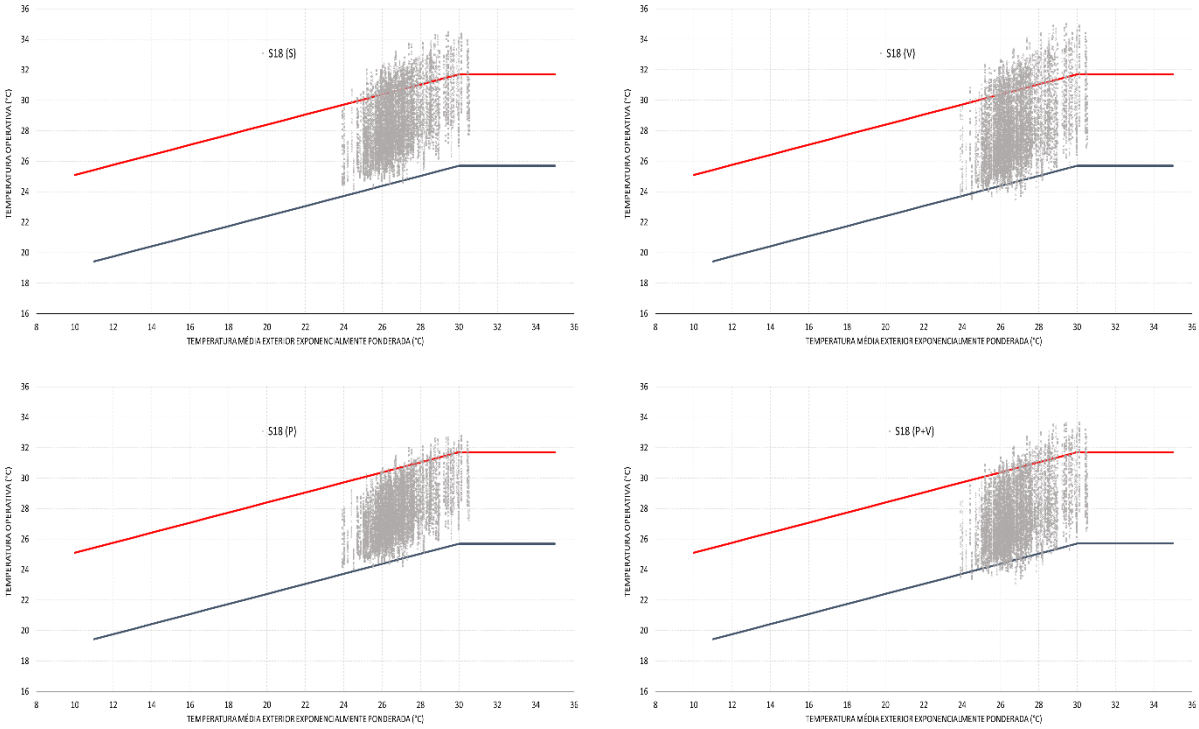


Figura AI.43 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S18 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

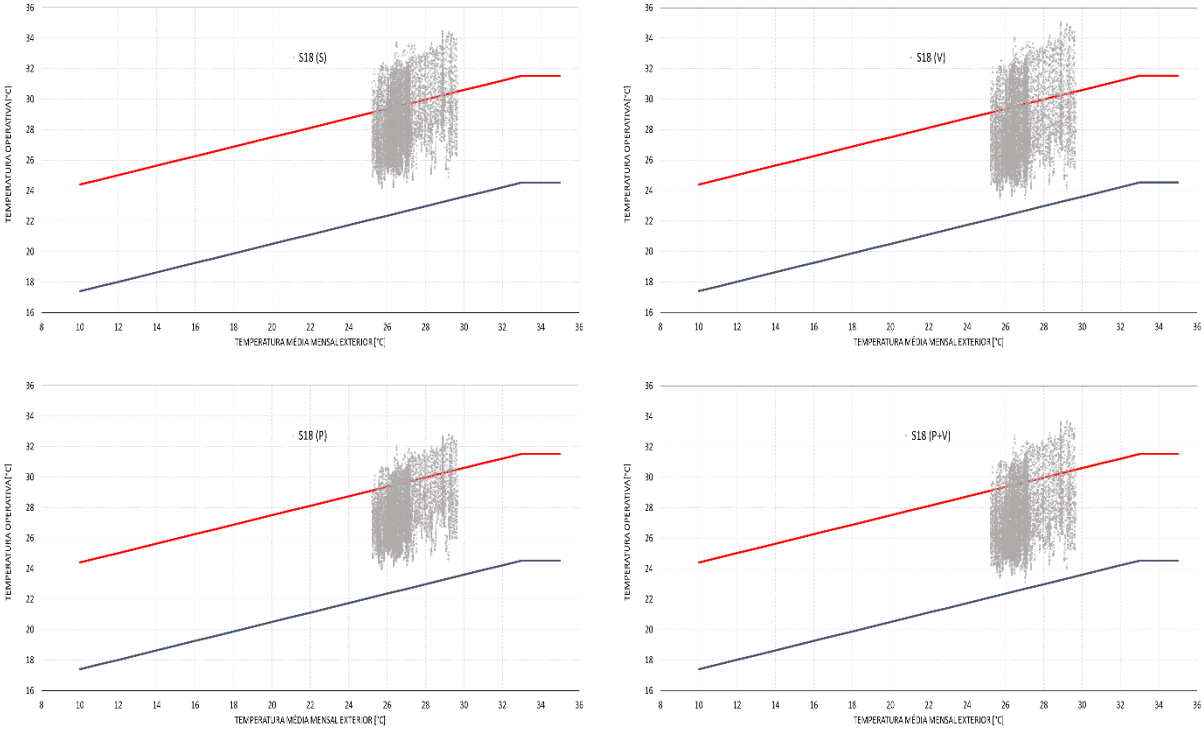


Figura AI.44 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S18 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S19

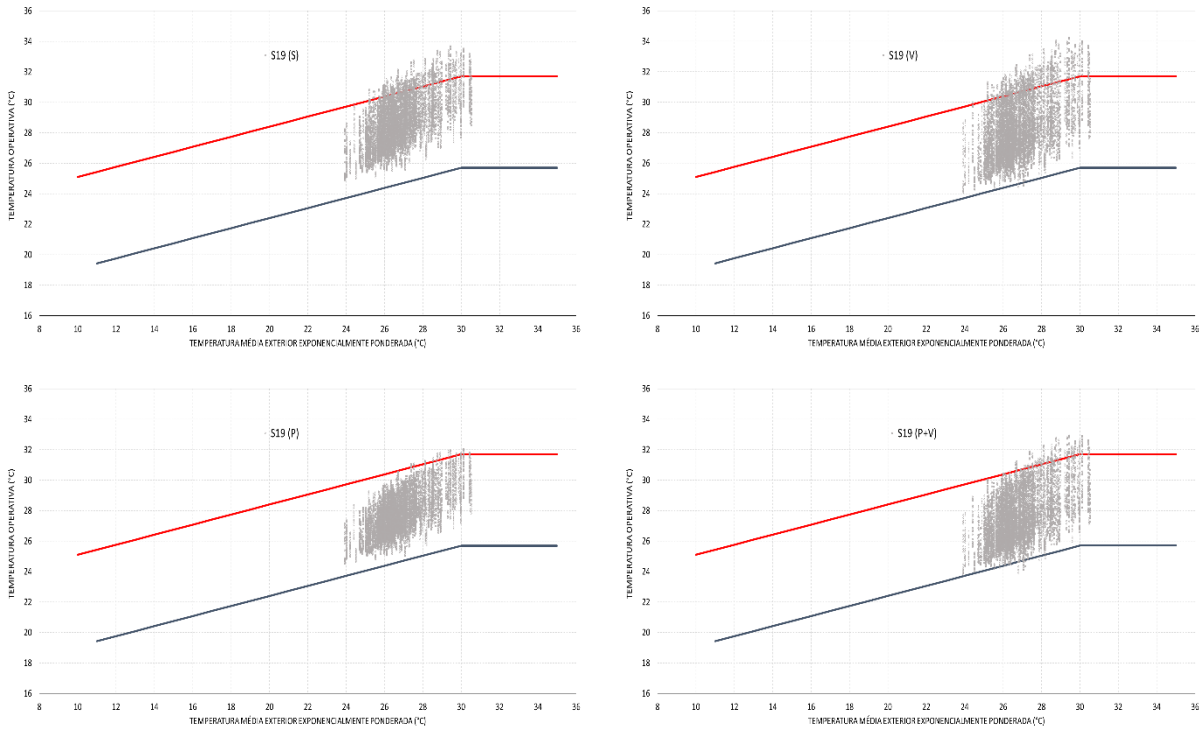


Figura AI.45 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S19 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

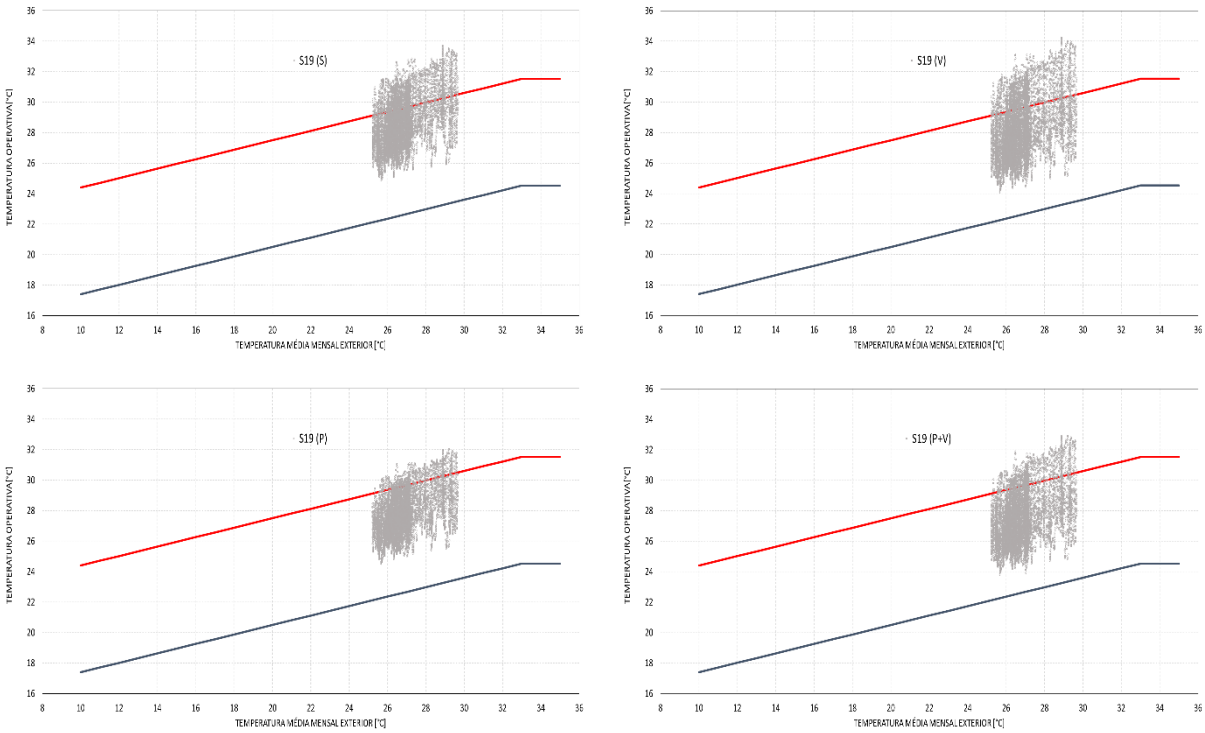


Figura AI.46 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S19 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S20

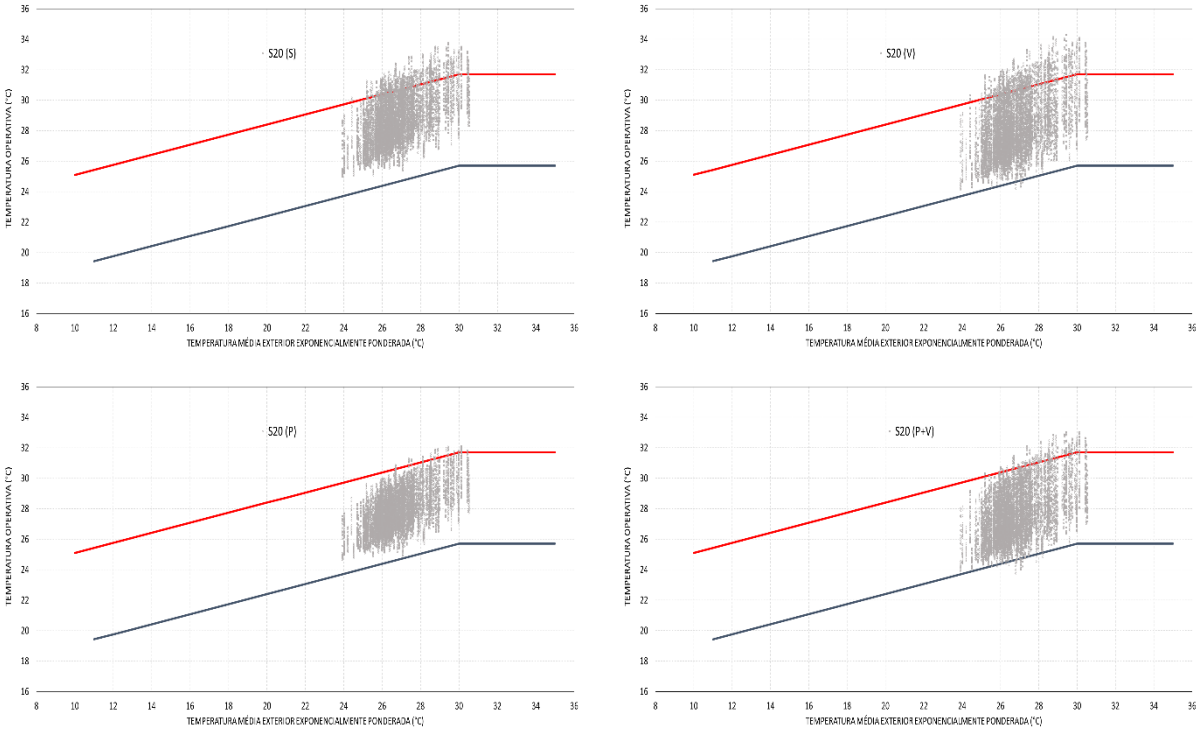


Figura AI.47 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S20 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

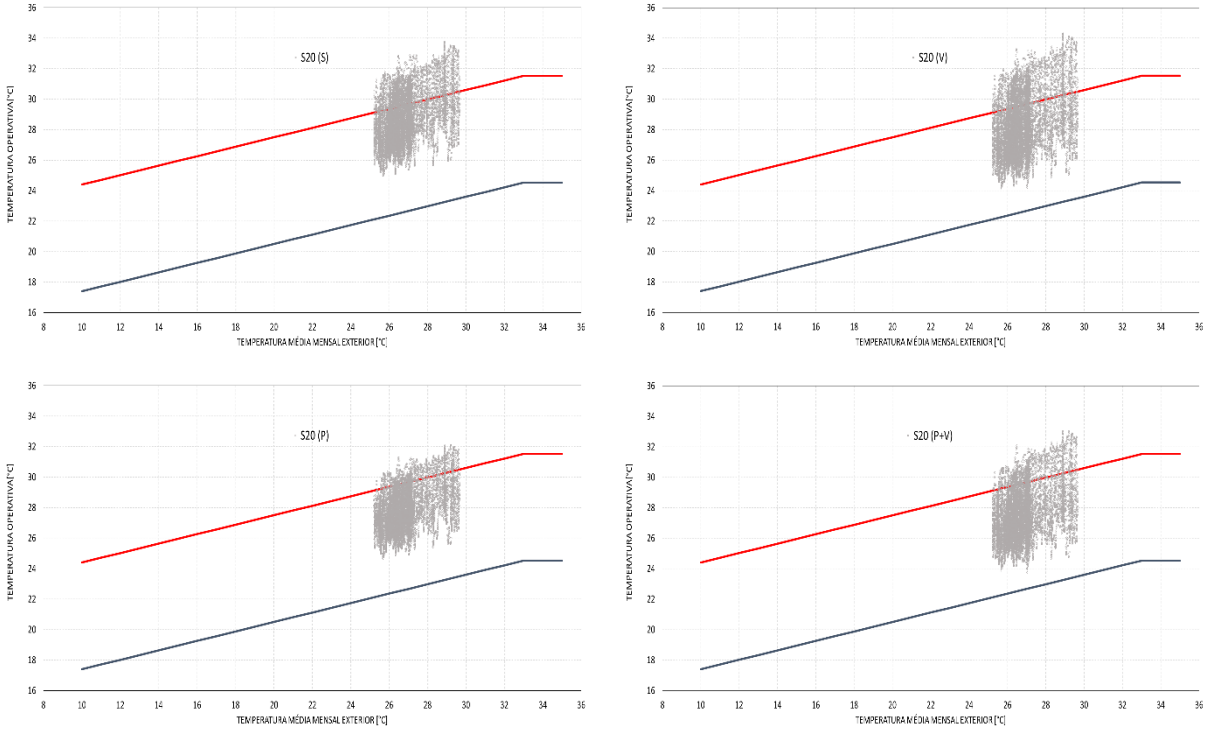


Figura AI.48 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S20 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S21

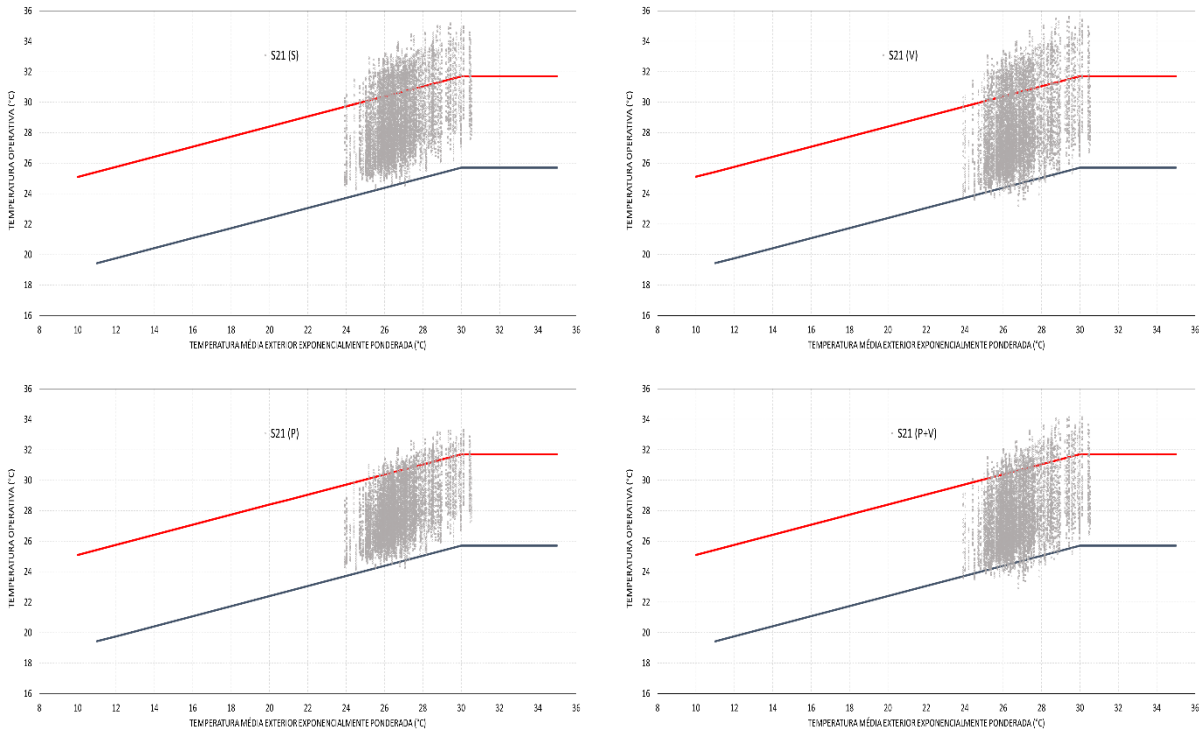


Figura AI.49 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S21 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

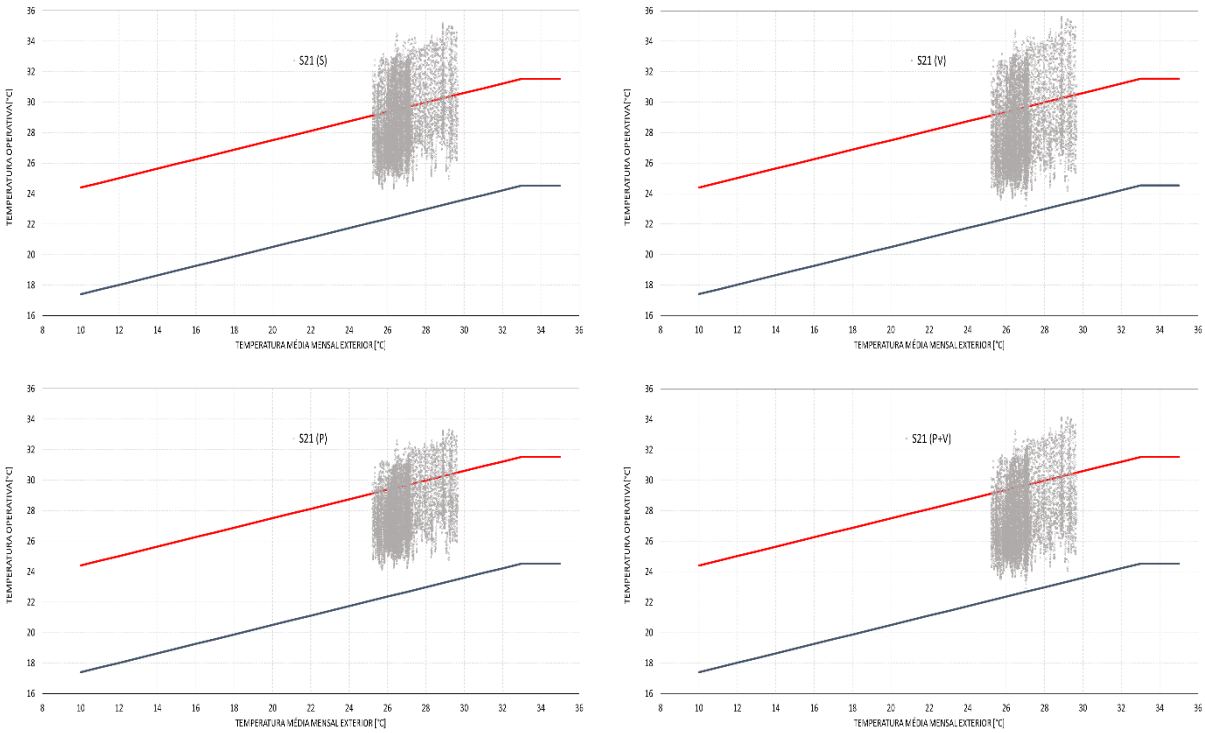


Figura AI.50 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S21 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S22

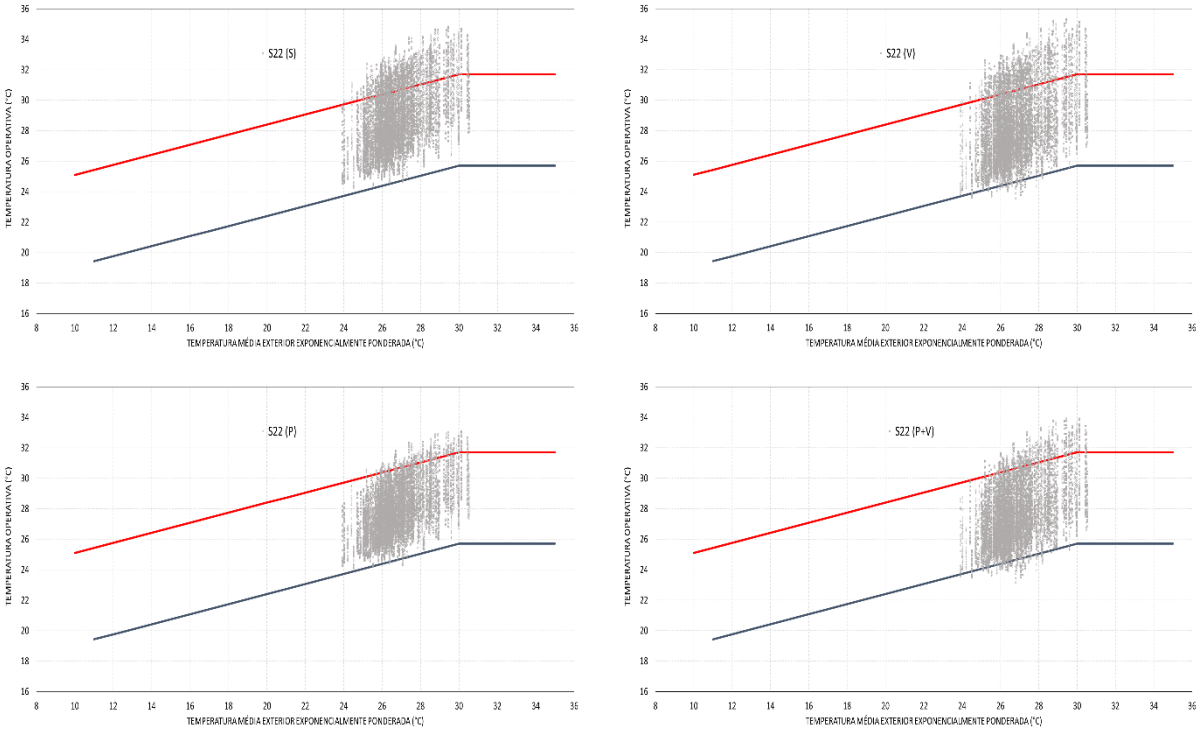


Figura AI.51 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S22 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

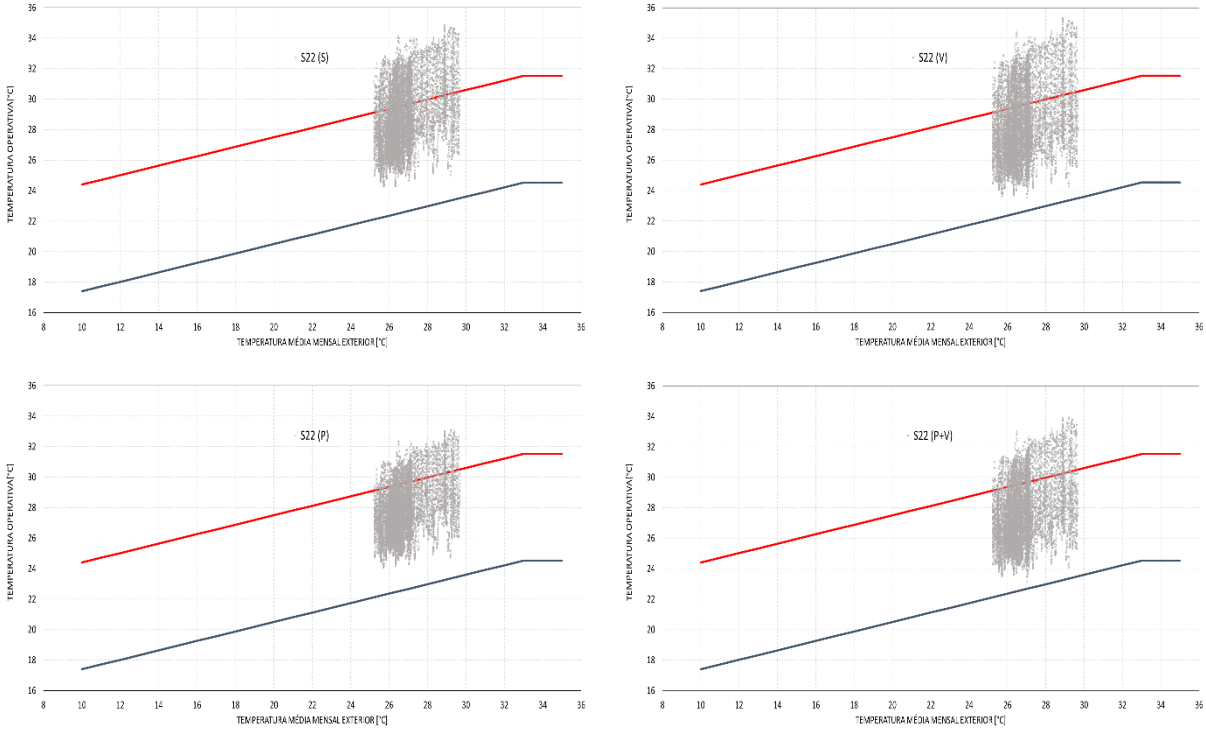


Figura AI.52 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S22 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S23

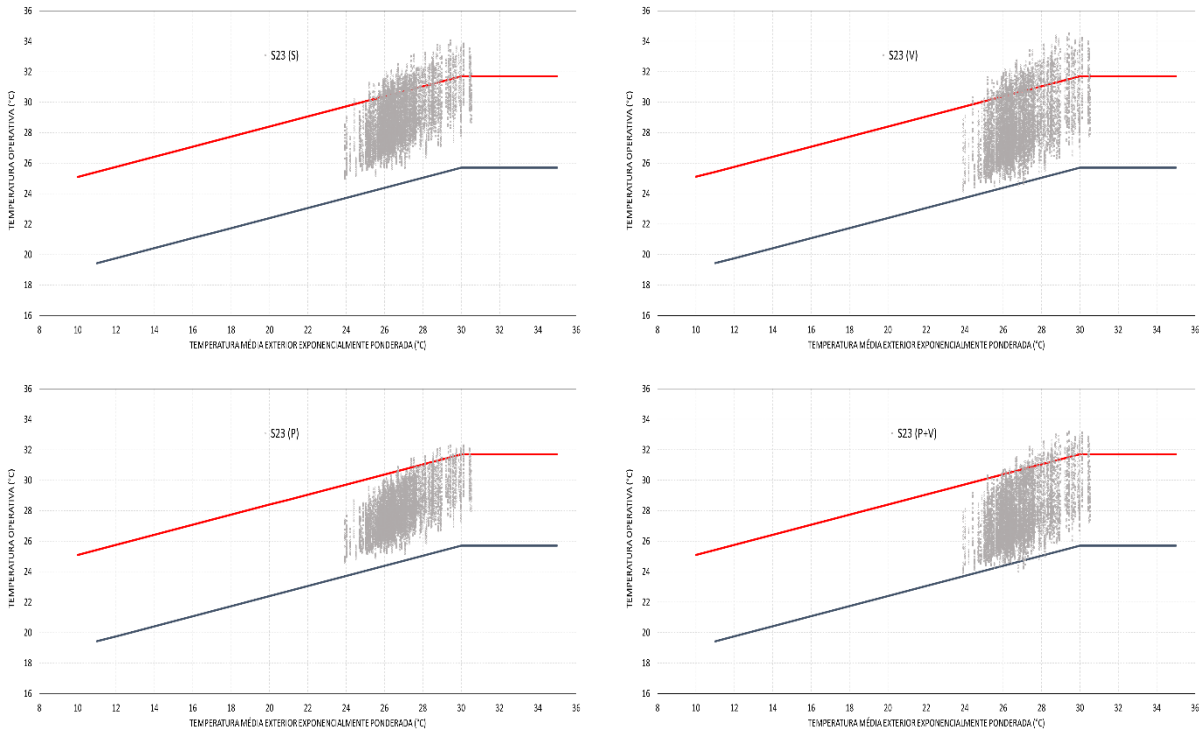


Figura AI.53 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S23 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

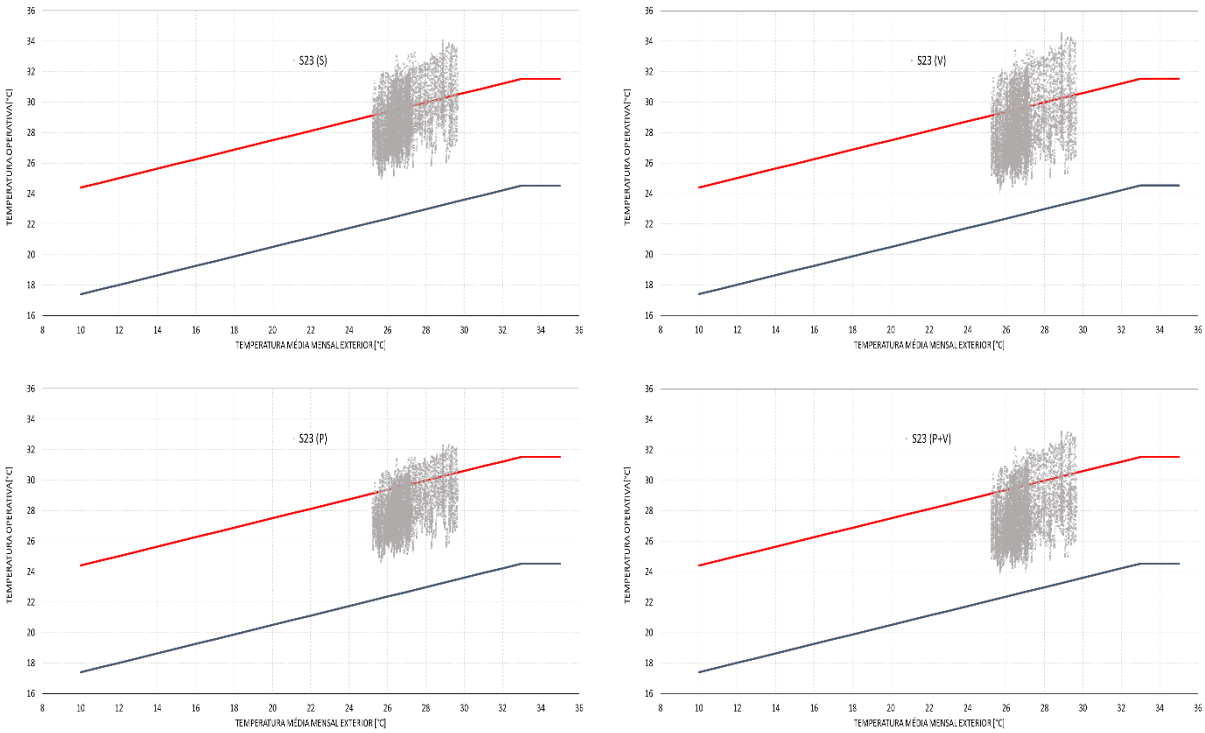


Figura AI.54 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S23 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

Simulação S24

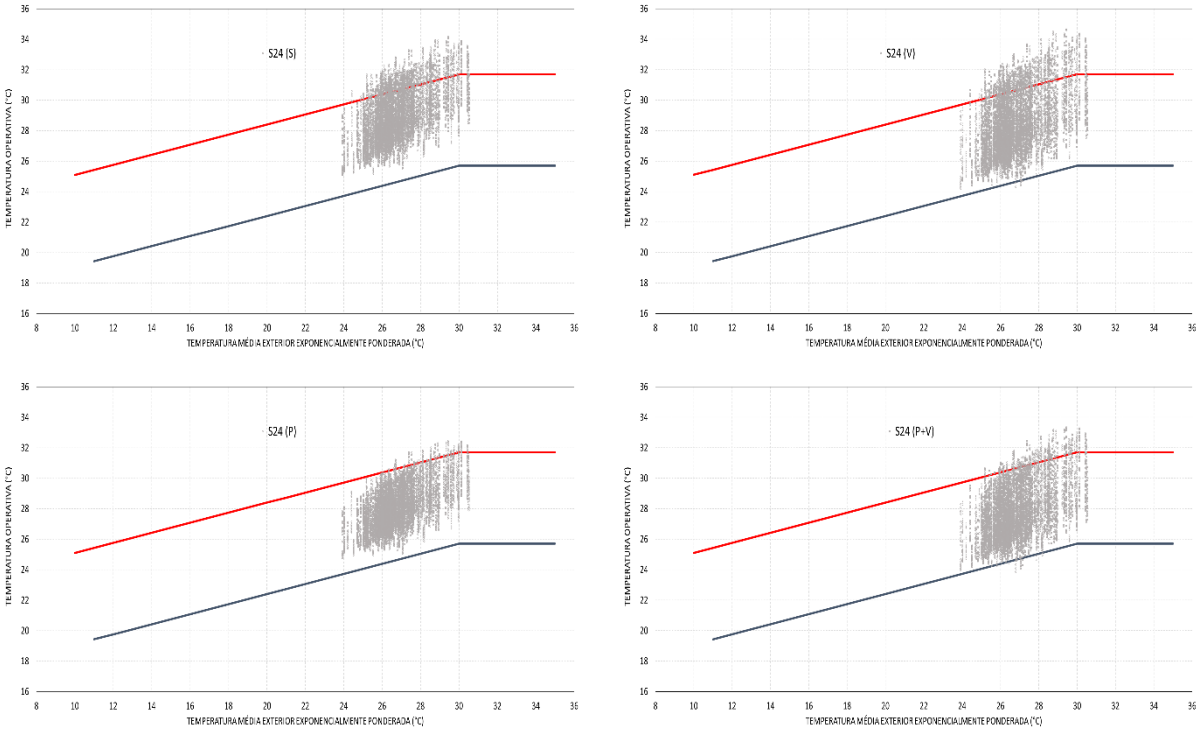


Figura AI.55 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S24 com as linhas limite de conforto para a norma EN 16798.

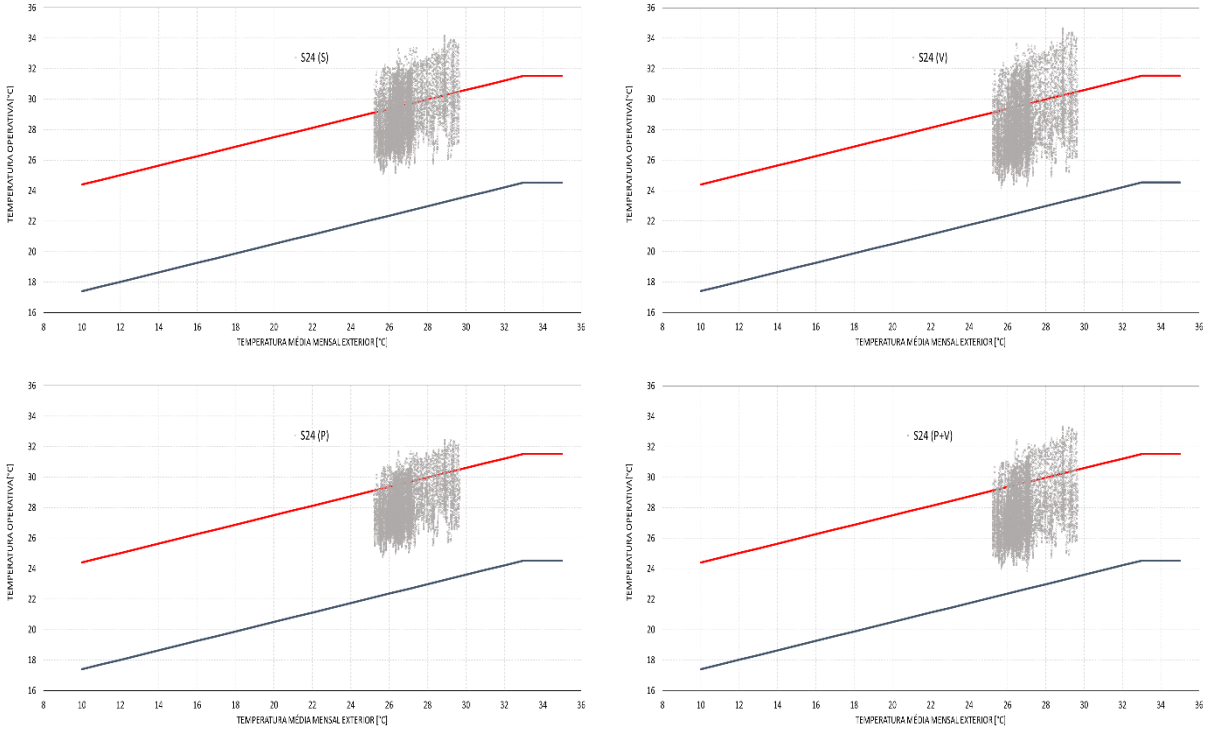


Figura AI.56 – Resultados da temperatura operativa para as simulações S24 com as linhas limite de conforto para a norma ASHRAE 55.

AI.3. VARIAÇÃO ANUAL DA TEMPERATURA OPERATIVA INTERIOR PARA AS 24 SIMULAÇÕES E SEUS CENÁRIOS

Simulação S1

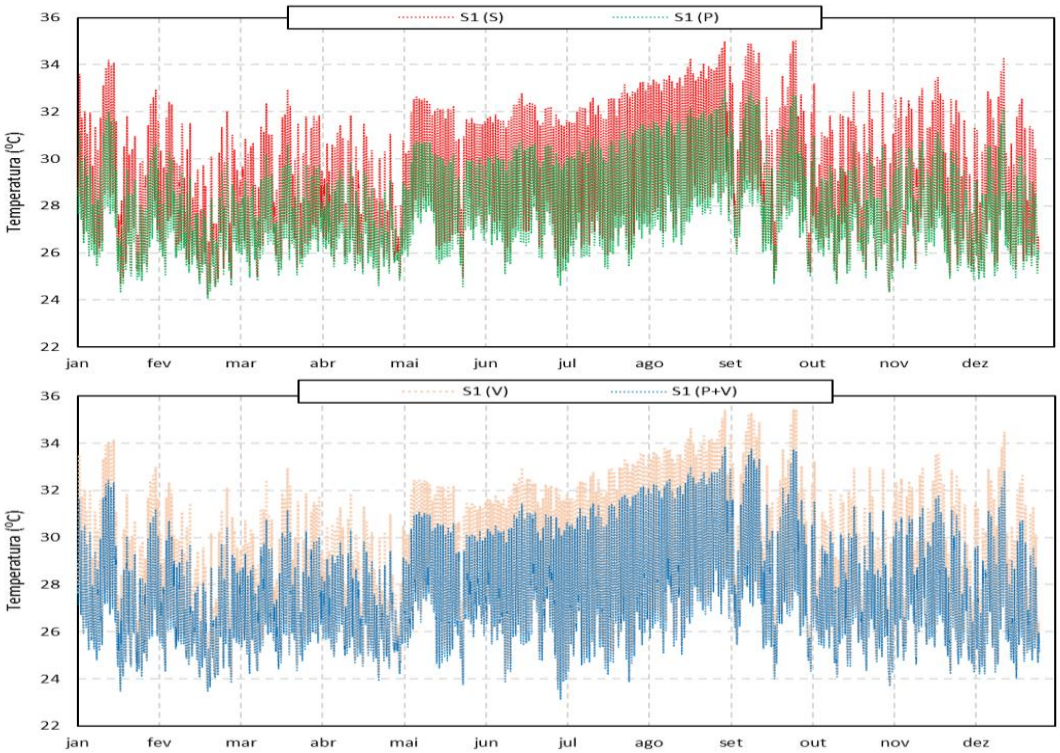


Figura AI.57 – Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S1

Simulação S13



Figura AI.58 – Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S13

Simulação S2

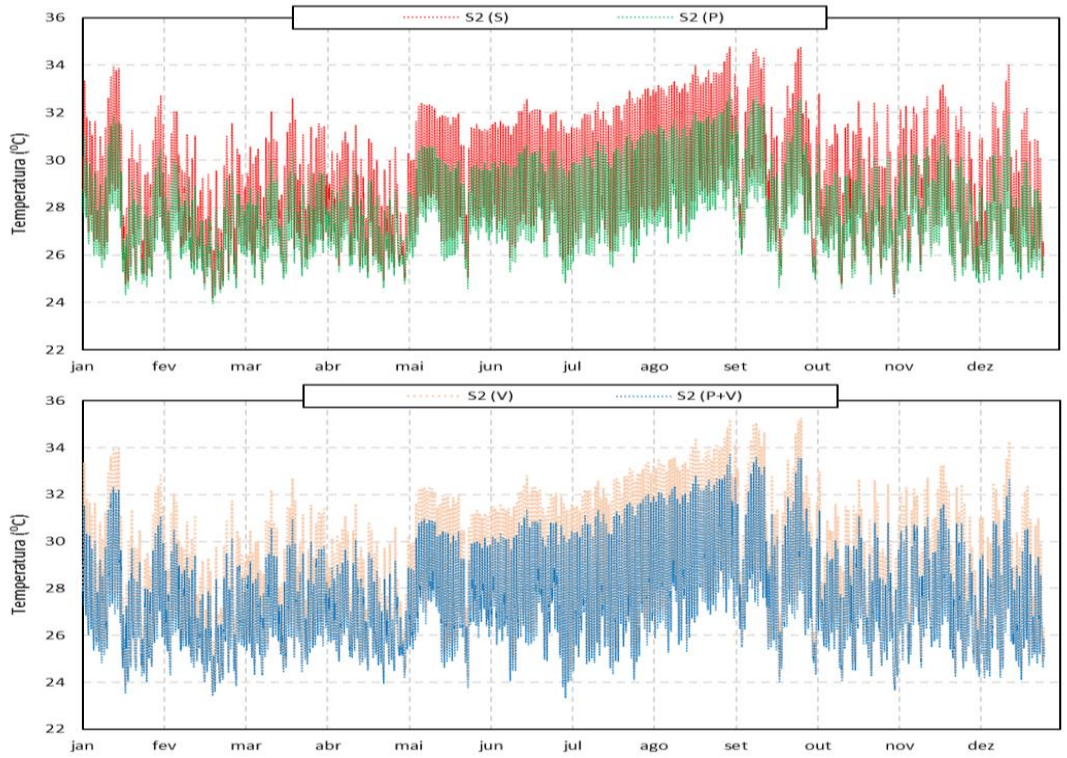


Figura AI.59 – Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S2

Simulação S14



Figura AI.60 – Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S14

Simulação S3



Figura AI.61 – Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S3

Simulação S15



Figura AI.62– Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S15

Simulação S4



Figura AI.63 – Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S4

Simulação S16

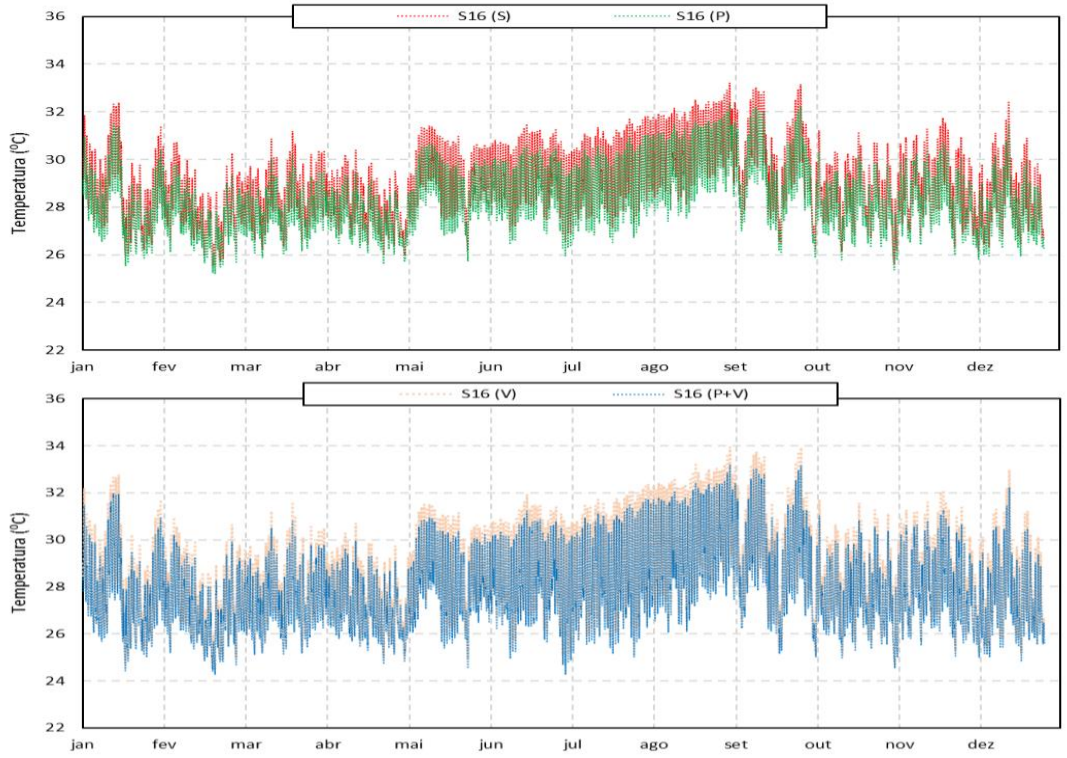


Figura AI.64– Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S16

Simulação S5

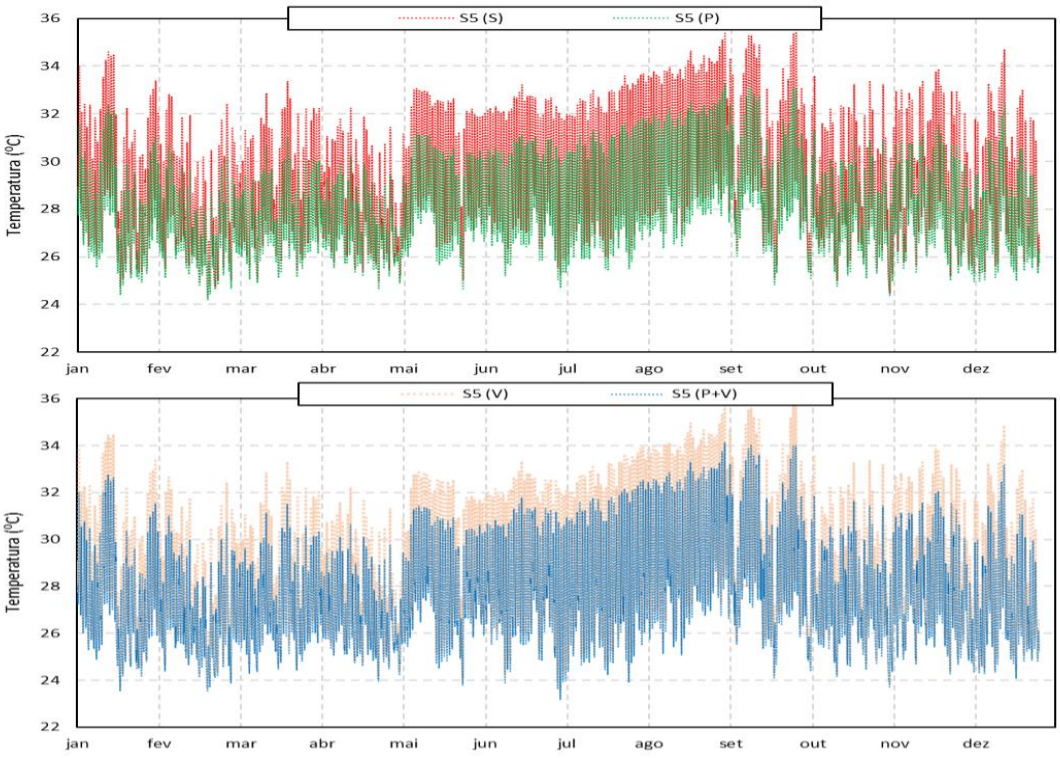


Figura AI.65 – Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S5

Simulação S17

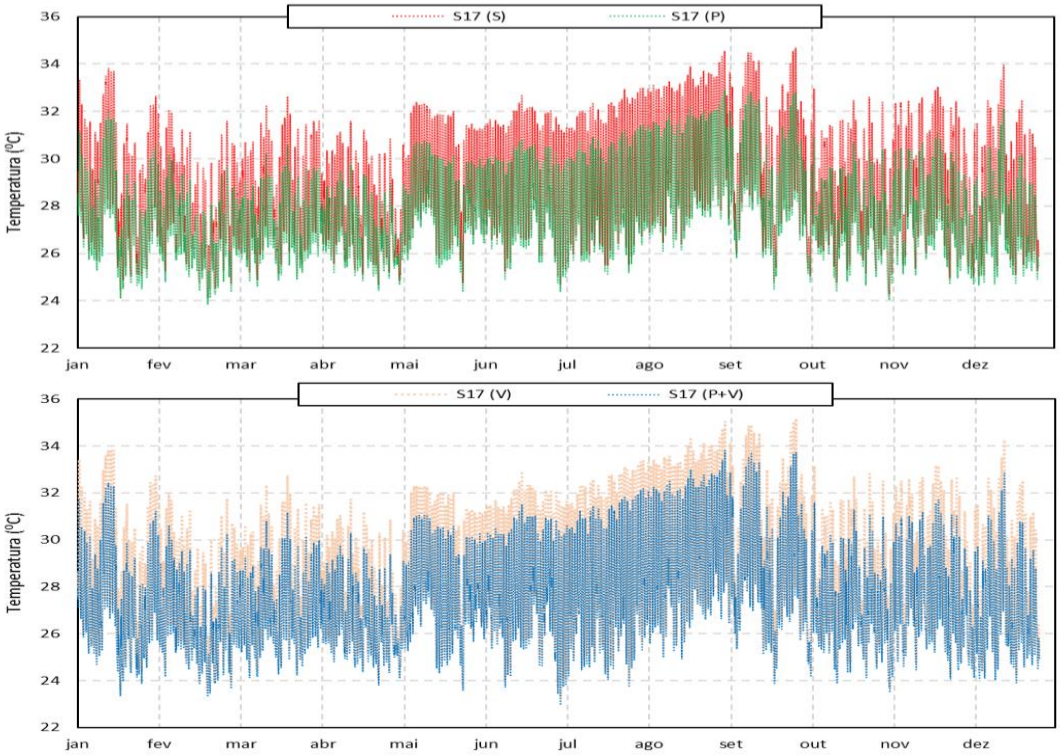


Figura AI.66– Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S17

Simulação S6

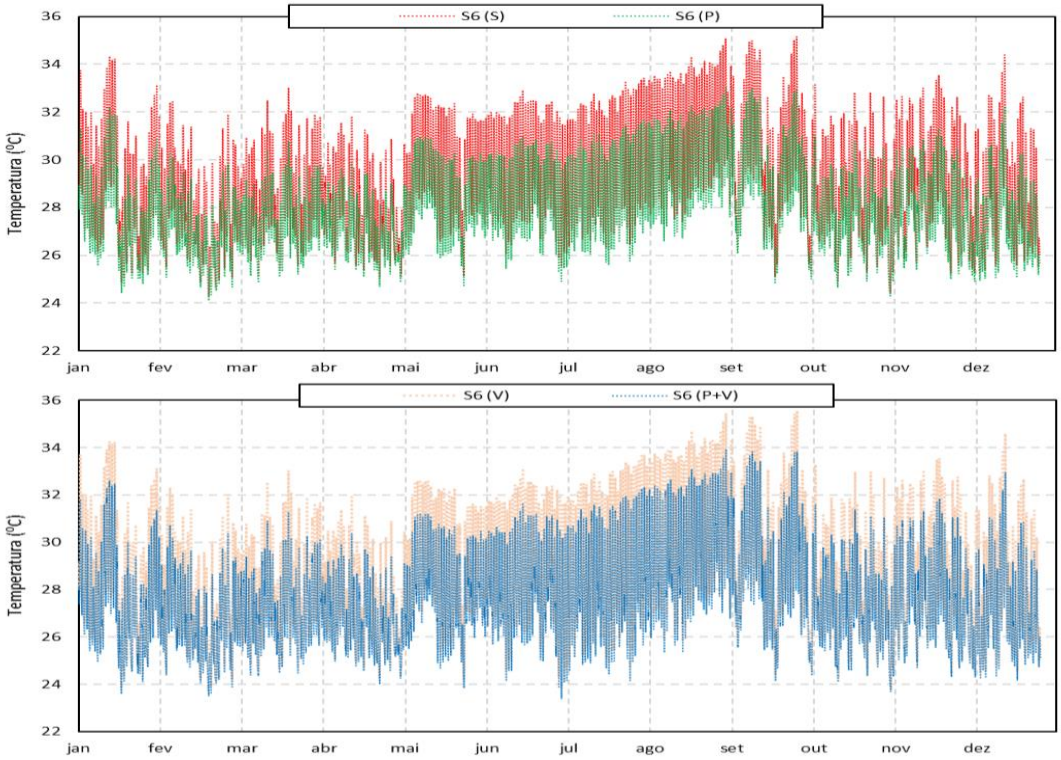


Figura AI.67 – Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S6

Simulação S18

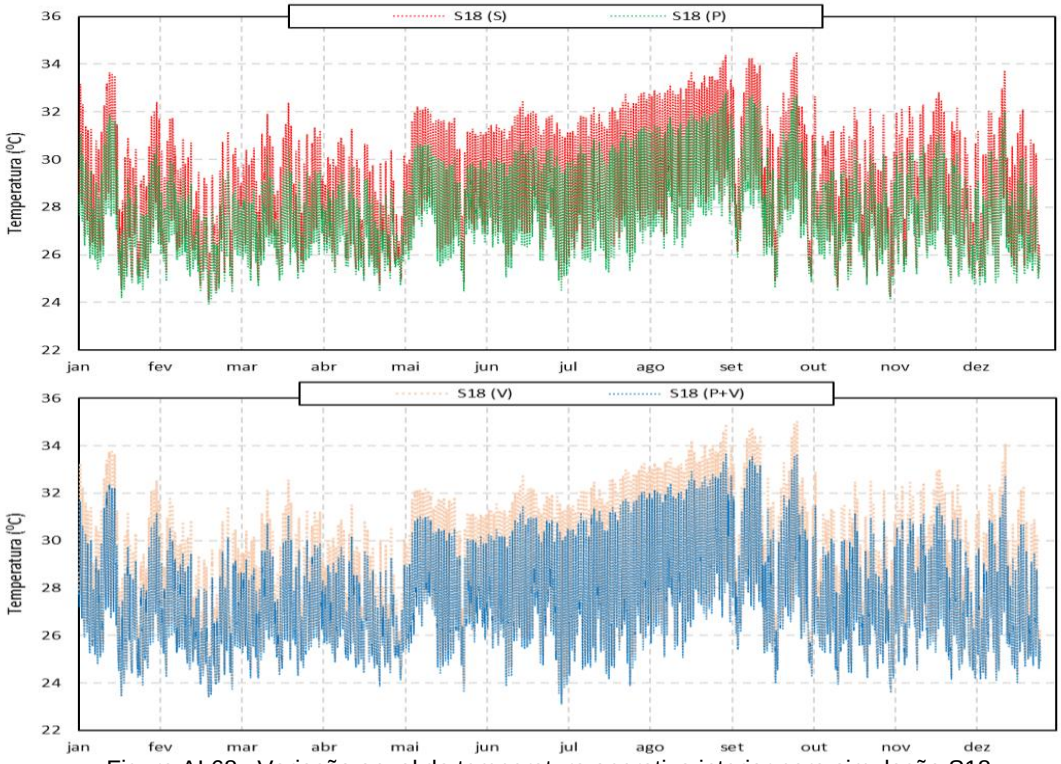


Figura AI.68– Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S18

Simulação S7



Figura AI.69 – Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S7

Simulação S19



Figura AI.70– Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S19

Simulação S8



Figura AI.71 – Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S8

Simulação S20



Figura AI.72– Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S20

Simulação S9



Figura AI.73 – Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S9

Simulação S21

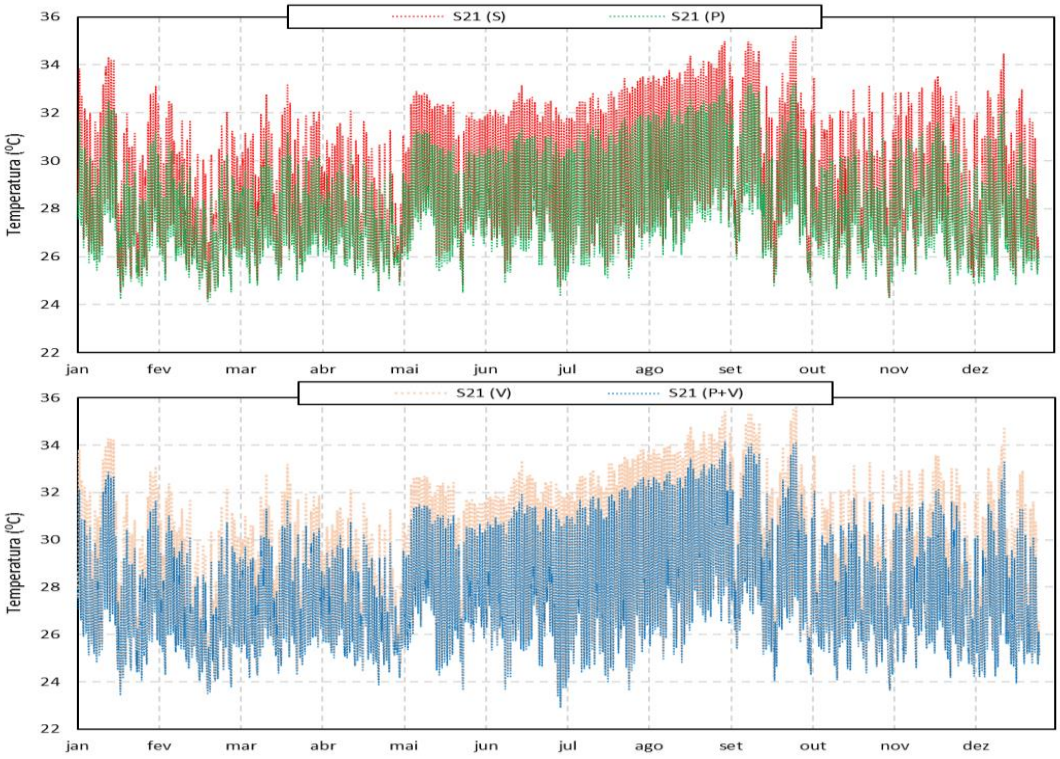


Figura AI.74– Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S21

Simulação S10



Figura AI.75 – Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S10

Simulação S22



Figura AI.76– Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S22

Simulação S11



Figura AI.77 – Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S11

Simulação S23



Figura AI.78– Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S23

Simulação S12



Figura AI.79 – Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S12

Simulação S24



Figura AI.80– Variação anual da temperatura operativa interior para simulação S24

ANEXO II

TUTORIAL DE EXECUÇÃO – APLICAÇÃO MÓVEL



Figura AII.1– Página 1 do Tutorial de execução da aplicação móvel

Ventilação Natural

A ventilação natural pode atuar na renovação do ar, no arrefecimento psicofisiológico e no arrefecimento convectivo por meio da diferença de pressão que transportam o ar fresco através dos edifícios.

- A ventilação cruzada ocorre quando a zona de pressão positiva se encontra na área à barlavento e a zona negativa à sotavento e a partir disso, proporcione uma variação de pressão.
- Observe o fluxo de ar do seu edifício.
- Atente-se na construção e distribuição dos ambientes Analise as janelas.

Ventilação Cruzada



É necessário se atentar ao fluxo de ar de dentro, fora e principalmente, nos diversos ambientes da edificação. Estabeleça uma planta com o mínimo de divisórias possíveis para proporcionar uma maior circulação do ar interno e externo. Além disso, investigue as posições das divisórias, para que estas não obstruam o fluxo.

Esse tutorial é objeto de estudo de uma tese de doutoramento realizada por Murilo de Pádua Marcolini, Eva Barreira e Ricardo Almeida.

Figura AII.2– Página 2 do Tutorial de execução da aplicação móvel

Observe se o seu edifício possui grandes aberturas, pois o volume do fluxo de ar é determinado pelo tamanho das aberturas de entrada e saída. Destine maiores áreas com janelas de saída, já que a velocidade do fluxo do ar é maior quando a pressão negativa sobressai a área das aberturas de entrada, com pressão positiva.

As janelas devem conduzir o fluxo de ar com eficácia. Quanto maior a necessidade do vento modificar sua direção, mais ambientes serão ventilados.

É recomendado o uso de janelas pivotantes e dobráveis para promoverem o redirecionamento da corrente de ar da entrada. As janelas de pivô horizontais possuem maior capacidade de ventilação, contudo, são ineficazes em edificações de multiplos andares. Já as de pivô verticais possuem capacidade inferior, entretanto, podem ser utilizadas em faces paralelas à direção dos ventos.

Esse tutorial é objeto de estudo de uma tese de doutoramento realizada por Murilo de Pádua Marcolini, Eva Barreira e Ricardo Almeida.

Figura AII.3– Página 3 do Tutorial de execução da aplicação móvel

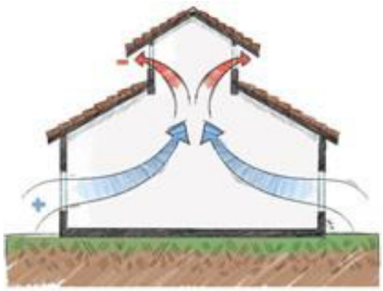
Ventilação Efeito Chaminé

- A ventilação por efeito chaminé gera fluxo de ar ascendente recolhendo o ar quente por meio de lanternins, exaustores eólicos e aberturas zenitais.
- A ventilação é otimizada pelo aumento da distância das aberturas inferiores e superiores.
- A ventilação efeito chaminé pode acelerar o fluxo de ar.
- As edificações que possuem pé-direito elevado e pavimentos com desníveis são as mais favoráveis.
- As aberturas superiores influenciam na condução da ventilação.

A abertura de saída de ar da edificação deve possuir uma geometria estratégica que não impeça a movimentação do fluxo de ar ascendente, possibilitando sua saída ao se posicionar em uma zona de sucção.

Não se deve colocar as aberturas zenitais de saída ou exaustores eólicos das coberturas com maior inclinação voltadas para os ventos. É recomendado que as aberturas de saídas dos ventos sejam na cumeeira.

Para promover uma maior capacidade do efeito chaminé é necessário



manter a ventilação livremente do ar para cima. As aberturas superiores devem estar localizadas na área central, onde sirvam de condutor de

Esse tutorial é objeto de estudo de uma tese de doutoramento realizada por Murilo de Pádua Marcolini, Eva Barreira e Ricardo Almeida.

Figura AII.4– Página 4 do Tutorial de execução da aplicação móvel

ventilação vertical.

O fluxo de ar pode ser acelerado ao utilizar uma superfície envidraçada no lado norte da parte superior da chaminé de ventilação.

A chaminé deve ser afastada das incidências de radiação direta no interior da construção.

Esse tutorial é objeto de estudo de uma tese de doutoramento realizada por Murilo de Pádua Marcolini, Eva Barreira e Ricardo Almeida.

Figura AII.5– Página 5 do Tutorial de execução da aplicação móvel

Pintura com tinta refletante

Características do envelope como o tipo de piso, parede e cobertura são determinantes da inércia térmica de uma edificação. Materiais mais densos provocam elevadas capacidades térmicas. A tinta refletante atua como isolante térmico e impermeabilizante e age ao refletir os raios solares.

- O betão e a alvenaria cerâmica são os materiais que apresentam capacidade térmica elevada.
- Os materiais utilizados na construção devem ser selecionados conforme a capacidade térmica e atraso térmico.



Vedações com alta inércia melhoram a capacidade térmica, absorvendo todo calor. Sendo assim, é indicado o uso de materiais cerâmicos não esmaltados.

Ao aplicar a tinta refletante no exterior das paredes dificultará a entrada de calor no ambiente. As tintas refletantes, em sua maioria, apresentam um rendimento de aproximadamente 40 m² por demão de aplicação em paredes e coberturas.

A aplicação é semelhante à pintura convencional. Primeiramente, misture bem o produto antes de aplicar. Verificar a temperatura e aplique somente em ambiente entre 10 °C e 40 °C, evitando os dias chuvosos e

Esse tutorial é objeto de estudo de uma tese de doutoramento realizada por Murilo de Pádua Marcolini, Eva Barreira e Ricardo Almeida.

Figura AII.6– Página 6 do Tutorial de execução da aplicação móvel

úmidos, e paredes nas quais estão sofrendo incidência solar no momento.

É importante que aplique o produto de maneira equivalente, não permitindo os repasses excessivos e os retoques isolados após a secagem do produto, utilizando rolo de lã de carneiro. Secagem entre demãos de aproximadamente entre 2 a 4 horas.

Esse tutorial é objeto de estudo de uma tese de doutoramento realizada por Murilo de Pádua Marcolini, Eva Barreira e Ricardo Almeida.

Figura AII.7– Página 7 do Tutorial de execução da aplicação móvel