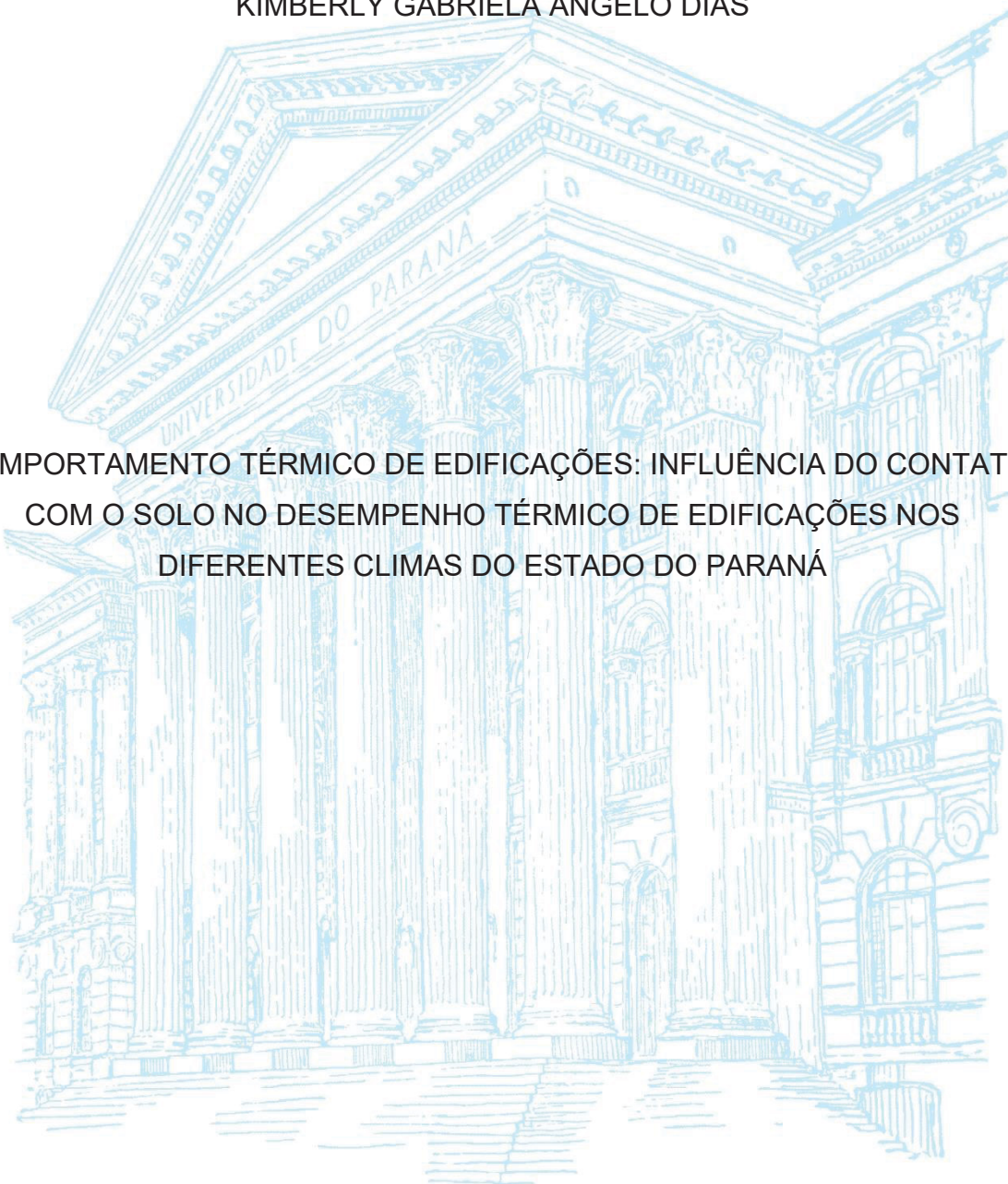


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KIMBERLY GABRIELA ANGELO DIAS

COMPORTAMENTO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES: INFLUÊNCIA DO CONTATO
COM O SOLO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES NOS
DIFERENTES CLIMAS DO ESTADO DO PARANÁ



CURITIBA

2025

KIMBERLY GABRIELA ANGELO DIAS

COMPORTAMENTO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES: INFLUÊNCIA DO CONTATO
COM O SOLO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES NOS
DIFERENTES CLIMAS DO ESTADO DO PARANÁ

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Carlos Fernandes

Coorientador: Prof. Dr. Márcio José Sorgato

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Dias, Kimberly Gabriela Angelo

Comportamento térmico de edificações: influência do contato com o solo no desempenho térmico de edificações nos diferentes climas do estado do Paraná / Kimberly Gabriela Angelo Dias. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Leandro Carlos Fernandes

Coorientador: Márcio José Sorgato

1. Simulação computacional. 2. Conforto térmico. 3. Edifícios - Propriedades térmicas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Fernandes, Leandro Carlos. IV. Sorgato, Márcio José. V. Título.

Bibliotecário: Leticia Priscila Azevedo de Sousa CRB-9/2029



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL -
40001016049P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **KIMBERLY GABRIELA ANGELO DIAS** intitulada: **COMPORTAMENTO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES: INFLUÊNCIA DO CONTATO COM O SOLO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES NOS DIFERENTES CLIMAS DO ESTADO DO PARANÁ**, sob orientação do Prof. Dr. LEANDRO CARLOS FERNANDES, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 11 de Setembro de 2024.

Assinatura Eletrônica

20/09/2024 09:43:40.0

LEANDRO CARLOS FERNANDES

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

18/09/2024 09:07:41.0

ANA PAULA DE ALMEIDA ROCHA

Avaliador Externo (FAE - CENTRO UNIVERSITÁRIO)

Assinatura Eletrônica

18/09/2024 18:54:30.0

ARTHUR SANTOS SILVA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Leandro Carlos Fernandes, o qual possibilitou e auxiliou na construção deste trabalho ao compartilhar seus ensinamentos de forma diligente e atenciosa. Obrigada por me inspirar a ser uma profissional e uma futura docente tão boa quanto você.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Marcio José Sorgato por doar seu tempo para a realização deste trabalho e pelos ensinamentos ao longo do programa.

Aos meus pais, Denilson e Dinalva, por sempre priorizarem os meus estudos, me incentivarem, acreditarem em mim e serem meus maiores exemplos.

Aos meus amigos e colegas os quais tornaram a jornada mais leve.

Agradeço especialmente ao Júnior pelo apoio, companheirismo e paciência.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPR e a todos os professores do Mestrado pelo conhecimento adquirido.

RESUMO

A crescente preocupação com os impactos ambientais e a sustentabilidade na construção civil, um dos principais setores responsáveis pelas emissões globais de CO₂ e pelo consumo de recursos naturais, tem impulsionado a busca por soluções mais eficientes e sustentáveis. A arquitetura adaptada ao clima surge como uma abordagem promissora para melhorar a eficiência térmica e energética das edificações. No entanto, muitos projetos ainda falham em considerar adequadamente as condições locais, resultando em construções ineficientes. Pesquisadores têm desenvolvido ferramentas de apoio ao projeto, que fornecem diretrizes gerais para arquitetos e engenheiros. No entanto, um aspecto frequentemente negligenciado nessas diretrizes é a relação entre a edificação e o solo, apesar de sua influência significativa no desempenho térmico. O contato com o solo pode desempenhar um papel essencial na regulação térmica passiva das edificações, uma vez que a troca de calor entre a edificação e o solo pode representar uma parcela significativa da carga térmica total para aquecimento ou resfriamento. Neste contexto, esta pesquisa avaliou o impacto do contato com o solo como estratégia de condicionamento passivo em edificações residenciais térreas, considerando diferentes climas do estado do Paraná. A análise foi conduzida por meio de simulações computacionais no software *EnergyPlus*, variando as condições de contato com o solo e a composição da envoltória das edificações. Os resultados indicam que a estratégia mais eficiente varia conforme o clima local. Em cidades de clima quente e úmido, como Paranaguá, o contato direto com o solo sem isolamento térmico mostrou-se a solução mais eficaz, proporcionando maior estabilidade térmica e reduzindo a ocorrência de temperaturas extremas. Já em cidades de clima mais frio, como Curitiba e Ivaí, o contato direto com o solo sem isolamento resultou em desconforto térmico por frio, sendo mais vantajoso adotar isolamento térmico na envoltória para reduzir perdas de calor. Em Campo Mourão, cidade de clima intermediário, o contato com o solo sem isolamento também apresentou bom desempenho, mas a escolha ideal depende da prioridade entre estabilidade térmica e redução de temperaturas extremas. Além disso, a elevação da edificação sobre pilotis resultou em maior amplitude térmica, sendo menos indicada para climas com grande variação sazonal. Já a elevação com câmara de ar não ventilada (porão fechado) apresentou um efeito intermediário, reduzindo a perda de calor para o solo no inverno, mas podendo acumular calor excessivo no verão. Como limitação da pesquisa, destaca-se a complexidade da seleção e manipulação das variáveis relevantes ao estudo, o que resultou em um número restrito de cenários avaliados. No entanto, os achados reforçam a importância do contato com o solo como estratégia bioclimática, demonstrando que sua aplicação deve ser cuidadosamente adaptada às condições climáticas locais para otimizar o conforto térmico e reduzir a demanda energética das edificações.

Palavras-chave: Simulação computacional; Conforto térmico; Contato com o solo; Desempenho Térmico de edificações; *EnergyPlus*.

ABSTRACT

The growing concern about environmental impacts and sustainability in the construction industry—one of the main sectors responsible for global CO₂ emissions and the consumption of natural resources—has driven the search for more efficient and sustainable solutions. Climate-adaptive architecture emerges as a promising approach to improving the thermal and energy efficiency of buildings. However, many projects still fail to adequately consider local conditions, resulting in inefficient constructions. Researchers have developed design support tools that provide general guidelines for architects and engineers. However, one often overlooked aspect of these guidelines is the relationship between the building and the ground, despite its significant influence on thermal performance. The contact with the ground can play a crucial role in the passive thermal regulation of buildings, as heat exchange between the building and the ground can represent a substantial portion of the total thermal load for heating or cooling. In this context, this research evaluated the impact of ground contact as a passive conditioning strategy in single-story residential buildings, considering different climates in the state of Paraná, Brazil. The analysis was conducted through computer simulations using the EnergyPlus software, varying ground contact conditions and the composition of the building envelope. The results indicate that the most efficient strategy varies according to the local climate. In cities with a hot and humid climate, such as Paranaguá, direct contact with the ground without thermal insulation proved to be the most effective solution, providing greater thermal stability and reducing the occurrence of extreme temperatures. In colder cities, such as Curitiba and Ivaí, direct ground contact without insulation resulted in thermal discomfort due to cold, making thermal insulation in the building envelope a more advantageous option to reduce heat loss. In Campo Mourão, a city with an intermediate climate, ground contact without insulation also performed well, but the ideal choice depends on the priority between thermal stability and the reduction of extreme temperatures. Additionally, elevating the building on stilts resulted in greater thermal amplitude, making it less suitable for climates with significant seasonal variation. Meanwhile, elevation with an unventilated air chamber (sealed basement) had an intermediate effect, reducing heat loss to the ground in winter but potentially accumulating excessive heat in summer. A limitation of the research is the complexity of selecting and manipulating relevant variables for the study, which led to a restricted number of evaluated scenarios. However, the findings reinforce the importance of ground contact as a bioclimatic strategy, demonstrating that its application should be carefully adapted to local climatic conditions to optimize thermal comfort and reduce buildings' energy demand.

Keywords: Computer simulation; Thermal comfort; Contact with the ground; Thermal performance of buildings; EnergyPlus.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – NÚMERO DE PUBLICAÇÕES POR ANO	17
FIGURA 2 – PUBLICAÇÕES POR ÁREAS DE CONHECIMENTO	17
FIGURA 3 – DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DAS PUBLICAÇÕES.....	18
FIGURA 4 – NÚMERO DE PUBLICAÇÕES POR ANO	19
FIGURA 5 – PUBLICAÇÕES POR ÁREAS DE CONHECIMENTO	20
FIGURA 6 – DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DAS PUBLICAÇÕES.....	20
FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO CONDUTIBILIDADE TÉRMICA	35
FIGURA 8 – SITE:GROUNDTEMPERATUREUNDISTURBED:FINITEDIFFERENCE	45
FIGURA 9 – SITE:GROUNDDOMAIN:SLAB.....	51
FIGURA 10 – PLANTA TIPO GEOMETRIA DE ANÁLISE – EDIFICAÇÃO TÉRREA	52
FIGURA 11 – ILUSTRAÇÃO MODELO EM CONTATO COM O SOLO.....	54
FIGURA 12 – ILUSTRAÇÃO MODELO ELEVADO COM CÂMARA DE AR NÃO VENTILADA	54
FIGURA 13 – ILUSTRAÇÃO MODELO ELEVADO COM CÂMARA DE AR VENTILADA	54
FIGURA 14 – ILUSTRAÇÃO COMPOSIÇÃO ALVENARIA SIMPLES	56
FIGURA 15 – ILUSTRAÇÃO COMPOSIÇÃO ALVENARIA COM ISOLAMENTO.....	57
FIGURA 16 – ILUSTRAÇÃO COMPOSIÇÃO LAJE PRÉ-MOLDADA COM LAJOTAS DE CERÂMICA	58
FIGURA 17 – ILUSTRAÇÃO COMPOSIÇÃO LAJE PRÉ-MOLDADA COM LAJOTAS DE EPS	58
FIGURA 18 – ILUSTRAÇÃO COMPOSIÇÃO LAJE CONVENCIONAL	59
FIGURA 19 – ILUSTRAÇÃO COMPOSIÇÃO LAJE COM ISOLAMENTO	59
FIGURA 20 – PADRÃO DE OCUPAÇÃO	62
FIGURA 21 – PADRÃO DE ILUMINAÇÃO NOS DIAS DE SEMANA	63
FIGURA 22 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS AMPLITUDES TÉRMICAS DIÁRIAS NO PERCENTIL 99.....	66
FIGURA 23 – MUNICÍPIOS CLASSIFICADOS NOS PERFIS CLIMÁTICOS DELIMITADOS POR KRAMEL	66
FIGURA 24 – ILUSTRAÇÃO DO DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 1	69

FIGURA 25 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CARTA BIOCLIMÁTICA DE GIVONI	70
FIGURA 26 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 1: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS EXTERNAS DE CURITIBA.....	72
FIGURA 27 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 1: MÉDIAS DIÁRIAS DAS TEMPERATURAS EXTERNAS DE CURITIBA.....	73
FIGURA 28 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA CURITIBA NO CENÁRIO EM CONTATO COM O SOLO.....	74
FIGURA 29 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA CURITIBA PARA EDIFICAÇÕES EM CONTATO COM O SOLO	77
FIGURA 30 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS ANUAIS SIMULADAS PARA CURITIBA	79
FIGURA 31 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA CURITIBA NO CENÁRIO ELEVADA COM PORÃO	81
FIGURA 32 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA CURITIBA PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS COM PORÃO.....	83
FIGURA 33 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS ANUAIS SIMULADAS PARA CURITIBA	85
FIGURA 34 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA CURITIBA NO CENÁRIO ELEVADA COM CÂMARA DE AR VENTILADA	86
FIGURA 35 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA CURITIBA PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS SOBRE PILOTIS.....	88
FIGURA 36 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA CURITIBA PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS SOBRE PILOTIS.....	90
FIGURA 37 – RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA INTERNA E EXTERNA PARA DIFERENTES CENÁRIOS DE EDIFICAÇÃO EM CURITIBA	91

FIGURA 38 – DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS HORAS DE TEMPERATURA INTERNA DENTRO, ABAIXO E ACIMA DO INTERVALO DE CONFORTO TÉRMICO PARA DIFERENTES CENÁRIOS EM CURITIBA	95
FIGURA 39 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 1: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS EXTERNAS DE IVAÍ.....	98
FIGURA 40 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 1: MÉDIAS DIÁRIAS DAS TEMPERATURAS EXTERNAS DE IVAÍ.....	99
FIGURA 41 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA IVAÍ NO CENÁRIO EM CONTATO COM O SOLO.....	100
FIGURA 42 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA IVAÍ PARA EDIFICAÇÕES EM CONTATO COM O SOLO	102
FIGURA 43 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS ANUAIS SIMULADAS PARA IVAÍ.....	104
FIGURA 44 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA IVAÍ NO CENÁRIO ELEVADA COM PORÃO.....	105
FIGURA 45 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA IVAÍ PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS COM PORÃO	107
FIGURA 46 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA IVAÍ PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS COM PORÃO	109
FIGURA 47 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA IVAÍ NO CENÁRIO ELEVADA COM CÂMARA DE AR VENTILADA.....	111
FIGURA 48 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA IVAÍ PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS SOBRE PILOTIS	113
FIGURA 49 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA IVAÍ PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS SOBRE PILOTIS	115

FIGURA 50 – RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA INTERNA E EXTERNA PARA DIFERENTES CENÁRIOS DE EDIFICAÇÃO EM IVAÍ.....	116
FIGURA 51 – DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS HORAS DE TEMPERATURA INTERNA DENTRO, ABAIXO E ACIMA DO INTERVALO DE CONFORTO TÉRMICO PARA DIFERENTES CENÁRIOS EM IVAÍ	118
FIGURA 52 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 1: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS EXTERNAS DE CAMPO MOURÃO	120
FIGURA 53 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 1: MÉDIAS DIÁRIAS DAS TEMPERATURAS EXTERNAS DE CAMPO MOURÃO	121
FIGURA 54 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA CAMPO MOURÃO NO CENÁRIO EM CONTATO COM O SOLO	122
FIGURA 55 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA CAMPO MOURÃO PARA EDIFICAÇÕES EM CONTATO COM O SOLO.....	125
FIGURA 56 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS ANUAIS SIMULADAS PARA CAMPO MOURÃO	127
FIGURA 57 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA CAMPO MOURÃO NO CENÁRIO ELEVADA COM CÂMARA DE AR NÃO VENTILADA	129
FIGURA 58 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA CAMPO MOURÃO PARA EDIFICAÇÕES EM ELEVADAS NÃO VENTILADAS	131
FIGURA 59 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA CAMPO MOURÃO PARA EDIFICAÇÕES EM CONTATO COM O SOLO.....	133
FIGURA 60 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA CAMPO MOURÃO NO CENÁRIO ELEVADA COM CÂMARA DE AR VENTILADA	135
FIGURA 61 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA CAMPO MOURÃO PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS SOBRE PILOTIS	137

FIGURA 62 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA CAMPO MOURÃO PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS SOBRE PILOTIS	139
FIGURA 63 – RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA INTERNA E EXTERNA PARA DIFERENTES CENÁRIOS DE EDIFICAÇÃO EM CAMPO MOURÃO	140
FIGURA 64 – DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS HORAS DE TEMPERATURA INTERNA DENTRO, ABAIXO E ACIMA DO INTERVALO DE CONFORTO TÉRMICO PARA DIFERENTES CENÁRIOS EM CAMPO MOURÃO	142
FIGURA 65 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 1: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS EXTERNAS DE PARANAGUÁ	144
FIGURA 66 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 1: MÉDIAS DIÁRIAS DAS TEMPERATURAS EXTERNAS DE PARANAGUÁ	145
FIGURA 67 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA PARANAGUÁ NO CENÁRIO EM CONTATO COM O SOLO	146
FIGURA 68 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA PARANAGUÁ PARA EDIFICAÇÕES EM CONTATO COM O SOLO	148
FIGURA 69 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS ANUAIS SIMULADAS PARA PARANAGUÁ	150
FIGURA 70 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA PARANAGUÁ NO CENÁRIO ELEVADA COM PORÃO	152
FIGURA 71 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA PARANAGUÁ PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS COM PORÃO	154
FIGURA 72 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA PARANAGUÁ PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS COM PORÃO	156
FIGURA 73 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA PARANAGUÁ NO CENÁRIO ELEVADA COM CÂMARA DE AR VENTILADA	157

FIGURA 74 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA PARANAGUÁ PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS SOBRE PILOTIS.....	159
FIGURA 75 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA PARANAGUÁ PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS SOBRE PILOTIS.....	161
FIGURA 76 – RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA INTERNA E EXTERNA PARA DIFERENTES CENÁRIOS DE EDIFICAÇÃO EM PARANAGUÁ	162
FIGURA 77 – DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS HORAS DE TEMPERATURA INTERNA DENTRO, ABAIXO E ACIMA DO INTERVALO DE CONFORTO TÉRMICO PARA DIFERENTES CENÁRIOS EM PARANAGUÁ.....	164

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – COMPARATIVO CONTATO COM O SOLO.....	53
QUADRO 2 – COMPARATIVO CONTATO COM O SOLO E COMPOSIÇÕES DA SUPERESTRUTURA.....	61

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – VALORES TÍPICOS APROXIMADOS DOS CALORES ESPECÍFICOS GRAVIMÉTRICOS E DAS MASSAS ESPECÍFICAS DAS FRAÇÕES CONSTITUINTES DO SOLO	34
TABELA 2 – VALORES TÍPICOS APROXIMADOS DOS CALORES ESPECÍFICOS GRAVIMÉTRICOS E DAS MASSAS ESPECÍFICAS DAS FRAÇÕES CONSTITUINTES DO SOLO	55
TABELA 3 – PROPRIEDADES TÉRMICAS.....	60
TABELA 4 – DADOS DE ENTRADA E VALORES ADOTADOS.....	60
TABELA 5 – TAXA METABÓLICA E FRAÇÃO RADIANTE PARA OS USUÁRIOS ..	62
TABELA 6 – DENSIDADE DE POTÊNCIA INSTALADA, FRAÇÃO RADIANTE E FRAÇÃO VISÍVEL PARA O SISTEMA DE ILUMINAÇÃO	63
TABELA 7 – PERÍODO DE USO, DENSIDADE DE CARGAS INTERNAS E FRAÇÃO RADIANTE PARA EQUIPAMENTOS DA SALA	64
TABELA 8 – CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA NBR 15220-3	64
TABELA 9 – MUNICÍPIOS PARANAENSES SELECIONADOS	67

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 PROBLEMA	18
1.2 HIPÓTESES	19
1.3 OBJETIVOS	19
1.3.1 Objetivo geral	19
1.3.2 Objetivos específicos.....	19
1.4 JUSTIFICATIVA	19
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2 ESTADO DA ARTE	16
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
3.1 ARQUITETURA E CLIMA - REVISAR	26
3.2 ESTRATÉGIAS PARA CONDICIONAMENTO TÉRMICO PASSIVO.....	29
3.3 O SOLO.....	30
3.3.1 Composição	30
3.3.2 Propriedades térmicas do solo	32
3.3.2.1 Densidade	32
3.3.2.2 Temperatura do solo.....	32
3.3.2.3 Calor específico	33
3.3.2.4 Condutibilidade térmica	35
3.3.2.5 Resistividade térmica.....	36
3.3.2.6 Capacidade térmica.....	36
3.3.3 Mecanismos de transferência de calor pelo solo.....	37
3.3.3.1 Transferência de calor por condução	37
3.3.4 Regime térmico do solo.....	38
3.4 NORMAS BRASILEIRAS DE DESEMPENHO DE EDIFICAÇÕES.....	40
4 MATERIAL E MÉTODOS	42
4.1 MODELAGEM E PARÂMETROS.....	42
4.1.1 Simulação computacional do solo	42
4.1.1.1 <i>Ground Domain</i>	44
4.1.1.2 <i>Ground domain: Slab</i>	45
4.1.2 Simulação computacional da superestrutura.....	51
4.1.2.1 Características do modelo: geometria e modelagem.....	51

4.1.2.2 Componentes construtivos	54
4.1.2.3 Cargas internas e schedules	61
4.1.3 Dados climáticos	64
4.1.4 Dados de saída	67
4.2 ANÁLISE DOS DADOS	67
4.2.1 DIAGRAMAS ANTROPOCLIMÁTICOS DE FERNANDES	67
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
5.1.1 CURITIBA.....	71
5.1.1.1 CONTATO COM O SOLO	73
5.1.1.2 ELEVADA COM CÂMARA DE NÃO VENTILADA (COM PORÃO)	80
5.1.1.3 ELEVADA COM CÂMARA DE AR VENTILADA (SOBRE PILOTIS)	85
5.1.1.4 COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS	91
5.1.2 IVAÍ.....	97
5.1.2.1 CONTATO COM O SOLO	99
5.1.2.2 ELEVADA COM CÂMARA DE NÃO VENTILADA (COM PORÃO)	105
5.1.2.3 ELEVADA COM CÂMARA DE AR VENTILADA (SOBRE PILOTIS)	110
5.1.2.4 COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS	115
5.1.3 CAMPO MOURÃO	119
5.1.3.1 CONTATO COM O SOLO	121
5.1.3.2 ELEVADA COM CÂMARA DE AR NÃO VENTILADA (COM PORÃO)	128
5.1.3.3 ELEVADA COM CÂMARA DE AR VENTILADA (SOBRE PILOTIS)	134
5.1.3.4 COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS	139
5.1.4 PARANAGUÁ.....	143
5.1.4.1 CONTATO COM O SOLO	145
5.1.4.2 ELEVADA COM CÂMARA DE NÃO VENTILADA (COM PORÃO)	151
5.1.4.3 ELEVADA COM CÂMARA DE AR VENTILADA (SOBRE PILOTIS)	156
5.1.4.4 COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS	161
6 CONCLUSÃO	165
REFERÊNCIAS.....	168

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a preocupação com os impactos ambientais, o esgotamento dos recursos naturais e a necessidade de preservação do planeta tem se intensificado. Nesse contexto, a construção civil emerge como um dos setores de maior impacto, sendo responsável por uma parcela significativa das emissões de CO₂, do consumo energético global e da geração de resíduos sólidos. Estima-se que edificações e infraestruturas respondam por aproximadamente 40% das emissões globais de CO₂, além de demandarem altos volumes de recursos naturais (PORTO, 2009).

O consumo energético dos edifícios está diretamente ligado a suas características arquitetônicas e ao uso dos espaços, especialmente no que concerne ao aquecimento, refrigeração e iluminação. Relatórios da Agência Internacional de Energia (IEA, 2023) indicam que o setor de construção e edificações é responsável por 30% do consumo final de energia e 27% das emissões do setor energético. Assim, torna-se essencial o desenvolvimento de edificações de baixo impacto ambiental, projetadas para maximizar a eficiência térmica e energética, minimizando o desperdício de recursos naturais.

A eficiência termoenergética dos edifícios depende, em grande parte, da adequação do projeto às condições climáticas locais (FROTA e SCHIFFER, 2003). A arquitetura bioclimática surge como uma abordagem essencial para reduzir o consumo energético e melhorar o conforto ambiental. Essa metodologia exige análises detalhadas das condições regionais, avaliações térmicas e biológicas, bem como a integração de soluções tecnológicas ao projeto arquitetônico (GIVONI, 1998). Contudo, a aplicação dessas estratégias ainda enfrenta desafios, como a falta de consideração sistemática do clima local durante a concepção dos projetos (CELIS, PEREIRA e MOREIRA, 2020).

Keeler e Burke (2010) ressaltam que as decisões críticas para a eficiência energética de uma edificação são tomadas na fase de concepção do projeto. Elementos como forma, tipo e tamanho das aberturas, sistemas construtivos, orientação da edificação e dispositivos de sombreamento influenciam diretamente o desempenho energético e ambiental. Entretanto, muitos profissionais ainda selecionam estratégias de economia de energia de forma intuitiva, sem uma análise criteriosa das alternativas disponíveis (WILDE e VOORDEN, 2004).

Diversas ferramentas de apoio bioclimático têm sido desenvolvidas para auxiliar no processo de tomada de decisão, considerando o contexto climático da edificação (OLGYAY, 1967; KOENIGSBERGER *et al.*, 1973; GIVONI, 1992; EVANS, 2003; FERNANDES, 2020; LI *et al.*, 2023). Essas ferramentas fornecem diretrizes para aquecimento e resfriamento, orientação das fachadas, ventilação natural e isolamento térmico (MANZANO-AGUGLIARO *et al.*, 2015). No entanto, suas recomendações podem ser insuficientes ou conflitantes, exigindo estudos adicionais para refinar as decisões de projeto. Um aspecto frequentemente negligenciado é a relação entre a edificação e o solo, especialmente no que diz respeito ao impacto do contato com o solo no desempenho térmico das edificações.

A transferência de calor entre o edifício e o solo pode representar uma parcela significativa da carga térmica de aquecimento e resfriamento, especialmente em edificações residenciais de baixa altura (ANDOLSUN *et al.*, 2011). No entanto, a estimativa precisa dessas trocas térmicas ainda é um desafio, devido à complexidade dos processos de condução térmica no solo, sua inércia térmica e a variabilidade das propriedades térmicas do solo ao longo do tempo (SPIGA e VOCALE, 2014). Hagentoft (2001) destaca que a perda de calor através do solo é a parcela menos compreendida das perdas térmicas totais de uma edificação.

Atualmente, ferramentas de simulação computacional permitem analisar o comportamento térmico das edificações com maior precisão (SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2016). O *EnergyPlus*, software amplamente utilizado e homologado pela ASHRAE 140 (ASHRAE, 2014), permite calcular a transferência de calor, umidade e ar, além de oferecer suporte à modelagem de sistemas radiantes e indicadores de conforto térmico. No Brasil, o *EnergyPlus* é a principal ferramenta de simulação adotada, sendo recomendado pela norma NBR 15575 (ABNT, 2013).

Apesar dos avanços na simulação computacional, grande parte dos estudos concentra-se no comportamento térmico da superestrutura dos edifícios, relegando a influência das trocas térmicas entre o piso e o solo a um segundo plano (RESENDE, 2017). Diante desse cenário, a presente pesquisa busca analisar a influência do contato com o solo em diferentes tipologias de edificações residenciais não condicionadas, utilizando simulação computacional no *EnergyPlus*. O foco da investigação reside na modelagem dos parâmetros de troca de calor entre o solo e a edificação, contribuindo para uma compreensão mais abrangente do comportamento térmico e energético das construções.

1.1 PROBLEMA

Estratégias bioclimáticas fornecidas por ferramentas de apoio para o processo de projeto e normas técnicas geralmente tem maior enfoque nas condições climáticas e em componentes acima do solo. Contudo, a interação térmica entre o piso e o solo é extremamente relevante, principalmente em edificações de pequeno porte, como habitações residenciais, uma vez que no contexto brasileiro, não é empregado com frequência isolamento na composição do piso dessas edificações (COSTA, 2017).

De acordo com Richards e Mathews (1994) algumas medições em edificações residenciais mostram que a perda de energia térmica pelo piso e pelo solo abaixo da edificação podem algumas vezes ser menos de 10% do total de perda de calor do edifício. No entanto, outros estudos alegam que, em climas frios, a perda de calor para o solo pode representar até um terço das perdas totais de calor (SPONNER, 1991 apud RICHARDS; MATHEWS, 1994). Diante disso, tem-se que a perda excessiva de calor para o solo pode resultar em um aumento no consumo de energia para manter a temperatura interna dos edifícios. Por outro lado, a retenção excessiva de calor no solo pode resultar em um aumento na temperatura interna dos edifícios, o que pode ser desconfortável para os ocupantes, repercutindo no aumento do consumo de energia para resfriamento. Portanto, entender a influência do contato com o solo nas temperaturas internas das edificações é essencial para garantir a aplicação adequada dessa estratégia de projeto.

O problema básico das perdas de calor em edifícios através do solo, segundo Janssen (2004) é profundamente mais complexo do que as perdas de calor através de partes de edifícios acima do solo. As razões para isso de acordo com o autor é devido à três fatores. A primeira delas é relacionado a abordagem dimensional, uma vez que a perda de calor através do solo é em essência um fenômeno tridimensional; a segunda é que a grande inércia térmica do solo necessita de cálculos não estacionários; e por último a ampla variação na geometria e estratégias de isolamento leva a muitos parâmetros a serem considerados (JANSSEN, 2004).

Em resumo, pesquisas indicam que a influência do solo tende a ser negligenciada nas análises térmicas de edificações. Diante do exposto, nesta pesquisa, propõe-se investigar: a) influência do contato com o solo no desempenho térmico de edificações residenciais; d) para quais climas a estratégia contato com o

solo é recomendável; e) como a estratégia deve ser utilizada – em contato direto com o solo, com isolamento entre o solo e a edificação ou elevadas do solo; f) a possibilidade de definir diretrizes a partir da análise do clima local.

1.2 HIPÓTESES

Esta pesquisa adotou a hipótese, a ser verificada, de que o contato com o solo é uma estratégia aplicável para condicionamento passivo para edificações residenciais unifamiliares de pequeno porte no estado do Paraná.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar o uso do ‘contato com o solo’ como uma estratégia para condicionamento passivo de edificações residenciais térreas nos diferentes climas do estado do Paraná.

1.3.2 Objetivos específicos

- Verificar o desempenho de diferentes cenários de contato com o solo.
- Verificar o impacto das variações nos sistemas construtivos sobre a influência do contato com o solo no desempenho térmico das edificações.
- Verificar quais outras estratégias impactam possíveis contribuições do contato com o solo para o bom desempenho térmico das edificações.

1.4 JUSTIFICATIVA

O estudo da influência do contato com o solo no desempenho térmico de edificações se justifica pela possibilidade de aprimorar o comportamento térmico das construções nas diferentes regiões climáticas do Paraná. Além disso, embora este estudo não tenha como objetivo direto a análise do consumo energético, a literatura aponta que a melhoria do desempenho térmico pode, indiretamente, contribuir para a

redução da necessidade de condicionamento artificial, aliviando a demanda energética e minimizando os impactos ambientais das edificações.

No Brasil, somente as edificações residenciais representam grande parte do consumo energético no país. Sabe-se que o setor residencial brasileiro consome cerca de 10,8% de toda a energia gerada (EPE, 2020). Ademais, de acordo com o EPE, até 60% do consumo de energia em edifícios residenciais está relacionado a sistemas artificiais de condicionamento, demonstrando falhas no atendimento ao conforto térmico. Estes dados reforçam a importância de práticas que visem reduzir o consumo de energia nas edificações.

Nesse contexto, compreender o papel do solo como regulador térmico torna-se fundamental. Para a maioria das edificações, o solo atua continuamente como um dissipador de energia térmica, absorvendo parte do calor da fundação do edifício. Diferentemente de outros elementos do envelope da edificação, a fundação mantém contato constante com uma superfície relativamente fria: o solo. Dessa forma, investigar a influência dessa interação permite uma melhor compreensão desse meio passivo na atenuação de picos térmicos nos ambientes internos.

Outro aspecto de relevância é a contribuição do estudo para a saúde dos usuários em decorrência de habitarem ambientes com condições ambientais próximas das demandadas pelo organismo humano. Segundo Olgyay (1998) os muitos elementos do entorno que constituem o ambiente interagem diretamente com o corpo humano, o qual pode absorvê-los ou rejeitá-los. Segundo Frota e Schiffer (2003) a sensação de conforto térmico do indivíduo é tida quando as trocas de calor entre o ambiente e o corpo ocorrem sem muito esforço. Quando estas condições de adaptação do corpo humano são alcançadas com mínimo de energia, são consideradas de acordo com Olgyay (1998) como zona de conforto, onde a maior parte da energia do usuário pode ser destinada a produtividade. Desta maneira o conforto térmico está estritamente ligado ao ambiente e a resposta do usuário a ele.

Por fim, o estudo apresenta pertinência na busca da construção do conhecimento e de novas soluções dentro da construção civil e arquitetura, desta forma busca-se o aprimoramento da aplicação de tecnologias construtivas e projetuais.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente pesquisa está dividida em seis capítulos. No primeiro capítulo, é apresentada a contextualização do problema de pesquisa, identificando os temas a serem explorados, as hipóteses consideradas e os objetivos ambicionados.

O segundo capítulo apresenta o estado da arte, identificando o panorama geral de pesquisa relacionados aos temas a serem explorados. O terceiro capítulo apresenta a fundamentação teórica, são abordados conceitos como arquitetura bioclimática; estratégias para condicionamento passivo; composição, propriedades térmicas, mecanismos de transferência de calor e regime térmico do solo e as normas brasileiras de desempenho de edificações.

No capítulo 4, descreve-se o método da pesquisa, no qual é apresentado a definição dos modelos analisados, abordando aspectos como geometria e características do modelo, a seleção dos dados climáticos que foram considerados na pesquisa, os parâmetros da simulação computacional, incluindo os padrões de ocupação, de iluminação, as cargas dos equipamentos, os critérios de contato com o solo e as propriedades térmicas dos modelos analisados.

Os últimos capítulos serão referentes à análise de dados e à conclusão, onde serão discutidos os resultados obtidos.

2 ESTADO DA ARTE

Utilizando a base de dados *Scopus*, da editora *Elsevier*, disponível no Portal de Periódicos da CAPES, foi realizada uma revisão sistêmica com o objetivo de identificar e mapear o estado atual das pesquisas na área de desempenho térmico de edifícios utilizando estratégias ou aspectos passivos e/ou bioclimáticos e exclusivamente o tema da influência do contato com o solo no desempenho térmico de edificações.

O *Scopus* foi utilizado pois possui o título, de acordo com a Elsevier (2015), de maior base de dados de resumos e citações de literatura revisada por pares, com ferramentas bibliométricas, contribuindo assim para a relevância da pesquisa.

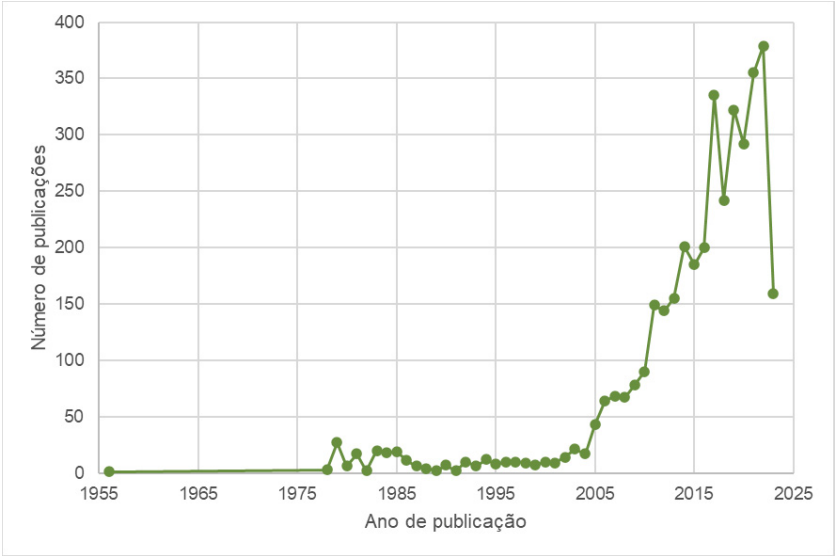
A busca no *Scopus* se realiza através de *strings* de busca e de operadores booleanos (*or*, *and*, *and not*) que sumarizam diferentes resultados relacionados a um tópico em comum. Por ser uma base multidisciplinar é necessário restringir a pesquisa excluindo termos genéricos de disciplinas não relacionadas ao tema como medicina e citologia. Elencando as principais palavras-chave relevantes ao tema de pesquisa de uma forma global e ampla e combinando com os operadores, a seguinte *string* foi utilizada: (*building* OR architecture OR approach*) AND (*passive OR bioclimatic OR bioclimatology*) AND (*design OR strategy* OR guideline**) AND ("*thermal performance*" OR "*energy efficiency*" OR "*thermal comfort*") AND NOT (*cytology OR medicine OR "fire spread"*).

As áreas correspondentes à pesquisa foram: Engenharia; Energia; Ciências Ambientais; Ciência dos Materiais; Ciências Sociais; Ciência da Computação; Matemática; Física e Astronomia; Ciências da Terra e Planetárias e Engenharia Química.

Para analisar os dados eles foram organizados em planilhas de acordo com o ano de publicação, área de assunto, tipo de documento, autores, instituições e países/territórios.

O total de retornos para a busca foi 3816 documentos. A publicação mais antiga data do ano de 1956 (FIGURA 1), outra publicação só foi ocorrer no ano de 1978, observa-se após este ano um aumento inexpressivo e somente após o ano de 2002 o número de publicações aumenta significativamente.

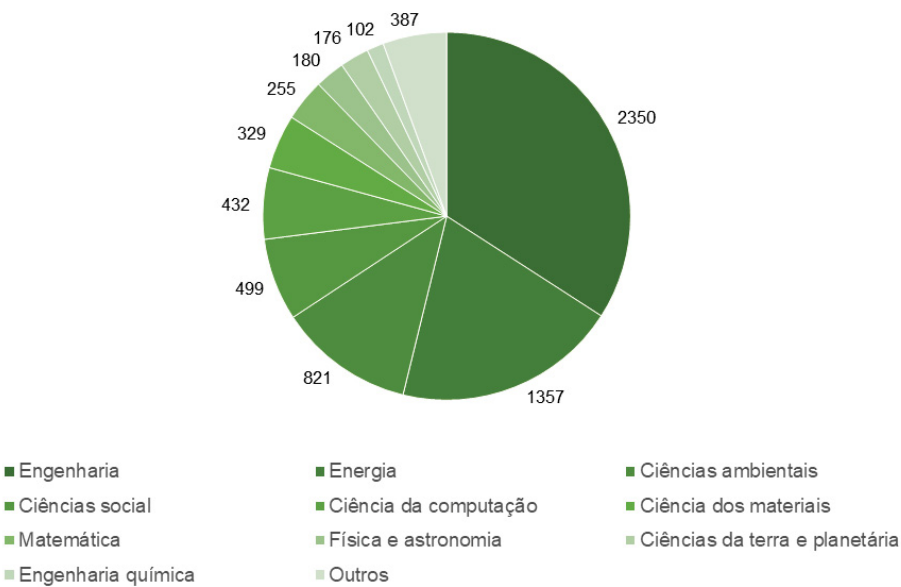
FIGURA 1 – NÚMERO DE PUBLICAÇÕES POR ANO



FONTE: Autora (2024).

Em relação a área de conhecimento das publicações, predominam pesquisas na área de Engenharia, Energia e Ciências ambientais conforme apresentado na FIGURA 2.

FIGURA 2 – PUBLICAÇÕES POR ÁREAS DE CONHECIMENTO

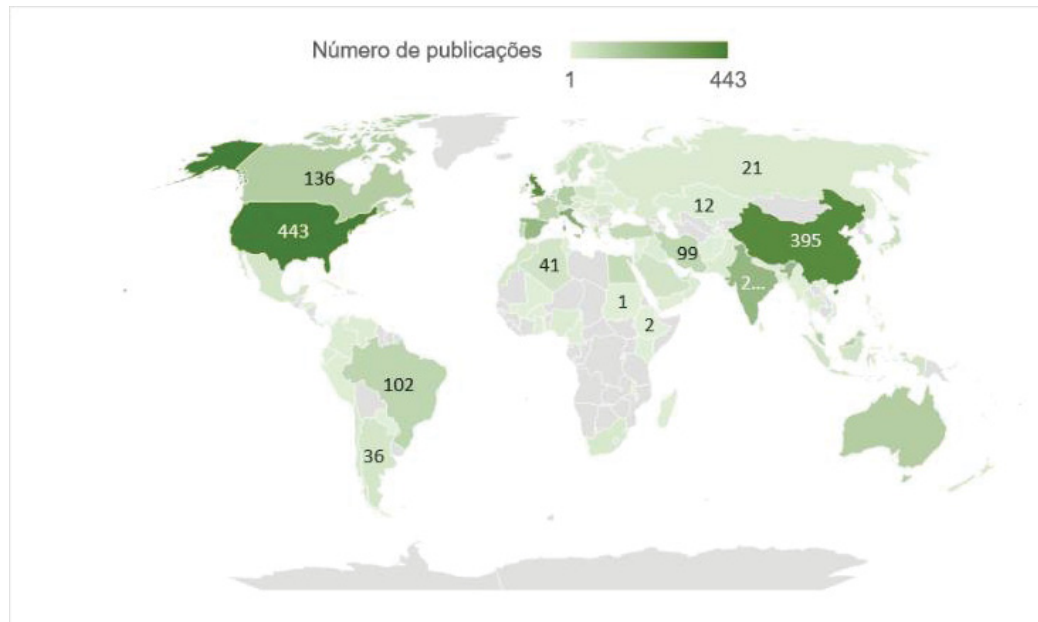


FONTE: Autora (2024).

Geograficamente, as pesquisas estão bem distribuídas ao redor do globo conforme demonstradas na FIGURA 3, no entanto, alguns países destacam-se em

relação a quantia de produção, é o caso dos Estados Unidos (443), China (395), Reino Unido (395), Itália (265), Índia (223) e Espanha (219).

FIGURA 3 – DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DAS PUBLICAÇÕES



FONTE: Autora (2024).

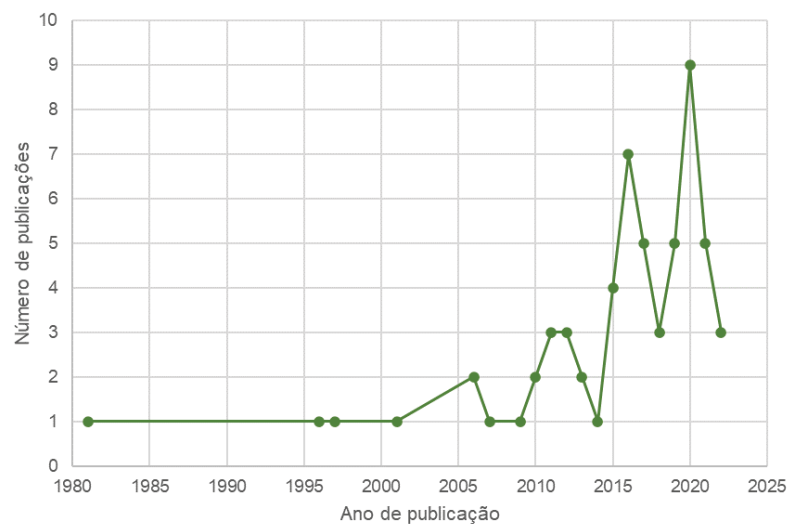
Uma segunda busca foi realizada com intuito de afunilar o foco da pesquisa para o mesmo tema do presente estudo, a fim de encontrar bases ou estudos semelhantes. Desta forma foram alteradas as *strings* utilizadas na busca para: (influence OR impact OR effect) AND (soil OR ground OR earth OR "ground heat transfer" OR "ground contact" OR "soil contact") AND ("ground-coupled" OR "slab-on-ground") AND ("thermal performance" OR "energy efficiency" OR "thermal comfort" OR "indoor temperature") AND (building* OR architecture OR approach) AND NOT (cytology OR medicine OR "fire spread" OR composites).

Semelhantes aos resultados da busca ampla, as áreas correspondentes foram: Engenharia; Energia; Ciências Ambientais; Ciências Sociais; Ciência da Computação; Matemática; Ciências Agrárias e Biológicas; Negócios, Gestão e Contabilidade; Ciências da Terra e Planetárias e Engenharia Química.

O total de retornos para a busca foi de 60 documentos, revelando uma redução drástica em comparação ao total de retornos para a busca anterior. A publicação mais antiga data do ano de 1981 (FIGURA 4), somente 15 anos depois outra pesquisa foi publicada. Observa-se que desde o ano da primeira publicação o

número de publicações não cresceu, até o presente momento não houve mais de 10 publicações por ano, evidenciando a falta de investigação do tema e a relevância de desenvolver pesquisas acerca do problema.

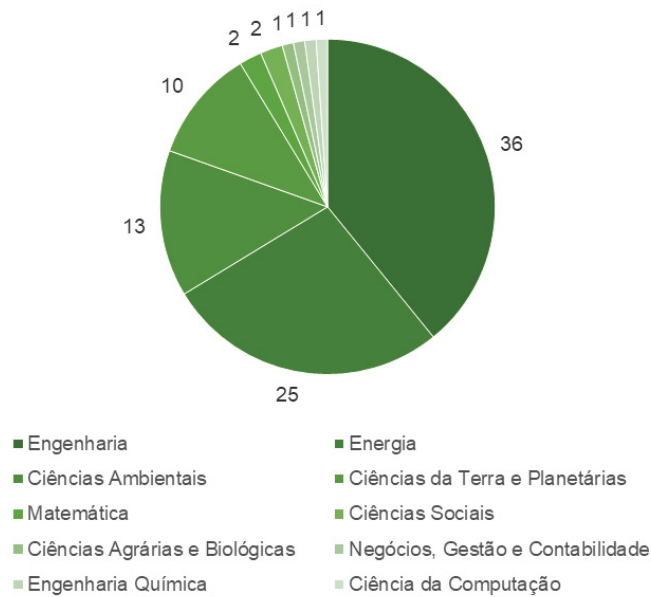
FIGURA 4 – NÚMERO DE PUBLICAÇÕES POR ANO



FONTE: Autora (2024).

Em relação a área de conhecimento das publicações, predominam pesquisas na área de Engenharia, Energia e Ciências Ambientais conforme apresentado na FIGURA 5.

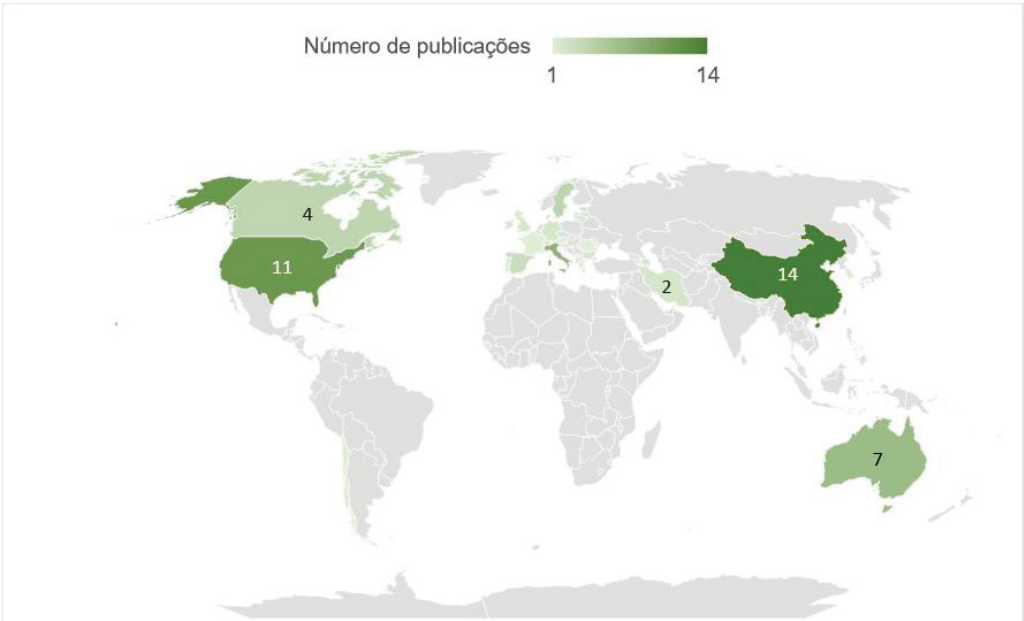
FIGURA 5 – PUBLICAÇÕES POR ÁREAS DE CONHECIMENTO



FONTE: Autora (2024).

Em relação a distribuição geográfica das pesquisas, as pesquisas não estão bem distribuídas ao redor do globo, as publicações concentram-se em países como Estados Unidos e China, conforme demonstradas na FIGURA 6. Em relação a quantia de produção, China (14), Estados Unidos (11) e Itália (8) lideram esse cenário.

FIGURA 6 – DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DAS PUBLICAÇÕES



FONTE: Autora (2024).

Como revelado através do mapeamento de pesquisas, a influência direta do contato com o solo no desempenho de edificações ainda é um tema pouco explorado. Existem inúmeros estudos relacionados ao solo e à interação com a edificação, no entanto, a maioria se subdivide em assuntos mais específicos.

Em pesquisas mais abrangentes, o contato com o solo é tratado com certa superficialidade, ainda que o contato contínuo de edificações com o solo, que atua como um dissipador de calor, desempenhe um papel crucial na condução de calor da fundação para a terra. Estudos revelam que essa interação térmica resulta em perdas significativas de energia, especialmente em climas frios, onde a transferência de calor através da fundação pode representar uma fração substancial das perdas térmicas totais do edifício. Em algumas residências, por exemplo, até 58% das perdas térmicas podem ocorrer através do piso (SAL-SOTO *et al.*, 2024).

A investigação sobre o impacto do contato com o solo no desempenho térmico revelou uma dimensão adicional ao problema: a umidade do solo. Estudos comparativos sobre a performance de edificações em diferentes climas mostram que a temperatura e umidade do solo, assim como a profundidade da fundação, são fatores críticos na definição da estratégia de isolamento mais adequada. Em regiões com temperaturas extremas, a profundidade da fundação e o tipo de solo influenciam significativamente a transferência de calor, exigindo soluções de isolamento personalizadas (KIM *et al.*, 2023).

Estudos experimentais focados na transferência de calor em relação à umidade em sistemas de lajes apoiadas sobre solo, desenvolvidos por Arce e Hwang (2020), mostraram que o contato direto com o solo pode aumentar significativamente a perda de calor principalmente devido à umidade do solo. A combinação de isolamento em lajes com barreiras contra umidade mostrou uma redução considerável na transferência de calor, melhorando a eficiência energética global da edificação.

A análise das pontes térmicas em lajes sobre o solo reforça a importância de soluções de isolamento bem projetadas. Modelos avançados de simulação térmica têm sido utilizados para avaliar diferentes configurações de isolamento, especialmente na parte externa da fundação, e suas implicações no desempenho energético dos edifícios. Esses modelos ajudam a identificar e implementar medidas eficazes para reduzir a transferência de calor e otimizar o desempenho térmico das edificações.

O estudo de Arce e Hwang (2020) conduziu os experimentos em dois módulos de habitação em escala real no campus da Universidade de Newcastle e, com a

utilização do isolamento na borda da laje, a redução da flutuação de temperatura no nível do piso térreo foi de $8,93^{\circ}\text{C}$, aproximadamente 4,5 vezes maior do que sem o isolamento. Mais de 20% da perda de energia pelo piso térreo foi reduzida no módulo de teste, correspondendo a uma redução anual de $26,29 \text{ MJ/m}^2$, demonstrando o potencial de economia de energia do isolamento na borda de lajes em edifícios residenciais.

Outras pesquisas destacam a importância do isolamento em diferentes tipos de fundações, como crawlspace (laje ou piso elevado) e estruturas subterrâneas. Na Suécia, Risberg e Risberg (2020) evidenciam como as características térmicas do solo e a temperatura do ar influenciam as perdas de calor em fundações do tipo crawlspace. O estudo revela que o isolamento adequado nessas fundações é crucial para minimizar o fluxo de calor indesejado. Além do isolamento, a temperatura do ar se mostrou um fator chave, com cada variação de grau resultando em uma diferença de $0,15 \text{ W/m}^2$ no fluxo médio de calor. Propriedades específicas do solo, como a capacidade térmica, também impactaram significativamente as perdas de calor, destacando a importância de considerar essas variáveis no projeto da fundação.

No caso de edifícios subterrâneos, a inércia térmica do solo e o isolamento térmico apropriado são fundamentais para garantir um desempenho energético eficiente e um conforto térmico adequado. Espaços subterrâneos, ao serem diretamente cercados pelo solo e sem ganho solar, luz do dia, sombra ou radiação do céu, apresentam um balanço energético total muito diferente dos edifícios acima do solo. Segundo Yu *et al.* (2020), edifícios subterrâneos podem economizar mais de 23% de energia em comparação com estruturas similares acima do solo, devido à alta inércia térmica da terra. O estudo enfatiza que fatores como o isolamento, as características térmicas e hidrotérmicas das envoltórias dos edifícios, as propriedades térmicas do solo e o clima externo são vitais para otimizar o uso de energia e melhorar o conforto dos ocupantes, evidenciando a complexidade da interação térmica entre edificações e o solo.

Outro aspecto crítico é a definição precisa da temperatura do solo em processos de simulação termoenergética. A utilização de metodologias adequadas e programas de simulação pode fornecer estimativas mais precisas das condições térmicas e evitar discrepâncias nos cálculos de fluxo de calor. Estimativas baseadas em temperaturas externas frequentemente apresentam diferenças significativas em comparação com medições *in situ*, ressaltando a necessidade de condições de

contorno mais realistas. Medições *in situ* da temperatura do solo, por exemplo, no sul da Polônia, realizadas por Nawalany e Sokolowski (2019) mostram variações sazonais significativas, impactando diretamente a gestão de energia dos edifícios. Essas variações são mais pronunciadas durante os meses de inverno, reforçando a importância de considerar essas flutuações ao planejar o isolamento térmico das fundações. Neste estudo, foram realizadas medições da temperatura do solo em vários pontos utilizando sensores e os cálculos para determinar as trocas de calor foram baseados na temperatura interna da residência e na temperatura do solo. O uso de temperaturas do solo provenientes de fora do edifício como condições de contorno resultou em diferenças significativas nos cálculos de fluxo de calor devido às temperaturas mais baixas em camadas específicas do solo.

Além de estudos de escala residencial, para complementar essas descobertas e aprimorar a análise das perdas térmicas em contextos variados, estudos recentes também têm focado em edifícios não residenciais de grande porte. Esses estudos, como o de Soares *et al.* (2024), destacam a importância de modelos tridimensionais para a análise preditiva de perdas de calor a longo prazo. Esses modelos avançados são essenciais para refletir com precisão a interação térmica entre o solo e a estrutura, possibilitando o desenvolvimento de estratégias mais eficientes para a mitigação das perdas térmicas.

Adicionalmente, há uma outra categoria de estudos que foca nas metodologias de cálculo para determinar o coeficiente de transferência de calor através do solo. Como parte desta categoria, destaque-se um estudo conduzido por Zubarev e Zobnina (2023) onde foram explorados vários métodos para calcular as perdas de calor através do solo por meio de estruturas de piso subterrâneo. A pesquisa focou nas perdas de calor do subsolo de um edifício através de uma massa de solo, propondo métodos novos para cálculos precisos e introduz uma metodologia simplificada para calcular a resistência à transferência de calor em estruturas em contato com o solo, destacando a importância do isolamento do piso e das paredes. A modelagem matemática envolvida considera a capacidade térmica específica do solo, a condutividade térmica e as variações temporais, e é validada através de experimentos em escala real que mostraram uma correlação estreita entre os valores calculados e medidos. O método proposto inclui camadas suplementares para contabilizar a troca de calor entre o subsolo e o ar externo, melhorando a precisão dos

cálculos de fluxo de calor. A metodologia foi validada com resultados que alinham-se com métodos clássicos, evidenciando sua relevância e potencial.

Um outro estudo conduzido por Nagy (2015) investigou fatores de correção para efeitos dependentes do ambiente e da estrutura no coeficiente de transferência de calor de estruturas de contato direto com o solo, usando ferramentas de modelagem computacional de elementos finitos. A análise comparativa entre os resultados iniciais e os corrigidos com base em diferentes condições ambientais ou estruturais revelou os impactos de circunstâncias variáveis na transferência de calor em estruturas de contato com o solo. Foram fornecidas equações para calcular o coeficiente de transferência de calor, considerando fatores como conexões de cantos (pontos onde diferentes elementos estruturais se encontram, como paredes, pisos e fundações) e tipos de solo, como areia, cascalho, argila ou silte, que têm condutividades térmicas variáveis. A pesquisa destacou a importância de compreender as reações dependentes do ambiente em estruturas de contato com o solo para arquitetos, engenheiros civis e engenheiros mecânicos, facilitando o projeto com consciência de energia. Fatores multiplicadores de correção de forma foram introduzidos para diferentes tipos de estruturas de contato com o solo, abordando os efeitos térmicos tridimensionais resultantes da forma geométrica dos edifícios. Esse entendimento da forma e do impacto das características geométricas é essencial para a precisão nos cálculos de transferência de calor (NAGY,2015).

Em consonância com essa abordagem, outro trabalho de pesquisa, realizado por Spiga e Vocale (2014), investiga o impacto da geometria do piso na perda de calor do edifício através do solo. Este estudo concentra-se em uma laje isolada no solo e analisa como a geometria do piso, variando de forma retangular a quadrada, influencia o coeficiente global de transferência de calor. Um piso retangular é analisado com proporções variáveis de 0 a 1, mostrando que a geometria do piso influencia significativamente o coeficiente global de transferência de calor do solo em estado estacionário. Conforme o piso muda de retangular estreito para quadrado, há uma diminuição de cerca de 15% no coeficiente de transferência de calor. O estudo também explora os efeitos da espessura do isolamento perimetral na redução do coeficiente de transferência de calor, indicando que, dependendo da espessura da camada de isolamento, a diminuição varia de 8% a 13%. A transmitância térmica linear é calculada nas simulações usando expressões específicas, com as dimensões características do piso e a espessura equivalente total desempenhando papéis

cruciais na determinação das características de transferência de calor. Vários coeficientes convectivos são considerados para diferentes direções do fluxo de calor, como horizontal e descendente, para modelar com precisão o comportamento térmico dos componentes do edifício nas simulações.

Em resumo, a vasta gama de pesquisas sobre a interação térmica entre edificações e o solo revela a complexidade e a importância desse tema para o desempenho termoenergético dos edifícios. Desde estudos que investigam a influência direta do contato com o solo na condução de calor e umidade, passando por análises de pontes térmicas e o impacto do isolamento, até modelos tridimensionais de simulação térmica, cada pesquisa contribui para uma compreensão mais profunda desse fenômeno. A pesquisa de Zubarev e Zobnina (2023) destaca novas metodologias para calcular perdas térmicas através de estruturas de piso subterrâneo, introduzindo métodos simplificados e camadas suplementares para melhorar a precisão dos cálculos de fluxo de calor. Pesquisas específicas, como as realizadas por Risberg e Risberg (2020) e Arce e Hwang (2020), destacam a eficácia do isolamento em diferentes tipos de fundação, enquanto estudos de Nagy (2015) e Spiga e Vocale (2014) enfatizam a importância da geometria do piso e dos fatores de correção no coeficiente de transferência de calor. Além disso, investigações sobre edifícios subterrâneos e não residenciais, como os trabalhos de Yu *et al.* (2020) e Soares *et al.* (2024), ampliam o escopo das análises, reforçando a necessidade de abordagens personalizadas e avançadas de modelagem para otimizar o desempenho térmico das edificações. Em conjunto, esses estudos fornecem um quadro abrangente e detalhado das estratégias e metodologias necessárias para minimizar as perdas de calor e maximizar a eficiência energética, sublinhando a interdependência crítica entre a edificação e o solo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são apresentados os principais conceitos que norteiam o tema, abordando desde conceitos como arquitetura bioclimática e estratégias de condicionamento passivo aos principais tópicos a respeito do solo, sua composição, propriedades e regime térmico. Por fim, serão apresentadas informações sobre simulação computacional, métodos de modelagem dos mecanismos de transferência de calor com o solo e normas brasileiras.

3.1 ARQUITETURA E CLIMA - REVISAR

Abrigo sempre foi uma necessidade do homem desde os tempos primitivos. A noção de abrigo é descrita por Zmitrowicz (2001) como “parte de uma estratégia para a manutenção de ambientes diferenciados, adaptados às exigências dos organismos e às atividades por eles desenvolvidas”. Muito antes do aparecimento de primitivas organizações no planeta, os animais popularam grandes sociedades e ainda hoje constroem abrigos para as suas comunidades (ZMITROWICZ, 2001). Os tipos de construção variam entre espécies e são criados conforme sua escala, suas habilidades, seus conhecimentos e cultura.

Comparando a flexibilidade física e a capacidade de adaptação fisiológica do homem com a dos animais, os quais possuem defesas naturais contra uma ampla faixa de desconforto climático, diz-se que estes aspectos humanos são relativamente fracos (OLGYAY, 1998). Desta maneira, a construção de abrigos é essencial para a sobrevivência do ser humano.

Os abrigos devem manter determinadas faixas de temperatura, de pressão, de umidade, de composição do ar. Devem proteger de radiações, vibrações, impactos, permitindo, ainda, a segregação de outros seres vivos que procuram os mesmos espaços para habitar (ZMITROWICZ, 2001).

Para o bom cumprimento dessas funções do abrigo, são tidas como premissa a localização, o meio local, as variações climáticas, os tipos de materiais, a quantidade de indivíduos e as atividades exercidas por eles. Nas construções humanas em particular, além destes, a manutenção do microclima é um dos objetivos da manipulação dos espaços (ZMITROWICZ, 2001). Logo, a adaptação climática se faz presente desde a concepção de estruturas arquitetônicas menos complexas.

Ao longo da história, com as transformações sociais e culturais, estratégias foram sendo desenvolvidas e novas soluções foram descobertas. O homem deixou de construir “apenas” abrigos para sobrevivência e passou a desenvolver espaços mais elaborados, dotados de outros significados. Se identifica a premissa da adaptação climática na arquitetura desde Vitruvius, o qual afirma em “De Arquitetura” (1999, p.143):

Parece, com efeito, que convém levantar as várias tipologias de edifícios de uma maneira no Egito, de outra na Espanha, não da mesma maneira no Ponto, diversamente em Roma, como acontece com as diferentes propriedades das terras e das regiões, porque numa parte a Terra se encontra sob a pressão do curso do Sol, em outra se afasta dele, e fica temperada no meio.

No entanto, à medida em que as construções foram se desenvolvendo, alguns aspectos também perderam relevância. De acordo com Corbella (2009), após a segunda Guerra Mundial, com a expansão de técnicas construtivas e com barateamento do combustível, o arquiteto foi perdendo atribuições para a tecnologia dos engenheiros. Assim o conforto térmico do usuário foi aos poucos desconsiderado, sendo essa tarefa agora exclusiva de engenheiros térmicos, bem como a iluminação natural que fora substituída pela artificial e delegada ao engenheiro eletricista (CORBELLA, 2009).

Segundo Maciel (2006), a única maneira de manipular o microclima dentro das edificações até o século XX era através de estratégias passivas. Contudo, com a introdução de equipamentos artificiais de condicionamento e sistemas artificiais de iluminação, tais tecnologias começaram a ser empregadas de forma indiscriminada, gerando dependência destas.

Apesar do incremento, o elevado consumo de energia não foi tido como relevante uma vez que, neste contexto, seu custo era considerado irrisório e ainda não havia grandes discussões sobre poluição ou sustentabilidade. Este cenário sofreu mudanças após a primeira crise de energia, decorrente do aumento do preço do petróleo no ano de 1973, estimulando as origens do movimento da arquitetura solar. Este movimento se fundamentou na preocupação em incorporar aos edifícios energia solar, com o objetivo de poupar o uso de energia, auxiliando na calefação. E a partir deste, a preocupação da adaptação climática foi retomando importância na arquitetura (CORBELLA, 2009).

Neste contexto, evidencia-se a busca pela integração do projeto de arquitetura às questões ambientais, para assim minimizar o consumo energético pelo uso de equipamentos de condicionamento e iluminação artificial e promover conforto aos usuários. Logo, o estudo do clima, torna-se imprescindível para a construção de espaços adaptados e eficientes. Desta maneira, apresenta-se a bioclimatologia.

De acordo com Fernandes (2020), o termo bioclima foi empregado originalmente por Wladimir Peter Köppen, climatólogo que se inspirou a partir de dois

trabalhos: o artigo “As zonas de temperatura da Terra” (SUPAN, 1879) e o estudo de geografia vegetal global publicado na revista Petermanns Geographische Mitteilungen (GRISEBACH, 1866 e DRUDE, 1884), para lançar seu sistema de classificação climática, correlacionando os estudos entre clima e vegetação. A bioclimatologia, de acordo com Munn (1987) relaciona os estudos da climatologia (clima) com os organismos vivos.

Segundo Widera (2015), a primeira regra da arquitetura bioclimática é tirar vantagem das condições bioclimáticas locais para benefício do ambiente construído.

O objetivo do projeto de arquitetura bioclimática é prover um ambiente construído com conforto físico, sadio e agradável, adaptado ao clima local, que minimize o consumo de energia convencional e precise da instalação da menor potência elétrica possível, o que também leva à mínima produção de poluição (CORBELLÀ, 2009, p. 39)

De uma maneira geral, a concepção da arquitetura bioclimática está relacionada especificamente com a compreensão das características climáticas locais e a aplicação de estratégias passivas para atender as necessidades biológicas humanas.

Apesar da relevância de diretrizes bioclimáticas, identifica-se por muitas vezes a não consideração destas na concepção do projeto arquitetônico. Em estudo feito por Chvatal, Labaki e Kowaltowski (1998), foram aplicados formulários a 169 profissionais, dentre eles projetistas de escritórios de arquitetura e construtoras e profissionais autônomos, com o intuito, de acordo com os próprios autores, de “avaliar o uso frequente de ferramentas ou auxiliares de projeto, o interesse e a importância dados ao conforto térmico, bem como obter informações mais detalhadas sobre a análise da insolação e da ventilação”. Os resultados dessa pesquisa mostraram que ao classificar 9 itens por nível de importância, dentre eles: conforto acústico, facilidade de manutenção, funcionalidade, economia de energia, relação estética da obra com o seu entorno imediato, harmonia/equilíbrio na forma, iluminação natural, beleza, expressão arquitetônica e conforto térmico natural para o conforto térmico natural, 64% dos entrevistados consideraram o conforto térmico natural entre os 04 primeiros. Em relação a análise do terreno a consideração principal votada foi a topografia (84%), as outras opções eram orientação-sol (iluminação e conforto térmico) e orientação em relação ao vento, tendo essa última consideração apenas de 10% dos entrevistados. Considerando a escolha de materiais, de acordo com os autores, observa-se que para

as casas de médio e alto padrão, os profissionais comumente aplicam melhores materiais do ponto de vista do conforto térmico e ainda acrescentam isolantes térmicos. De forma geral, a pesquisa mostrou que os profissionais em suas escolhas não consideraram instrumentos e/ou ferramentas relacionados ao conforto térmico, ao invés disso basearam-se em “regras práticas”.

Em outra pesquisa, Cardoso (2002), avaliou 15 profissionais que atuam com projeto arquitetônico, dentre eles arquitetos e engenheiros civis e constatou que apenas 20% dos profissionais tiveram na formação acadêmica disciplinas como conforto térmico e nenhum deles realizava a seleção de condicionantes ou avaliação térmica ou lumínica na fase de projeto. De acordo com esse estudo, 60% dos profissionais entrevistados consideram a maior preocupação na fase de anteprojeto a funcionalidade da planta e bom fluxo dos espaços criados, enquanto o item menos importante considerado foi a escolha de materiais a serem empregados nos acabamentos interna e externamente. De acordo com Maciel (2002), conceitos científicos, uso de cartas e diagramas aos quais se apoiam as diretrizes bioclimáticas não são métodos indicados como relevantes na fase inicial de projeto.

Estas pesquisas demonstram o quão o tema é relegado na prática profissional e que é necessário a disseminação de estudos para contribuir para esta aproximação.

3.2 ESTRATÉGIAS PARA CONDICIONAMENTO TÉRMICO PASSIVO

Segundo Givoni (1997) muitos recursos de design arquitetônico influenciam o clima interno das edificações. Aspectos como a forma geral do edifício, a profundidade e a altura dos cômodos e o tamanho e orientação das janelas, são diretrizes projetuais que fazem parte das decisões para concepção da arquitetura bioclimática e elevam o potencial de conservação de energia e conforto térmico nas edificações.

Existem inúmeras ferramentas para se obter diretrizes de projeto bioclimáticos, as Tabelas de Mahoney, Carta Bioclimática de Olgyay, nomograma de Temperatura Efetiva de Yaglow e Houghten, nomograma do Índice Equatorial de Webb etc.

No Brasil, no que se refere as ferramentas de apoio ao processo de projeto, adequou-se a carta bioclimática da edificação (GIVONI, 1992) para o contexto local (BOGO, A. *et al.*, 1994) a fim de realizar o zoneamento bioclimático do território nacional (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT/CB-55,

2005) e apresentar diretrizes projetuais. Originalmente, o zoneamento e as diretrizes projetuais foram propostos apenas para orientar projetos de habitações unifamiliares de interesse social. No entanto, desde o início, por preencherem uma lacuna evidente, tanto o zoneamento quanto as diretrizes projetuais adquiriram aplicações mais amplas, tanto no processo de formação de projetistas quanto na prática profissional destes posteriormente.

Algumas estratégias bioclimáticas para se obter as condições de bem-estar térmico mais comuns são a utilização da massa térmica do edifício, o esfriamento evaporativo, a correta utilização da ventilação, além do aquecimento e resfriamento passivo. Embora essas estratégias sejam amplamente discutidas na literatura, poucas abordagens exploram o uso do contato com o solo como uma estratégia bioclimática.

Em conclusão, o estudo da influência do contato com o solo no desempenho térmico de edificações destaca a importância de uma abordagem integrada no design arquitetônico para alcançar eficiência energética e conforto térmico. As diretrizes projetuais baseadas em parâmetros bioclimáticos específicos fornecem uma base sólida para otimizar o desempenho térmico das construções, garantindo ambientes internos mais confortáveis e sustentáveis.

Introduzir os diagramas antropoclimáticos, mas dizer que serão descritos com precisão dentro de materiais e métodos.

3.3 O SOLO

Para analisar a influência do contato com o solo como estratégia bioclimática faz-se necessária a compreensão das características físicas do solo propriamente dito. À vista disso, neste item serão descritas as características do solo, propriedades térmicas, mecanismos de transferência de calor e influência de suas características em seu regime térmico.

3.3.1 Composição

O termo solo, quando usado por engenheiros, refere-se a um complexo material que consiste em partículas sólidas de várias composições, minerais ou orgânicas, onde vários formatos e tamanhos são aleatoriamente arranjados com espaços porosos entre eles. Esses espaços porosos contêm ar e geralmente água em

seus diversos estados, como gasoso, líquido e sólido. Além disso, a água presente pode conter sais minerais e íons (FAROUKI, 1981).

Em outras palavras, de acordo com Costa (2017) o solo é composto por três frações físicas, os sólidos, os líquidos e os gases. Os sólidos compõem a matriz do solo; os líquidos - água com sais minerais e substâncias orgânicas já dissolvidas – compõem a fração da solução do solo; já a fração gasosa é similar à da atmosfera, no entanto com menos oxigênio (O_2) e mais gás carbônico (CO_2).

De acordo com Calado (2016), as partículas sólidas que compõem o solo, onde imperam os minerais, são resultado da ação de variados agentes externos, como temperatura, vegetação, vento e água. Esses agentes atuam nos processos físicos e químicos que culminam no tamanho, forma física e composição mineralógica do solo (CAPUTO, 1988 apud CALADO 2016).

As partículas sólidas minerais do solo, por si só, também são divididas em três frações, as frações texturais, são elas: areia, silte e argila. Essas partículas têm dimensões variáveis, podendo ser vistas a olho nu ou serem coloides (PREVEDELLO e ARMINDO, 2015).

Para realizar a quantificação da distribuição da grandeza das partículas que compõem o solo, é necessário comumente recorrer a uma análise granulométrica. Esta análise gera resultado gráfico originando uma curva granulométrica, a qual apresenta em percentagem as dimensões das partículas presentes em uma amostra de solo estabelecida (SILVA, 2013 apud CALADO 2016).

No que diz respeito a fração líquida, segundo Rees *et al.* (2000) apud Calado (2016), a presença de água no solo contribui significativamente na transmissão de calor entre partículas sólidas. Os solos que possuem conteúdo de água mais elevado apresentam maior capacidade de armazenamento de energia térmica. De acordo com Prevedello e Armindo (2015) isoladamente, a fase líquida caracteriza a umidade do solo e pode estar presente completa ou parcialmente no solo. Quando há presença completa no solo, este é dito como um solo saturado de água, onde todos os poros do sistema poroso estarão preenchidos por água. Já quando a presença é parcial os poros do sistema poroso é ocupado tanto pela fase líquida como pela fase sólida.

Por fim em relação a fração gasosa, atua o grau de compactação do solo, que por sua vez leva à diminuição do volume de ar presente no solo e consequentemente ao aumento da área de contato entre as partículas sólidas (CALADO, 2016). A porção gasosa presente no solo se caracteriza pela porosidade livre de água. Essa

porosidade de aeração do solo contém gases como CO₂, O₂, N₂, NH₂ e vapor de água. Em razão das variações na composição e concentração dos gases do solo por atividades químicas e biológicas, a massa específica da fase gasosa do solo varia entre 1,0kg/m³ e 1,5kg/m³ (PREVEDELLO e ARMINDO, 2015).

3.3.2 Propriedades térmicas do solo

As propriedades térmicas do solo são de grande importância em muitos projetos de engenharia e outras situações em que a transferência de calor ocorre no solo. Também tem relevância em outros campos como agricultura, meteorologia e geologia.

Por sua composição heterogênea, as propriedades térmicas do solo são dependentes de suas características e das proporções das fases que o compõem.

Desta forma, são apresentadas as propriedades térmicas do solo, como a densidade, temperatura do solo, a condutibilidade térmica, difusidade térmica, resistividade térmica e capacidade térmica.

3.3.2.1 Densidade

A densidade do solo é definida por Costa (2017) como “a relação entre a massa de sólidos secos do solo e seu volume total”. A densidade do solo é determinada por sua estrutura, umidade, compactação, manuseio do solo, profundidade dentre outras características (COSTA, 2017). A unidade que expressa essa propriedade é kg/m³ e a sua equação é descrita na Equação 1:

$$\rho = \frac{M_s}{V_s} \quad (1)$$

Onde:

ρ — densidade (kg/m³).

M_s — massa do solo seco (kg).

V_s — volume do solo (m³).

3.3.2.2 Temperatura do solo

A temperatura do solo depende de muitos fatores, como as propriedades estruturais e físicas do solo (capacidade térmica volumétrica, condutividade térmica,

calor latente e umidade), temperatura ambiente e outras variáveis, assim como, as características da superfície do solo (vegetação, orientação da inclinação) (SILVA et al, 2022).

A temperatura de superfície do solo é afetada por complexos processos de convecção e radiação em seu entorno imediato e mais distante, bem como a perda de energia por evaporação e transferência de calor entre a superfície e as camadas mais profundas do solo (SILVA et al, 2022).

Além disso a temperatura do solo, a determinado ponto depende da profundidade abaixo da superfície. Dependendo da profundidade, três zonas de temperatura do solo podem ser distinguidas: a zona de superfície superficial (temperatura da superfície), zona rasa (temperatura subsuperfície) e zona profunda. Na superfície superficial a temperatura é fortemente influenciada pela flutuação diária da temperatura de superfície do solo, dependendo das condições climáticas. Além disso, outros fatores meteorológicos como vento e chuva podem causar significativas variações locais. Na zona rasa, a temperatura do solo depende de flutuações sazonais e está próxima da temperatura média anual do ar. Na zona profunda, a temperatura do solo permanece quase constante e aumenta muito devagar conforme a profundidade, dependendo do valor local do gradiente geotérmico (SILVA et al, 2022).

3.3.2.3 Calor específico

Também chamado de capacidade térmica mássica, o calor específico do solo (C_p), é definido como a quantidade de energia necessária para aumentar a temperatura em 1°C a temperatura de uma unidade de grama de solo (COSTA, 2017). A unidade da capacidade térmica é expressa em J/(kg.K), e é expressa pela Equação 2.

$$C_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (2)$$

Onde:

C_p – calor específico (J/kg.K)

Q – quantidade de calor (J)

m – massa (kg)

ΔT – variação da temperatura (K)

De acordo com Costa (2017) por ser um sistema multicomponente, o calor específico do solo consiste na somatória do calor específico das frações que o compõem, a fração sólida, líquida e gasosa. A fração líquida influencia significativamente no aumento do calor específico por sua oscilação, incrementando a umidade. Além disso, a umidade reflete no calor específico dependendo do tipo de solo.

Em termos gravimétricos, a soma dos calores específicos de suas fases constituintes é dada pela Equação 3:

$$c_{g(solo)} = c_{gm}f_{gm} + c_{go}f_{go} + c_{gag}f_{gag} + c_{gar}f_{gar} \quad (3)$$

Onde:

$c_{g(solo)}$ – calor específico gravimétrico do solo expresso por J/(kg K).

$c_{gm}, c_{go}, c_{gag}, c_{gar}$ – calores específicos gravimétricos das frações mineral, orgânica, da água e do ar do solo expresso por K/(kg K).

$f_{gm}, f_{go}, f_{gag}, f_{gar}$ – frações gravimétricas da matéria mineral, orgânica, da água e do ar do solo, kg/kg.

Com base no volume, a unidade passa a ser J/(m³ K) e a equação transforma-se na Equação 4:

$$c_{v(solo)} = c_{gm}f_{vm}p_{pm} + c_{go}f_{vo}p_{po} + c_{gag}f_{vag}p_{pag} + c_{gar}f_{var}p_{par} \quad (4)$$

Onde:

$c_{v(solo)}$ – calor específico volumétrico do solo expresso por J/(m³ K).

$p_{gm}, p_{go}, p_{gag}, p_{gar}$ – massas específicas das partículas minerais, orgânicas, da água e do ar do solo, kg/m³.

$f_{vm}, f_{vo}, f_{vag}, f_{var}$ – frações volumétricas das partículas minerais, orgânicas, da água e do ar solo, m³/m³.

Prevedello e Armindo (2015) citado por Costa (2017) afirmam que o calor específico do solo exprime a capacidade de operar como um reservatório de calor.

Na TABELA 1 são apresentados valores típicos aproximados de c_g e p_p das frações constituintes do solo.

TABELA 1 – VALORES TÍPICOS APROXIMADOS DOS CALORES ESPECÍFICOS GRAVIMÉTRICOS E DAS MASSAS ESPECÍFICAS DAS FRAÇÕES CONSTITUINTES DO SOLO

Frações	c_g J/(kg K)	p_g kg/m ³
Mineral	712	2650

Frações	c_g J/(kg K)	ρ_g kg/m ³
Orgância	1926	1400
Água	4186	1000
Ar	1005	1,3

FONTE: Prevedello e Armindo (2015).

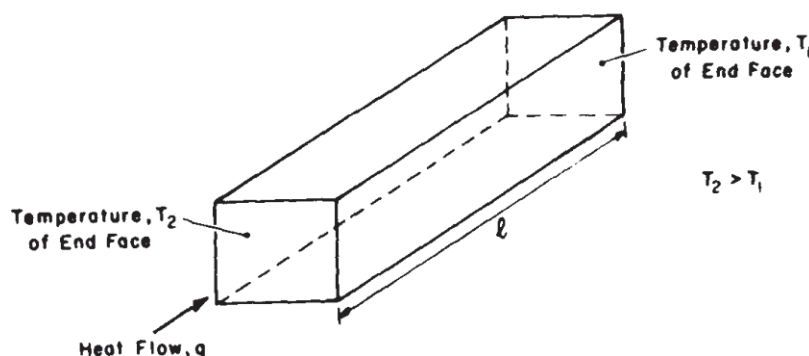
3.3.2.4 Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica ou condutividade térmica, expressa em W/(m.K), representa a capacidade do material conduzir calor. É por definição segundo Costa (2017) “o quociente entre a densidade de fluxo térmico e o gradiente de temperatura”.

Em outros termos, a condutibilidade térmica do solo é definida como a quantia de calor que passa em uma unidade de tempo através de uma unidade de área transversal do solo sob uma unidade de gradiente de temperatura aplicado na direção desse fluxo de calor (FAROUKI, 1981). A condutibilidade térmica é definida por Prevedello e Armindo (2015) como “a quantidade de energia térmica que o solo pode transmitir por segundo a uma distância de 1m, quando a diferença de temperatura nessa distância é de 1K”.

Considerando um elemento prismático de solo assim como demonstrado na FIGURA 7, contendo uma área transversal A perpendicular ao fluxo de calor q, a condutibilidade térmica k é definida através da Equação 5.

FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO CONDUTIBILIDADE TÉRMICA



FONTE: Farouki (1981).

$$k = \frac{q}{A \cdot (\Delta T / l)} \quad (5)$$

Onde:

- q– fluxo de calor (W)
 A– área da seção transversal (m²)
 ΔT – gradiente de temperatura (K)
 l– distância percorrida pelo calor (m)
 k– condutibilidade térmica (W/m.K)

3.3.2.5 Resistividade térmica

De acordo com Singh e Devid (2000) a resistência térmica do solo depende do tipo de solo, da umidade e do tamanho, distribuição e proximidade do empacotamento dos grãos. Segundo os autores a resistividade do solo depende de seu tipo pois é afetada facilmente pelas condições nas quais o solo é formado e sua localização.

A umidade desempenha um importante papel na resistência térmica do solo, uma vez que a condução através do solo é amplamente eletrolítica. Solos secos possuem alta resistividade devido ao ar, ao contrário de solos úmidos, na proporção que se a umidade do solo aumenta, a resistividade diminui devido a presença de água. Sendo assim a umidade é inversamente proporcional a resistividade.

3.3.2.6 Capacidade térmica

A capacidade térmica é de acordo com Calado (2016) “uma das propriedades do solo que controla as variações da sua temperatura, e define a capacidade deste em armazenar energia térmica”. Em outros termos, a capacidade térmica é definida como a quantidade de energia armazenada em um material por unidade de massa por unidade de mudança de temperatura.

A capacidade térmica é calculada através da somatória da capacidade térmica de seus componentes de acordo com sua fração de volume (Rees, *et al.*, 1999). Ao considerar, por exemplo, x_1 , x_2 e x_3 sendo o volume das frações que compõem o solo, fração gasosa, líquida e sólida, respectivamente, a capacidade térmica do solo pode ser expressa a partir da Equação 6:

$$c = x_1 p_1 c_1 + x_2 p_2 c_2 + x_3 p_3 c_3 \quad (6)$$

Onde:

c_1, c_2, c_3 – capacidade térmica das três frações que compõem o solo.

p_1, p_2, p_3 – densidade das frações.

3.3.3 Mecanismos de transferência de calor pelo solo

A transferência de calor dentro de um mesmo meio ou entre dois corpos em contato, ocorre quando existe um gradiente de temperatura, onde a transferência é processada segundo o sentido das temperaturas decrescentes, isto é, o sentido da taxa de calor é da região de temperatura mais elevada para a região de menor temperatura.

Há muito se estuda sobre os mecanismos de transferência de calor pelo solo, pesquisadores como Houghten *et al.* (1942, apud Janssen, 2002), Dill *et al.* (1945 apud Janssen, 2002), Bareither *et al.* (1948 apud Janssen, 2002), Macey (1949 apud Janssen, 2002), realizaram medições de trocas de calor pelo solo.

Segundo Resende (2017) o solo, por ser um material não homogêneo, torna os mecanismos de transporte de calor mais complexos, podendo variar de acordo com os parâmetros considerados, como o tipo de solo por exemplo.

Através de cálculos complexos e investigações analíticas, numéricas e experimentais, são investigados modelos dinâmicos de transferência de calor e dessa forma requerem recursos computacionais para seu estudo (RESENDE, 2017).

De acordo com Rees *et. al* (1999) o transporte de calor em meios porosos pode ser induzido por vários mecanismos. Os mais influentes são condução, convecção e transferência de calor devido a evaporação. No solo o mecanismo de transferência de calor dominante é a condução.

3.3.3.1 Transferência de calor por condução

A transferência de calor por condução é o fenômeno mais importante referente a transmissão de calor através do solo, sobretudo em solos secos, uma vez que as trocas de calor em solos secos ocorrem quase que estritamente por condução (COSTA, 2017).

Condução de calor refere-se ao processo através do qual o calor é transferido de uma região para outra. A condução de calor ocorre em todos os constituintes do solo, seja na fração sólida, como a líquida e gasosa. No ar ou no vapor d'água a condução ocorre por um processo de colisão entre as moléculas que

consequentemente resulta em um aumento na energia cinética à medida que o calor passa para de uma região de maior temperatura para uma região de temperatura menor (FAROUKI, 1981).

Um mecanismo similar é parcialmente responsável pela condução do calor na água líquida, no entanto, a transferência de energia pela quebra e formação de pontes de hidrogênio na água também parecer contribuir para a condução. O comportamento da água líquida assemelha-se aos gases, com seu movimento molecular aleatório (FAROUKI, 1981).

A condução do calor em sólidos é analisada desde 1822 por Fourier, matemático e físico francês associado com as equações de transporte linear utilizadas para descrever a condução de calor. A primeira lei da condução de calor, conhecida como lei de Fourier, afirma que o fluxo de calor em um corpo homogêneo definido pela Equação 7 é na mesma direção e proporcional ao gradiente de temperatura (HILLEL, 1998). O fluxo de calor por unidade área, q_{cond} , gerado por condução é expresso por:

$$q_{cond} = -\lambda \nabla T \quad (7)$$

Onde:

λ – condutividade térmica.

T– temperatura.

∇ – gradiente.

De acordo com Deru e Kirkpatrick (2001) a transferência de calor por condução é dirigida através da condutividade térmica do solo, a qual por sua vez depende principalmente de três fatores: o tipo de solo, a quantidade de umidade do solo e a temperatura do solo.

3.3.4 Regime térmico do solo

O comportamento térmico do solo é compreendido através da caracterização do tipo de solo, bem como sua composição e a definição de suas propriedades térmicas (COSTA, 2017). Em consonância, Baver *et al.* (1973) afirma que o regime térmico do solo compreende o fluxo de calor que o solo recebe, as características do solo e a troca de calor entre o solo e o ar, e é geralmente é expresso em termos de temperatura (BAVER *et al.* 1973).

Segundo Costa (2017) determina-se como regime térmico do solo, o aquecimento da sua superfície devido a radiação solar e o transporte do calor sensível através da condução do calor para o interior do solo.

Por estar em contato com o meio ambiente externo, a superfície do solo, pode, de acordo com Calado (2016), ser considerada como uma superfície ativa, onde sua temperatura é determinada através do balanço entre o calor recebido pela radiação solar diurna; das trocas de calor por condução e convecção com o ar exterior; das perdas de calor tanto por evapotranspiração como as perdas de calor entre a própria superfície e camadas mais profundas.

Diante disso, o que define o regime térmico é o fluxo de calor que é gerado no solo, regulado pela variação de sua temperatura devido a profundidade, tempo e estação do ano (CALADO, 2016).

Definem-se, portanto, dois tipos de ciclos para o regime térmico do solo, o ciclo diário e sazonal. No ciclo diário, o padrão das temperaturas em função do tempo, se plotadas em um gráfico considerando as variações típicas de temperatura do solo em diversas profundidades para um dia típico de verão, assume forma de onda sinusoidal. Através dessa curva, verifica-se que a temperatura do solo, conforme aumenta-se a profundidade, tende a exibir um atraso em comparação às camadas mais próximas da superfície. Verifica-se também que a amplitude térmica diminui a medida em que a profundidade do solo aumenta, isso ocorre em virtude da diferença entre o aquecimento no período diurno e seu arrefecimento no período noturno, isto é, há uma redução na diferença entre a temperatura máxima e a mínima (CALADO, 2016).

No ciclo sazonal, a variação das temperaturas é semelhante ao do ciclo diário, ao mesmo passo que a temperatura em função do tempo apresenta uma forma de onda sinusoidal. Apesar disso, o atraso temporal e a redução da amplitude diante a grandes profundidades se intensifica. Ao longo do ano, a temperatura nas camadas mais profundas, tende a permanecer quase que constante, fato justificado por Bansal e Mathur (2009) apud Calado (2016) pela elevada inércia térmica do solo.

A inércia térmica do solo é de acordo com Spiga et al, (2011) apud Calado (2016) governada tanto por sua condutibilidade térmica como por seu calor específico volumétrico, “os quais, em conjunto, descrevem a capacidade do solo em absorver e armazenar calor nos períodos de aquecimento, assim como a capacidade de dissipá-lo em tempo posterior”.

Em contrapartida, o comportamento térmico do solo, pode ser afetado pelo tipo de cobertura, como vegetação por exemplo, a qual pode diminuir a incidência direta da radiação solar sobre a superfície e consequentemente diminuir a amplitude térmica.

Outro fator que influencia significativamente o comportamento térmico do solo é a latitude a que este se enquadra, uma vez que a radiação disponível é dada exclusivamente pelo clima de determinada região e o ângulo de incidência dos raios solares é definido por sua latitude. De acordo com estudos é possível verificar um aumento gradual da temperatura do solo, em qualquer profundidade, mediante apenas ao aumento da latitude (CALADO, 2016).

3.4 NORMAS BRASILEIRAS DE DESEMPENHO DE EDIFICAÇÕES

A avaliação do desempenho térmico de edificações habitacionais por meio de simulação computacional é regulada no Brasil através da norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2021): Edificações habitacional - Desempenho e da Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R) (INMETRO, 2022).

A NBR 15575 estabelece critérios e requisitos para a avaliação do desempenho térmico de edificações, definindo parâmetros mínimos que devem ser atendidos. Entre esses requisitos, a norma especifica as características que o programa de simulação computacional e o arquivo climático devem possuir. No que se refere ao solo, exige-se que o programa de simulação computacional seja capaz de modelar as trocas de calor entre a edificação e o solo, enquanto o arquivo climático deve fornecer valores mensais da temperatura média do solo, em graus Celsius (°C), ao longo de todo o ano. No entanto, a norma não apresenta diretrizes sobre como modelar a condição do piso em contato com o solo ou situações específicas, como ambientes subterrâneos, deixando essa definição a critério do usuário. Essa lacuna pode comprometer a precisão e a comparabilidade dos resultados obtidos, evidenciando a necessidade de estudos que aprofundem a modelagem desse fator no desempenho térmico das edificações.

O INI-R (INMETRO, 2022) por sua vez incorpora o procedimento de simulação computacional segundo a ABNT NBR 15575-1, resultando novamente na seleção da alternativa conforme critério do usuário.

Este cenário evidencia a necessidade de aperfeiçoamento da norma e a ampliação de critérios e requisitos considerando as condições de contato com o solo no procedimento de simulação, para que desta forma pesquisadores e profissionais da área tenham melhores parâmetros para avaliar e propor melhores soluções para o conforto e desempenho de edificações. Embora a falta de orientações precisas sobre a modelagem representar alvo de crítica, as normativas vigentes ainda representam ferramentas confiáveis para a realização de simulações, avaliações e comparações de resultados.

A introdução de diretrizes claras sobre a modelagem do contato com o solo poderia padronizar as simulações e reduzir a subjetividade nas escolhas dos parâmetros de entrada, resultando em avaliações mais consistentes e comparáveis. Além disso, ao abordar explicitamente a condição do piso em contato com o solo, as normativas poderiam incentivar o desenvolvimento de soluções de design que considerem melhor o comportamento térmico das edificações em diferentes condições de fundação.

Portanto, a ampliação e o detalhamento deste tema de estudo são essenciais para fornecer uma base mais sólida e precisa para a avaliação do desempenho térmico de edificações, promovendo assim construções mais eficientes e confortáveis.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento do trabalho envolve a realização de quatro etapas principais:

a) Definição da inserção da temperatura do solo e procedimentos de simulação: será estabelecido como será modelado a transferência de calor entre a edificação e o solo e os procedimentos necessários para a simulação.

b) Caracterização do objeto de estudo: Esta etapa inclui o desenvolvimento das unidades de análise, a definição da geometria da edificação teste e a seleção dos dados climáticos a serem utilizados.

c) Elaboração do modelo computacional: Nesta fase, será desenvolvido um modelo computacional da edificação utilizando o programa *EnergyPlus*, versão 23.1, com interface do *Rhinoceros* versão 8 e plugin *Pollination*, versão 40.3

d) Análise dos resultados: Finalmente, serão analisados os resultados obtidos das simulações.

Será utilizada uma abordagem numérica para avaliar a influência do solo no desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares naturalmente ventiladas, utilizando o *EnergyPlus*. As análises serão conduzidas por meio das simulações computacionais, considerando diferentes condições de contato entre o piso e o solo. Serão avaliadas variáveis como a temperatura interna dos ambientes, a amplitude térmica diária e a troca de calor entre a edificação e o solo, a fim de compreender o impacto desse fator no desempenho térmico da edificação. Os resultados obtidos permitirão identificar padrões de comportamento térmico e contribuir para a definição de diretrizes que auxiliem no aprimoramento do projeto de edificações em distintas condições climáticas.

4.1 MODELAGEM E PARÂMETROS

4.1.1 Simulação computacional do solo

Dada a relevância e complexidade da investigação da influência do contato com o solo no desempenho de edificações, a modelagem computacional insere-se como uma ferramenta valiosa, utilizada para auxiliar na compreensão dos processos

de transferência de calor entre a edificação e o solo. A ferramenta computacional utilizada na presente pesquisa foi o software *EnergyPlus* versão 23.1.

O programa *EnergyPlus* é um *software* de simulação desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos para modelar o consumo e desempenho de energia em edifícios. De acordo com Crawley *et al.* (1999) o software combina as melhores características e capacidades do *BLAST* e *DOE-2* além de introduzir novas capacidades. Essa ferramenta computacional usa uma abordagem de modelagem de edificações para simular o uso de energia e é capaz de integrar sistemas *HVAC*, envoltória, componentes construtivos, sistemas de iluminação e sistemas de energia renovável, padrões de ocupação, sistemas de ventilação natural e mecânica, entre outros. Também é capaz de simular diferentes climas e condições meteorológicas.

Para tal é necessário dar entrada a uma série de dados e variáveis de inicialização, como as condições ambientais, composição e propriedades termofísicas dos componentes da envoltória do edifício etc.

Em relação a simulação de superfícies em contato com o solo, o processamento e inserção destes dados é mais desafiador, uma vez que o próprio processo térmico do solo é mais complexo. O campo de temperatura do solo é tridimensional e variável no tempo.

As edificações em contato com o solo, de acordo com Mazzaferro *et al.* (2013), podem ser simuladas a partir de três alternativas de objeto dentro do *software*: inserir as temperaturas médias mensais do solo diretamente no objeto *Site:Groundtemperature:BuildingSurface*; utilizar as sub-rotinas do objeto *Ground Domain* ou utilizar o objeto *Detailed Ground Heat Transfer*, o qual segundo os próprios autores possuem resultados mais precisos.

Ao se considerar a terceira alternativa, ainda é preciso optar entre outras duas escolhas: o pré processador *Slab* ou o *Basement*. No pré processador *Slab*, deve-se simular casos em que a edificação possui laje em contato com o solo. Os procedimentos e parâmetros necessários para executar o *Slab* e que se destacam são: “as propriedades dos materiais envolvidos na troca de calor; as propriedades da edificação; o isolamento da laje em contato com o solo; a modelagem de uma laje equivalente a algumas condições de contorno” (MAZZAFERRO *et al.*, 2013). Enquanto no pré processador *Basement*, deve-se simular casos em que a edificação

possui partes enterradas, como garagem ou qualquer outro cômodo subterrâneo. Para determinar as temperaturas do solo, utiliza-se uma formulação em diferenças finitas.

Ambos os pré processadores realizam a simulação da influência que o solo exerce nas temperaturas da edificação e reciprocamente, o que caracteriza, portanto, um processo iterativo. No entanto, a utilização de cada um é definida pelo tipo da edificação.

Na presente pesquisa foi considerado o método *Ground Domain* utilizando o objeto *Site:GroundDomain:Slab* devido a facilidade de manipulação que permite realizar simulações paramétricas de forma mais rápida e mais confiável.

4.1.1.1 *Ground Domain*

O cálculo da transferência de calor das superfícies horizontais da edificação que estão em contato com o solo com objetivo de se obter as temperaturas não perturbadas do solo pode ser realizado através de três métodos distintos: *FiniteDifference*, *KusudaAchenbach* e *Xing*.

O modelo *FiniteDifference* obtém a transferência de calor no solo através da utilização de um modelo em diferenças finitas. A simulação é realizada através da inserção do arquivo climático para obter as condições de contorno da superfície, esta simulação é executada para o período anual até que o perfil da temperatura tenha um comportamento periódico constante. Atingido tal comportamento os valores de temperatura do solo são armazenados e utilizados durante a simulação (RESENDE, 2017).

O modelo *KusudaAchenbach* obtém as temperaturas não perturbadas do solo fundamentado no trabalho de *Kusuda* e *Achenbach* de 1965. Os parâmetros utilizados neste modelo são: temperatura média do solo na superfície, a amplitude da temperatura do solo na superfície e o dia do ano em que a temperatura da superfície alcança o valor mínimo. A partir destes parâmetros o programa define uma correlação para as temperaturas não perturbadas do solo de acordo com a profundidade e tempo (RESENDE, 2017).

O método *Xing* obtém as temperaturas não perturbadas do solo fundamentado no trabalho de *Xing* de 2014. A simulação é realizada através da inserção do arquivo climático para obter as condições de contorno da superfície. *Xing* (2014) desenvolveu uma correlação constituída por cinco parâmetros: média anual da

temperatura do solo na superfície, duas amplitudes da temperatura do solo na superfície e dois ângulos de fase da temperatura (RESENDE, 2017).

Na presente pesquisa, foi utilizado o modelo de temperatura não perturbada do solo por diferenças finitas. Todos os parâmetros que devem ser preenchidos neste objeto são especificados a seguir e os valores adotados na simulação estão contemplados na FIGURA 8FIGURA 20:

- *Soil Thermal Conductivity*: condutividade térmica do solo (W/m.k).
- *Soil Density*: densidade do solo (kg/m³)
- *Soil Specific Heat*: calor específico do solo seco (J/kg.K)
- *Soil Moisture Content Volume Fraction*: corresponde a um valor nominal do teor de umidade do solo a ser usado na avaliação das propriedades térmicas do solo;
- *Soil Moisture Content Volume Fraction at Saturation*: corresponde a um valor nominal da umidade do solo quando o solo é saturado. Este parâmetro é essencial na avaliação das propriedades térmicas do solo congelado;
- *Evapotranspiration Ground Cover Parameter*: este campo numérico especifica os efeitos da cobertura do solo usados no modelo de evapotranspiração para o cálculo do balanço térmico da superfície do solo. Os valores variam de 0 (superfície sólida, não permeável à terra) a 1,5 (crescimento selvagem de vegetação).

FIGURA 8 – SITE:GROUNDTEMPERATUREUNDISTURBED:FINITEDIFFERENCE

Field	Units	Obj1
Name		groundtemp
Soil Thermal Conductivity	W/m-K	1
Soil Density	kg/m3	1250
Soil Specific Heat	J/kg-K	1200
Soil Moisture Content Volume Fraction	percent	30
Soil Moisture Content Volume Fraction at Saturation	percent	50
Evapotranspiration Ground Cover Parameter	dimensionless	0.4

FONTE: EnergyPlus (2025).

4.1.1.2 Ground domain: Slab

Como dito anteriormente, o pré processador *Slab* é método aplicado para lajes sobre o solo com o intuito de simular a transferência de calor em superfícies horizontais de edificações em contato direto com o solo.

O método de cálculo do *Slab* é um método numérico, o qual segundo Costa e Chvatal (2017) é baseado em uma operação de diferenças finitas tridimensional. Este método foi estabelecido através de um estudo 3D realizado por Bahnfleth em 1989 denominado *Three-Dimensional Modelling of Heat Transfer From Slab Floors* que posteriormente foi modificado por Clements (2004). De acordo com Clements (2004) apud Costa (2017) esse pré processador foi desenvolvido com o objetivo de “melhorar as soluções numéricas de transferência de calor com o envelope da edificação de construções com terra acoplada, fornecendo uma solução mais flexível e detalhada do que a maioria de seus contemporâneos”.

A simulação da transferência de calor da laje sobre o solo envolve cálculos que utilizam condições de contorno que englobam todo o “complexo sistema de trocas de calor do modelo: a superfície do solo, o solo profundo, limites de campos distantes e limites internos” (COSTA, 2017).

Para a aplicação deste método é necessário realizar a definição do domínio físico avaliado por um domínio virtual composto por um número finito de células de parâmetros aglomerados. Este domínio virtual é modelado no *EnergyPlus* através de coordenadas cartesianas, sendo seu ponto de origem no centro geométrico da laje do piso da edificação modelada. O funcionamento da variação de temperatura dentro deste método de cálculo é explicado por meio da divisão do domínio em pequenas células, onde assume-se que as propriedades destas células são uniformes e sua variação de temperatura é, portanto, linear. Sobre cada célula é aplicada a equação de condução de calor, expressa pela Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada. Erro! Fonte de referência não encontrada..** Dentro da modelagem é possível modelar o dimensionamento destas células ou considerar a modelagem automática gerada durante a simulação (COSTA, 2017).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

Onde:

ρ – densidade (kg/m³)

C_p – calor específico a pressão constante (J/kg.K)

T – temperatura (°C)

t- tempo (s)

x, y, z- coordenadas cartesianas

k- condutividade térmica (W/m.K)

Além dessas condições, para a modelagem neste sistema deve-se adotar um valor representativo da condutividade térmica efetiva para o domínio considerado, uma vez que este método de cálculo não permite a entrada de diferentes valores para a condutividade térmica do solo. O valor adotado para a condutividade térmica efetiva permite a realização do balanço energético das células e de suas células vizinhas, o que garante a conservação de energia no cálculo (COSTA, 2017).

De forma geral, para simular a transferência de calor com superfícies horizontais de edifícios em contato com o solo com o modo *GroundDomain:Slab*, é implementado um modelo geral de diferença finita (U.S. Department of Energy, 2022). O modelo simula a transferência de calor com as superfícies horizontais do edifício através do domínio do solo, o qual pode simular a transferência de calor para cenários onde a laje está sobre ou sob o solo. Em todos os cenários, o domínio do solo deve interagir com a zona através de um objeto chamado *OtherSideConditionsModel* como condição de contorno externa da superfície horizontal.

Este modelo é generalizado para ser capaz de lidar com uma série de diferentes configurações de laje e isolamento. Como resultado do uso da formulação de diferença finita para resolver as temperaturas do solo, a simulação é estável para todos os intervalos de tempo e tamanho de grade como explicado por Costa (2017), mas um loop de iteração deve ser empregado para convergir as temperaturas no domínio para cada intervalo de tempo (U.S. Department of Energy, 2022).

Múltiplas superfícies horizontais podem ser acopladas a cada objeto de domínio do solo. O modelo determina quais superfícies estão acopladas ao domínio do solo e cria uma superfície de área equivalente dentro de um único domínio como uma representação das superfícies horizontais acopladas. Esta superfície interage com o solo, fornecendo temperaturas atualizadas para os cálculos de balanço de calor.

Na superfície de interface, o fluxo médio de calor por condução de todas as superfícies conectadas ao domínio do solo é usado como condição de contorno no *GroundDomain*. As temperaturas de campo distante (resultado da dispersão da

radiação por um objeto) são aplicadas como temperatura de contorno nas laterais e na superfície inferior do *GroundDomain* (U.S. Department of Energy, 2022).

As células da superfície do solo são tratadas como um balanço de calor, considerando radiação de ondas longas e curtas, condução, convecção e evapotranspiração. A taxa de evapotranspiração é calculada como uma perda de umidade usando o modelo de Allen *et al.* (2005), e traduzida em uma perda de calor ao multiplicar pela densidade e calor latente de evaporação da água. A taxa de evapotranspiração depende do tipo de vegetação na superfície, o usuário pode variar a vegetação entre uma superfície de concreto e uma grama relativamente alta (U.S. Department of Energy, 2022).

Uma vez que o modelo de solo tenha rodado, as células com condições de contorno da superfície da zona atualizarão as temperaturas do *OtherSideConditionsModel*, que serão usadas na próxima etapa dos cálculos de balanço de calor da superfície.

O domínio do solo é atualizado conforme especificado pelo usuário: em cada intervalo de tempo da zona, ou de hora em hora. Para situações em que o domínio do solo é atualizado em cada intervalo de tempo, o domínio é simulado aplicando as condições de contorno de fluxo de calor da superfície do intervalo de tempo anterior e calculando uma nova temperatura do *OthersideConditionsModel*. Neste ponto, os algoritmos de balanço de calor da superfície podem usar as novas temperaturas da superfície externa para atualizar seus fluxos de calor. Se o usuário optou por ter atualizações horárias, o balanço de calor da superfície para cada superfície acoplada é agregado e passado para o domínio como um fluxo de calor superficial médio da hora anterior. Isso atualizará as temperaturas da superfície externa para a próxima iteração do balanço de calor da superfície (U.S. Department of Energy, 2022).

Tanto os cenários subterrâneos quanto os acima do solo são simulados com o objeto *GroundDomain*. A diferença principal é que, para cenários subterrâneos, a laje e o isolamento horizontal são simulados pelo domínio do solo, enquanto, para cenários acima do solo, a laje e o isolamento horizontal devem ser incluídos no objeto de construção do piso.

Todos os parâmetros que devem e foram preenchidos neste objeto são especificados a seguir e os valores adotados na simulação estão contemplados na FIGURA 9FIGURA 21:

- *Name*: espaço usado para identificar cada domínio. Embora seja possível simular múltiplos domínios simultaneamente, cada um deve ter um nome exclusivo. Além disso, os domínios não interagem entre si e são tratados como domínios independentes;
- *Ground Domain Depth*: objeto utilizado para a determinação da profundidade em metros do domínio de simulação. O valor default estabelecido pelo programa é 10 metros;
- *Aspect Ratio*: proporção entre o comprimento do porão e a largura, usado para determinar a relação de aspecto do porão;
- *Perimeter Offset*: objeto utilizado para a determinação da distância em metros considerada entre o perímetro do porão e o perímetro do domínio. O valor default considerado pelo programa é 5 metros.
- *Soil Thermal Conductivity*: condutividade térmica do solo (W/m.K);
- *Soil Density*: densidade do solo (kg/m³);
- *Soil Specific Heat*: calor específico do solo seco (J/kg.K);
- *Soil Moisture Content Volume Fraction*: valor nominal do teor de umidade do solo;
- *Soil Moisture Content Volume Fraction at Saturation*: valor nominal de umidade do solo quando o solo é saturado;
- *Undisturbed Ground Temperature Model Type*: objeto de temperatura do solo não perturbado: *FiniteDifference*, *KusudaAchenbach* ou *Xing*;
- *Undisturbed Ground Temperature Model Name*: nome do objeto de temperatura do solo não perturbado, selecionado no parâmetro *Undisturbed Ground Temperature Model Type*;
- *Evapotranspiration Ground Cover Parameter*: objeto que especifica os efeitos da cobertura do solo. Os valores variam de 0 a 1,5, sendo 0: concreto ou outro sólido, superfície do solo não impermeável; 0,5: grama curta ou gramado bem cuidado; 1: grama de 12 cm e 1,5: vegetação de crescimento selvagem.
- *Slab Boundary Condition Model Name*: nome do outro modelo de condição de contorno lateral usado para a superfície do piso do porão;
- *Slab Location*: este objeto especifica se a laje está alocada sobre o solo ou sob o solo;

- *Slab Material Name*: objeto que especifica o material de lajes do caso sob o solo.
- *Horizontal Insulation*: campo que especifica a presença de isolamento abaixo do piso do porão. Deve-se selecionar "SIM" e "NÃO" na lista de opções.
- *Horizontal Insulation Name*: nome do material isolante. Esse objeto é opcional, somente exigido se houver isolamento;
- *Horizontal Insulation Extents*: objeto que indica se o isolamento horizontal sob o piso se estende para cobrir toda a área horizontal do assoalho do porão ou apenas cobre o perímetro do chão do porão, escolhendo entre as opções "Full" e "Perimeter". Só é necessário preenchê-lo se houver isolamento horizontal;
- *Perimeter Insulation Width*: objeto que indica a largura do isolamento do perímetro medido a partir da borda do piso do porão;
- *Vertical Insulation*: campo que especifica a presença de isolamento vertical. Deve-se selecionar "SIM" e "NÃO" na lista de opções.
- *Vertical Insulation Name*: nome do material que representa o isolamento da laje vertical. Esse parâmetro é opcional e somente é exigido se houver isolamento vertical;
- *Vertical Insulation Depth*: objeto que indica a profundidade, medida em metros, da superfície do solo à qual se estende o isolamento do perímetro vertical;
- *Simulation Timestep*: objeto que indica se o domínio atualizará as temperaturas em cada zona a cada passo de tempo, ou em intervalos horários. As opções incluem "time step" e "hourly";
- *Geometric Mesh Coefficient*: objeto que indica o coeficiente da distribuição geométrica com base no número de células;
- *Mesh Density Parameter*: objeto que indica a densidade das células do modelo de diferenças finitas entre o porão e os limites de campo distante. O valor Default do programa é 4.

FIGURA 9 – SITE:GROUNDDOMAIN:SLAB

Field	Units	Obj1
Name		ground_coupled
Ground Domain Depth	m	10
Aspect Ratio		1
Perimeter Offset	m	5
Soil Thermal Conductivity	W/m-K	1
Soil Density	kg/m3	1250
Soil Specific Heat	J/kg-K	1200
Soil Moisture Content Volume Fraction	percent	30
Soil Moisture Content Volume Fraction at Saturation	percent	50
Undisturbed Ground Temperature Model Type		Site:GroundTemperature:Undisturbed:FiniteDifference
Undisturbed Ground Temperature Model Name		groundtemp
Evapotranspiration Ground Cover Parameter		0.4
Slab Boundary Condition Model Name		ground_coupled
Slab Location		OnGrade
Slab Material Name		
Horizontal Insulation		No
Horizontal Insulation Material Name		
Horizontal Insulation Extents		Full
Perimeter Insulation Width	m	
Vertical Insulation		No
Vertical Insulation Material Name		
Vertical Insulation Depth	m	
Simulation Timestep		Timestep
Geometric Mesh Coefficient		1.6
Mesh Density Parameter		6

FONTE: EnergyPlus (2024).

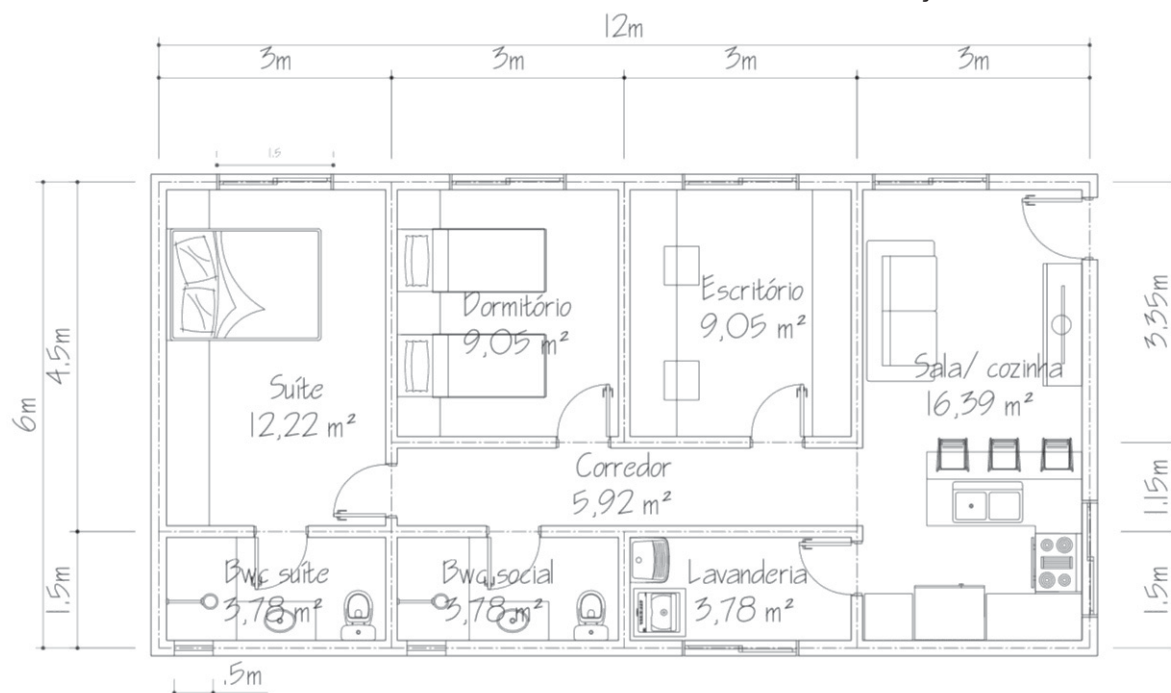
4.1.2 Simulação computacional da superestrutura

Como dito anteriormente, para realizar simulações dentro do *EnergyPlus* é necessário dar entrada a uma série de dados e variáveis de inicialização, os quais são descritas nesta seção.

4.1.2.1 Características do modelo: geometria e modelagem

A unidade de análise da pesquisa foi determinada como uma edificação unifamiliar naturalmente ventilada de pequeno porte para a qual foi gerada um modelo hipotético representativo. A simulação computacional subsidiará estudos utilizando esta unidade permitindo diferentes cenários de contato com o solo e de isolamento térmico com o objetivo de estabelecer recomendações para projetistas em função do clima. A FIGURA 10 apresenta a planta baixa hipotética desenvolvida. A unidade habitacional consiste em uma edificação térrea com 68,4 m² de área total com um quarto, um home office, uma suíte, um banheiro social, lavanderia, sala e cozinha, com dimensões de 6m x 12m x 2,5m. Os dormitórios foram orientados a norte, enquanto a sala foi projetada para orientação leste.

FIGURA 10 – PLANTA TIPO GEOMETRIA DE ANÁLISE – EDIFICAÇÃO TÉRREA



FONTE: A autora (2023).

Em relação à modelagem para simulação computacional, a edificação foi modelada no *software Rhinoceros* como um volume único definido apenas por sua envoltória. No entanto, foi adicionada massa térmica interna a este volume correspondente as divisórias dos ambientes através do *software EnergyPlus*. A massa térmica interna definida dessa forma é utilizada para especificar os componentes construtivos e a área de itens dentro do espaço que são importantes para cálculos de transferência de calor, mas não necessariamente importantes geometricamente. Adotou-se esse procedimento pois o objeto de estudo é hipotético, portanto, a distribuição interna dos ambientes não é um fator relevante, além de facilitar a manipulação das variáveis de entrada e de saída.

Os elementos transparentes foram modelados considerando as áreas de superfície com transparência, bem como a parcela correspondente aos caixilhos. Considerou-se um caixilho de 5cm ao redor das esquadrias das janelas.

O modelo preservou as áreas de superfícies expostas ao exterior, o norte geográfico e a área de piso total dos ambientes da edificação.

Em relação aos cenários estudados, definiu-se que seriam explorados três variáveis de acordo com o QUADRO 1. No cenário 01, a residência foi modelada com uma laje diretamente apoiada sobre o solo. Este modelo foi utilizado para avaliar a influência direta do contato entre o piso e o solo. No cenário 02, a edificação foi elevada em relação ao solo através de um porão, criando uma camada de ar entre o piso da edificação e o piso em contato solo. Este cenário permitirá observar como a ausência de contato direto da edificação com o solo e a presença de uma camada de ar influenciam o desempenho térmico, neste cenário é considerado uma câmara fechada, ou seja, não haverá ventilação neste porão. No cenário 03, a edificação também será elevada em relação ao solo, no entanto, este cenário representa uma edificação sobre pilotis, considerando, portanto, ventilação natural direta abaixo da residência. Este cenário visa entender o impacto da ausência de contato direto com o solo adicionada a presença de ventilação.

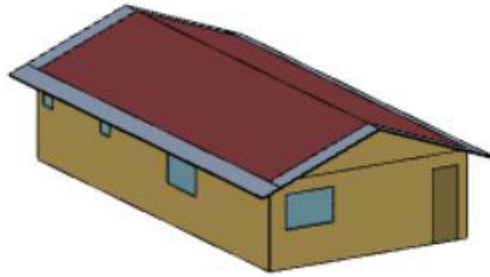
QUADRO 1 – COMPARATIVO CONTATO COM O SOLO

Edificação	Cenário	Contato com o solo
Térrea	1	Edificação com laje apoiada sobre o solo
	2	Edificação com laje elevada do solo com câmara de ar não ventilada (com fechamento do “porão”)
	3	Edificação com laje elevada do solo com câmara de ventilada (sobre pilotis)

FONTE: A autora (2023).

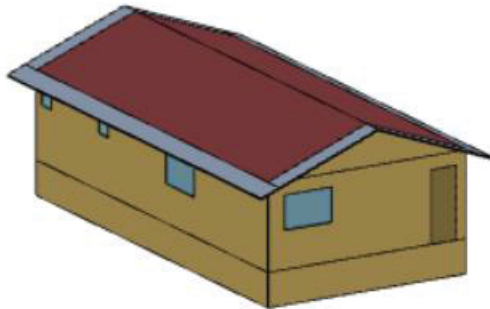
Foram modelados, portanto, três unidades. Os modelos estão representados nas figuras abaixo. O modelo em contato com o solo está na ilustrado na FIGURA 11, o modelo elevado com porão está ilustrado na FIGURA 12 e o modelo elevado sobre pilotis está ilustrado na FIGURA 13.

FIGURA 11 – ILUSTRAÇÃO MODELO EM CONTATO COM O SOLO



FONTE: A autora (2025).

FIGURA 12 – ILUSTRAÇÃO MODELO ELEVADO COM CÂMARA DE AR NÃO VENTILADA



FONTE: A autora (2025).

FIGURA 13 – ILUSTRAÇÃO MODELO ELEVADO COM CÂMARA DE AR VENTILADA



FONTE: A autora (2025).

4.1.2.2 Componentes construtivos

Tendo a pesquisa o objetivo de avaliar o desempenho térmico, incluiu-se na análise diferentes configurações construtivas mantendo os modelos geométricos. Foram realizadas combinações entre materiais comuns empregados na construção civil brasileira, dividindo as tipologias entre totalmente isoladas, não isoladas e parcialmente isoladas, de acordo com a TABELA 2.

TABELA 2 – VALORES TÍPICOS APROXIMADOS DOS CALORES ESPECÍFICOS GRAVIMÉTRICOS E DAS MASSAS ESPECÍFICAS DAS FRAÇÕES CONSTITUINTES DO SOLO

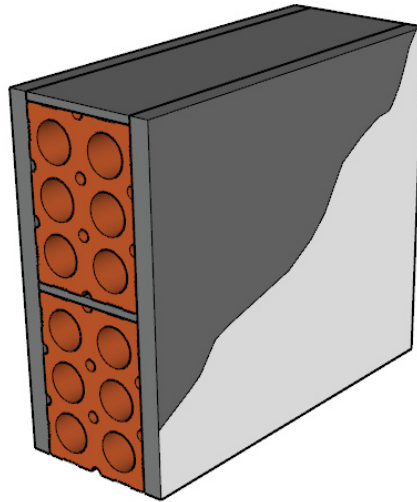
	Parede	Piso
Configuração 1	Sem isolamento	Sem isolamento
Configuração 2	Com isolamento	Sem isolamento
Configuração 3	Sem isolamento	Com isolamento
Configuração 4	Com isolamento	Com isolamento

FONTE: A autora (2025).

Em relação a composição empregada nas paredes, foram introduzidas composições utilizando alvenaria, por se tratar de um dos materiais mais utilizados no cenário da construção civil brasileira. Nos cenários sem isolamento na parede foi considerado composição “a”, descrita abaixo, e nos cenários com isolamento na parede foi considerado a composição “b”.

- a) Composição alvenaria simples: A composição adotada inclui uma camada externa de argamassa de 25 mm, bloco cerâmico de 8 furos 9x19x19 cm e argamassa interna de 25 mm. Para as paredes internas será considerada a mesma composição. A composição está ilustrada na FIGURA 14.

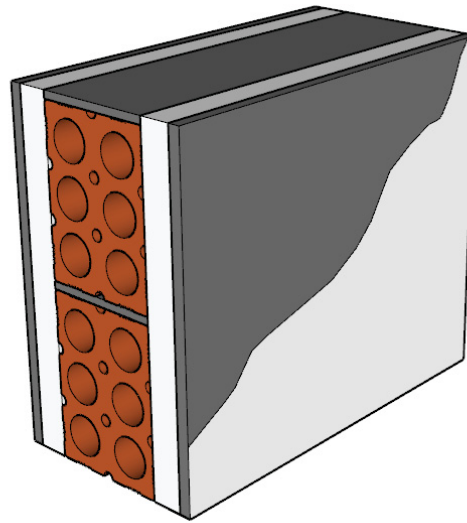
FIGURA 14 – ILUSTRAÇÃO COMPOSIÇÃO ALVENARIA SIMPLES



FONTE: A autora (2024).

- b) Composição alvenaria com isolamento: A composição adotada inclui uma camada externa de argamassa de 25 mm, bloco cerâmico 9x19x19 cm, isolamento térmico de EPS de 80 mm e acabamento interno em gesso acartonado de 20 mm. Para as paredes internas será considerado isolamento em ambos os lados, desta forma a composição interna inclui, acabamento interno em gesso acartonado de 20 mm, isolamento em EPS, bloco cerâmico, outra camada de EPS e acabamento externo em gesso acartonado de 20 mm. A composição está ilustrada na FIGURA 15.

FIGURA 15 – ILUSTRAÇÃO COMPOSIÇÃO ALVENARIA COM ISOLAMENTO

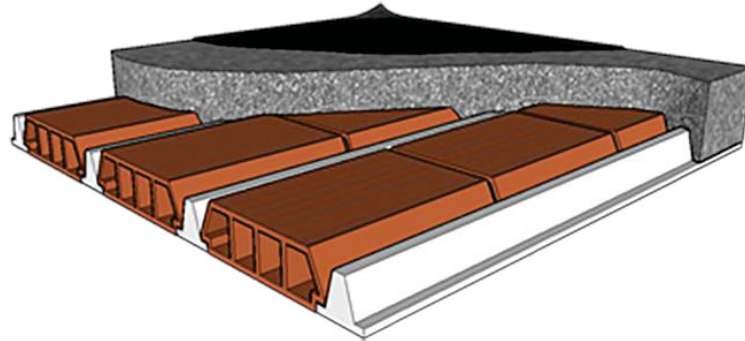


FONTE: A autora (2024).

As composições de piso variaram conforme o tipo de contato com o solo, refletindo as práticas mais comuns para cada sistema, portanto, para a edificação em contato direto com o solo foi considerado laje apoiada sobre o solo e para as elevadas laje pré-moldada. Nos cenários sem isolamento e com a edificação elevada – tanto ventilada quanto não ventilada – foi considerado a composição “a”, enquanto nos cenários com isolamento foi considerado a composição “b”. Já no cenário em contato direto com o solo, sem isolamento no piso foi considerado a composição “c”, detalhada abaixo, e no cenário em contato com o solo com isolamento foi considerado a composição “d”.

- a) Laje pré-moldada comum: Piso elevado com sistema de laje pré-moldada com lajotas de cerâmica de 24x7x20 cm. A composição está ilustrada na FIGURA 16.

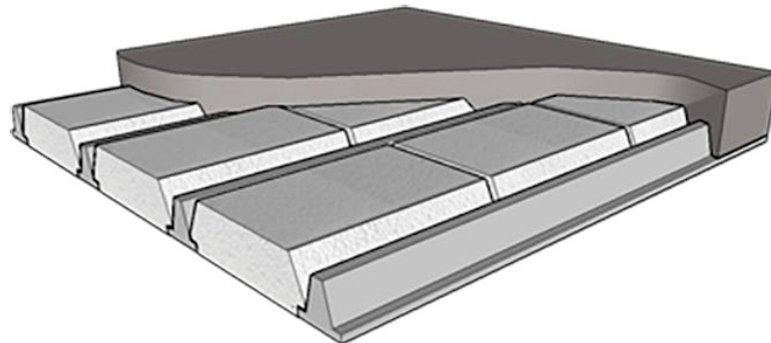
FIGURA 16 – ILUSTRAÇÃO COMPOSIÇÃO LAJE PRÉ-MOLDADA COM LAJOTAS DE CERÂMICA



FONTE: Projeteeee (2024).

- b) Laje pré-moldada isolada: Piso elevado com sistema de laje pré-moldada com lajotas de EPS com 120 mm. A composição está ilustrada na FIGURA 17.

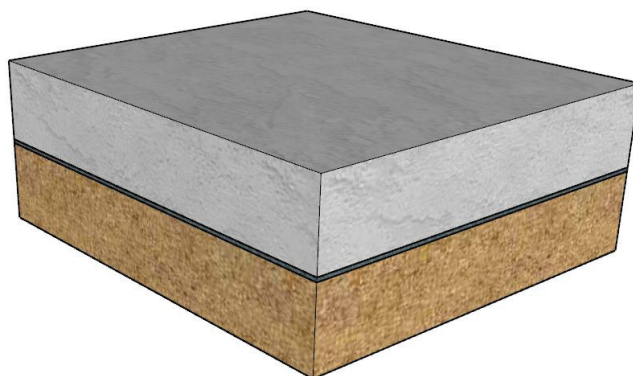
FIGURA 17 – ILUSTRAÇÃO COMPOSIÇÃO LAJE PRÉ-MOLDADA COM LAJOTAS DE EPS



FONTE: Projeteeee (2024).

- c) Laje apoiada sobre o solo sem isolamento: Camada de subleito composta por brita para nivelamento e drenagem de 100 mm, membrana de polietileno para prevenir a entrada de umidade e laje de concreto de 100 mm. A composição está ilustrada na FIGURA 18.

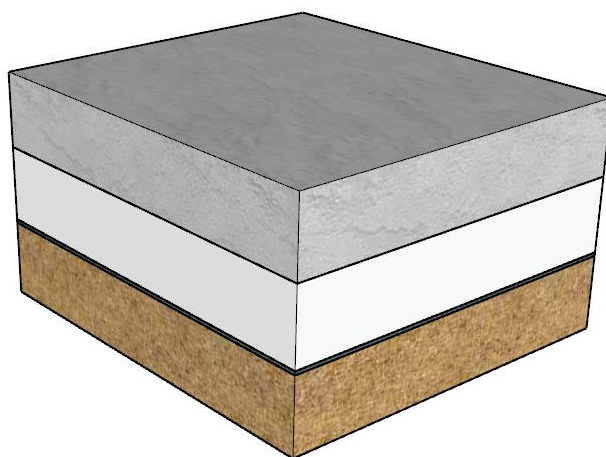
FIGURA 18 – ILUSTRAÇÃO COMPOSIÇÃO LAJE CONVENCIONAL



FONTE: A autora (2024).

- d) Laje apoiada sobre o solo com isolamento: Camada de subleito composta por brita para nivelamento e drenagem de 100 mm, membrana de polietileno para prevenir a entrada de umidade, isolamento térmico de XPS de 100 mm e laje de concreto de 100 mm. A composição está ilustrada na FIGURA 19.

FIGURA 19 – ILUSTRAÇÃO COMPOSIÇÃO LAJE COM ISOLAMENTO



FONTE: A autora (2024).

A cobertura foi padronizada em todos os cenários, assegurando que as variações no desempenho térmico sejam atribuídas principalmente às diferenças no contato com o solo. Foi utilizada telha cerâmica com isolamento térmico de lã de vidro.

Em relação aos vidros foi adotado um vidro simples modelo Guardian Clear com transmitância térmica (U-value) de $5.8 \text{ W/m}^2\text{K}$, transmitância luminosa (VLT) de 91% e fator solar (g-value) de 87%.

As propriedades térmicas de cada material estão definidas na TABELA 3.

TABELA 3 – PROPRIEDADES TÉRMICAS

Material	Espessura (mm)	Propriedades térmicas		
		k (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg.k)
Argamassa	25/10	1,15	2000	1000
Bloco de alvenaria	130	0,9	1600	920
Gesso acartonado	20	0,35	900	870
Impermeabilização (membrana asfáltica)	50	0,2	900	1500
Isolamento XPS	100	0,03	32	1400
Isolamento EPS	80	0,04	3	1400
Lã de vidro	125	0,04	20	840
Laje maciça de concreto/capa de concreto	100	1,7	2200	1000
Tabela cerâmica	12	1,05	2000	920
EPS+concreto	70	0,223	373	1000

FONTE: A autora (2025).

A TABELA 4 apresenta de forma sintetizada os dados de entrada utilizados na modelagem e simulação dos modelos.

TABELA 4 – DADOS DE ENTRADA E VALORES ADOTADOS

Dados de entrada	Valores/referências adotados			
Dados climáticos	INMET			
Transmitância térmica das paredes (W/m ² .K)	Alvenaria sem isolamento		Alvenaria com isolamento	
	Interna/Externa		Interna	Externa
	2,489		0,219	0,41
Transmitância térmica do piso (W/m ² .K)	Edificação apoiada sobre o solo		Edificação elevada	
	Sem isolamento	Com isolamento	Sem isolamento	Com isolamento
	2,762	0,271	2,467	1,971
Transmitância térmica da cobertura (W/m ² .K)	0,547			

FONTE: A autora (2025).

A seguir, é apresentado um quadro comparativo entre diferentes cenários de contato com o solo e as variadas composições da superestrutura (QUADRO 2). No total, foram realizadas 15 simulações para cada cidade para contemplar todos os cenários possíveis.

QUADRO 2 – COMPARATIVO CONTATO COM O SOLO E COMPOSIÇÕES DA SUPERESTRUTURA

Grupo de cenários	Subcenário	Contato com o solo	Composições
1	1.1	Edificação com laje apoiada sobre o solo	Alvenaria convencional + laje concreto convencional
	1.2		Alvenaria com isolamento + laje concreto convencional
	1.3		Alvenaria com isolamento + laje concreto com isolamento
	1.4		Alvenaria convencional + laje concreto com isolamento
2	2.1	Edificação com laje elevado do solo com câmara de ar não ventilada (com porão)	Alvenaria convencional + laje concreto convencional
	2.2		Alvenaria com isolamento + laje concreto convencional
	2.3		Alvenaria com isolamento + laje concreto com isolamento
	2.4		Alvenaria convencional + laje concreto com isolamento
3	3.1	Edificação com laje elevada do solo com câmara de ar ventilada (sobre pilotis)	Alvenaria convencional + laje concreto convencional
	3.2		Alvenaria com isolamento + laje concreto convencional
	3.3		Alvenaria com isolamento + laje concreto com isolamento
	3.4		Alvenaria convencional + laje concreto com isolamento

FONTE: A autora (2025).

4.1.2.3 Cargas internas e schedules

A modelagem da edificação considerou a ocorrência de cargas internas provenientes da ocupação dos usuários bem como o uso de iluminação artificial e equipamentos. Os valores de referência para as cargas internas bem como as agendas foram provenientes da norma brasileira de desempenho de edificações habitacionais, a ABNT NBR 15575. Como a edificação foi modelada a divisão de ambientes, utilizou-se os valores de referência de edificações de uso misto.

PADRÕES DE OCUPAÇÃO

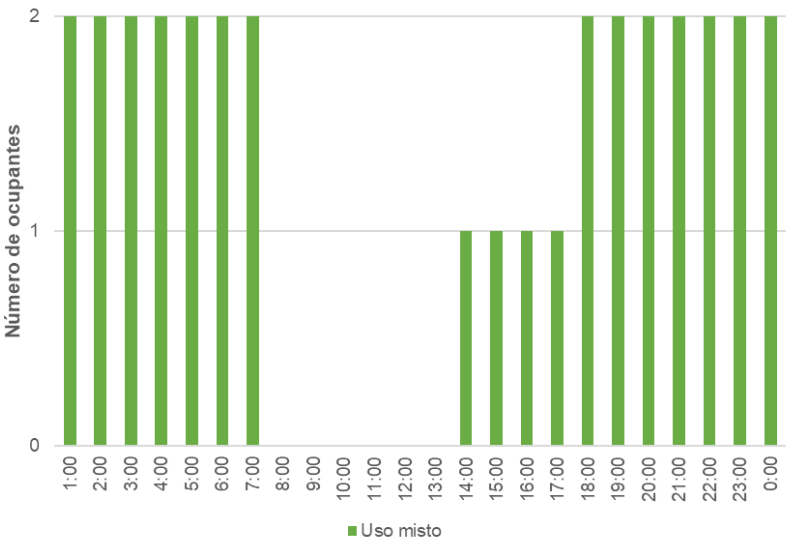
O padrão de ocupação com uso misto, corresponde à união, de acordo com a norma, dentro do mesmo modelo de simulação, dos períodos ocupados em ambientes do tipo sala e do tipo dormitório, considerando duas taxas metabólicas que dependem do horário. Esses valores foram adotados o mesmo para todos os dias do ano, incluindo finais de semana, conforme os valores apresentados na TABELA 5 e FIGURA 20.

TABELA 5 – TAXA METABÓLICA E FRAÇÃO RADIANTE PARA OS USUÁRIOS

Ambiente	Período de uso	Atividade realizada	Calor produzido por área de superfície corporal W/m²	Calor produzido por uma pessoa de 1,80 m² de área de superfície corporal W	Fração radiante
Único – Uso misto	00:00 – 07:59 e 22:00 – 23:59	Dormindo ou descansando	45	81	0,30
	14:00 – 21:59	Sentado ou assistindo TV	60	108	0,30

FONTE: NBR 15575 (ABNT, 2021).

FIGURA 20 – PADRÃO DE OCUPAÇÃO



FONTE: A autora (2025).

A norma define que na condição de uso misto, o valor de ocupação igual a 100% é equivalente a dois ocupantes, à vista disso, a modelagem foi configurada desta forma.

PADRÕES DE ILUMINAÇÃO

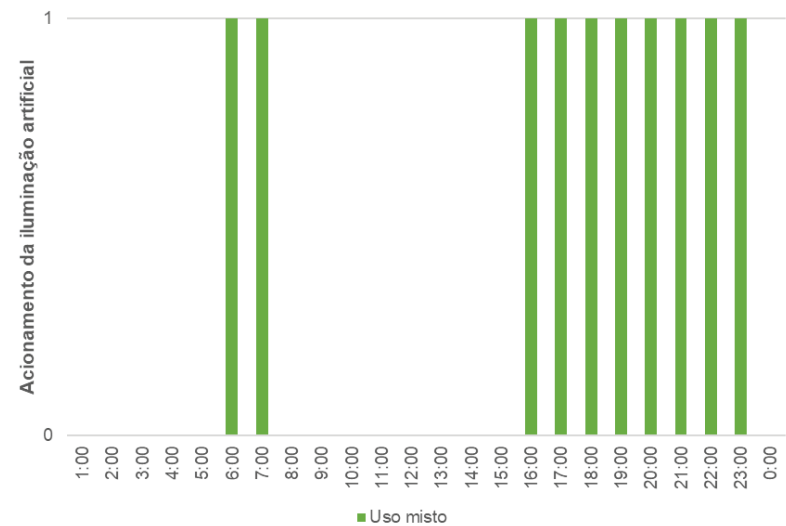
O padrão de uso do sistema de iluminação artificial foi o mesmo para todos os dias do ano, incluindo finais de semana, conforme os valores estipulados na norma, considerando a edificação de uso misto, de acordo com a FIGURA 21. O valor de densidade de potência instalada de iluminação (DPI) e os valores de fração radiante e visível também estão de acordo com a norma, conforme apresentados na TABELA 6.

TABELA 6 – DENSIDADE DE POTÊNCIA INSTALADA, FRAÇÃO RADIANTE E FRAÇÃO VISÍVEL PARA O SISTEMA DE ILUMINAÇÃO

Ambiente	DPI W/m²	Fração radiante	Fração visível
Único – Uso misto	5,00	0,32	0,23

FONTE: NBR 15575 (ABNT, 2021).

FIGURA 21 – PADRÃO DE ILUMINAÇÃO NOS DIAS DE SEMANA



FONTE: A autora (2025).

EQUIPAMENTOS

Os valores de densidade de cargas internas e da fração radiante constantes na norma são apresentados na TABELA 7. Da mesma forma, o padrão de uso de equipamentos deve ser considerado para todos os dias do ano, incluindo finais de semana.

TABELA 7 – PERÍODO DE USO, DENSIDADE DE CARGAS INTERNAS E FRAÇÃO RADIANTE PARA EQUIPAMENTOS DA SALA

Ambiente	Período de uso	Potência W	Fração radiante
Único – Uso misto	14:00 – 21:59	120	0,30

FONTE: NBR 15575 (ABNT, 2021).

PADRÃO DE VENTILAÇÃO

Os modelos da presente pesquisa referem-se a edificações residenciais passivas naturalmente ventiladas, porém a ventilação é um fator que depende completamente da operação do usuário, sendo esse um dos fatores de maior influência e de controle dentro da operação de um edifício, desta maneira, para a simulação foi adotado uma taxa fixa de 1 renovação de ar por hora por infiltração, sem ventilação natural ou mecânica.

4.1.3 Dados climáticos

Na presente pesquisa todas as análises para avaliar a influência do solo no desempenho térmico dos modelos simulados foram realizadas para as Zonas Bioclimáticas presentes no estado do Paraná, são elas as Zonas 1, 2 e 3. Para a análise são escolhidas cidades com climas representativos para cada uma das zonas. Foram selecionadas algumas cidades as quais possuem classificação dentro das zonas bioclimáticas de acordo com a norma NBR 15220-3 conforme demonstrado na TABELA 8.

TABELA 8 – CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA NBR 15220-3

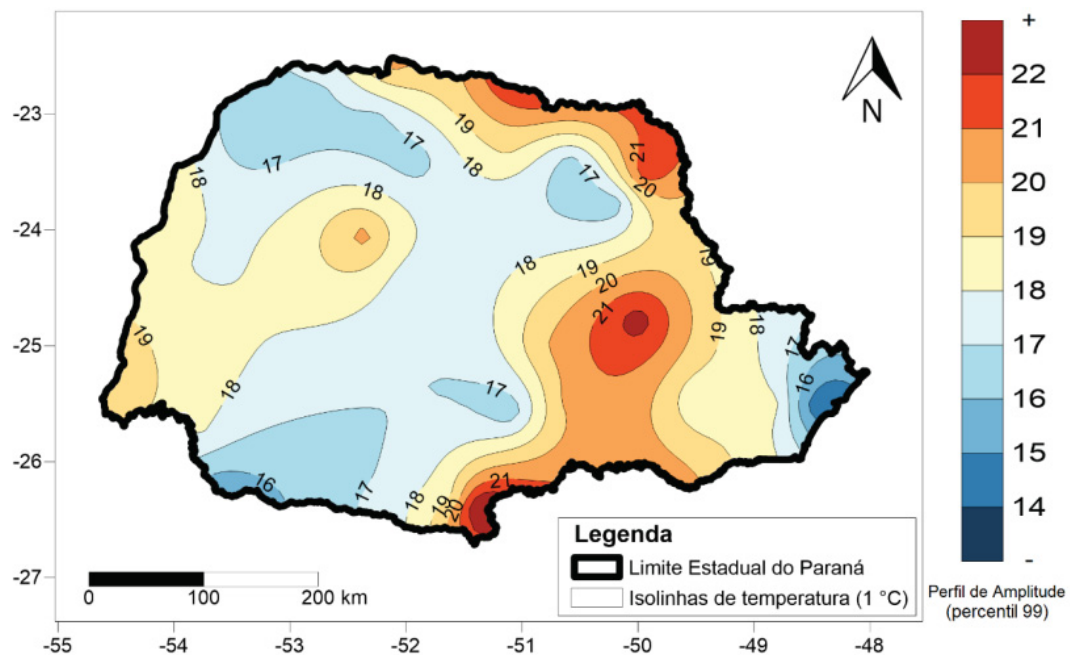
Cidade	Zona Bioclimática	Latitude	Longitude
Castro	1	-24.792	-50.0117

Cidade	Zona Bioclimática	Latitude	Longitude
Curitiba	1	-25.4284	-49.2733
Guarapuava	1	-25.3833	-51.4500
Maringá	1	-23.4273	-51.9370
Palmas	1	-26.4842	-51.9914
Ivaí	2	-25.0072	-50.8606
Jaguariaíva	2	-24.2362	-49.7066
Ponta Grossa	2	-25.0994	-50.1583
Rio Negro	2	-26.1058	-49.7978
Campo Mourão	3	-24.0458	-52.3828
Foz do Iguaçu	3	-25.5469	-54.5882
Guaíra	3	-20.3183	-48.3106
Jacarezinho	3	-23.1608	-49.9689
Londrina	3	-23.3100	-51,1628
Paranaguá	3	-25.5208	-48.5094

FONTE: ABNT (2013)

O critério utilizado para a seleção dos climas representativos envolveu a escolha de um município em cada zona bioclimática presente no Estado do Paraná, desde que esse município se enquadrasse nos perfis climáticos definidos no estudo de Kramel (2021), conforme ilustrado na FIGURA 22 e FIGURA 23, e apresentassem características distintas. Esse critério foi adotado porque, além de facilitar trabalhos futuros que combinem diferentes estratégias e diretrizes para o desenvolvimento de habitações passivas adaptadas a diversas condições climáticas, ele também fomenta pesquisas complementares nesse campo, contribuindo para o avanço do conhecimento na área de conforto térmico e eficiência energética.

FIGURA 22 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS AMPLITUDES TÉRMICAS DIÁRIAS NO PERCENTIL 99



FONTE: Camila Kramel (2021).

FIGURA 23 – MUNICÍPIOS CLASSIFICADOS NOS PERFIS CLIMÁTICOS DELIMITADOS POR KRAMEL

PERFIL	MUNICÍPIOS
Perfil 1	Ilha do Mel
Perfil 2	Paranaguá
Perfil 3	-
Perfil 4	Maringá, Paranavaí, Pato Branco, Nova Fátima, Palotina, Terra Rica, Ibaiti, Icaraíma e Inácio Martins.
Perfil 5	Lapa, Clevelândia, Diamante do Norte, Iretama e Morretes.
Perfil 6	Curitiba, Palmas e Planalto.
Perfil 7	Campo Mourão, Ivaí, Londrina, Foz do Iguaçu e Mal. Cândido Rondon.
Perfil 8	Irati e Paranapoema.
Perfil 9	Joaquim Távora.
Perfil 10	Castro e General Carneiro.

FONTE: Camila Kramel (2021).

A partir dos critérios estabelecidos foram selecionados para a simulação as cidades de Curitiba, Campo Mourão, Ivaí e Paranaguá. Os dados climáticos das cidades selecionadas foram fornecidos pelo INMET e estão disponíveis na plataforma online “*Climate.OneBuilding*”.

A TABELA 9 mostra a seleção final entre os municípios paranaenses de acordo com os critérios estabelecidos.

TABELA 9 – MUNICÍPIOS PARANAENSES SELECIONADOS

Municípios selecionados	Zona Bioclimática	Perfil de amplitude térmica	Percentil 99
Curitiba	1	6	18,70
Ivaí	2	7	19,80
Campo Mourão	3	7	20,40
Paranaguá	3	2	14,72

FONTE: A autora (2024).

4.1.4 Dados de saída

Com o objetivo de analisar como o contato com o solo influencia na temperatura interna da edificação, foram solicitados como dados de saída as temperaturas operativas máximas e mínimas, o percentual de horas de ocupação dentro, abaixo e acima da faixa de conforto térmico para cada cenário e as temperaturas operativas médias. Esses dados permitiram avaliar a eficácia de diferentes configurações de contato com o solo e estratégias de isolamento no controle das variações térmicas internas, contribuindo para a identificação das melhores práticas de construção que proporcionam conforto térmico nas diversas condições climáticas das cidades analisadas.

4.2 ANÁLISE DOS DADOS

Nesta etapa, os dados obtidos na fase anterior foram analisados utilizando uma ferramenta para avaliação de ambientes internos: os diagramas antropoclimáticos (FERNANDES, 2020), considerando a temperatura operativa do ambiente interno.

Além disso, serão realizadas comparações entre os cenários, avaliando a variação térmica interna em função das temperaturas externas, bem como a porcentagem de horas em que as temperaturas internas permanecem dentro, abaixo ou acima da faixa de conforto térmico.

4.2.1 DIAGRAMAS ANTROPOCLIMÁTICOS DE FERNANDES

Os diagramas Antropoclimáticos foram desenvolvidos por Fernandes (2020) como ferramentas de apoio à antropização de microclimas e são chamados de Diagrama Antropoclimático 1 (DA1) e Diagrama Antropoclimático 2 (DA2).

Segundo a descrição de Fernandes (2020), inicia-se com uma edificação hipotética, cujo ambiente interno apresenta amplitudes térmicas diárias (ΔT_d) e a temperaturas do ar (T_a) idênticas àsquelas do ambiente externo. As características desta edificação são:

- Nível de inércia térmica igual a zero;
- Baixa absorção de radiação térmica com revestimentos reflexivos e dispositivos de sombreamento;
- Sem artifícios para aquecimento/resfriamento.

Como dados de entrada, os diagramas exigem as temperaturas externas do ar ($T_{a\text{ ex}}$) e a latitude local. A partir desses dados os diagramas retornam: temperaturas médias diárias ($T_{ae \times m}$); amplitudes térmicas diárias (ΔT_d); temperaturas médias móveis dos últimos 30 dias ($T_{ae \times m \text{ m}}$) e temperaturas operativas neutras ($T_{o \text{ conf}}$).

O Diagrama Antropoclimático 1 (DA1) é estritamente utilizado para analisar os dados do ambiente externo e objetiva determinar o Nível de Inércia Térmica Relativo Recomendado (NITRR) e a estratégia para atingir esse NITRR.

Dentre as estratégias possíveis estão: isolamento capacitivo associado à massa térmica das paredes internas e isolamento capacitivo e resistivo associado à massa térmica das paredes internas.

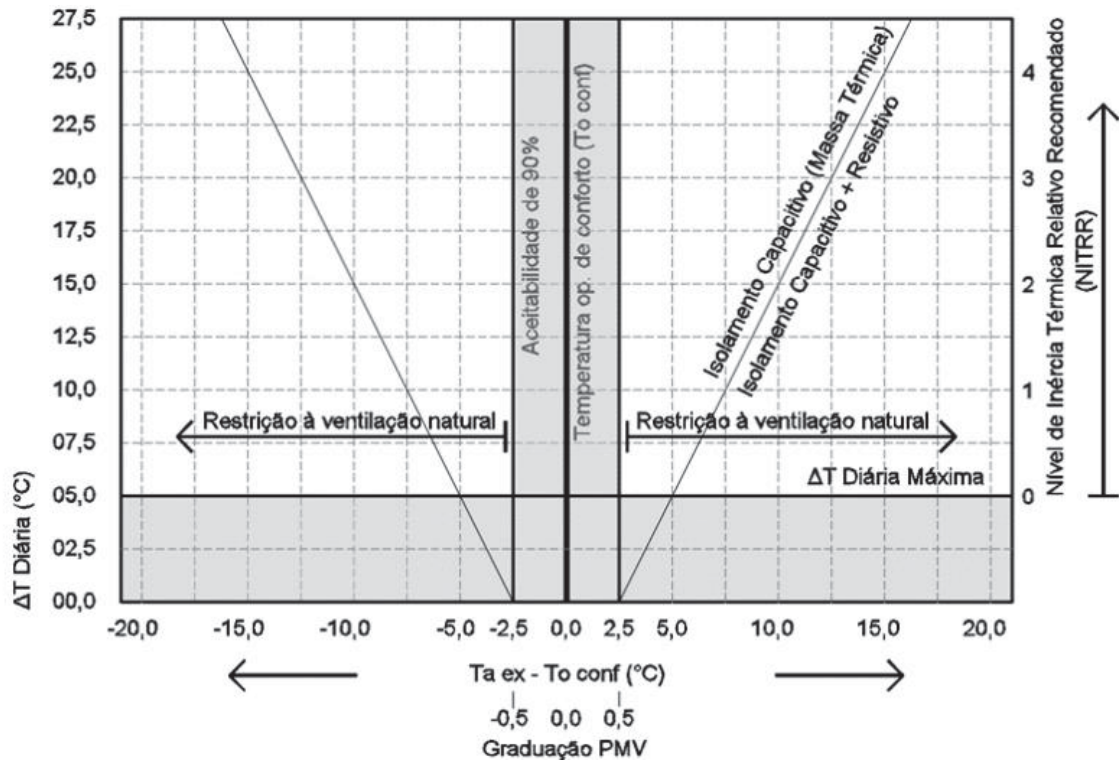
Quanto ao diagrama em si, ilustrado na FIGURA 24, sua estrutura contém um eixo horizontal, indicando as diferenças entre as temperaturas externas e as temperaturas operativas neutras; um semieixo vertical, indicando as amplitudes térmicas diárias; semirretas inclinadas, delimitando uma faixa de indicação de uso de isolamento e massa térmica e um semieixo secundário, indicando o Nível de Inércia Térmica Relativo Recomendado. No ponto zero do eixo horizontal é traçada a semirreta de neutralidade térmica.

Perpendicularmente ao eixo horizontal, no ponto zero é traçada uma semirreta de neutralidade térmica. Dessa semirreta foi traçada a faixa de conforto para 90% de aceitabilidade com variação de $\pm 2,5^\circ\text{C}$. Este eixo específico pode também ser adaptado para eixo de sensação térmica e terá como limites os valores $\pm 0,50$.

A semirreta inclinada é espelhada a partir da base da faixa de conforto, determinando uma faixa em forma de 'V'. Por ser inclinada, a largura da faixa aumenta

conforme aumentam os valores indicados no semieixo das ΔT_d . A região delimitada por essa faixa corresponde à região na qual a $\Delta T_{d\text{ in}}$ pode ser reduzida com isolamento capacitivo e massa térmica interna, além de isolamento resistivo.

FIGURA 24 – ILUSTRAÇÃO DO DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 1



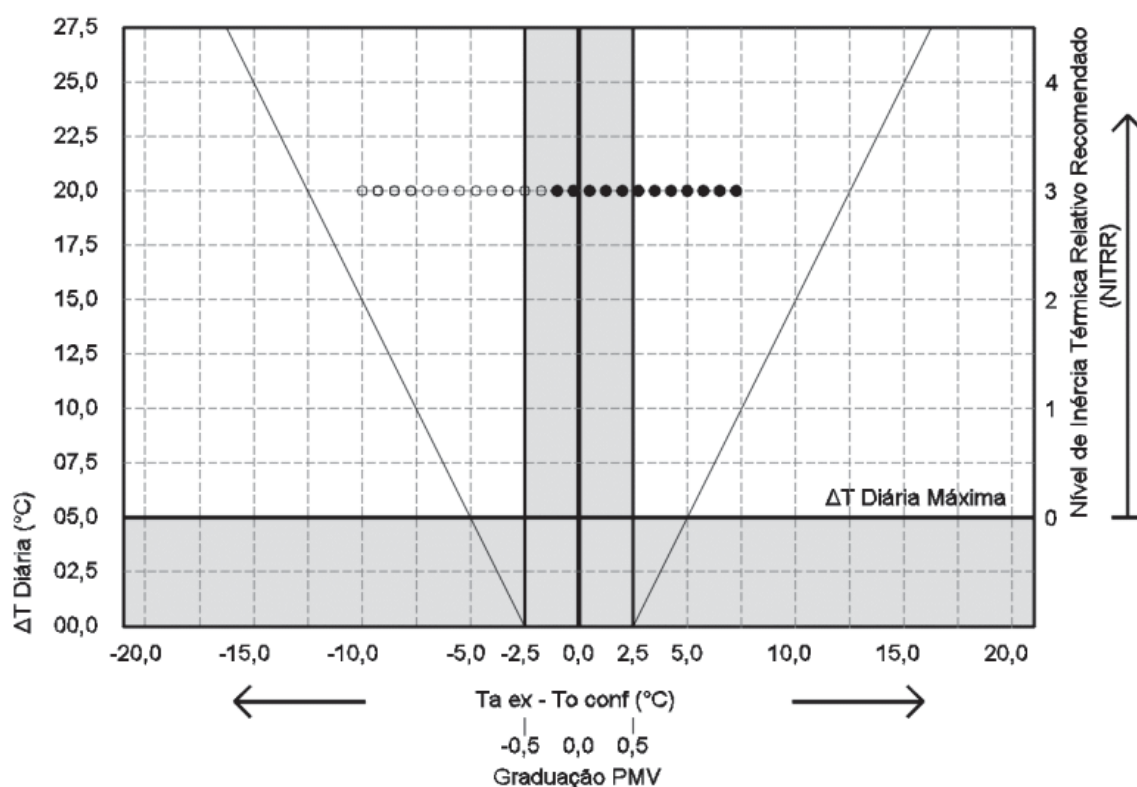
FONTE: Fernandes (2020).

A avaliação do clima através do DA1, também permite verificar: o percentual de horas com temperaturas na faixa de conforto, nas quais pode ocorrer ventilação natural sem maiores restrições e percentual de horas com restrição à ventilação natural e estão ainda divididas em: horas com temperaturas abaixo da faixa de conforto e horas com temperaturas acima da faixa de conforto.

A plotagem de dados neste gráfico está ilustrada na FIGURA 25 e é realizado de acordo com o próprio autor da seguinte forma:

- 1) Para cada dia, calcula-se a ΔT_d .
- 2) Para cada hora do dia, é calculado a diferença entre a $T_{a\text{ ex}}$ e a $T_{o\text{ conf}}$.
- 3) Os vinte e quatro valores resultantes para cada hora do dia, são plotados na altura correspondente à ΔT_d calculada.

FIGURA 25 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CARTA BIOCLIMÁTICA DE GIVONI



FONTE: Fernandes (2020).

O Diagrama Antropoclimático 2 (DA2) objetiva a análise de dados do ambiente interno fruto de uma simulação, a qual pode ser realizada via software ou via equações preditivas, onde é considerado no NITRR estipulado no DA1, de forma que a maior parte das $\Delta T_{d\text{ in}}$ com a edificação simulada sejam iguais ou menores ao valor máximo dado pelo modelo adaptativo adotado.

Para essa análise é adotado uma edificação hipotética com características específicas: sombreada e sem mecanismos artificiais de aquecimento/resfriamento. As temperaturas internas do ar ($T_{a\text{ in}}$) simuladas e as temperaturas operativas (T_o) do ambiente em projeto são assumidas como iguais para compatibilidade com os modelos adaptativos da ASHRAE (2017).

Os dados desse ambiente interno simulado são aplicados ao Diagrama Antropoclimático 2 (DA2), que retorna orientações quanto aos seguintes aspectos: exposição à radiação solar, ventilação, aquecimento e resfriamento.

Os Diagramas Antropoclimáticos, serão aplicadas na análise dos resultados com o objetivo de identificar a porcentagem de conforto e desconforto, bem como a identificação das estratégias que são ou não necessárias.

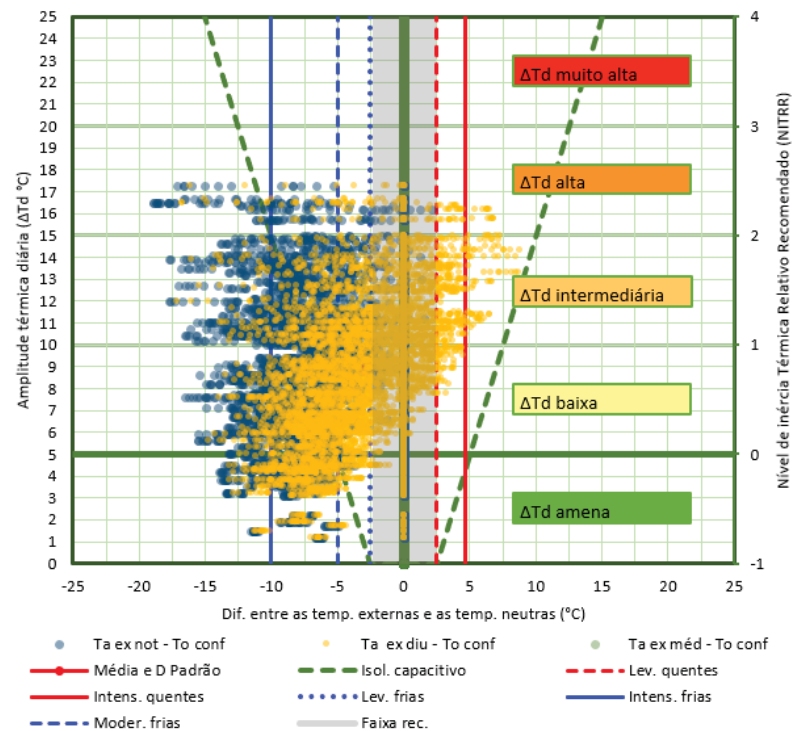
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresentam-se, neste capítulo, os resultados avaliados sob os indicadores da ferramenta de apoio para o projeto de edificações passivas de Fernandes (2020), os chamados, Diagramas Antropoclimáticos, para cada uma das cidades avaliadas. Serão apresentados os resumos das simulações para avaliação do desempenho com o objetivo de expor os respectivos resultados de classificação final para cada simulação realizada, analisados neste capítulo.

5.1.1 CURITIBA

Para a análise do clima de Curitiba, temos plotados no Diagrama Antropoclimático 1 as médias horárias das temperaturas da cidade como apresentado na FIGURA 26. A partir da análise do gráfico conclui-se que assim como Campo Mourão, as temperaturas possuem grande flutuação, ou seja, o clima é caracterizado por uma expressiva amplitude térmica diária. Além disso é possível observar temperaturas majoritariamente à esquerda da faixa recomendada de conforto, com diferenças entre as temperaturas externas e neutras horárias chegando na casa do - 19 °C, sugerindo desta forma, que há predominantemente desconforto por frio.

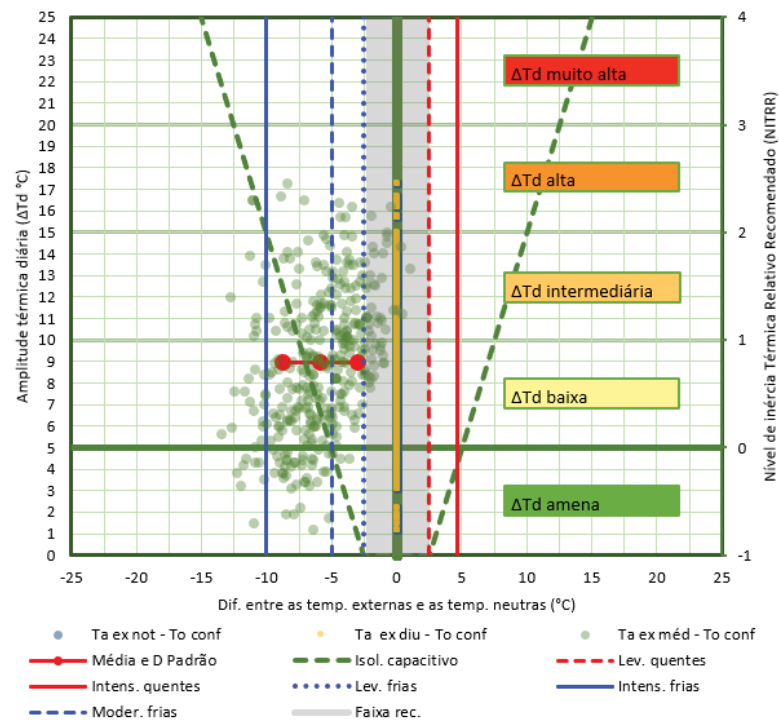
FIGURA 26 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 1: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS EXTERNAS DE CURITIBA



FONTE: A autora (2024).

A diferença máxima positiva entre as temperaturas diárias e temperaturas neutras é de 1°C, enquanto a diferença máxima negativa é de 13°C, reforçando a característica de um clima frio. Essa tendência também pode ser observada a partir da plotagem das médias diárias de temperatura apresentadas na FIGURA 27.

FIGURA 27 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 1: MÉDIAS DIÁRIAS DAS TEMPERATURAS EXTERNAS DE CURITIBA



FONTE: A autora (2024).

Com base na análise climática, conclui-se que a cidade de Curitiba necessita de soluções construtivas que aumentem as temperaturas internas para mantê-las dentro da faixa de conforto, além de estratégias de inércia térmica para reduzir as variações diárias de temperatura.

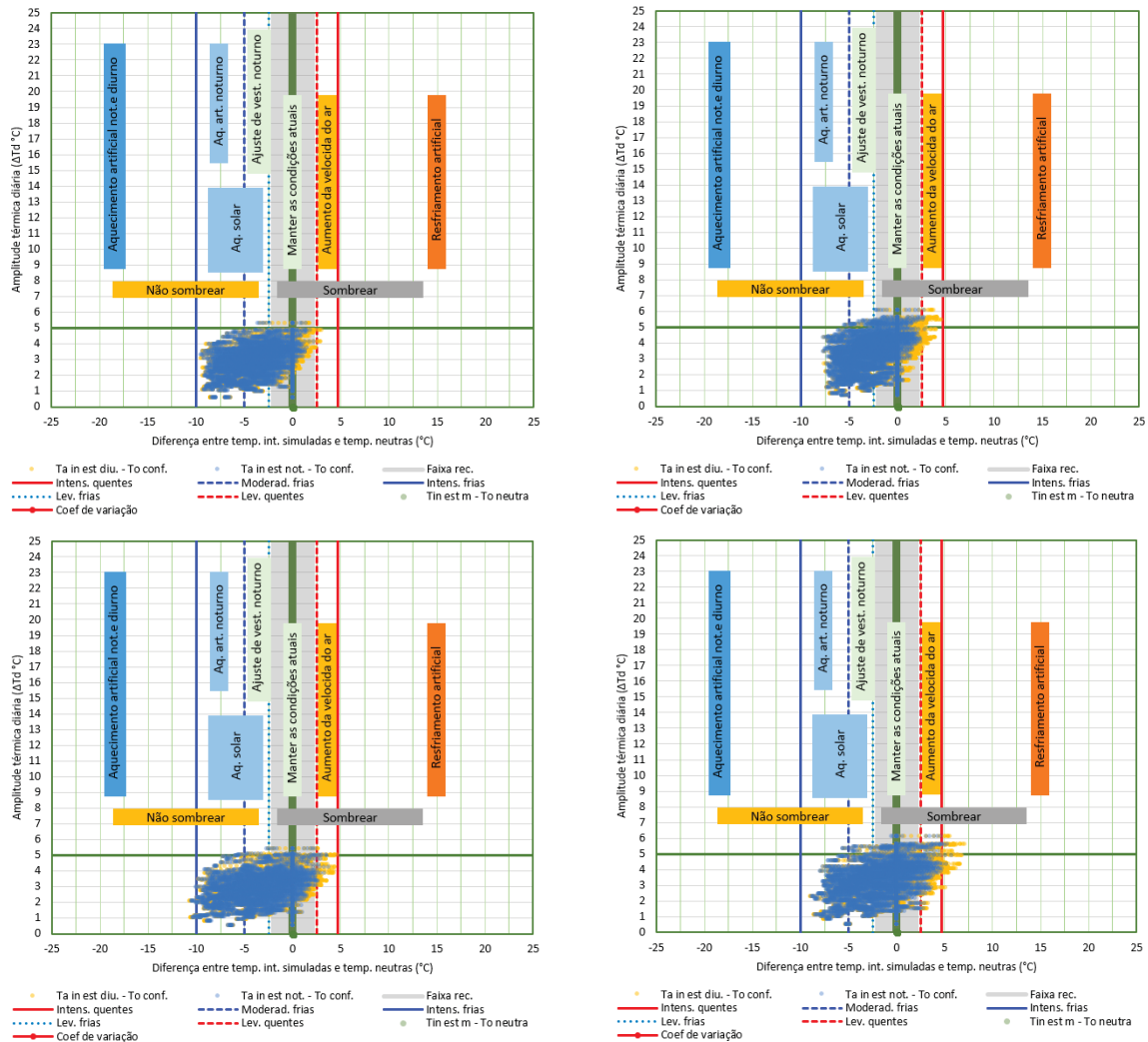
A partir disso, examinaremos como as condições de contato com o solo e os diferentes cenários construtivos se comportaram em resposta a esse contexto climático.

5.1.1.1 CONTATO COM O SOLO

Com base na análise climática, a edificação simulada em contato com o solo demonstrou temperaturas adequadas em todos os cenários construtivos, quando comparadas às temperaturas externas. Observou-se uma redução significativa na amplitude térmica de forma geral, não ultrapassando 7°C de amplitude térmica diária, com uma migração das temperaturas internas para a faixa de conforto em grande parte do tempo. Os cenários analisados possuem diferenças mais pronunciadas entre eles do que no contexto climático anterior, conforme ilustrado na FIGURA 28. A seguir,

os resultados serão detalhados, demonstrando a resposta da edificação em cada cenário.

FIGURA 28 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA CURITIBA NO CENÁRIO EM CONTATO COM O SOLO



FONTE: A autora (2025).

O gráfico do Diagrama Antropoclimático 2, conforme mencionado anteriormente, oferece uma análise detalhada do comportamento térmico da edificação simulada.

O primeiro cenário, representado pelo gráfico à esquerda superior, corresponde a edificações construídas com alvenaria convencional e laje de concreto convencional, ambos sem isolamento. A análise indica que, apesar de alguns pontos estarem na faixa de conforto térmico, há uma dispersão significativa à esquerda do gráfico. Isso mostra que a edificação frequentemente tem temperaturas internas

abaixo do conforto ideal. As temperaturas não atingem níveis extremamente frios, o que sugere que, embora sejam mais baixas, o desempenho térmico da edificação poderia ser otimizado utilizando apenas estratégias passivas. Além disso, a amplitude térmica diária indica que a edificação passa por baixas variações de temperatura ao longo do dia. Em comparação a temperatura externa essas variações são reduzidas em 71%.

Para este cenário as temperaturas simuladas para o ambiente interno são predominantemente frias e significam o montante de 70% do tempo. A ferramenta recomenda estratégias passivas para aumentar o conforto, é recomendado em 32,9% aquecimento solar, 22,8% aquecimento ativo noturno e ajuste da vestimenta em 14,7% do tempo. De forma geral, este é o cenário que apresenta o pior desempenho do grupo.

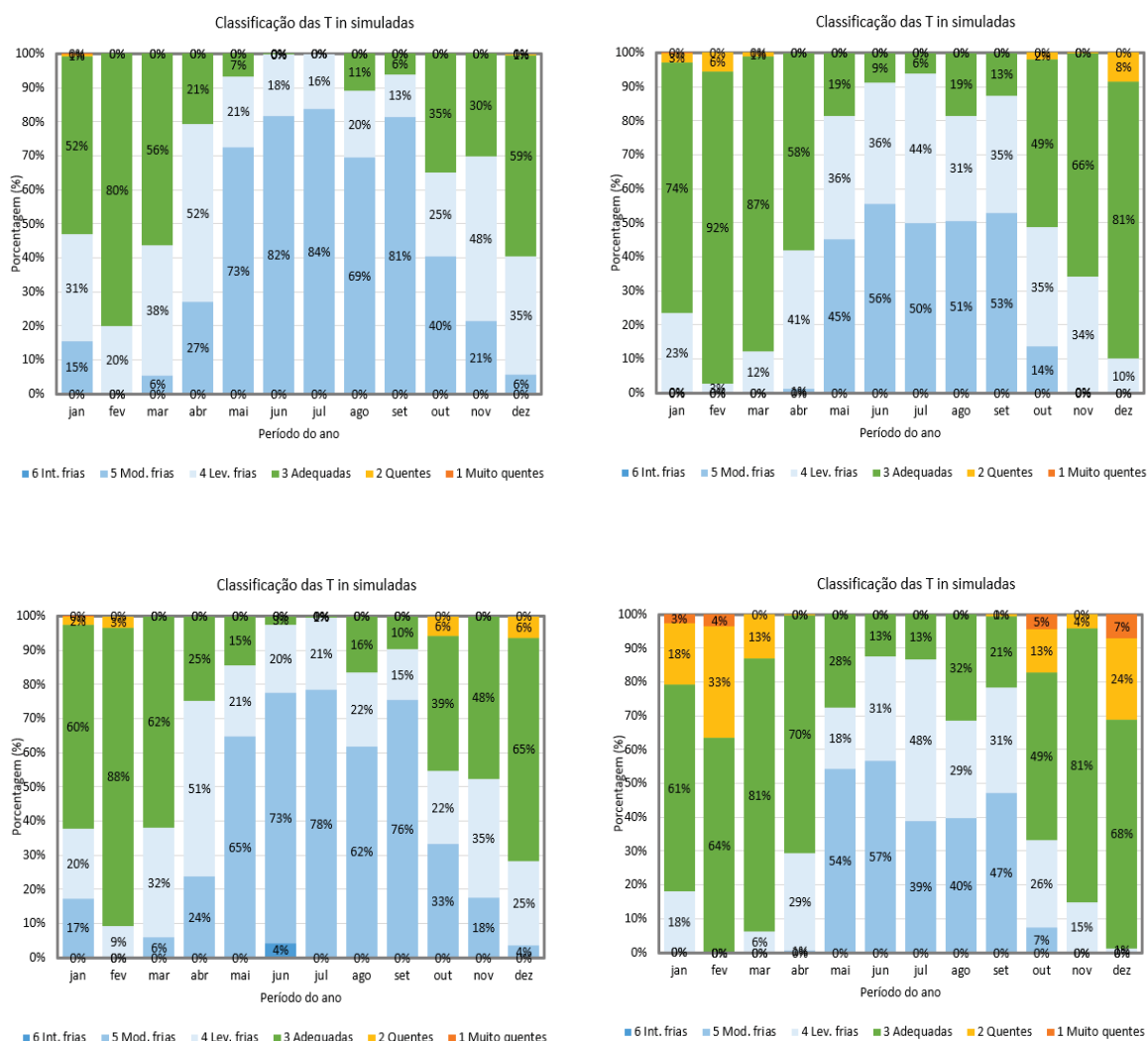
No segundo cenário, ilustrado pelo gráfico à direita superior, as edificações são construídas com alvenaria com isolamento. Comparado ao cenário 1.1, a presença de isolamento na alvenaria resulta em uma maior concentração de pontos dentro da faixa de conforto, o que indica uma redução nos extremos de temperatura interna. Ainda que haja uma dispersão para a esquerda, essa dispersão é menos acentuada, sugerindo que o isolamento na alvenaria contribui para limitar as perdas de calor. A amplitude térmica diária é ligeiramente menos controlada do que no grupo anterior, refletindo que mesmo que as temperaturas sejam mais confortáveis ainda há flutuação. Para este cenário as temperaturas simuladas para o ambiente interno também são predominantemente frias, mas há uma redução da porcentagem em comparação ao cenário anterior, representando 51% do tempo. Neste caso, para 22,2% do tempo recomenda-se aquecimento solar, 13,5% aquecimento noturno ativo e 15,3% com ajuste da vestimenta.

O terceiro cenário, ilustrado pelo gráfico à esquerda inferior, refere-se a edificações com laje de concreto com isolamento. Este cenário apresenta resultados similares ao do cenário 1.1, porém como uma maior dispersão em direção aos extremos de temperatura. O isolamento na laje reduz uma parte das temperaturas frias e aumenta uma parte das temperaturas quentes. Apesar dessa variação, nesse cenário as temperaturas simuladas para o ambiente interno também são predominantemente frias, sendo recomendado manter as condições em apenas 35,5% do tempo, se classificando como o terceiro pior cenário.

O último cenário, representado pelo gráfico à direita inferior, apresenta edificações construídas com alvenaria e laje de concreto com isolamento térmico. Esse cenário apresenta características semelhantes ao cenário 1.2, no entanto, a inclusão do isolamento em ambos resulta em um aumento nos picos de temperatura interna, tanto de frio quanto de calor. Neste caso, as temperaturas atingem a faixa de intensamente quentes, mas não de intensamente frias, indicando que, apesar da melhoria proporcionada pelo isolamento na laje e alvenaria, o excesso de isolamento pode limitar o desempenho térmico geral da edificação, com maiores picos de temperatura. Neste cenário as temperaturas simuladas para o ambiente interno não são predominantemente confortáveis, porém, maiores do que os cenários anteriores, representando 48,2% do tempo. Do mesmo modo que nos cenários anteriores, as recomendações são aquecimento solar, aquecimento ativo noturno e ajuste da vestimenta com 18,6%, 11,8% e 11,2% do tempo, respectivamente.

Olhando para um panorama anual, a ferramenta nos traz informações sobre a classificação das temperaturas internas mensais simuladas, como apresentado na FIGURA 29 e FIGURA 33.

FIGURA 29 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA CURITIBA PARA EDIFICAÇÕES EM CONTATO COM O SOLO



FONTE: A autora (2025).

Os gráficos apresentam uma análise das temperaturas internas simuladas ao longo do ano e as classifica entre temperaturas adequadas, intensamente frias, moderadamente frias e levemente frias, quentes e muito quentes.

No primeiro cenário, representado pelo gráfico superior esquerdo, a edificação é composta por alvenaria convencional e laje de concreto convencional. Observa-se que, somente no período de verão, as temperaturas internas simuladas permanecem predominantemente na faixa classificada como "adequada". Durante os meses de inverno, como junho e julho, não há temperaturas "adequadas" e as temperaturas internas são majoritariamente classificadas como "moderadamente frias", atingindo 82% e 84%, respectivamente. De acordo com os resultados, a habitação

experimentará temperaturas frias ao longo de todo o ano, mesmo nos meses mais quentes como dezembro e fevereiro.

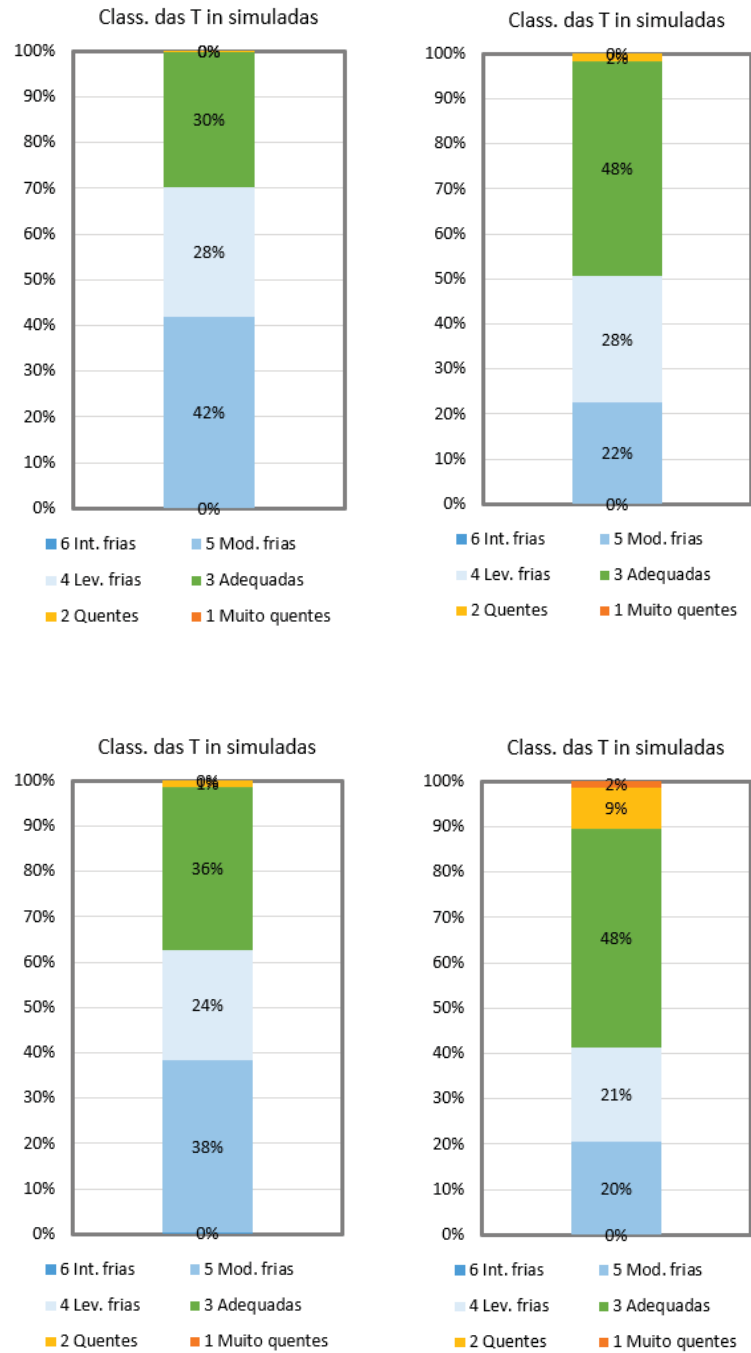
No segundo cenário, ilustrado pelo gráfico superior direito, a edificação utiliza alvenaria com isolamento combinado com laje de concreto convencional. Neste caso, há um aumento das temperaturas "adequadas" em comparação ao cenário anterior, tendo de novembro a abril predominância desta categoria. Houve também uma atenuação das porcentagens de temperaturas "moderadamente frias", onde estas migraram para temperaturas "levemente frias" ou confortáveis ao longo de quase todo o ano, especialmente entre abril e setembro, com reduções de até 15%. Durante os meses mais frios, junho e julho, observa-se que embora mínima há a presença de temperaturas classificadas como adequadas. O isolamento em alvenaria demonstra eficácia significativa na melhoria do conforto térmico ao longo de todo o ano.

O terceiro cenário, ilustrado pelo gráfico inferior esquerdo, a edificação combina alvenaria convencional com laje de concreto com isolamento. A distribuição das temperaturas internas se assemelha ao primeiro cenário, porém, há um destaque negativo em junho, quando 73% das temperaturas são classificadas como "moderadamente frias" e, pela primeira vez, aparecem temperaturas "intensamente frias" (4%). Isso indica que o isolamento na laje, ao invés de melhorar o desempenho térmico, trouxe uma desvantagem, possivelmente limitando a entrada natural do calor, o que resultou em temperaturas internas mais baixas durante os meses de inverno.

No último cenário, representado pelo gráfico inferior direito, combina tanto a alvenaria quanto a laje de concreto com isolamento. Este cenário apresenta uma distribuição um pouco mais equilibrada das temperaturas internas ao longo do ano, com uma proporção mais significativa de temperaturas "adequadas", principalmente nos meses mais frios. Contudo, há um aumento significativo de temperaturas consideradas quentes e muito quentes durante o período de verão. Comparado aos cenários anteriores, este grupo demonstra uma melhoria no controle térmico nos períodos mais frios, e em contrapartida uma piora nos períodos mais quentes, demonstrando a complexidade do equilíbrio térmico ao se trabalhar com isolamento excessivo.

Considerando a média geral do ano todo temos dois cenários com as maiores porcentagens de temperaturas adequadas, os cenários 1.2 e 1.4, ambos com 48%. A comparação das médias anuais pode ser observada na FIGURA 47.

FIGURA 30 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS ANUAIS SIMULADAS PARA CURITIBA



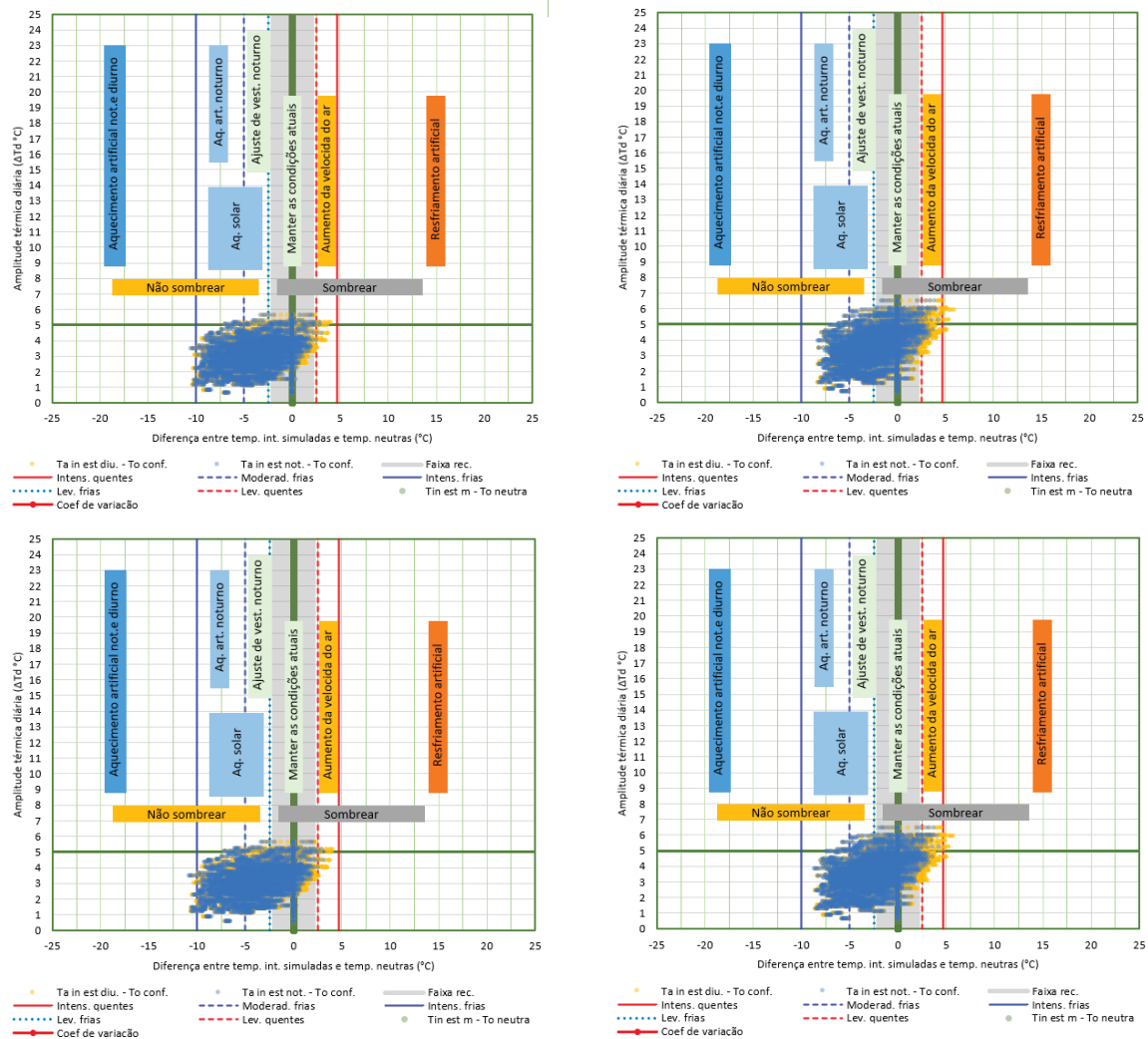
FONTE: A autora (2025).

Resumindo, a análise dos gráficos indica que, para Curitiba, onde as temperaturas são majoritariamente frias (79% do tempo), o cenário 1.4 é o mais eficiente pois melhor atenua esse perfil térmico. No entanto, os resultados indicam que as variações não são tão expressivas entre os cenários, sugerindo que o desempenho do cenário 1.2 é comparável.

5.1.1.2 ELEVADA COM CÂMARA DE NÃO VENTILADA (COM PORÃO)

Considerando a análise climática, a edificação simulada elevada com porão apresentou temperaturas melhoradas em todos os cenários construtivos, quando comparadas às temperaturas externas. Os resultados desse cenário de um modo geral assemelham-se aos resultados do cenário em contato com o solo. Também se observou uma redução significativa na amplitude térmica de forma geral. Nota-se uma semelhança entre os cenários analisados, onde há uma grande correspondência entre os cenários 2.1 (sem isolamento) e 2.3 (com isolamento somente na laje), bem como entre os cenários 2.2 (com isolamento apenas na alvenaria) e 2.4 (com isolamento na alvenaria e na laje), conforme ilustrado na FIGURA 31. A seguir, os resultados serão detalhados, demonstrando a resposta da edificação em cada cenário.

FIGURA 31 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA CURITIBA NO CENÁRIO ELEVADA COM PORÃO



FONTE: A autora (2025).

Em todos os gráficos, a maioria dos pontos plotados se concentra na parte inferior esquerda, sugerindo que a amplitude térmica diária foi mantida em níveis baixos na maior parte do tempo. Além disso, a diferença entre a temperatura interna simulada e a temperatura neutra também é frequentemente alocada a esquerda na maioria dos casos, o que sugere que as condições internas estão experimentando temperaturas frias em boa parte do tempo.

No cenário 2.1, representado pelo gráfico superior esquerdo, podemos observar um resultado com baixa variação térmica, porém desconforto na maioria do tempo. A recomendação para manter condições atuais em 31,4% do tempo, enquanto as temperaturas são predominantemente frias em 50% do tempo. Há uma diferença

máxima positiva das temperaturas horárias e temperaturas neutras de 5,8 °C. enquanto a diferença máxima negativa é de 8,6 °C.

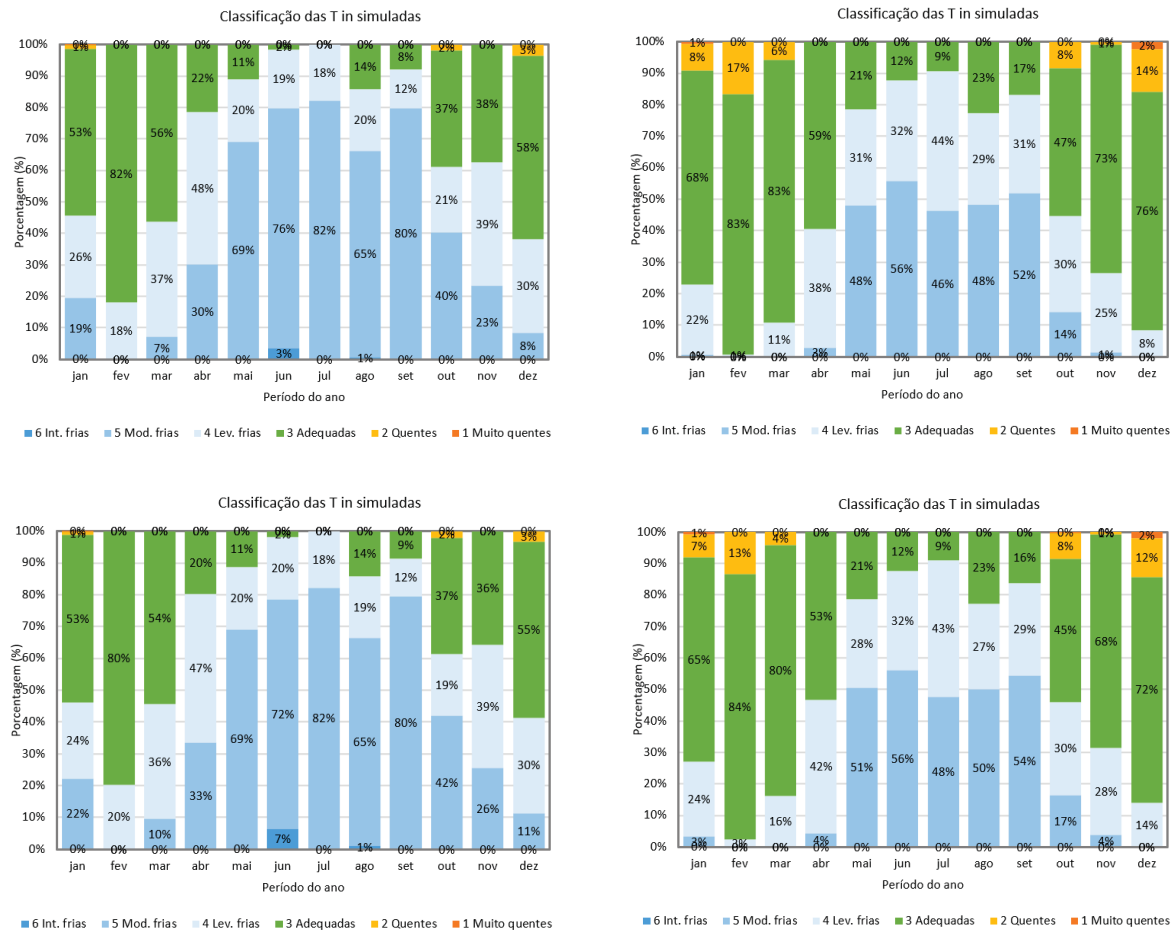
O cenário 2.2, ilustrado pelo gráfico superior direito, refere-se a edificações construídas com alvenaria com isolamento e laje convencional. Em comparação ao primeiro cenário, a presença de isolamento na alvenaria resulta em uma maior concentração de pontos dentro da faixa de conforto, indicando uma redução nos extremos de temperatura interna, porém em contrapartida, há uma maior flutuação das temperaturas, ou seja, um aumento na amplitude térmica. Ainda que haja uma dispersão para a esquerda, esta é menos acentuada, sugerindo que o isolamento na alvenaria contribui para limitar as perdas de calor. A porcentagem para manter as condições neste cenário é de 47,4%, o valor mais alto dentre os cenários.

O cenário 2.3 no gráfico inferior esquerdo apresenta um desempenho semelhante ao cenário 2.1, conforme já observado na análise de Campo Mourão. Os resultados indicam que a inclusão de isolamento na laje em edificações elevadas não apresenta um efeito significativo. Comparado ao cenário sem isolamento, observa-se inclusive um aumento das temperaturas predominantemente frias em 1%. A recomendação para manter condições atuais em 30,6% do tempo, a porcentagem mais baixa dentre todos os cenários, sugere que o cenário, dentre todos, é o mais ineficiente.

O último cenário 2.4, mostrado no gráfico inferior direito, tem resultados semelhantes ao segundo cenário, com amplitude térmica e dispersão parecidas. As temperaturas simuladas para o ambiente interno são majoritariamente desconfortáveis, com 50% sendo frias. Recomenda-se manter as condições atuais em 45,5% do tempo.

Voltando-se para a escala anual, a ferramenta nos traz informações sobre a classificação das temperaturas internas mensais simuladas, como apresentado na FIGURA 32.

FIGURA 32 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA CURITIBA PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS COM PORÃO



FONTE: A autora (2025).

No primeiro cenário, a distribuição das temperaturas internas ao longo do ano mostra que uma parte significativa dos meses apresenta temperaturas mais baixas, especialmente de maio a setembro. Nestes cinco meses, as temperaturas moderadamente frias ultrapassam 65%, chegando a 80%. Os meses mais quentes, especialmente de dezembro a março, são caracterizados por uma presença maior de temperaturas "adequadas", com temperaturas dessa categoria de forma predominante.

O segundo cenário apresenta uma melhoria em relação ao primeiro, especialmente nos períodos mais frios. Há uma ligeira atenuação de temperaturas "moderadamente frias" ao passo que há um ligeiro aumento de temperaturas "levemente frias", o que sugere que o isolamento pode estar agindo na migração das temperaturas em direção a faixa de conforto. Além disso, observa-se um aumento

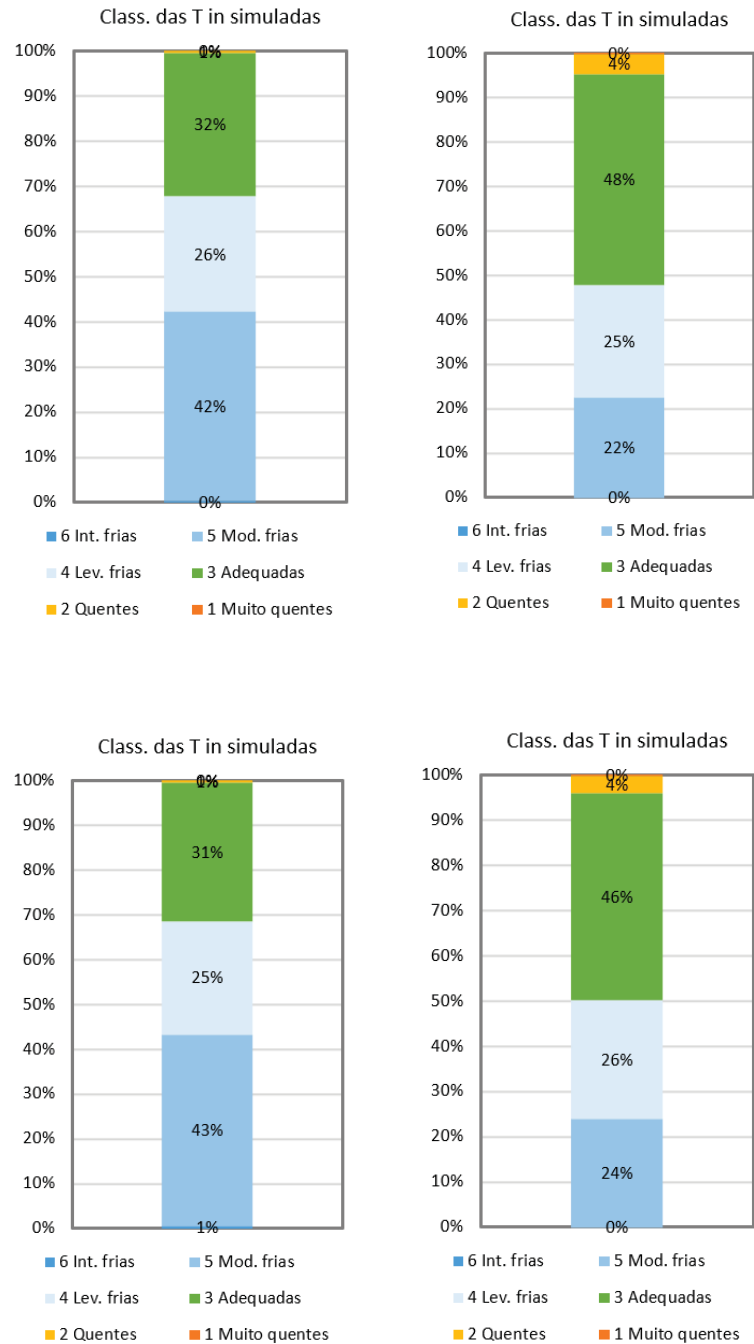
das temperaturas consideradas "adequadas" ao longo do ano, indicando que o isolamento teve um impacto positivo.

A distribuição de temperaturas do terceiro cenário mostra que, mesmo os meses de verão não tem uma boa proporção de dias "adequados", seguindo a tendência do primeiro cenário, onde somente quatro meses do ano possuem temperaturas majoritariamente adequadas e os meses de inverno são dominados por temperaturas "frias". A proximidade com os resultados do cenário 2.1, onde não há isolamento, reforça a ideia de que o isolamento na laje não tem impacto significativo.

No quarto cenário, que inclui isolamento tanto na alvenaria quanto na laje de concreto, a distribuição de temperaturas adequadas ao longo do ano é semelhante à do cenário 2.2, como era esperado. No entanto, observa-se uma leve piora em relação a esse cenário, sugerindo que o isolamento na laje pode, nestas condições, ter um efeito adverso no desempenho térmico.

Ao avaliar o melhor cenário com base na maior porcentagem de temperaturas adequadas ao longo do ano, o cenário 2.2 se destaca, apresentando o desempenho mais eficiente. A comparação das médias anuais pode ser observada na FIGURA 33.

FIGURA 33 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS ANUAIS SIMULADAS PARA CURITIBA



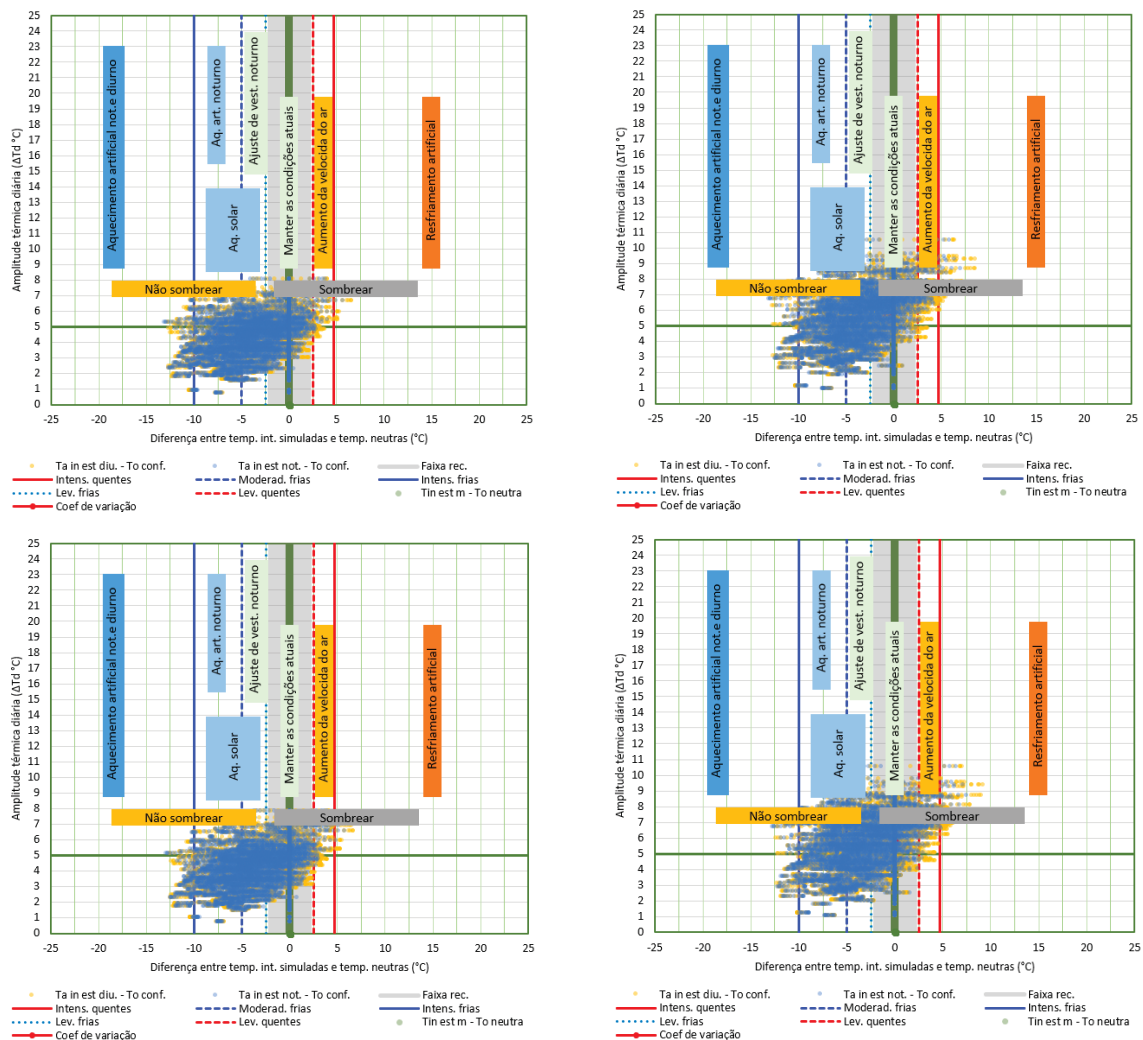
FONTE: A autora (2025).

5.1.1.3 ELEVADA COM CÂMARA DE AR VENTILADA (SOBRE PILOTIS)

Com base na análise climática, a edificação simulada elevada sobre pilotis apresentou temperaturas internas satisfatórias em todos os cenários construtivos, em comparação com os grupos anteriores. Observou-se que em comparação aos

cenários em que edificação está em contato com o solo e é elevada com porão, a amplitude térmica é maior em todos os cenários construtivos. Por outro lado, a tendência de semelhança entre os cenários se repete assim como no outro grupo de casos anterior. Há uma semelhança marcante entre os cenários 3.1 (sem isolamento) e 3.3 (isolamento apenas na laje), assim como entre os cenários 3.2 (isolamento somente na alvenaria) e 3.4 (isolamento tanto na alvenaria quanto na laje), conforme mostrado na FIGURA 55FIGURA 26. A seguir, os resultados serão detalhados, demonstrando como a edificação responde em cada cenário.

FIGURA 34 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA CURITIBA NO CENÁRIO ELEVADA COM CÂMARA DE AR VENTILADA



FONTE: A autora (2024).

O gráfico superior esquerdo, referente ao cenário 3.1 (alvenaria convencional e laje convencional), mostra uma pequena concentração de pontos na faixa de

conforto, com uma dispersão notável em relação ao eixo x, principalmente a esquerda. As temperaturas são predominantemente frias, representando um total de 68% do tempo. Neste cenário a diferença máxima positiva entre as temperaturas horárias e as temperaturas neutras é de 6,6°C e a diferença máxima negativa é de 13,1°C. Em relação as recomendações, somente em 29,1% do tempo é recomendado manter as condições atuais. Em 31% é recomendado intensificar o aquecimento solar, em 10,7% ajuste de vestimenta e em 22,3% é recomendado aquecimento ativo noturno.

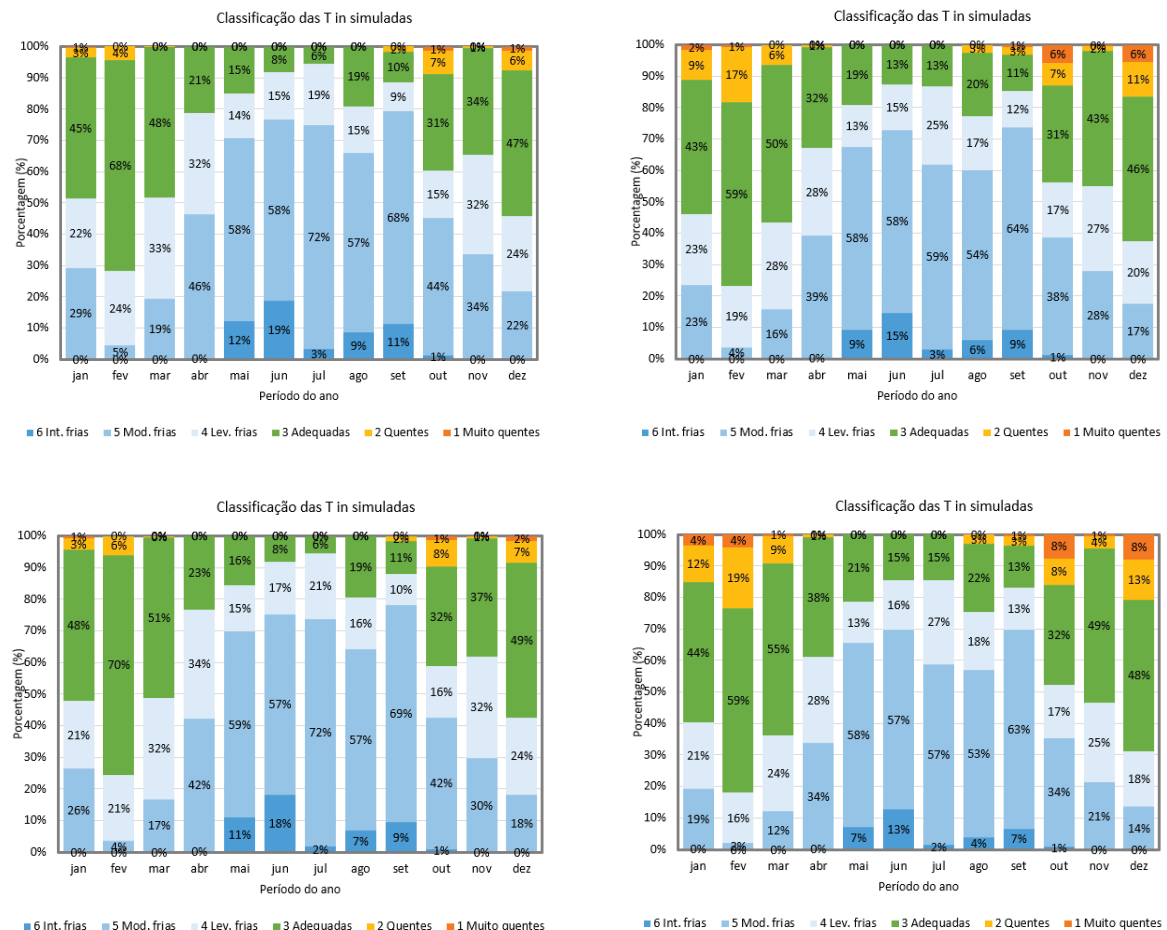
No gráfico superior direito, referente ao cenário 3.2 (alvenaria com isolamento e laje de concreto convencional), observa-se um aumento significativo na amplitude térmica, com uma migração atenuada das temperaturas internas para dentro da zona de conforto, indicando a redução de picos extremos de frio. Por outro lado, há uma dispersão mais acentuada de temperaturas quentes. Neste cenário as temperaturas também são predominantemente frias, porém com uma leve redução de 6% em comparação ao cenário anterior. É recomendado manter as condições em 31,6%. Para melhorar o desempenho este cenário segue as recomendações do cenário anterior, com aquecimento solar (27,7%), ajuste de vestimenta (10,6%), aquecimento ativo noturno (20,4%) e ventilação (4,8%). Aqui, a diferença máxima positiva entre as temperaturas horárias e as temperaturas neutras é de 8,6°C e a negativa de 13,1°C.

O gráfico inferior esquerdo, que representa o cenário 3.3 (alvenaria convencional e laje de concreto com isolamento), indica que o isolamento na laje, sem a presença de isolamento na alvenaria, resulta em um comportamento térmico semelhante ao do cenário 3.1, com uma distribuição de temperaturas mais dispersa e uma menor capacidade de manter as temperaturas dentro da faixa de conforto. Neste caso a amplitude diária máxima é semelhante ao do primeiro cenário (8,1°C) com 7,9°C, bem como as diferenças máximas positivas e negativas entre as temperaturas horárias e as temperaturas neutras de 6,7°C e 12,9°C, demonstrando certa ineficácia do isolamento somente na laje.

O gráfico inferior direito, que representa o cenário 3.4 (alvenaria e laje com isolamento), evidencia uma maior amplitude térmica, com uma dispersão mais acentuada dos dados. Nesse cenário, a máxima diferença positiva e negativa entre as temperaturas horárias e as temperaturas neutras é de 9,2°C e 12,8°C, respectivamente. Além disso, observa-se que as temperaturas são predominantemente frias em 58% do tempo, o menor percentual entre os cenários analisados.

Ao analisar o período de um ano, a ferramenta fornece detalhes sobre a classificação das temperaturas internas mensais simuladas, conforme mostrado na FIGURA 48.

FIGURA 35 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSIS SIMULADAS PARA CURITIBA PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS SOBRE PILOTIS



FONTE: A autora (2025).

A análise do gráfico de classificação das temperaturas internas simuladas revela que, no cenário superior esquerdo (3.1), apenas o mês de fevereiro apresentou temperaturas “adequadas” em mais de 50% do tempo. Além disso, esse cenário, juntamente com o cenário 3.3 (inferior esquerdo), apresenta as maiores ocorrências de temperaturas classificadas como “moderadamente frias” e “intensamente frias”. Observa-se, ainda, que mesmo durante o verão há uma significativa presença de temperaturas frias, evidenciando um desempenho térmico desfavorável nesse caso.

De uma forma geral, analisando estes gráficos é possível notar que em todos os cenários construtivos houve uma redução das temperaturas “adequadas” em

comparação aos grupos anteriores de contato com o solo, sugerindo que a condição elevada sobre pilotis se mostra menos eficaz sob esse aspecto.

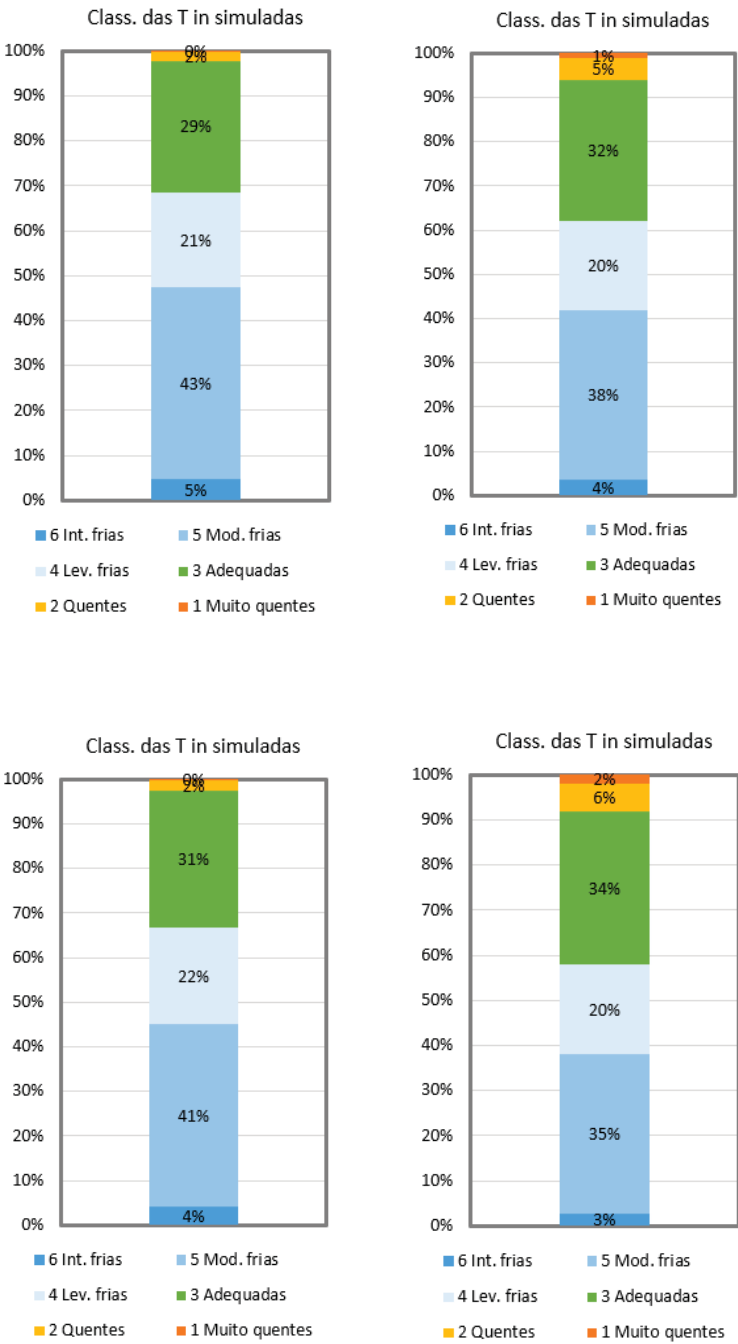
O segundo cenário apresenta uma melhoria em relação ao primeiro nos períodos mais frios, com um aumento na porcentagem de temperaturas classificadas como "adequadas". Nota-se que parte das temperaturas "moderadamente frias" migrou para a categoria "levemente frias" e parte das "levemente frias" passou a ser classificada como "adequadas", indicando que, embora ainda predominem temperaturas frias, há um deslocamento em direção à faixa de conforto térmico. Por outro lado, observa-se um aumento na ocorrência de temperaturas "quentes" e "muito quentes", ainda que em um volume pouco expressivo. Junto ao cenário 3.4, este cenário apresenta a maior incidência dessas temperaturas.

O terceiro cenário preserva a tendência de distribuição de temperaturas ao longo do ano observada no primeiro cenário, com apenas pequenas variações. Seu desempenho é ligeiramente superior ao do cenário sem isolamento, apresentando uma redução modesta nas ocorrências de temperaturas "intensamente frias". Essa melhora, porém, é mínima, com diminuições que não ultrapassam 2%.

Por outro lado, o último cenário se assemelha ao segundo, exibindo uma distribuição de temperaturas similar. Esse resultado sugere que a adição de isolamento na laje não resulta em uma diferença significativa no desempenho térmico em comparação ao cenário com isolamento apenas na alvenaria. Nos períodos mais quentes, observa-se um aumento nas ocorrências de temperaturas "muito quentes" e "quentes", enquanto as temperaturas "intensamente frias" e "moderadamente frias" apresentam uma redução. No entanto, ao longo do ano, há um aumento na distribuição de temperaturas classificadas como "adequadas", indicando uma leve melhora no conforto térmico.

Ao classificar o melhor cenário com base na maior porcentagem de temperaturas adequadas durante o ano, temos o cenário 3.4. A comparação das médias anuais pode ser observada na FIGURA 49.

FIGURA 36 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA CURITIBA PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS SOBRE PILOTIS



FONTE: A autora (2025).

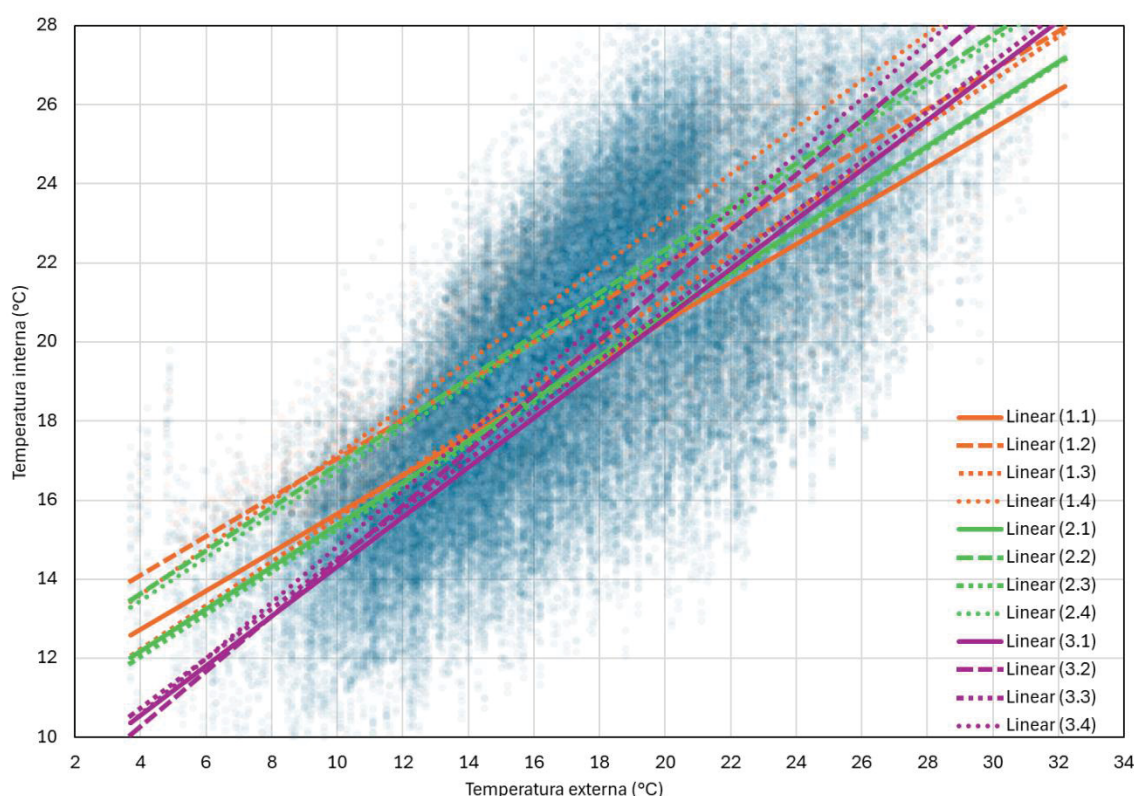
Considerando todos os gráficos, o cenário 3.4 pode ser identificado como o mais favorável, pois apresenta a maior porcentagem de temperaturas classificadas como “adequadas” e a menor ocorrência de temperaturas “moderadamente frias” e “intensamente frias”. Esse resultado é particularmente positivo dentro do conjunto de

cenários analisados, especialmente levando em conta o perfil climático da cidade de Curitiba, onde a mitigação do frio é um fator relevante.

5.1.1.4 COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS

São apresentados nessa seção os resultados das simulações através de gráficos que ilustram tanto a variação térmica interna em função das temperaturas externas (FIGURA 52) quanto a porcentagem de horas em que as temperaturas internas permanecem dentro, abaixo ou acima da faixa de conforto térmico (FIGURA 38) para a cidade de Curitiba.

FIGURA 37 – RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA INTERNA E EXTERNA PARA DIFERENTES CENÁRIOS DE EDIFICAÇÃO EM CURITIBA



FONTE: A autora (2025).

Na cidade de Curitiba, os cenários de edificações em contato com o solo apresentaram diferentes comportamentos térmicos de acordo com a estratégia de isolamento adotada. No cenário 1.1 (sem isolamento), observa-se uma inclinação moderada na linha de tendência, indicando uma baixa variação da temperatura interna em resposta às oscilações da temperatura externa. Esse cenário se destaca como o

mais eficiente nesse aspecto, apresentando a menor inclinação da linha de tendência em comparação com os demais cenários.

O cenário 1.2 (isolamento somente na alvenaria) apresenta linha de tendência com inclinação semelhante ao cenário 1.1, porém localizado mais acima do eixo y. Isso sugere que o ambiente interno está mais influenciado pelo ambiente externo em comparação ao primeiro.

Por outro lado, o cenário 1.3 (isolamento na alvenaria e na laje) que inicia-se mais abaixo, segue uma linha de tendência mais inclinada e cruza com a linha 1.2, sugerindo uma variação de temperatura interna maior à medida que a temperatura externa aumenta.

Finalmente, o cenário 1.4 (isolamento somente na laje) é o que apresenta a maior inclinação na linha de tendência, indicando a maior variação de temperatura interna em resposta às flutuações externas. Este comportamento sugere que o isolamento apenas na laje não é suficiente para estabilizar a temperatura interna, tornando a edificação mais vulnerável às condições térmicas externas. É interessante observar que, a linha 1.1 é menos inclinada que a do cenário 1.4, sugerindo que o contato direto com o solo, sem isolamento, pode ser mais favorável.

Essas observações indicam que, para edificações em contato com o solo em Curitiba, a estratégia sem isolamento (cenário 1.1) proporciona maior estabilidade térmica, devido à menor variação da temperatura interna. No entanto, essa estabilidade não significa necessariamente um melhor desempenho em termos de conforto térmico, pois a temperatura pode permanecer fora da faixa ideal por longos períodos.

No Grupo 2, que representa edificações elevadas não ventiladas (com porão), observa-se que as linhas dos cenários 2.1 (sem isolamento) e 2.3 (isolamento apenas na laje) praticamente se sobrepõem, indicando um comportamento térmico muito semelhante entre ambos. Essas linhas iniciam com uma inclinação quase idêntica e permanecem distantes das linhas dos cenários 2.2 e 2.4, situando-se em uma posição mais abaixo no gráfico. Isso sugere que, nesses dois cenários, a temperatura interna é mais baixa para uma mesma temperatura externa, possivelmente devido à influência do solo e à menor capacidade de retenção de calor. Além disso, a proximidade das curvas de 2.1 e 2.3 indica como observado ao longo deste trabalho, que o isolamento apenas na laje pode ter um impacto limitado na estabilidade térmica dessas edificações.

As linhas de tendência para os cenários 2.2 (isolamento somente na alvenaria) e 2.4 (isolamento na alvenaria e na laje) também se sobrepõem, indicando que o comportamento térmico desses dois cenários é muito semelhante. Ambos apresentam uma inclinação próxima à dos cenários 2.1 e 2.3, o que significa que a variação da temperatura interna em resposta às oscilações da temperatura externa segue a mesma tendência. No entanto, como essas linhas estão posicionadas mais acima no gráfico, isso indica que a temperatura interna é, em média, mais alta nesses cenários.

Esse comportamento demonstra que o isolamento na alvenaria (presente em 2.2 e 2.4) influencia significativamente a temperatura interna, reduzindo as trocas térmicas com o ambiente externo. No entanto, por elevar a temperatura média interna, ele pode reter mais calor ao longo do tempo, o que pode ser benéfico em climas frios, mas desfavorável em períodos mais quentes, dependendo das estratégias de ventilação adotadas.

Essas observações sugerem que, para edificações elevadas não ventiladas em Curitiba, as estratégias que não incluem o isolamento na alvenaria (cenários 2.1 e 2.2) proporcionam uma maior estabilidade térmica, especialmente em condições de temperaturas externas mais elevadas.

No Grupo 3, que representa edificações elevadas ventiladas (sobre pilotis), os resultados indicam que a ventilação sob a edificação pode ter um efeito negativo no comportamento térmico. De modo geral, as linhas de tendência desse grupo são as mais inclinadas entre todos os grupos analisados, sugerindo uma maior variação da temperatura interna em resposta às flutuações da temperatura externa. A ventilação sob a edificação não parece contribuir para a redução dessas variações; pelo contrário, a ausência de contato direto com o solo parece tornar a edificação mais vulnerável às mudanças térmicas do ambiente externo.

O cenário 3.1 (sem isolamento) apresenta a menor inclinação da linha de tendência dentro do grupo, indicando que, a configuração sem isolamento, é relativamente menos suscetível às flutuações térmicas externas.

Os cenários 3.2 (isolamento somente na alvenaria) e 3.3 (isolamento somente na laje) apresentam linhas de tendência significativamente inclinadas, sugerindo que, mesmo com algum nível de isolamento, a ventilação sob a edificação continua a permitir grandes variações na temperatura interna. Entre os dois, o cenário 3.3 exibe uma inclinação ligeiramente menor do que o cenário 3.2, e sua linha de tendência se

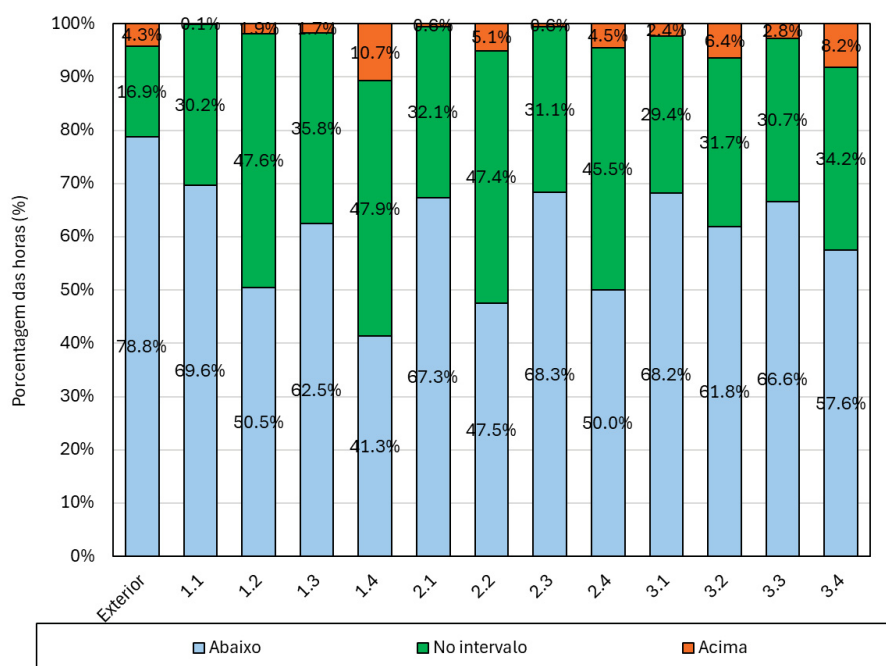
aproxima da do cenário 3.1, sugerindo que o isolamento na laje pode ser mais eficiente do que na alvenaria nesse contexto.

Por fim, o cenário 3.4 (isolamento na alvenaria e na laje) apresenta a maior inclinação da linha de tendência dentro do grupo, reforçando a ideia de que o isolamento combinado pode intensificar as variações térmicas internas, ao invés de mitigá-las.

Esses resultados indicam que, para edificações elevadas ventiladas em Curitiba, a ventilação sob a construção tende a aumentar a variação da temperatura interna, o que pode ser desfavorável para o conforto térmico.

Analisando o gráfico de porcentagem das horas em que as temperaturas internas permaneceram abaixo, dentro ou acima do intervalo de conforto térmico para os diferentes cenários, mostrado na FIGURA 51, observa-se como as estratégias de isolamento e o tipo de contato da edificação com o solo influenciam diretamente o conforto térmico das edificações. O gráfico permite avaliar a eficácia das diferentes configurações em manter as temperaturas internas em uma faixa confortável ao longo do tempo, destacando as melhores práticas para cada tipo de edificação e estratégia de isolamento. A seguir, são apresentadas as análises detalhadas para cada grupo de cenários.

FIGURA 38 – DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS HORAS DE TEMPERATURA INTERNA DENTRO, ABAIXO E ACIMA DO INTERVALO DE CONFORTO TÉRMICO PARA DIFERENTES CENÁRIOS EM CURITIBA



FONTE: A autora (2025).

Para o Grupo 1, que representa edificações em contato direto com o solo, os resultados indicam que o cenário 1.4 (isolamento na alvenaria e na laje) tem o maior percentual de horas dentro do intervalo de conforto térmico (47,9%), seguido pelo cenário 1.2 (isolamento somente na alvenaria) com 47,6%. Estes dois cenários demonstram a importância do isolamento na alvenaria para manter as temperaturas internas confortáveis. O cenário 1.1 (sem isolamento) e o cenário 1.4 (isolamento somente na laje) apresentam um desempenho inferior, com a maioria das horas abaixo do intervalo de conforto, especialmente o cenário 1.1 com 69,6% das horas fora do intervalo. Isso sugere que, em edificações em contato direto com o solo, o isolamento na alvenaria é crucial para melhorar o conforto térmico.

Para o Grupo 2, que analisa edificações elevadas não ventiladas (com porão), os resultados mostram que os cenários 2.2 (isolamento somente na alvenaria) e 2.4 (isolamento na alvenaria e na laje) possuem porcentagens semelhantes de horas dentro do intervalo de conforto (47,4% e 45,5%, respectivamente). Isso sugere que, para edificações com porão, o isolamento na alvenaria (com ou sem o complemento da laje) oferece um desempenho térmico mais adequado. Os cenários 2.1 (sem isolamento) e 2.3 (isolamento somente na laje) têm uma maior proporção de horas

abaixo do intervalo de conforto (67,3% e 68,3%, respectivamente), destacando novamente a importância do isolamento na alvenaria para minimizar as horas em condições desconfortáveis.

No Grupo 3, que avalia edificações elevadas ventiladas (sobre pilotis), os cenários demonstram um comportamento similar. O cenário 3.2 (isolamento somente na alvenaria) tem a maior proporção de horas dentro do intervalo de conforto (31,7%), seguido pelo cenário 3.4 (isolamento na alvenaria e na laje) com 34,2%. As edificações ventiladas mostram que o isolamento na alvenaria ainda contribui para um desempenho térmico mais favorável, mas de forma menos pronunciada do que nos outros grupos. Os cenários 3.1 (sem isolamento) e 3.3 (isolamento somente na laje) apresentam uma alta porcentagem de horas abaixo do intervalo de conforto (68,2% e 66,6%, respectivamente), indicando que, com a ventilação, o isolamento é necessário para alcançar um conforto térmico aceitável.

Ao correlacionar os resultados dos dois gráficos, observa-se que há diferenças significativas na interpretação do desempenho térmico dos cenários dependendo do tipo de análise realizada. No primeiro gráfico, que mostra a relação entre a temperatura interna e externa, o cenário 1.1 (sem isolamento) apresenta a menor inclinação na linha de tendência. Isso indica que este cenário tem a menor variação de temperatura interna em resposta às variações da temperatura externa. Com base apenas neste gráfico, o cenário 1.1 pareceria ser a melhor estratégia para o clima de Curitiba.

No entanto, ao analisar o segundo gráfico, que apresenta a porcentagem de horas que as temperaturas internas permanecem abaixo, dentro ou acima do intervalo de conforto térmico, uma interpretação diferente emerge. Neste gráfico, os cenários 1.2, 1.4, 2.2 e 2.4 demonstram as maiores porcentagens de horas dentro do intervalo de conforto térmico (47,6%, 47,9%, 47,4% e 45,5%, respectivamente). Isso sugere que, embora o cenário 1.1 apresente a menor variação de temperatura interna no primeiro gráfico, ele não mantém as temperaturas internas dentro da faixa de conforto.

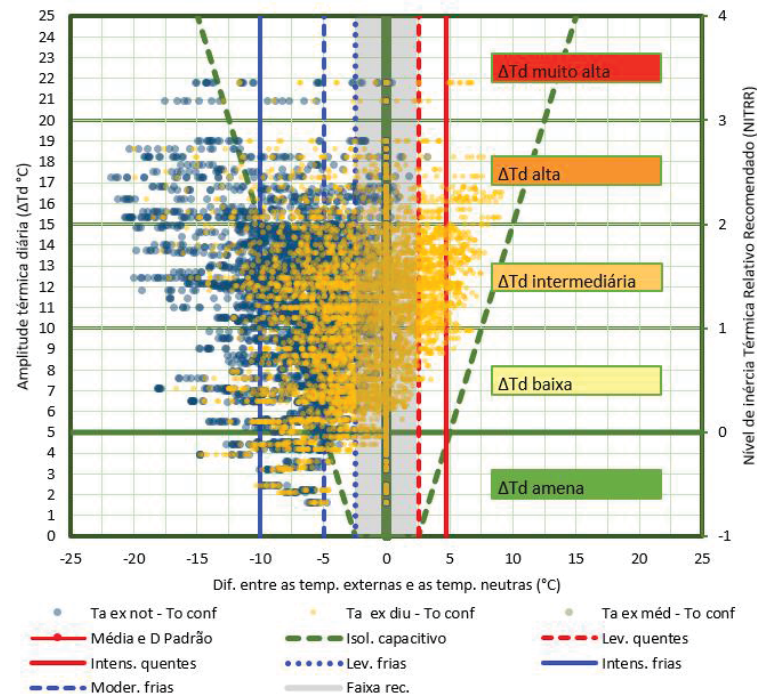
Portanto, a análise dos dois gráficos em conjunto sugere que a escolha da melhor estratégia de isolamento deve considerar tanto a capacidade de reduzir variações térmicas internas quanto a eficácia em manter as temperaturas dentro de uma faixa confortável. Em Curitiba, os cenários 1.2, 1.4, 2.2 e 2.4 se destacam como as melhores opções, pois equilibram essas duas considerações, oferecendo tanto estabilidade térmica quanto conforto interno.

De forma geral, considerando as análises através dos Diagramas Antropoclimáticos e a comparação entre os cenários, para o clima de Curitiba, destacam-se as estratégias de contato com o solo com isolamento na alvenaria e laje e edificações elevadas sem ventilação com isolamento na alvenaria.

5.1.2 IVAÍ

Para a análise do clima de Ivaí, o Diagrama Antropoclimático 1, apresentado na FIGURA 39, exhibe as médias horárias das temperaturas da cidade. A partir desse gráfico, conclui-se que Ivaí possui um perfil climático bastante distinto em comparação com as cidades analisadas anteriormente. As temperaturas mostram grande flutuação, caracterizando o clima com uma amplitude térmica diária expressiva, classificada como "muito alta" no Diagrama. Além disso, observa-se que as temperaturas predominam à esquerda da faixa recomendada de conforto, com diferenças entre as temperaturas externas e neutras horárias médias chegando a - 21,77 °C, o que indica um desconforto predominante por frio. Os pontos horários das temperaturas estão bem espaçados, sugerindo uma variabilidade significativa ao longo do dia, com longos períodos de desconforto térmico e a necessidade de intervenções para melhorar o conforto ambiental na região.

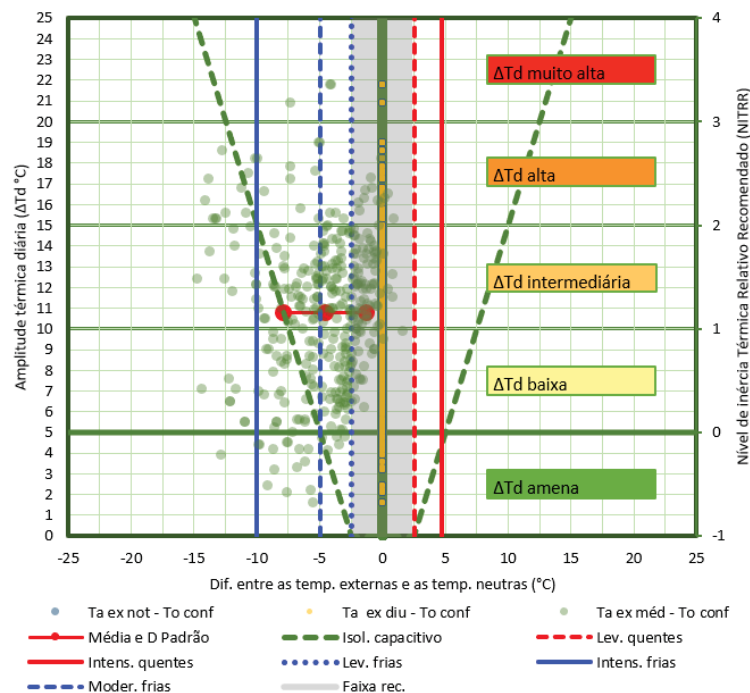
FIGURA 39 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 1: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS EXTERNAS DE IVAÍ



FONTE: A autora (2024).

A diferença máxima positiva entre as temperaturas diárias e as temperaturas neutras é de 2°C, enquanto a diferença máxima negativa alcança 15°C, o que reforça o caráter frio do clima. Essa tendência também se evidencia nas médias diárias de temperatura, conforme ilustrado na FIGURA 60.

FIGURA 40 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 1: MÉDIAS DIÁRIAS DAS TEMPERATURAS EXTERNAS DE IVAÍ



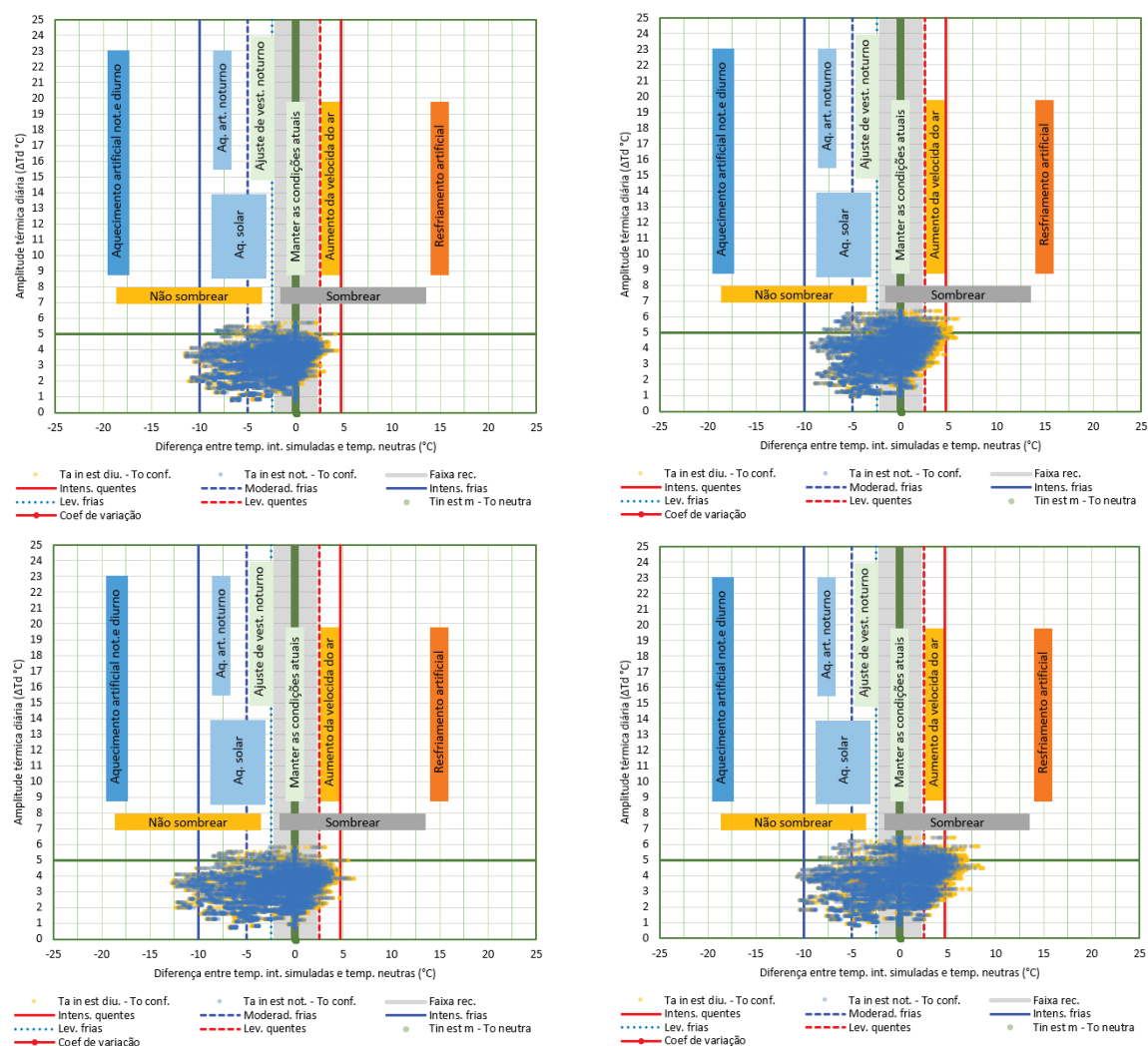
FONTE: A autora (2024).

Com base na análise climática, conclui-se que a cidade de Ivaí demanda soluções construtivas que elevem as temperaturas internas, de modo a mantê-las dentro da faixa de conforto de maneira mais eficaz do que nos cenários analisados anteriormente. Além disso, são necessárias estratégias rigorosas de inércia térmica para minimizar as variações diárias de temperatura. A partir dessa análise, será investigado como as condições de contato com o solo e os diferentes cenários construtivos responderam a esse contexto climático específico.

5.1.2.1 CONTATO COM O SOLO

A partir da análise climática, verificou-se que a edificação simulada em contato com o solo apresentou temperaturas internas melhoradas em todos os cenários construtivos, quando comparadas às temperaturas externas. Houve uma redução significativa na amplitude térmica média, que não ultrapassou 7°C ao longo do dia, e as temperaturas internas migraram para a faixa de conforto em parte do tempo, conforme ilustrado na FIGURA 41. A seguir, os resultados serão detalhados para mostrar a resposta da edificação em cada um dos cenários.

FIGURA 41 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA IVÁI NO CENÁRIO EM CONTATO COM O SOLO



FONTE: A autora (2025).

A análise dos dados do cenário 1.1 revela que, embora haja certa dispersão dos pontos, especialmente à esquerda do gráfico, as temperaturas internas são predominantemente confortáveis em 52% do tempo. Além disso, a amplitude térmica diária é considerada baixa em 98% do tempo, com um valor máximo de 5,7°C. Quanto à estatística descritiva das diferenças entre as temperaturas horárias e as temperaturas neutras, observa-se uma diferença máxima positiva de 4,3°C e uma diferença máxima negativa de 11,5°C, indicando uma maior variação para temperaturas abaixo da neutra.

Ao analisar o segundo cenário e comparar com o cenário 1.1, observa-se que a adição de isolamento na alvenaria resulta em uma maior concentração de

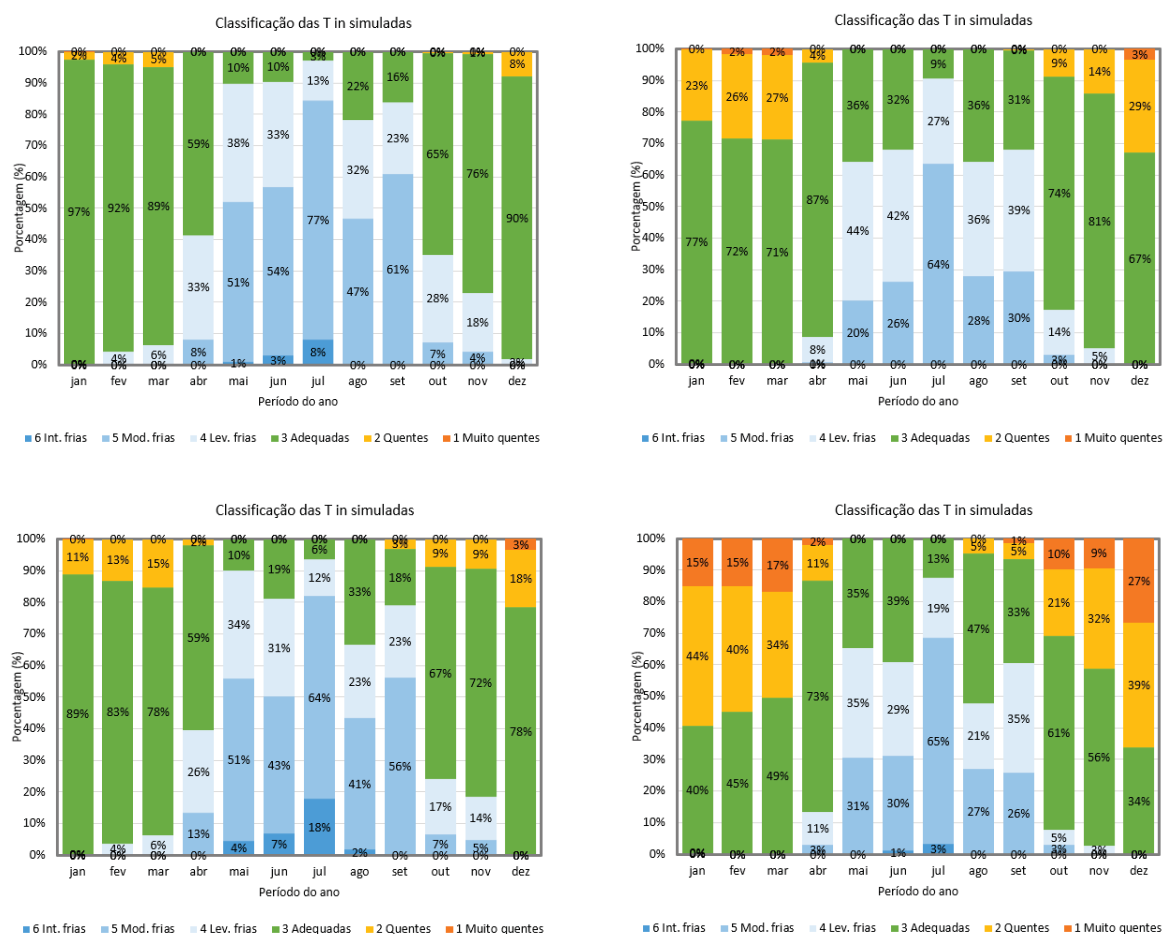
temperaturas internas dentro da faixa de conforto, indicando uma atenuação térmica. Embora ainda haja alguma dispersão para a esquerda, essa tendência é menos acentuada, sugerindo que o isolamento na alvenaria auxilia na redução das perdas de calor. No entanto, a amplitude térmica diária é relativamente elevada, e há um aumento na ocorrência de temperaturas “quentes” e “intensamente quentes”. Nesse cenário, as temperaturas internas permanecem dentro da faixa de conforto por 56% do tempo, representando uma melhora em relação ao cenário anterior, mesmo que não muito significativa.

No cenário 1.3, representado pelo gráfico inferior esquerdo, embora a amplitude térmica seja mais atenuada, a dispersão das temperaturas se concentra novamente à esquerda do gráfico, assim como no cenário 1.1. Nesse caso, as temperaturas internas permanecem predominantemente confortáveis, embora com uma leve redução, representando 51% do tempo. A diferença máxima positiva entre as temperaturas horárias e as temperaturas neutras é de $6,0^{\circ}\text{C}$, enquanto a diferença máxima negativa é de $9,2^{\circ}\text{C}$, indicando uma variação térmica ainda presente, com maior intensidade para temperaturas mais frias em comparação ao cenário 1.1.

O quarto cenário, ilustrado no gráfico inferior direito, apresenta o pior desempenho entre todos os analisados. A dispersão das temperaturas indica que o excesso de isolamento pode estar comprometendo o desempenho térmico da edificação, resultando em picos de temperatura mais elevados. Ao comparar com o cenário 1.2, observa-se que a adição de isolamento na laje, em especial, tem um efeito negativo, aumentando a ocorrência de temperaturas “intensamente frias” e “intensamente quentes”. Nesse cenário, as temperaturas internas não são predominantemente confortáveis, com 56% do tempo em condições de desconforto, seja por frio ou calor.

Ao considerar uma visão anual, a ferramenta fornece uma análise detalhada da classificação das temperaturas internas mensais simuladas, conforme ilustrado na FIGURA 42.

FIGURA 42 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA IVAÍ PARA EDIFICAÇÕES EM CONTATO COM O SOLO



FONTE: A autora (2025).

No primeiro cenário, durante os meses de outubro a abril, as temperaturas internas simuladas permanecem predominantemente dentro da faixa considerada “adequada”. No entanto, nos meses de inverno, especialmente em junho e julho, observa-se uma redução significativa das temperaturas “adequadas”, com um aumento da predominância das classificadas como “moderadamente frias”, atingindo 54% e 77%, respectivamente. Além disso, nesses meses, também há ocorrência de temperaturas “intensamente frias”, sugerindo que esse cenário pode ser ineficaz nos períodos mais frios do ano, embora apresente um desempenho satisfatório nos meses mais quentes.

No segundo cenário, representado pelo gráfico superior direito, observa-se um aumento das temperaturas classificadas como “adequadas” durante os períodos frios e uma redução dessas mesmas temperaturas nos períodos quentes, em comparação ao cenário anterior. Entre os meses de outubro e março, há um aumento

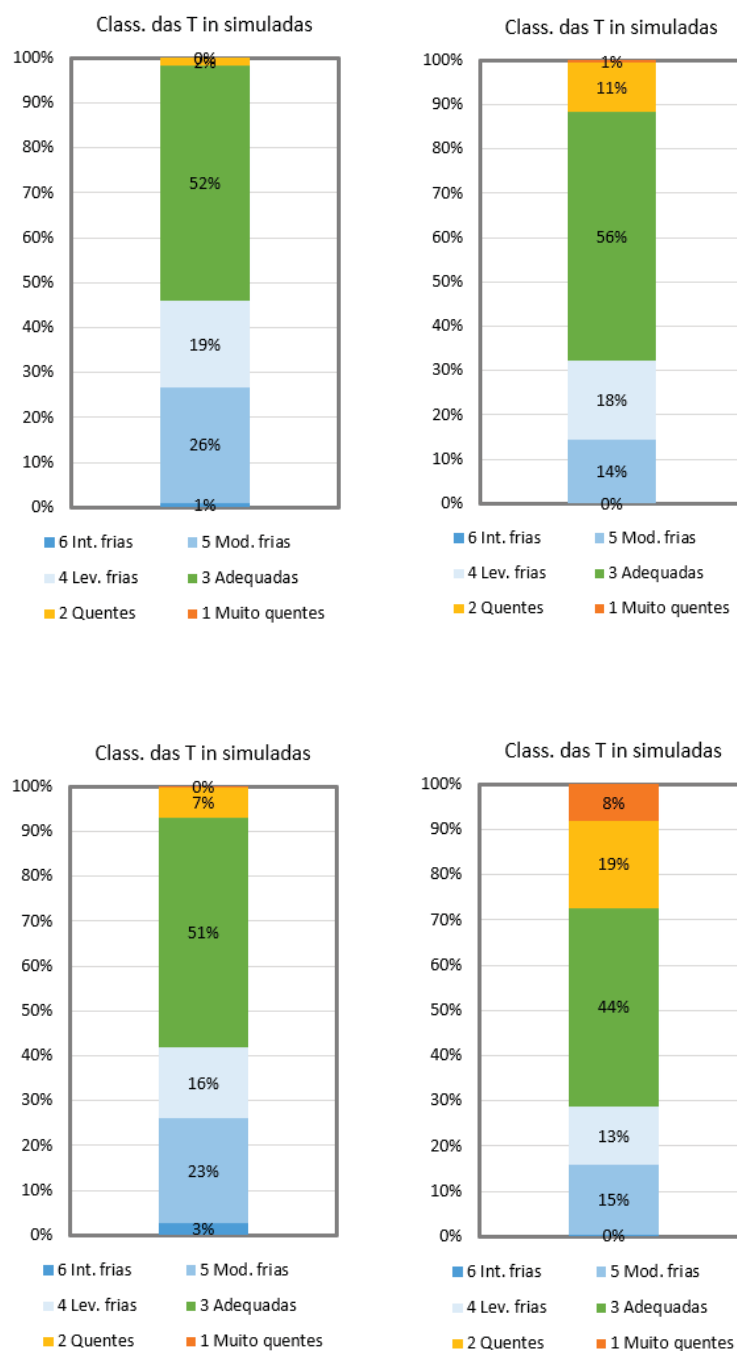
significativo na ocorrência de temperaturas “muito quentes”, enquanto nos meses de junho e julho as temperaturas “intensamente frias” são eliminadas. Além disso, as porcentagens de temperaturas “moderadamente frias” diminuem, migrando levemente para as categorias “levemente frias” ou “adequadas” ao longo de quase todo o ano. Esses resultados sugerem que o isolamento na alvenaria é eficaz para melhorar o conforto térmico nos períodos mais frios, mas pode comprometer o desempenho da edificação nos meses mais quentes.

No terceiro cenário, ilustrado pelo gráfico inferior esquerdo, a distribuição das temperaturas internas apresenta semelhanças com o primeiro cenário, porém, com um desempenho geral inferior. Este cenário destaca-se negativamente, com uma maior incidência de temperaturas “intensamente frias”, que alcançam 18% em julho, além de uma predominância de temperaturas “moderadamente frias” em três meses do ano. Através dos resultados, sugere-se que a presença de isolamento na laje, ao invés de melhorar o conforto térmico, parece ter criado uma barreira à entrada de calor, resultando em temperaturas internas mais baixas durante os meses de inverno, o que agrava o desconforto térmico nessas estações.

No quarto cenário, representado pelo gráfico inferior direito, a combinação de isolamento na alvenaria e na laje de concreto resulta em um desempenho térmico menos equilibrado ao longo do ano. Observa-se uma redução nas ocorrências de temperaturas “levemente frias” e “moderadamente frias”, especialmente no inverno. No entanto, essa melhoria nos períodos frios é acompanhada por um aumento expressivo das temperaturas classificadas como “quentes” e “muito quentes”, tornando o ambiente desconfortável nos meses mais quentes. Consequentemente, este cenário apresenta a menor incidência de temperaturas “adequadas” ao longo do ano, indicando um comprometimento no conforto térmico geral da edificação.

Considerando a média geral do ano todo a maior porcentagem de temperaturas adequadas o melhor cenário é o 1.2 com 56%. A comparação das médias anuais pode ser observada na FIGURA 43.

FIGURA 43 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS ANUAIS SIMULADAS PARA IVAÍ



FONTE: A autora (2025).

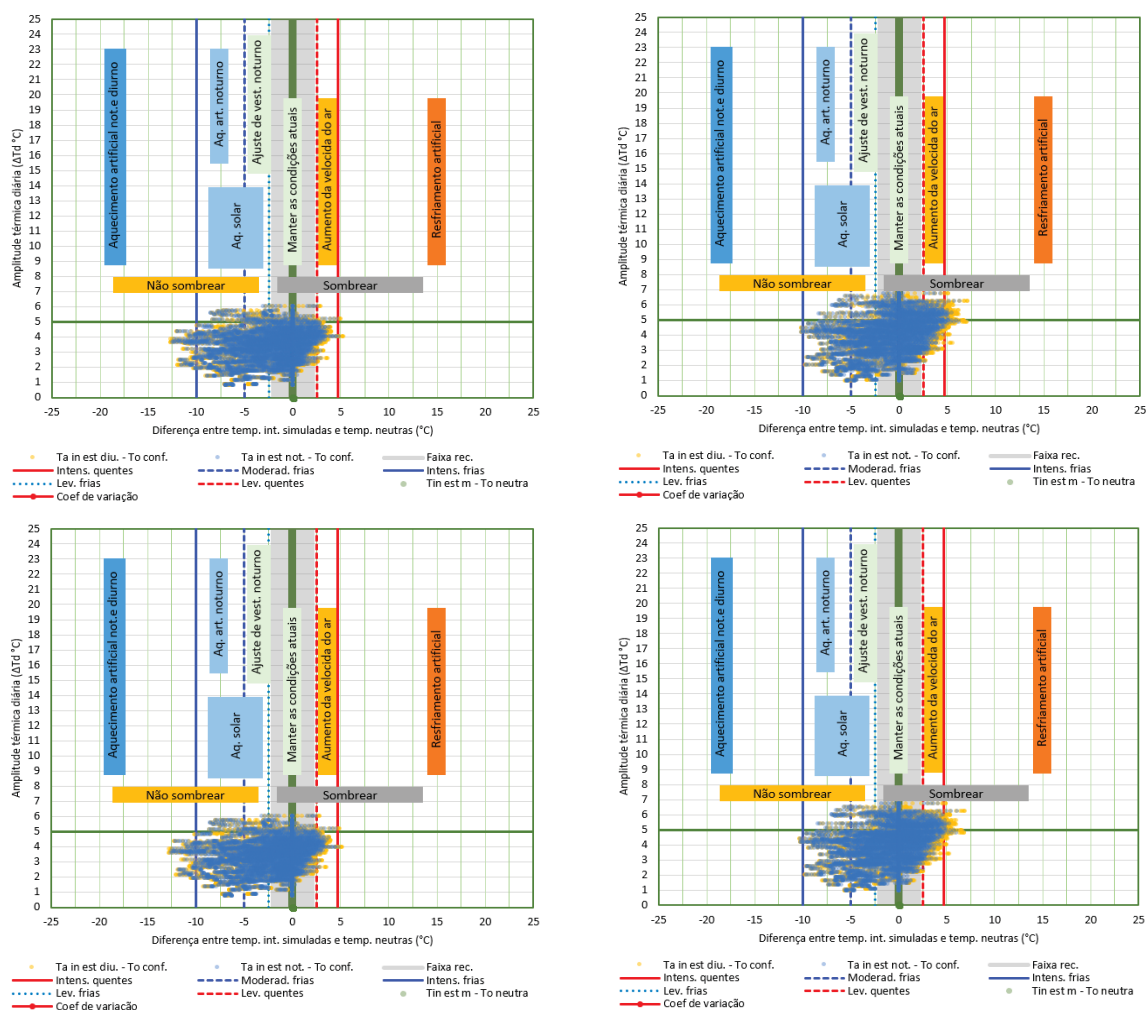
Em geral, a análise dos gráficos aponta o cenário 1.2 como o mais eficiente, sugerindo que o isolamento térmico aplicado na envoltória proporciona o melhor desempenho ao longo do tempo, mantendo as temperaturas internas mais próximas da faixa de conforto.

5.1.2.2 ELEVADA COM CÂMARA DE NÃO VENTILADA (COM PORÃO)

Considerando a análise climática, a edificação simulada com elevação sobre porão apresentou temperaturas internas melhoradas em todos os cenários construtivos, especialmente em comparação com as temperaturas externas.

Houve uma correspondência notável entre os cenários analisados, destacando semelhanças entre os cenários 2.1 (sem isolamento) e 2.3 (isolamento apenas na laje), assim como entre os cenários 2.2 (isolamento somente na alvenaria) e 2.4 (isolamento tanto na alvenaria quanto na laje), conforme ilustrado na FIGURA 44. A seguir, os resultados serão detalhados, demonstrando o desempenho térmico da edificação em cada cenário.

FIGURA 44 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA IVAÍ NO CENÁRIO ELEVADA COM PORÃO



FONTE: A autora (2025).

Em todos os gráficos, a maioria dos pontos se concentra na parte inferior, indicando que a amplitude térmica diária foi mantida em níveis baixos em boa parte do tempo. Além disso, a diferença entre a temperatura interna simulada e a temperatura neutra também está frequentemente posicionada à esquerda, o que sugere que as condições internas experimentaram temperaturas frias durante grande parte do período analisado.

No cenário 2.1, representado pelo gráfico superior esquerdo, observamos uma baixa variação térmica, com acentuada dispersão à esquerda. A recomendação para manter as condições atuais é válida para 51,1% do tempo, logo as temperaturas internas são predominantemente confortáveis. Neste cenário, a diferença máxima positiva entre as temperaturas horárias e as temperaturas neutras é de 5,3°C, enquanto a diferença máxima negativa atinge 12,6°C. Um ponto crítico nesse cenário é a alta frequência com que as temperaturas caem na faixa classificada como "moderadamente frias".

O cenário 2.2, ilustrado pelo gráfico superior direito, apresenta uma maior concentração de pontos dentro da faixa de conforto em comparação ao primeiro cenário, indicando uma redução nos extremos frios da temperatura interna. No entanto, essa melhoria ocorre juntamente com um aumento na flutuação térmica, resultando em uma maior amplitude térmica ao longo do dia. Nesse cenário, as temperaturas classificadas como "adequadas" representam 52% do tempo. Além disso, nota-se um aumento na ocorrência de temperaturas que ultrapassam a faixa de "intensamente quentes", sugerindo um impacto negativo nos períodos mais quentes do ano.

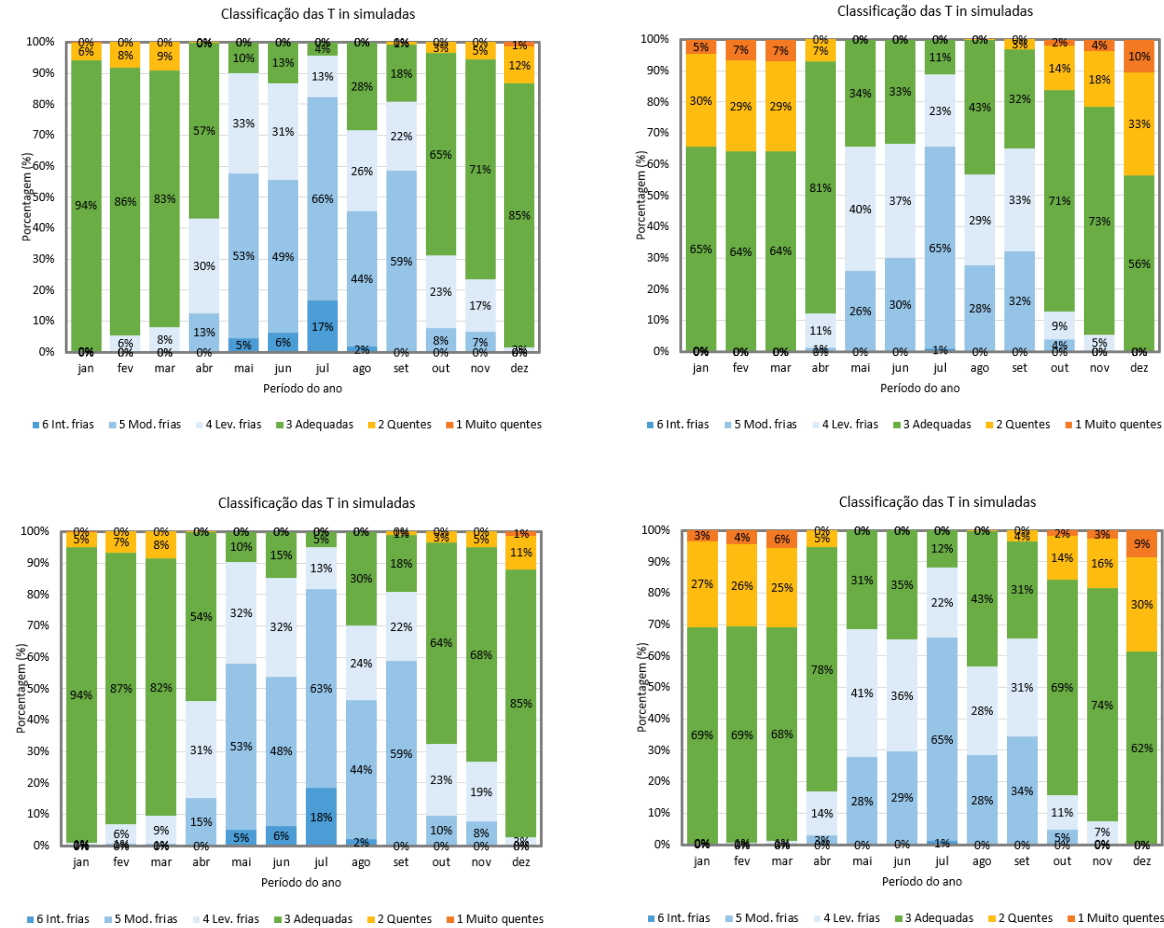
O cenário 2.3, ilustrado no gráfico inferior esquerdo, representa edificações com alvenaria convencional e laje com isolamento. Esse cenário apresenta um comportamento térmico bastante semelhante ao do primeiro cenário, com amplitude térmica e dispersão comparáveis. As temperaturas simuladas para o ambiente interno são predominantemente confortáveis em 51% do tempo, assim como no cenário 2.1. Além disso, a diferença máxima positiva entre as temperaturas horárias e neutras é de 5,2°C, enquanto a diferença máxima negativa alcança 12,7°C, indicando uma variação térmica significativa, especialmente para temperaturas mais baixas.

No cenário 2.4, ilustrado no gráfico inferior direito, o desempenho térmico se assemelha bastante ao do segundo cenário. A amplitude térmica diária média é de 6,7°C, exatamente igual à do cenário 2.2, indicando que a adição do isolamento na

laje não resultou em melhorias significativas. A diferença máxima positiva entre as temperaturas horárias e as temperaturas neutras é de 6,9°C, enquanto a diferença máxima negativa atinge 10,3°C. Nesse contexto, a recomendação para manter as condições atuais é válida em 53,1% do tempo, a maior porcentagem entre todos os cenários analisados.

Considerando a análise ao longo do ano, a ferramenta fornece dados sobre a classificação das temperaturas internas simuladas para cada mês, conforme ilustrado na FIGURA 45.

FIGURA 45 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA IVAÍ PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS COM PORÃO



FONTE: A autora (2025).

No primeiro cenário, a análise das temperaturas internas ao longo do ano revela uma predominância do desconforto térmico devido ao frio em grande parte dos meses, especialmente entre maio e setembro. Durante esse período, as temperaturas moderadamente frias atingem picos de 66%, enquanto as levemente frias chegam a

33%. De outubro a março, prevalecem temperaturas classificadas como "adequadas". Nos meses mais frios, como maio, junho e julho, as temperaturas intensamente frias se destacam, com uma presença limitada de temperaturas adequadas, intensificando o desconforto térmico nesses períodos.

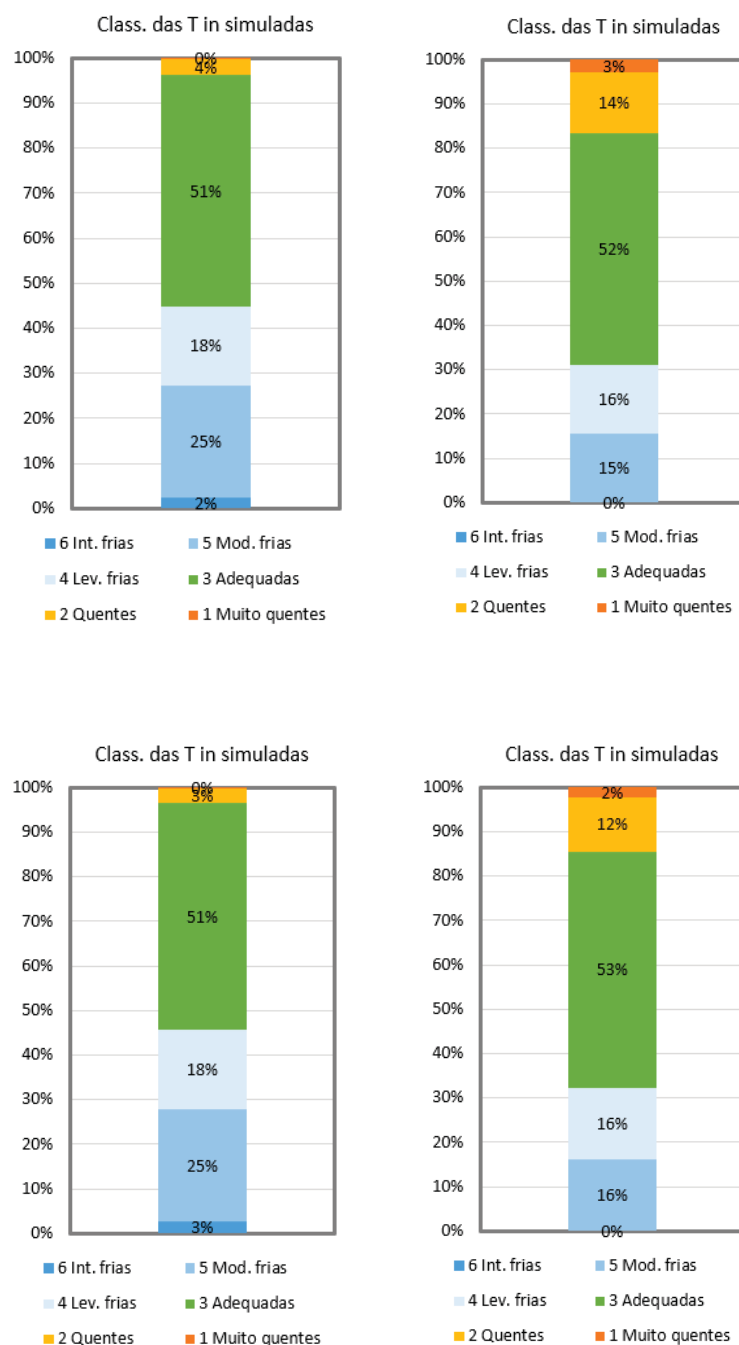
No segundo cenário, verifica-se uma melhoria em relação ao primeiro, especialmente durante os períodos mais frios. A ocorrência de temperaturas "moderadamente frias" diminuiu de forma geral, enquanto as temperaturas "intensamente frias" foram completamente eliminadas. No entanto, entre outubro e março, houve um aumento significativo das temperaturas classificadas como "quentes" e "muito quentes", sugerindo que o isolamento implementado teve um impacto negativo no conforto térmico durante os meses mais quentes.

No cenário 2.3, a distribuição das temperaturas ao longo do ano mostra que, durante o verão, uma parcela significativa dos dias é classificada como "adequada", enquanto, no inverno, predominam as temperaturas "frias", mantendo a tendência observada no primeiro cenário. Nota-se um leve aumento nas temperaturas intensamente frias, que atingem um pico de 18% em julho. A semelhança dos resultados com o cenário 2.1, que não possui isolamento, indica que a adição de isolamento na laje tem um impacto pouco expressivo no desempenho térmico.

No último cenário, que inclui isolamento tanto na alvenaria quanto na laje, a distribuição das temperaturas adequadas ao longo do ano se assemelha significativamente à do cenário 2.2, reforçando a percepção de que o isolamento adicional na laje tem um impacto limitado no desempenho térmico. Nota-se uma leve atenuação das temperaturas frias e quentes, sugerindo que o isolamento contribui para a aproximação das temperaturas à faixa de conforto. No entanto, o desempenho geral permanece semelhante ao do cenário 2.2, resultando em uma média global praticamente idêntica.

Ao analisar o cenário mais favorável com base na maior porcentagem de temperaturas adequadas ao longo do ano, os cenários 2.2 e 2.3 se destacam, apresentando desempenhos praticamente idênticos. A comparação das médias anuais, pode ser visualizada na FIGURA 46.

FIGURA 46 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA IVAÍ PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS COM PORÃO



FONTE: A autora (2025).

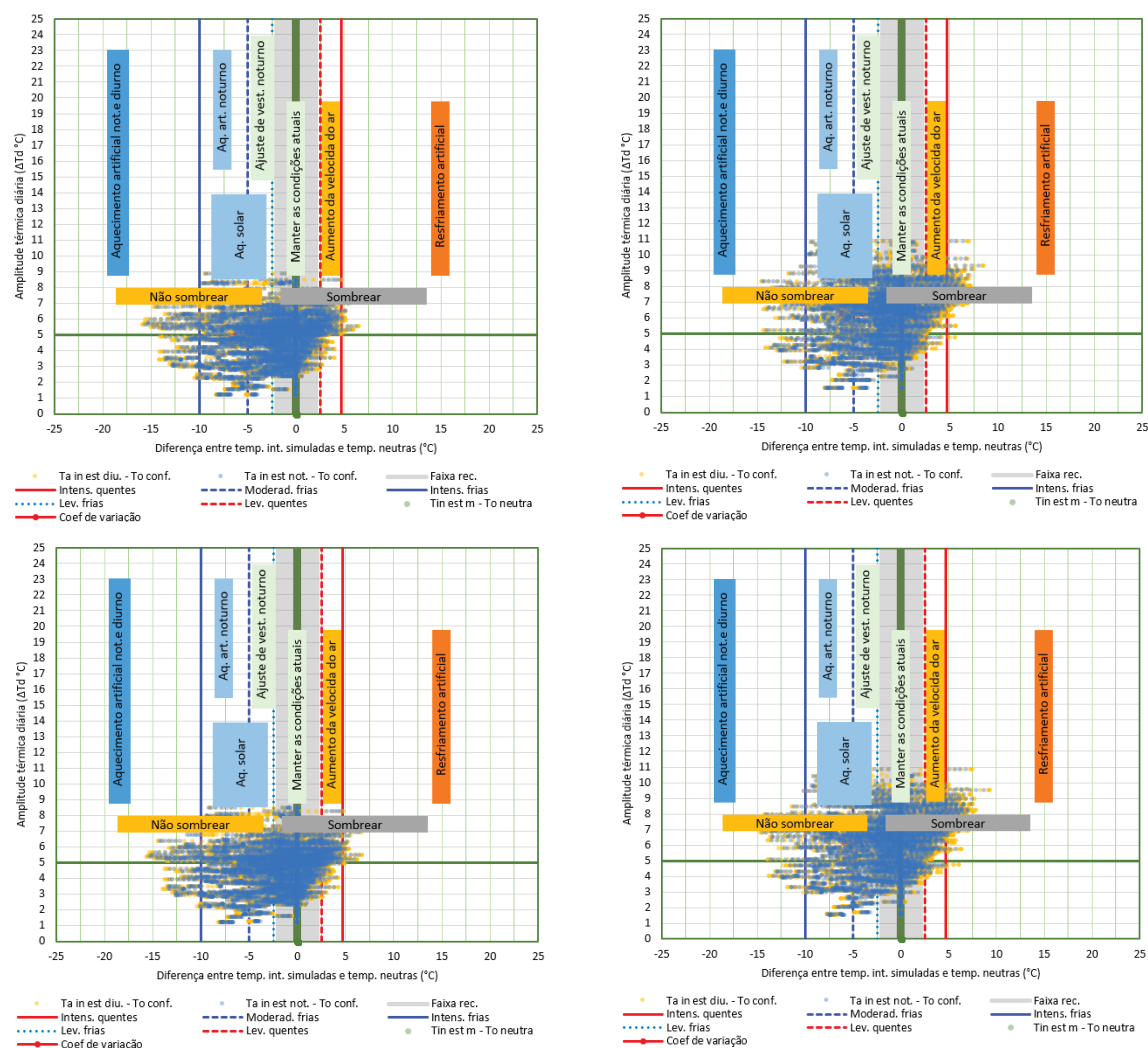
A partir dos gráficos analisados, os cenários 2.2 e 2.3 destacam-se por apresentarem uma maior proporção de temperaturas dentro da faixa de conforto térmico, superando os cenários 2.1 e 2.4. No entanto, ao observar que os resultados não mostram mudanças significativas quando o isolamento na laje é combinado com

o isolamento na alvenaria, pode-se concluir que o isolamento na laje tem um impacto limitado.

5.1.2.3 ELEVADA COM CÂMARA DE AR VENTILADA (SOBRE PILOTIS)

A edificação simulada elevada sobre pilotis exibiu temperaturas internas melhores em todos os cenários construtivos, em relação às temperaturas externas. A tendência de semelhança entre os cenários se manteve, similar ao observado no grupo de casos anterior. Notou-se uma semelhança significativa entre os cenários 3.1 (sem isolamento) e 3.3 (isolamento apenas na laje), assim como entre os cenários 3.2 (isolamento somente na alvenaria) e 3.4 (isolamento tanto na alvenaria quanto na laje), conforme ilustrado na FIGURA 47.

FIGURA 47 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA IVAÍ NO CENÁRIO ELEVADA COM CÂMARA DE AR VENTILADA



FONTE: A autora (2025).

O gráfico superior esquerdo, que representa o cenário 3.1 (alvenaria convencional e laje de concreto convencional), mostra uma dispersão significativa ao longo do eixo que representa a diferença entre as temperaturas internas simuladas e as temperaturas neutras, especialmente em direção às temperaturas mais baixas. Observa-se que as temperaturas frequentemente atingem a faixa de "intensamente frias". Nesse cenário, a diferença máxima positiva entre as temperaturas horárias e as temperaturas neutras é de 6,5°C, enquanto a diferença máxima negativa chega a 15,9°C.

No gráfico superior direito, correspondente ao cenário 3.2 (alvenaria com isolamento e laje de concreto convencional), observa-se um aumento significativo na amplitude térmica, com uma migração das temperaturas, sendo que uma parte delas

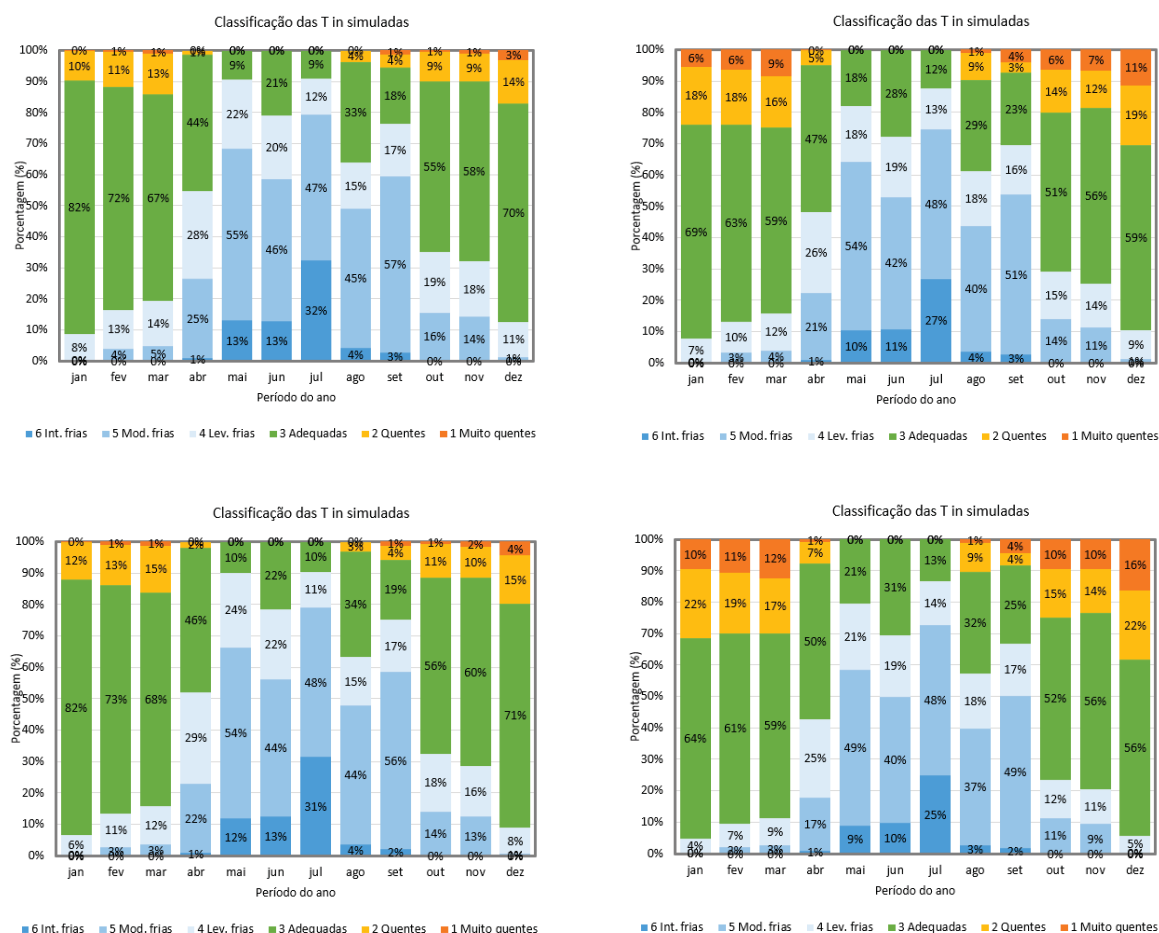
se desloca para a faixa entre as temperaturas "levemente quentes" e "intensamente quentes". Nesse cenário, a diferença máxima positiva entre as temperaturas horárias e as temperaturas neutras é de $8,6^{\circ}\text{C}$, enquanto a diferença máxima negativa atinge 16°C . Em comparação com o cenário anterior, há uma piora no desempenho térmico, com temperaturas predominantemente desconfortáveis em 57% do tempo, representando um aumento de 2%.

O gráfico inferior esquerdo, que representa o cenário 3.3 (alvenaria convencional e laje com isolamento), resulta em um comportamento térmico semelhante ao do cenário 3.1. Assim como no primeiro cenário, a distribuição das temperaturas é dispersa, e a capacidade de mantê-las dentro da faixa de conforto é reduzida. As amplitudes térmicas diárias máximas são bastante próximas nos dois cenários, com $8,4^{\circ}\text{C}$ no cenário 3.3 e $8,8^{\circ}\text{C}$ no cenário 3.1. Da mesma forma, as diferenças máximas entre as temperaturas horárias e as neutras são similares, atingindo $6,8^{\circ}\text{C}$ de diferença positiva e $15,6^{\circ}\text{C}$ de diferença negativa. Nesse cenário, as temperaturas internas também são predominantemente desconfortáveis, ocorrendo em 54% do tempo.

O gráfico inferior direito, correspondente ao cenário 3.4, apresenta uma dispersão mais acentuada, indicando maior variação térmica. Nesse caso, a diferença máxima positiva entre as temperaturas horárias e as temperaturas neutras é de $9,4^{\circ}\text{C}$, enquanto a diferença máxima negativa atinge $15,6^{\circ}\text{C}$, configurando o maior intervalo entre todos os cenários analisados. As temperaturas frequentemente ultrapassam os limites das faixas de "intensamente frias" e "intensamente quentes", evidenciando um desempenho térmico mais instável. Esse cenário apresenta o pior desempenho, com temperaturas predominantemente desconfortáveis em 57% do tempo.

Ao analisar o período de um ano, a ferramenta fornece detalhes sobre a classificação das temperaturas internas mensais simuladas, conforme mostrado na FIGURA 48.

FIGURA 48 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA IVAÍ PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS SOBRE PILOTIS



FONTE: A autora (2025).

Ao analisar o gráfico de classificação das temperaturas internas simuladas, observa-se que, no cenário superior esquerdo (3.1), as temperaturas "moderadamente frias" predominam nos meses mais frios do ano, especialmente de maio a setembro, período em que mais de 40% das temperaturas internas se enquadram nessa categoria. Esse cenário, juntamente com o cenário 3.3 (inferior esquerdo), apresenta a maior frequência de temperaturas "moderadamente frias". Além disso, nos meses de maio, junho e julho, há registros de temperaturas "intensamente frias", com picos de até 32%.

O segundo cenário apresenta uma melhoria em relação ao primeiro, especialmente nos períodos mais frios, com um aumento na proporção de temperaturas classificadas como "adequadas". Observa-se que algumas temperaturas "levemente frias" migraram para "adequadas", indicando uma aproximação maior da faixa de conforto, embora o frio ainda seja predominante

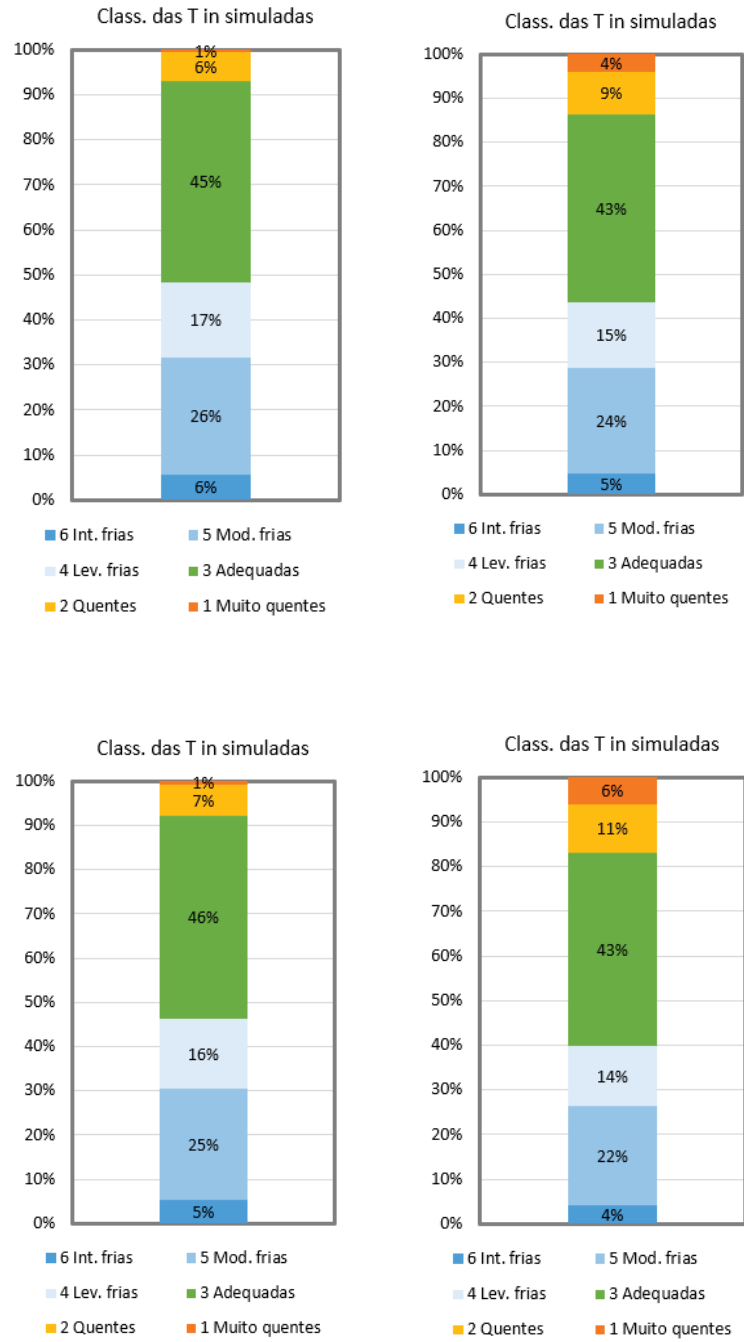
nesses períodos. No entanto, em alguns meses, também se nota uma diminuição na porcentagem de temperaturas adequadas, acompanhada por um aumento de temperaturas quentes, especialmente nos meses de outubro a março.

O terceiro cenário se assemelha ao primeiro, exibindo uma distribuição de temperaturas semelhante, porém com algumas variações. Nos meses mais frios, observa-se uma leve redução nas temperaturas "intensamente frias", acompanhada por um pequeno aumento na proporção de temperaturas "adequadas". No entanto, essas mudanças não são significativamente expressivas.

O último cenário segue a tendência do cenário 3.2 na distribuição de temperaturas ao longo do ano, apresentando apenas pequenas variações. Seu desempenho é bastante similar, com um leve aumento nas temperaturas "quentes" e "muito quentes", enquanto nos meses mais frios há um acréscimo na proporção de temperaturas "adequadas". No geral, o comportamento de ambos os cenários é semelhante, sem grandes alterações na distribuição térmica, o que sugere a baixa influência do isolamento na laje.

Ao avaliar o melhor cenário com base na maior porcentagem de temperaturas adequadas ao longo do ano, os cenários 3.1 e 3.3 se destacam. Ainda assim, a comparação das médias anuais, ilustrada na FIGURA 49, revela que todos os cenários são bastante semelhantes, sem que nenhum se destaque de forma significativa em relação ao outro.

FIGURA 49 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA IVAÍ PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS SOBRE PILOTIS



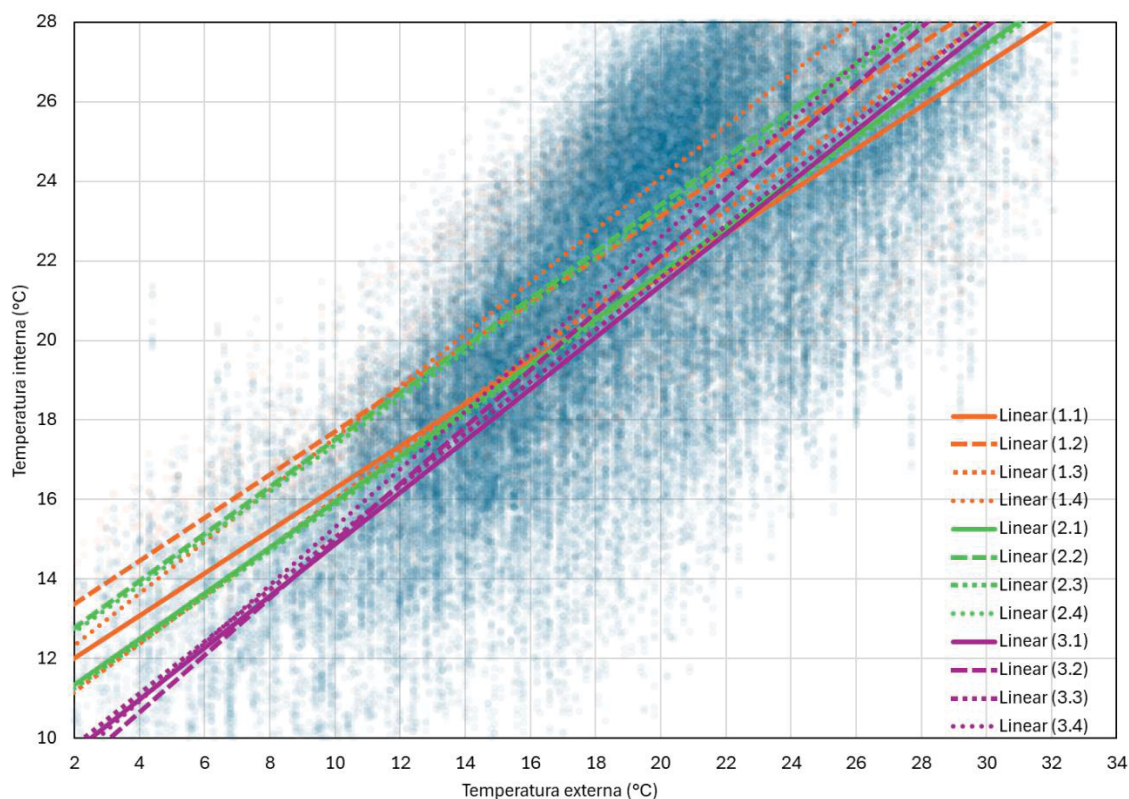
FONTE: A autora (2025).

5.1.2.4 COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS

São apresentados nessa seção os resultados das simulações através de gráficos que ilustram tanto a variação térmica interna em função das temperaturas externas (FIGURA 52) quanto a porcentagem de horas em que as temperaturas

internas permanecem dentro, abaixo ou acima da faixa de conforto térmico (FIGURA 51) para a cidade de Ivaí.

FIGURA 50 – RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA INTERNA E EXTERNA PARA DIFERENTES CENÁRIOS DE EDIFICAÇÃO EM IVAÍ



FONTE: A autora (2025).

Para a cidade de Ivaí, os cenários de edificações em contato com o solo apresentam variações diferentes de desempenho térmico conforme o isolamento adotado. Observa-se que o cenário 1.1 (sem isolamento) tem uma inclinação menor do que o cenário 1.4 (isolamento na alvenaria e na laje), sugerindo que, paradoxalmente, o cenário sem isolamento oferece uma menor variação de temperatura interna em resposta às variações externas. Este comportamento pode indicar que o solo está atuando como um moderador térmico mais eficaz do que o isolamento combinado de alvenaria e laje no contexto climático de Ivaí.

O cenário 1.1 (sem isolamento) continua apresentando a menor inclinação, o que indica o melhor desempenho térmico em termos de estabilidade da temperatura interna. Esse comportamento sugere que essa configuração é a mais eficaz na

minimização das flutuações térmicas, garantindo maior estabilidade térmica ao longo do tempo.

O cenário 1.2 exibe uma inclinação semelhante à do 1.1, porém sua linha de tendência está posicionada mais acima no gráfico, indicando que, embora a variação térmica seja próxima, a temperatura interna média tende a ser mais elevada.

Já o cenário 1.3 apresenta a segunda maior inclinação, evidenciando uma resposta térmica mais sensível às variações da temperatura externa.

Por fim, o cenário 1.4 (isolamento na alvenaria e na laje) possui a maior inclinação entre os cenários analisados, demonstrando que essa estratégia de isolamento é a menos eficaz no controle térmico, resultando em uma maior variação da temperatura interna e menor estabilidade térmica.

Para as edificações elevadas não ventiladas (com porão), os resultados indicam um desempenho térmico distinto. As linhas dos cenários 2.1 (sem isolamento) e 2.3 (isolamento somente na laje) praticamente se sobrepõem, mostrando inclinações similares. Ambas as linhas apresentam uma inclinação maior do que os mesmos cenários no grupo anterior, sugerindo uma variação térmica interna significativa em resposta às variações externas.

Os cenários 2.2 (isolamento somente na alvenaria) e 2.4 (isolamento na alvenaria e na laje) também apresentam linhas de tendência próximas, mas com posição acima dos cenários 2.1 e 2.4.

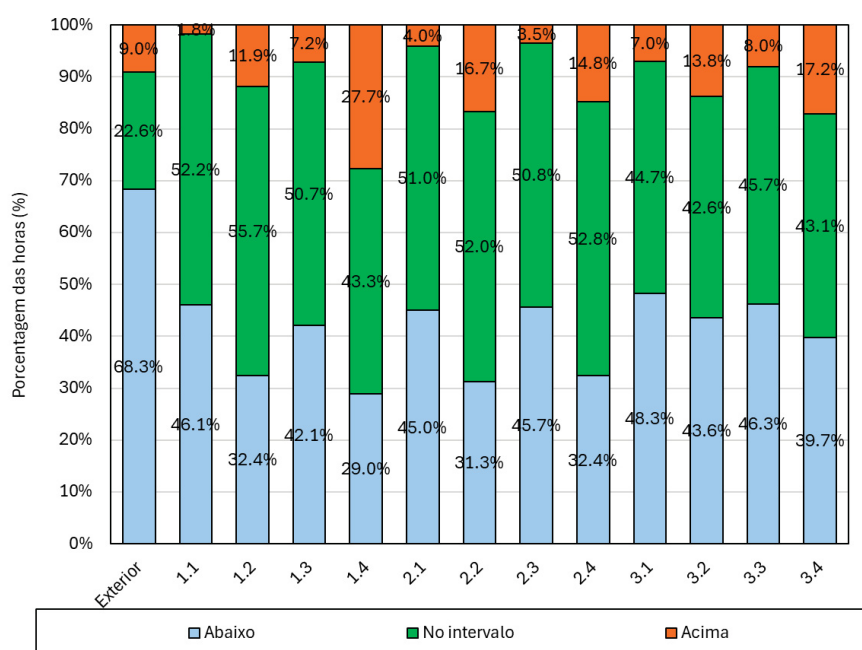
Nos cenários do Grupo 3, que analisam edificações elevadas ventiladas (sobre pilotis), observa-se que as linhas de tendência são geralmente mais inclinadas em comparação com os cenários dos Grupos 1 e 2. Isso indica que a ventilação sob a edificação pode ter um efeito menos favorável no desempenho térmico, resultando em uma maior variação de temperatura interna em resposta às flutuações externas.

O cenário 3.1 (sem isolamento) apresenta a menor inclinação, sugerindo que, sem isolamento, a edificação elevada ventilada é mais estável às variações térmicas externas, ainda que inferior aos outros grupos. Os cenários 3.2 (isolamento somente na alvenaria) e 3.4 (isolamento na alvenaria e na laje) apresentam inclinações ligeiramente maiores, indicando uma piora no controle térmico.

O cenário 3.3 (isolamento somente na laje) apresenta uma linha de tendência inclinada muito próxima ao do cenário 3.1, reforçando a ideia de que a ventilação sob a edificação, por si só, não proporciona um controle térmico estável.

Após a análise da relação entre a temperatura interna e externa para os diferentes cenários na cidade de Ivaí, a FIGURA 51 apresenta a porcentagem de horas em que as temperaturas internas permaneceram abaixo, dentro e acima do intervalo de conforto térmico.

FIGURA 51 – DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS HORAS DE TEMPERATURA INTERNA DENTRO, ABAIXO E ACIMA DO INTERVALO DE CONFORTO TÉRMICO PARA DIFERENTES CENÁRIOS EM IVAÍ



FONTE: A autora (2025).

A primeira barra do gráfico, com 22,6% das horas no intervalo de conforto, corresponde às temperaturas externas da cidade de Ivaí, demonstrando o perfil climático mais restritivo da cidade.

Para o Grupo 1, que representa edificações em contato direto com o solo, o gráfico revela que o cenário 1.2 (isolamento na alvenaria) apresenta o maior percentual de horas dentro do intervalo de conforto térmico, com 55,7%.

O cenário 1.1 (sem isolamento) apresenta um bom desempenho, com 52,2% das horas dentro do intervalo de conforto, embora registre mais ocorrências de temperaturas abaixo dessa faixa. Em contraste, o cenário 1.4 (com isolamento na alvenaria e na laje) possui apenas 43,3% das horas dentro do intervalo de conforto, sugerindo que a presença de isolamento não garante uma maior proporção de horas

confortáveis. Além disso, observa-se um aumento nas ocorrências de temperaturas acima da faixa de conforto.

No Grupo 2, que analisa edificações elevadas não ventiladas (com porão), os cenários 2.1 (sem isolamento) e 2.3 (isolamento somente na laje) apresentam 56,9% das horas fora do intervalo de conforto, o que evidencia uma alta vulnerabilidade térmica sem o isolamento adequado.

Por outro lado, os cenários 2.2 (isolamento somente na alvenaria) e 2.4 (isolamento na alvenaria e na laje) têm desempenhos semelhantes, com 52% e 52,8% das horas dentro do intervalo de conforto, respectivamente. Esses resultados confirmam a eficácia do isolamento na alvenaria, sendo um pouco mais eficaz quando combinado com o isolamento na laje.

Para o Grupo 3, que representa edificações elevadas ventiladas (sobre pilotis), o cenário 3.1 (sem isolamento) possui a maior porcentagem de horas fora do intervalo de conforto, com 48,3%.

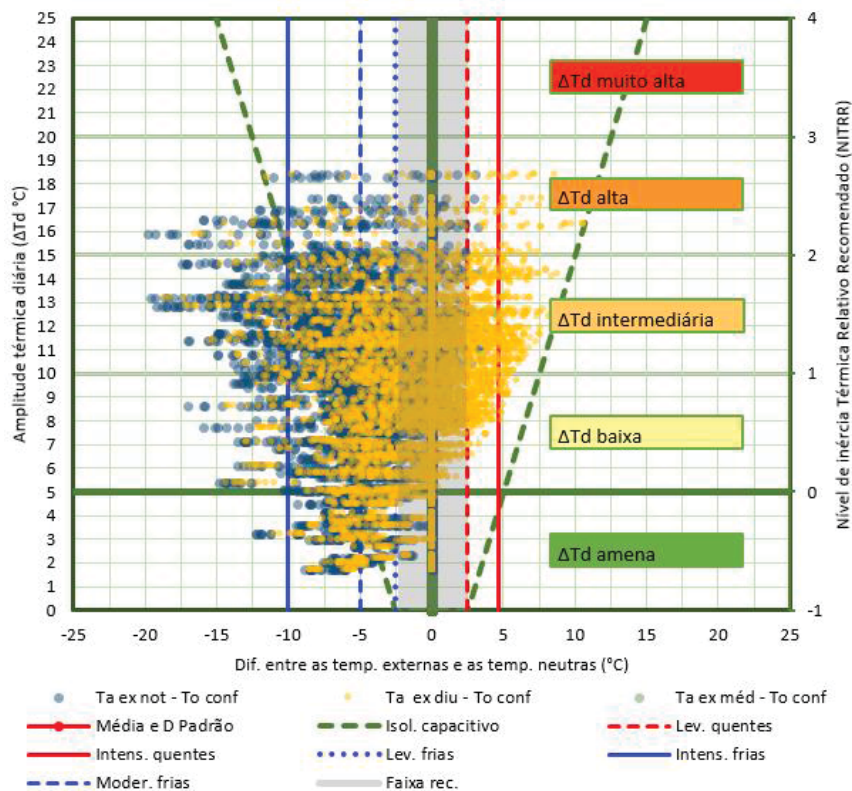
O cenário 3.4 (isolamento na alvenaria e na laje) apresenta o melhor desempenho dentro do intervalo de conforto, com 43,1% das horas, sugerindo que o isolamento combinado é melhor nesse contexto para minimizar as variações térmicas. O cenário 3.3 (isolamento somente na laje) tem 45,7% das horas dentro do intervalo de conforto, apenas 1% melhor do que o cenário que não possui isolamento.

A análise combinada entre os Diagramas Antropoclimáticos e a comparação entre os cenários para a cidade de Ivaí, revela que a estratégia de contato com o solo com isolamento na alvenaria é a mais eficaz. Este cenário proporciona um equilíbrio entre reduzir a variação térmica e manter o conforto térmico ao longo do tempo.

5.1.3 CAMPO MOURÃO

Na FIGURA 52, temos plotados no Diagrama Antropoclimático 1 as médias horárias das temperaturas da cidade de Campo Mourão. A partir da análise do gráfico conclui-se que as temperaturas possuem grande flutuação, ou seja, o clima é caracterizado por uma alta amplitude térmica diária. Além disso é possível observar temperaturas majoritariamente à esquerda da faixa recomendada de conforto, com diferenças entre as temperaturas externas e neutras chegando na casa do -19 °C, na escala de um dia, sugerindo desta forma, que há predominantemente desconforto por frio.

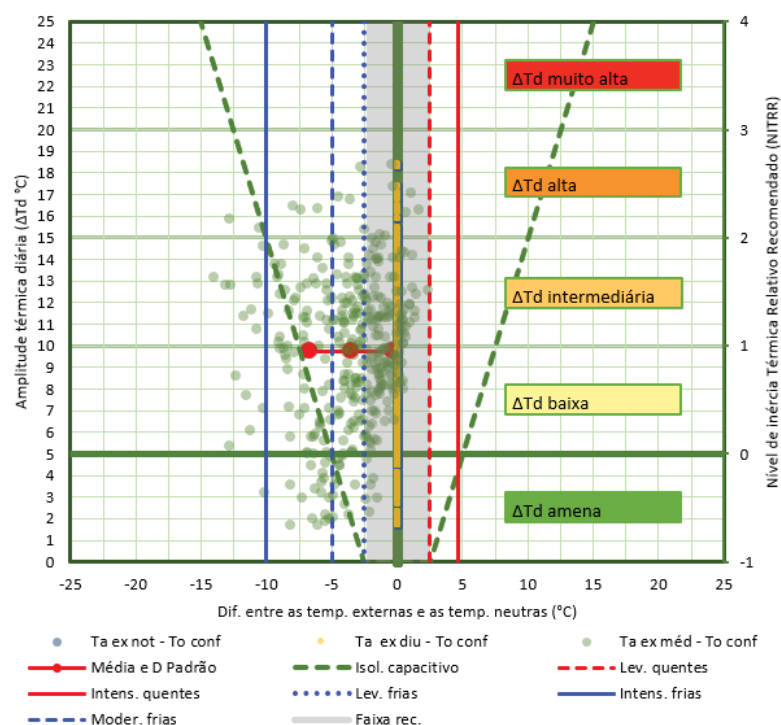
FIGURA 52 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 1: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS EXTERNAS DE CAMPO MOURÃO



FONTE: A autora (2024).

Podemos observar as mesmas características analisando as temperaturas sob a escala de médias diárias, contemplada na FIGURA 53.

FIGURA 53 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 1: MÉDIAS DIÁRIAS DAS TEMPERATURAS EXTERNAS DE CAMPO MOURÃO



FONTE: A autora (2024).

Com base na análise climática, conclui-se que a cidade de Campo Mourão necessita de estratégias que aumentem as temperaturas internas para mantê-las dentro da faixa de conforto, além de estratégias de inércia térmica para reduzir as variações diárias de temperatura.

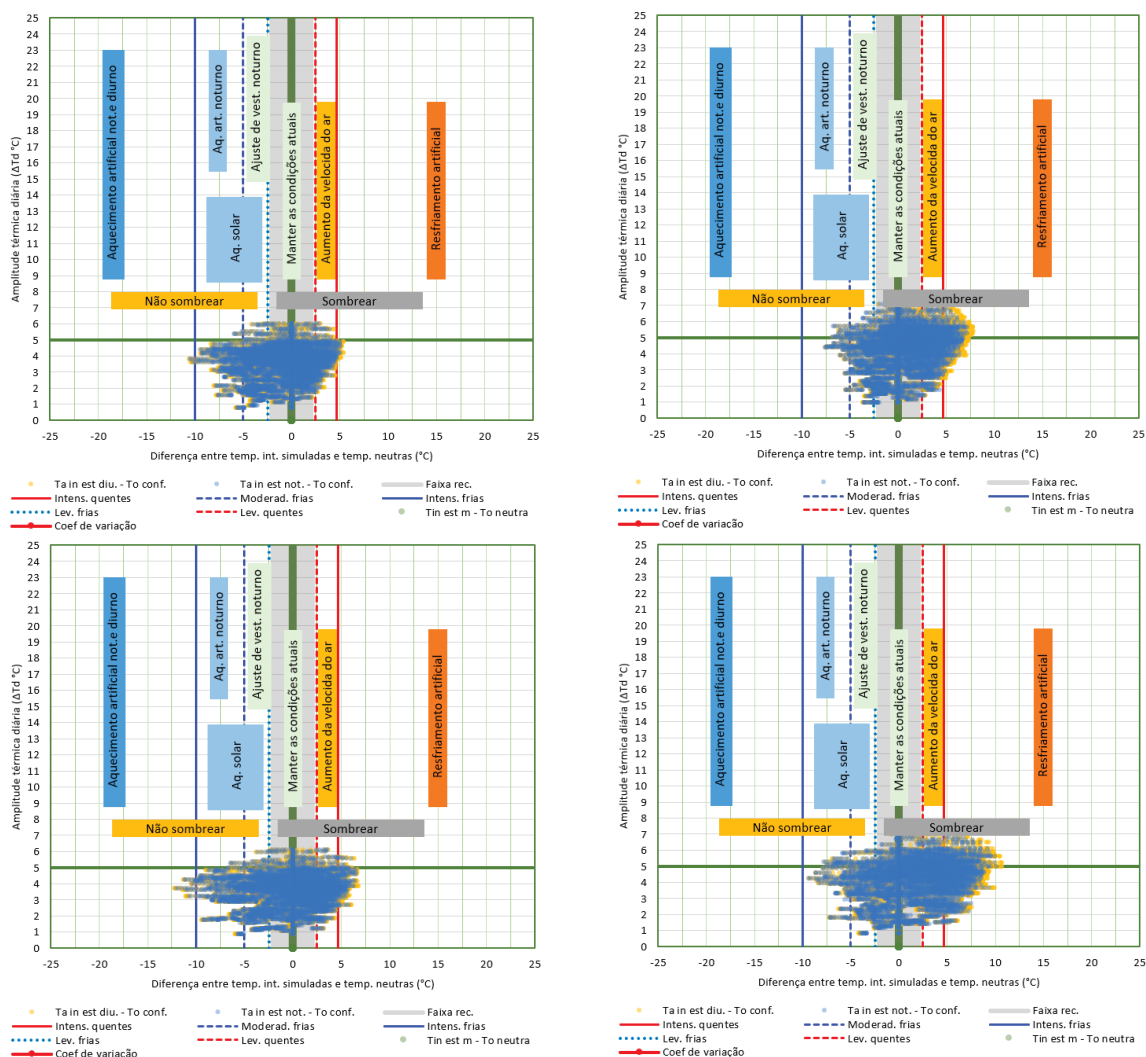
A partir disso, examinaremos como as condições de contato com o solo e os diferentes cenários construtivos se comportaram em resposta a esse contexto climático.

5.1.3.1 CONTATO COM O SOLO

Diante da análise climática, observou-se uma redução significativa na amplitude térmica de forma geral, com uma migração das temperaturas internas para a faixa de conforto em grande parte do tempo. Entre os cenários analisados, houve novamente uma semelhança notável entre os cenários 1.1 (sem isolamento) e 1.3 (com isolamento somente na laje), bem como entre os cenários 1.2 (com isolamento apenas na alvenaria) e 1.4 (com isolamento na alvenaria e na laje), conforme ilustrado

na FIGURA 54. A seguir, os resultados serão detalhados, demonstrando a resposta da edificação em cada cenário.

FIGURA 54 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA CAMPO MOURÃO NO CENÁRIO EM CONTATO COM O SOLO



FONTE: A autora (2025).

O gráfico do Diagrama Antropoclimático 2, apresenta uma análise detalhada do comportamento térmico da edificação simulada, a qual está em contato com o solo. Os dados plotados no gráfico representam as médias horárias de temperatura interna simulada em comparação com a temperatura neutra de conforto. Neste gráfico é possível verificar a diferença entre as temperaturas internas simuladas e as temperaturas neutras e a amplitude térmica diária.

O primeiro cenário, representado pelo gráfico à esquerda superior, corresponde a edificações construídas com alvenaria convencional e laje de concreto

convencional, sem isolamento. A análise dos dados revela que, embora uma parte significativa dos pontos esteja concentrada na faixa de conforto térmico, há uma dispersão considerável, especialmente para a esquerda do gráfico. Isso indica que a edificação frequentemente experimenta temperaturas internas abaixo da temperatura neutra de conforto. Além disso, a amplitude térmica diária, sugere que a edificação sofre variações significativas de temperatura ao longo do dia, mas ainda sim, é considerada uma variação mínima, visto que em comparação com a temperatura externa, as amplitudes térmicas diárias do ambiente interno simulado tiveram uma redução de 66% no percentil 99. Para este cenário as temperaturas simuladas para o ambiente interno são predominantemente confortáveis e significam o montante de 56% do tempo. A ferramenta recomenda estratégias passivas para aumentar o conforto, como ajuste da vestimenta, ventilação e aquecimento solar.

No segundo cenário, ilustrado pelo gráfico à direita superior, as edificações são construídas com alvenaria com isolamento e laje de concreto convencional sem isolamento. Comparado ao cenário 1.1, a presença de isolamento na alvenaria resulta em uma menor concentração de pontos dentro da faixa de conforto, o que indica um aumento nos extremos de temperatura interna. A dispersão para a esquerda neste cenário é menos acentuada, sugerindo que o isolamento na alvenaria contribui para limitar as perdas de calor. No entanto, identifica-se uma migração à direita, indicando que este cenário sofre maior desconforto por calor, ultrapassando com frequência a faixa de temperaturas classificadas como intensamente quentes. A amplitude térmica diária é menos controlada do que no grupo anterior, refletindo também uma flutuação significativa. Para este cenário as temperaturas simuladas para o ambiente interno são desconfortáveis em 50% do tempo (frias e quentes). Recomenda-se estratégias passivas para aumentar o conforto como ventilação, ajuste da vestimenta e aquecimento solar e ainda estratégias ativas como o resfriamento artificial.

O terceiro cenário, representado pelo gráfico à esquerda inferior, apresenta edificações construídas com alvenaria simples sem isolamento e laje de concreto com isolamento térmico. Esse cenário apresenta características inferiores aos cenários 1.1 e 1.2. A inclusão de isolamento na laje de concreto proporciona uma redução na amplitude térmica diária, porém aumenta a dispersão dos dados. Neste cenário as temperaturas simuladas para o ambiente interno são predominantemente desconfortáveis (frias e quentes), representando 51% do tempo. Este grupo experimenta tanto temperaturas intensamente frias quanto temperaturas

intensamente quentes, demonstrando até então, um aumento nos picos de temperaturas extremas em comparação aos cenários anteriores.

O último grupo, ilustrado pelo gráfico à direita inferior, refere-se a edificações com alvenaria e laje de concreto, ambos com isolamento. Este cenário tem as temperaturas mais elevadas entre todos os cenários, indicando que o excesso de isolamento pode ser desvantajoso na regulação da temperatura interna. Nesse cenário as temperaturas simuladas para o ambiente interno, majoritariamente quentes, representam 51% do tempo, com uma diferença máxima positiva entre a temperatura simulada e a temperatura neutra de 10,7°C.

Olhando para um panorama mais amplo, a ferramenta nos traz informações sobre a classificação das temperaturas internas mensais simuladas, como apresentado na FIGURA 55.

FIGURA 55 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA CAMPO MOURÃO PARA EDIFICAÇÕES EM CONTATO COM O SOLO



FONTE: A autora (2025).

Os gráficos apresentam uma análise das temperaturas internas simuladas ao longo do ano e as classifica entre temperaturas adequadas, intensamente frias, moderadamente frias e levemente frias, quentes e muito quentes.

No primeiro cenário, representado pelo gráfico superior esquerdo, observa-se que, durante a maior parte do ano, especialmente entre setembro e abril, as temperaturas internas simuladas permanecem predominantemente na faixa classificada como "adequada", proporcionando conforto térmico para os ocupantes. No entanto, durante os meses de inverno, como junho, julho e agosto, há um aumento significativo das temperaturas internas classificadas como "moderadamente frias" e "levemente frias", atingindo 53% e 41%, respectivamente. Isso sugere que, nesse

período, a edificação necessitará de estratégias adicionais de aquecimento ou melhorias no isolamento para garantir o conforto térmico.

No segundo cenário, ilustrado pelo gráfico superior direito, as temperaturas "adequadas" representam 50%. Além disso, durante os meses mais frios, em junho e julho, observa-se uma redução nas temperaturas "moderadamente frias" e "levemente frias", que chegam a 22% e 43%, respectivamente. Embora, o isolamento na alvenaria parece ser eficaz em manter o conforto durante os períodos mais frios, se comparado ao cenário anterior, apresenta desafios para controlar as temperaturas mais quentes, sendo possível observar um aumento significativo nas temperaturas consideradas "quentes" e "muito quentes".

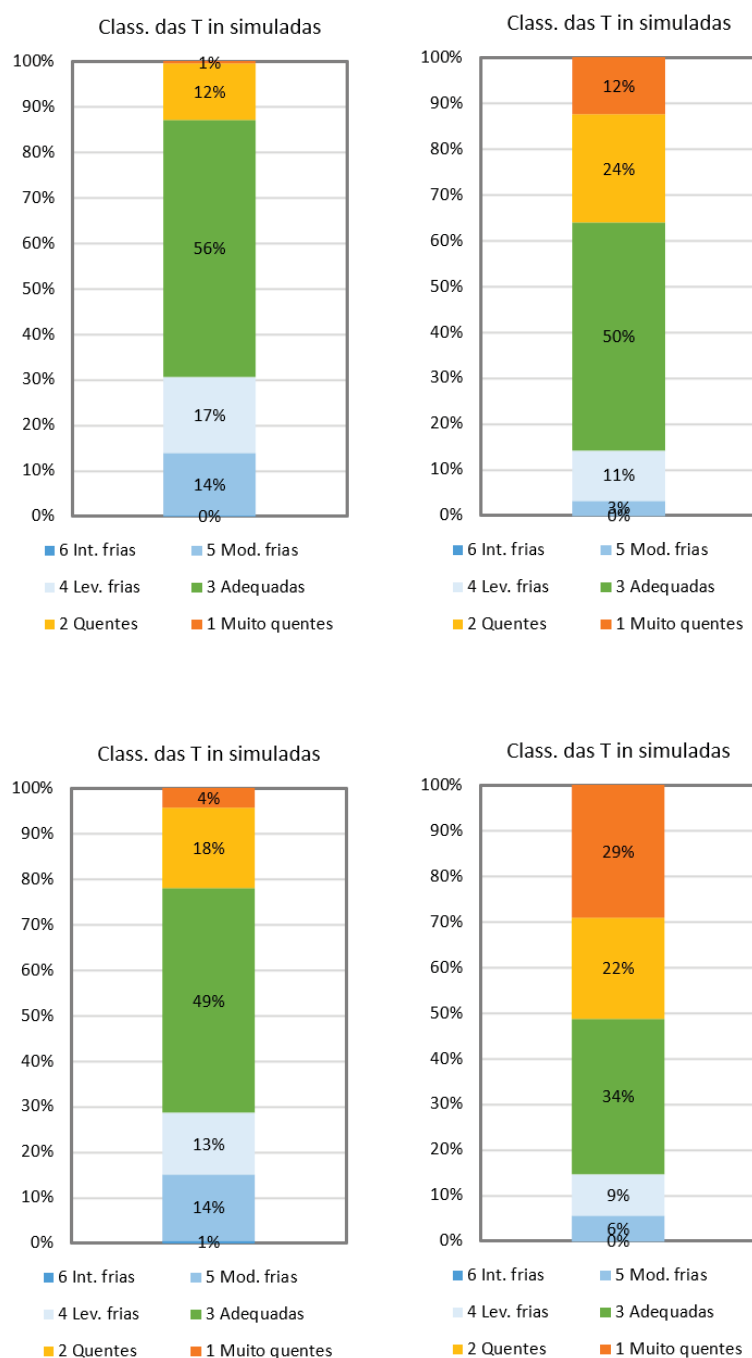
O terceiro cenário, representado pelo gráfico inferior esquerdo, apresenta uma distribuição que difere dos cenários anteriores. Durante o inverno, há uma presença de temperaturas levemente frias e moderadamente frias, atingindo picos de 49%, além do aparecimento mais pronunciado de temperaturas intensamente frias. Comparado ao cenário anterior, este grupo demonstra uma melhoria no controle térmico nos períodos mais quentes, no entanto, a ausência de isolamento na envoltória permitiu temperaturas ainda mais frias, demonstrando-se inadequado, especialmente nos meses de junho e julho.

No último cenário, ilustrado pelo gráfico inferior direito, a distribuição das temperaturas internas é a mais drástica, com predominância de temperaturas "muito quentes" durante parte do ano. Janeiro destaca-se com uma proporção significativa, chegando a 68% de temperaturas "muito quentes", 21% de temperaturas "quentes" e apenas 10% de temperaturas adequadas. Este cenário destaca o desconforto causado pelo calor, indicando que o isolamento excessivo se demonstra prejudicial.

Essas análises indicam que, embora o isolamento seja eficaz em manter temperaturas adequadas durante os meses mais frios em comparação com o cenário em que não há isolamento, existem desafios significativos a serem enfrentados durante o verão, especialmente nos cenários 1.2 e 1.4. Os cenários que utilizam alvenaria convencional, como 1.1 e 1.3, mostraram um desempenho térmico relativamente melhor durante os meses mais quentes, enquanto os cenários com alvenaria isolada tendem a proporcionar maior conforto durante os meses mais frios.

Considerando a média geral do ano todo a maior porcentagem de temperaturas adequadas o melhor cenário é o 1.1 com 56%. A comparação das médias anuais pode ser observada na FIGURA 56.

FIGURA 56 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS ANUAIS SIMULADAS PARA CAMPO MOURÃO



FONTE: A autora (2025).

Em resumo, a análise dos gráficos evidencia o cenário 1.1 como mais eficiente, sugerindo que a ausência de isolamento oferece o melhor desempenho térmico ao longo do tempo, mantendo as temperaturas internas mais próximas da faixa de conforto.

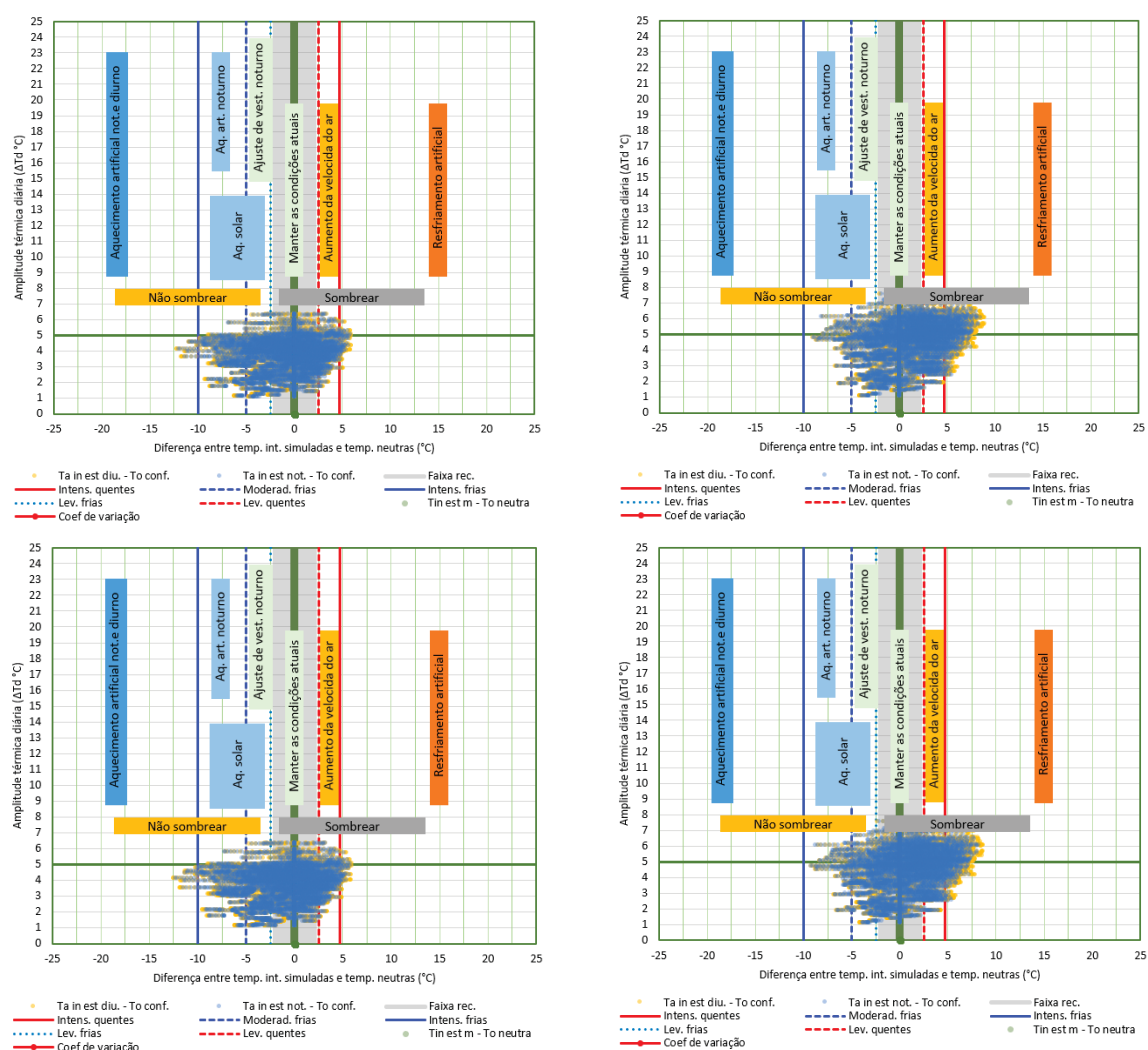
Esses resultados sugerem que, em regiões com características climáticas parecidas, a utilização de construções em contato direto com o solo, sem isolamento na laje e na envoltória, pode ser uma estratégia viável para melhorar o conforto térmico.

Entretanto, para indicar a melhor alternativa para esse contexto, ainda é necessário analisar os outros cenários em relação ao contato com o solo, o que será realizado nos tópicos a seguir.

5.1.3.2 ELEVADA COM CÂMARA DE AR NÃO VENTILADA (COM PORÃO)

Diante da análise climática, a edificação simulada elevada com porão apresentou em todos os cenários construtivos, quando comparadas às temperaturas externas, uma redução significativa da amplitude térmica diária. Os resultados desse grupo de cenários de um modo geral diferem dos resultados dos cenários em contato com o solo. A seguir, os resultados são apresentados na FIGURA 57 e serão detalhados, demonstrando a resposta da edificação em cada cenário.

FIGURA 57 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA CAMPO MOURÃO NO CENÁRIO ELEVADA COM CÂMARA DE AR NÃO VENTILADA



FONTE: A autora (2025).

No cenário 2.1, representado pelo gráfico superior esquerdo, podemos observar um resultado com baixa variação térmica e boas condições de conforto na maioria do tempo. A recomendação para manter condições atuais em 53,2% do tempo, sugere que o cenário é otimizado. A análise dos dados revela que a maioria dos pontos está concentrada dentro ou próximo da faixa de conforto térmico, mas há uma dispersão considerável para a esquerda do gráfico, indicando que a edificação frequentemente experimenta temperaturas internas abaixo da temperatura neutra de conforto. Há uma diferença máxima positiva das temperaturas horárias e temperaturas neutras de 5,9 °C, enquanto a diferença máxima negativa é de 12,2 °C.

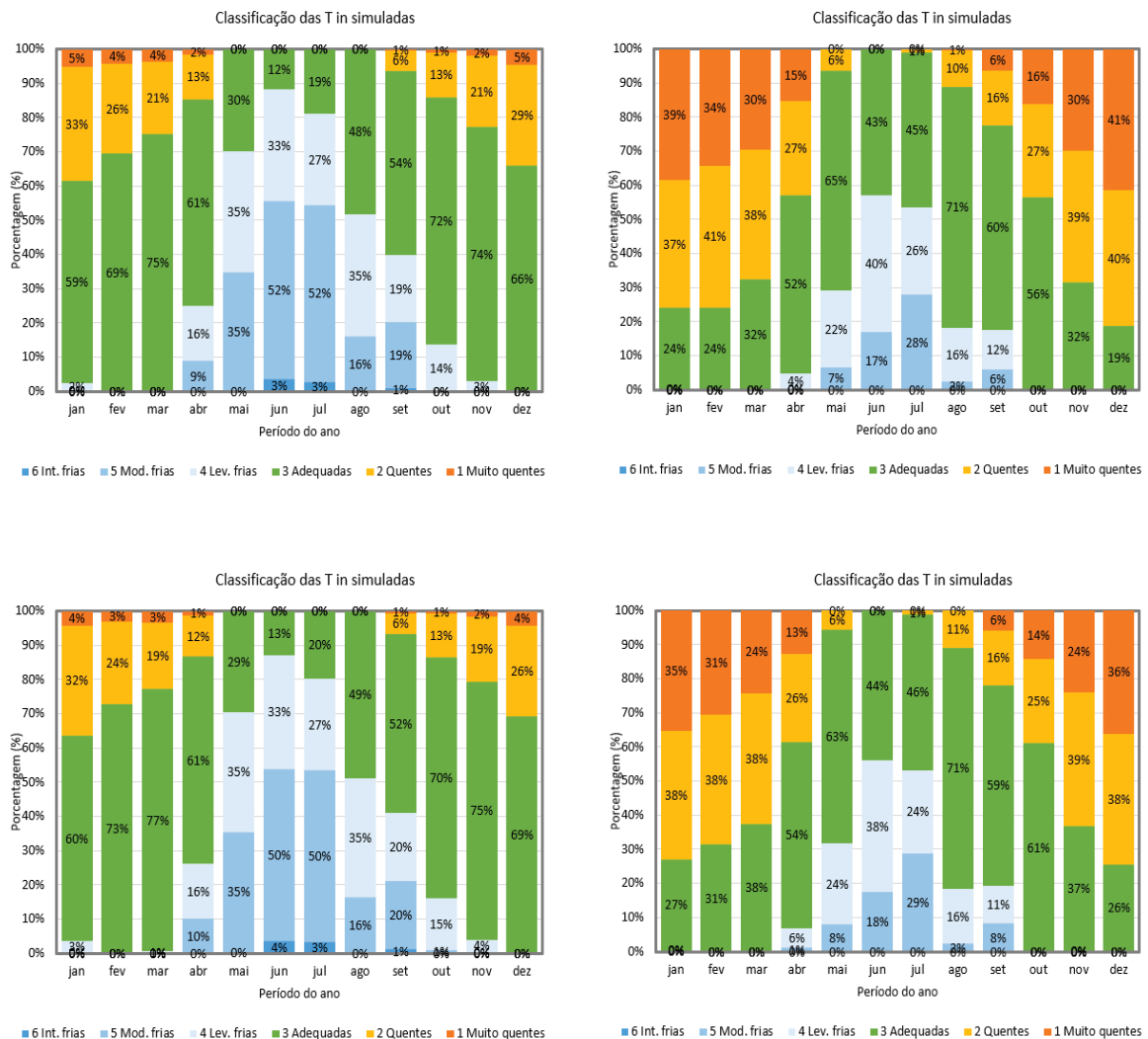
O cenário 2.2, ilustrado pelo gráfico superior direito, refere-se a edificações construídas com alvenaria com isolamento e laje de concreto convencional. Em comparação ao primeiro cenário, a presença de isolamento na alvenaria resulta em uma maior migração de pontos a direita da faixa de conforto, indicando um aumento nos extremos de temperatura interna. Frequentemente a edificação experimenta temperaturas consideradas intensamente quentes. Além disso, há uma maior flutuação das temperaturas, ou seja, um aumento na amplitude térmica. Ainda que haja uma dispersão para a esquerda, esta é menos acentuada, sugerindo que o isolamento na alvenaria pode contribuir para limitar as perdas de calor, extinguindo-se temperaturas intensamente frias, por exemplo. Percebe-se que até então o desempenho se assemelha com o do grupo anterior, onde a edificação está em contato direto com o solo, em relação à predominância de temperaturas desconfortáveis, indicando que os materiais estão respondendo de forma semelhante independentemente da condição em relação ao solo. Neste cenário, no entanto, a falta de contato com o solo agrava o desempenho do componente construtivo, representado pelas temperaturas predominantemente desconfortáveis em 56% do tempo.

No cenário 2.3, mostrado no gráfico inferior esquerdo, é apresentado um desempenho superior aos cenários anteriores de forma geral. A inclusão de isolamento na laje, porém, parece não ter efeito significativo, apresentando um desempenho muito semelhante ao cenário em que não há isolamento. Neste cenário as condições devem ser mantidas em 53,9% do tempo, havendo um ligeiro aumento em comparação ao cenário 2.1 (53,2%). Embora os valores sejam mais dispersos do que o cenário 2.2, por exemplo, há menores ocorrências de temperaturas consideradas como intensamente quentes ou intensamente frias.

Por fim, o último cenário, ilustrado no gráfico inferior direito, refere-se a edificações com alvenaria e laje de concreto com isolamento. Este cenário apresenta resultados similares ao do segundo cenário, com uma ligeira redução nas temperaturas predominantemente desconfortáveis que apresentam o total de 54% do tempo. Neste cenário as recomendações para melhorar o desempenho são ventilação e resfriamento ativo, indicando um maior desconforto por temperaturas quentes.

Voltando-se para a escala anual, a ferramenta nos traz informações sobre a classificação das temperaturas internas mensais simuladas, como apresentado na FIGURA 58.

FIGURA 58 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA CAMPO MOURÃO PARA EDIFICAÇÕES EM ELEVADAS NÃO VENTILADAS



FONTE: A autora (2025).

No primeiro cenário, a distribuição das temperaturas internas ao longo do ano revela que uma parte significativa dos meses apresenta temperaturas adequadas, especialmente nos meses de setembro a abril. No entanto, há uma quantidade notável de temperaturas consideradas "moderadamente frias" e "levemente frias" durante os meses de inverno, o que sugere que as temperaturas internas podem cair abaixo do nível de conforto. Os meses de verão, especialmente de outubro a fevereiro, são caracterizados por uma presença maior de temperaturas "quentes", mas com baixa ocorrência de temperaturas extremas classificadas como "muito quentes". As temperaturas simuladas são predominantemente confortáveis em 53% do tempo.

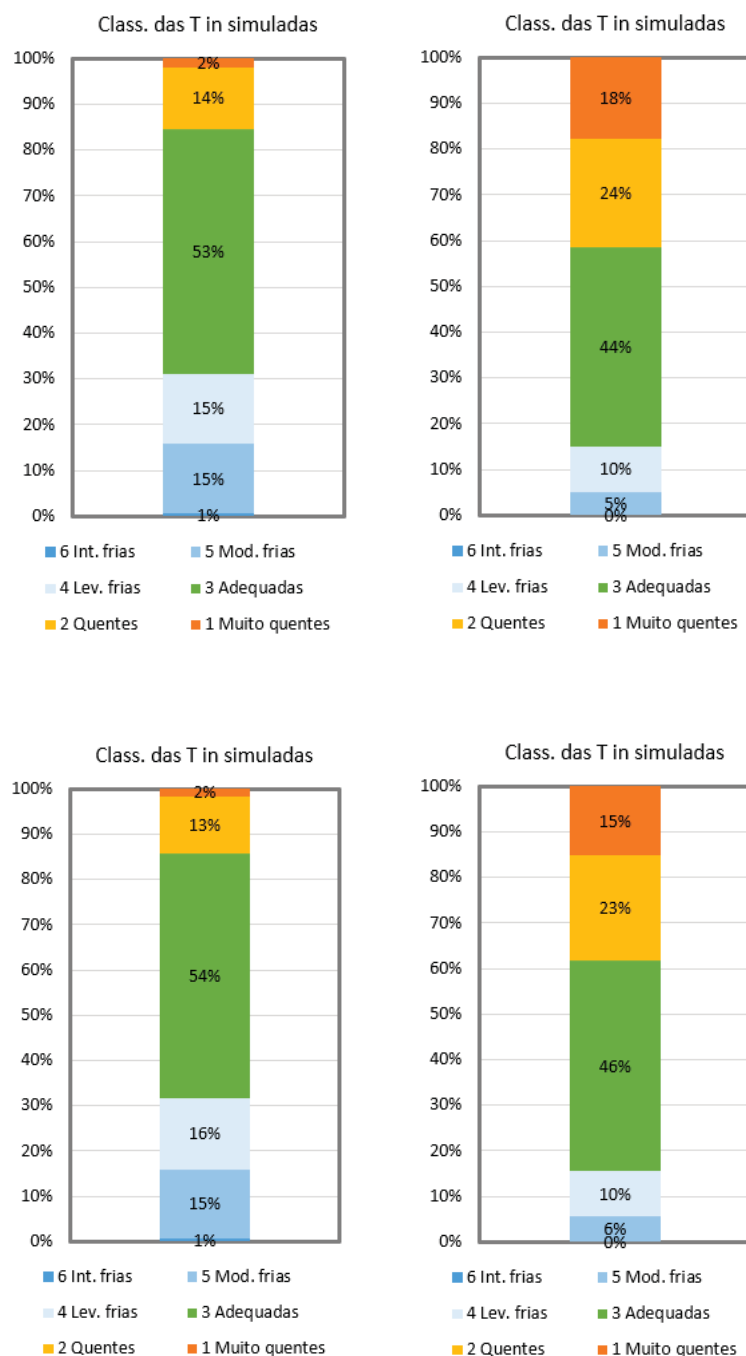
O segundo cenário mostra uma melhoria em relação ao primeiro, no que se refere aos períodos mais frios, com uma maior porcentagem classificados como "adequados". Há presença de temperaturas "levemente frias" nos meses de inverno, mas as temperaturas "intensamente frias", presentes no primeiro cenário, estão ausentes. Por outro lado, o período de verão (dezembro a março) apresenta temperaturas classificadas como "muito quentes" e "quentes" frequentemente, sugerindo que apesar da diminuição de desconforto por frio, passa-se a ter desconforto por calor. Neste cenário, as temperaturas simuladas são predominantemente desconfortáveis em 56% do tempo.

No terceiro cenário, que inclui isolamento na laje, a distribuição de temperaturas adequadas ao longo do ano é extremamente semelhante ao primeiro cenário, o que indica que a influência do isolamento é pouco expressiva. A porcentagem de temperaturas "adequadas" é moderadamente elevada ao longo de todo o ano, representando 54% do tempo.

O quarto cenário revela um desempenho térmico semelhante ao do segundo cenário, com algumas variações. Assim como o cenário 2.2, a distribuição de temperaturas ao longo do ano mostra que, os meses de verão não tem uma boa proporção de dias "adequados", dando vez as temperaturas quentes e muito quentes, enquanto nos meses de inverno há uma atenuação das temperaturas frias. Neste caso, as temperaturas são também predominantemente desconfortáveis, porém, em 54% do tempo.

Ao classificar o melhor cenário com base na maior porcentagem de temperaturas adequadas durante o ano, apresenta-se o cenário 2.3, porém há um certo impasse considerando que entre os cenários 2.3 e 2.1 há uma diferença de 1%. A comparação das médias anuais pode ser observada na FIGURA 59.

FIGURA 59 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA CAMPO MOURÃO PARA EDIFICAÇÕES EM CONTATO COM O SOLO



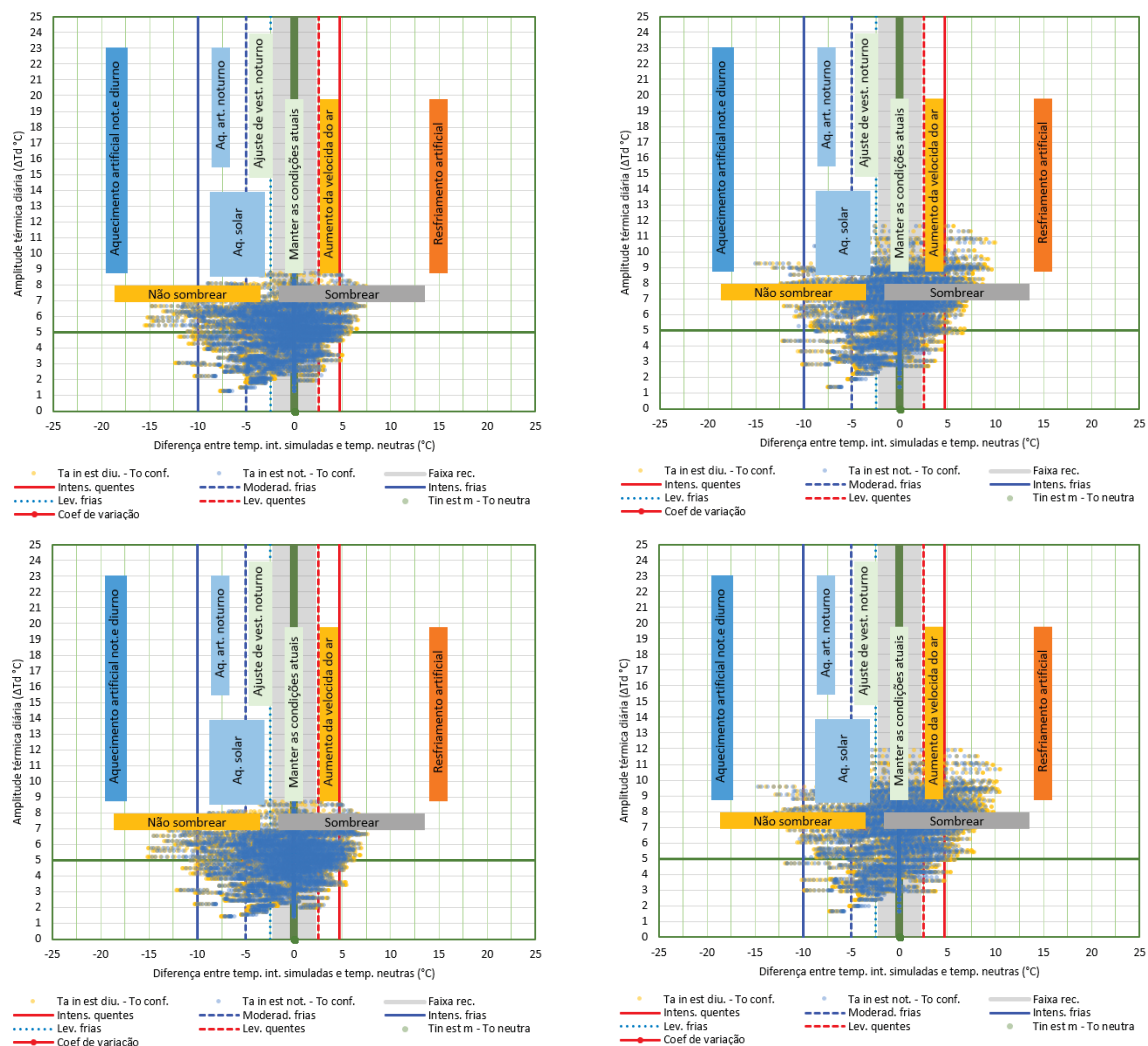
FONTE: A autora (2025).

Considerando o clima de Campo Mourão, com temperaturas geralmente abaixo da neutra, o cenário ideal seria aquele que equilibra temperaturas adequadas e mínima ocorrência de frio. Portanto, deste ponto de vista, o cenário 2.1 é o mais eficiente, ainda que por uma diferença mínima. Devido à esta pequena diferença entre os cenários, ambos se destacam entre os analisados.

5.1.3.3 ELEVADA COM CÂMARA DE AR VENTILADA (SOBRE PILOTIS)

Neste grupo, os resultados diferem dos resultados dos cenários anteriores. Observou-se que em comparação aos cenários em que edificação está em contato com o solo e é elevada com porão, a amplitude térmica é maior em todos os cenários construtivos, além de diferenças em relação as temperaturas neutras mais pronunciadas. Por outro lado, a tendência de semelhança entre os cenários se repete assim como nos outros casos. Há uma semelhança marcante entre os cenários 2.1 (sem isolamento) e 2.3 (isolamento apenas na laje), assim como entre os cenários 2.2 (isolamento somente na alvenaria) e 2.4 (isolamento tanto na alvenaria quanto na laje), conforme mostrado na FIGURA 60. A seguir, os resultados serão detalhados, demonstrando como a edificação responde em cada cenário.

FIGURA 60 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA CAMPO MOURÃO NO CENÁRIO ELEVADA COM CÂMARA DE AR VENTILADA



FONTE: A autora (2025).

O gráfico superior esquerdo, referente ao cenário 3.1 (alvenaria e laje sem isolamento), mostra uma grande dispersão de pontos em relação ao eixo x, principalmente a esquerda, o que sugere temperaturas muito menores que as temperaturas neutras. Neste cenário a diferença máxima positiva entre as temperaturas horárias e as temperaturas neutras é de 7,4° e a diferença máxima negativa é de 15,5 °C e a amplitude térmica diária máxima por sua vez, é de 8,8°C. Neste cenário é recomendado manter as condições em 48% do tempo, indicando que as temperaturas são predominantemente desconfortáveis.

No gráfico superior direito, referente ao cenário 3.2 (alvenaria com isolamento), observa-se um aumento significativo na amplitude térmica, e com a as temperaturas internas extravasando tanto a direita quanto a esquerda, indicando os

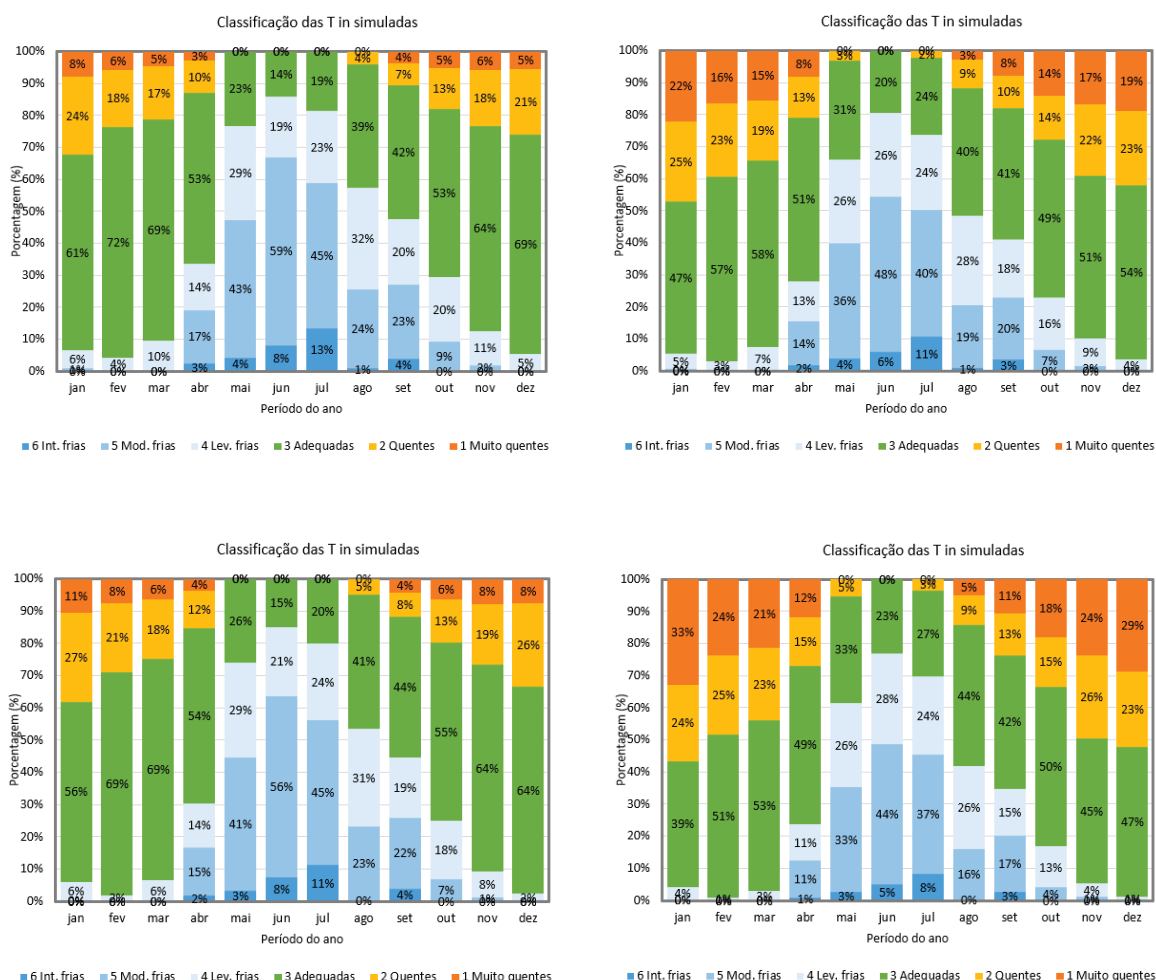
picos extremos. Há uma redução da ocorrência de temperaturas intensamente frias, juntamente com uma elevação da ocorrência de temperaturas intensamente quentes, um padrão também notado nos grupos anteriores. Neste cenário, 56% do tempo é composto por temperaturas desconfortáveis, com diferença máxima positiva máxima diferença negativa entre as temperaturas horárias e temperaturas neutras de 10,0°C e 15,5°C, respectivamente.

O gráfico inferior esquerdo, que representa o cenário 3.3 (laje com isolamento), indica que o isolamento na laje, sem a presença de isolamento na alvenaria, resulta em um comportamento térmico semelhante ao do cenário 3.1, com uma distribuição de temperaturas mais dispersa e uma menor capacidade de manter as temperaturas dentro da faixa de conforto. Neste caso a amplitude diária máxima é extremamente semelhante ao do primeiro cenário com 8,7°C, bem como as diferenças máximas positivas e negativas entre as temperaturas horárias e as temperaturas neutras, com 7,6°C e 15,1°C, respectivamente, demonstrando certa ineficácia do isolamento somente na laje.

Por fim, o gráfico inferior direito, representando o cenário 3.4 (alvenaria com isolamento e laje com isolamento), mostra uma tendência levemente mais pronunciada de amplitude térmica, com maior dispersão e consequentemente, menor estabilidade térmica. Neste cenário a máxima diferença positiva e máxima diferença negativa entre as temperaturas horárias e temperaturas neutras é de 10,6°C e de 15,1°C, enquanto a amplitude térmica diária máxima é de 11,9°C, resultados muito semelhantes aos do cenário 2.2.

Ao analisar o período de um ano, a ferramenta fornece detalhes sobre a classificação das temperaturas internas mensais simuladas, conforme mostrado na FIGURA 61.

FIGURA 61 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA CAMPO MOURÃO PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS SOBRE PILOTIS



FONTE: A autora (2025).

Analisando o gráfico da classificação das temperaturas internas simuladas, observa-se no cenário superior esquerdo (3.1) uma predominância de temperaturas “adequadas” ao longo do ano, especialmente nos meses de outubro a abril, onde mais de 50% das temperaturas internas se encontram nesta categoria. Esse cenário junto ao cenário 3.3 (inferior esquerdo) possui as maiores ocorrências de temperaturas classificadas como “moderadamente frias”.

De uma forma geral, analisando estes gráficos é possível notar que em todos os cenários construtivos houve um aumento das temperaturas “quentes” e “muito quentes” em comparação aos grupos anteriores, sugerindo que a condição elevada sobre pilotis se mostra menos eficaz sob esse aspecto.

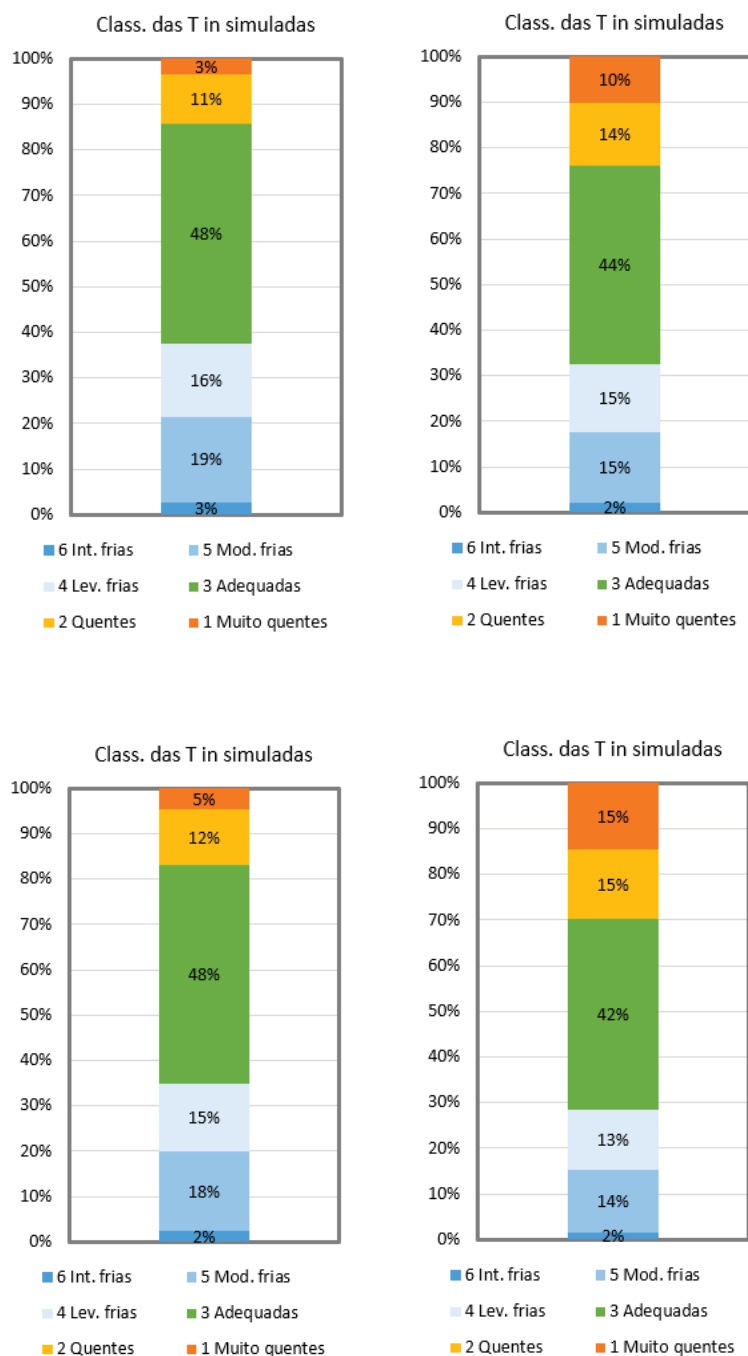
O segundo cenário mostra uma melhoria em relação ao primeiro, no que se refere aos períodos mais frios, com uma maior porcentagem classificados como "adequados". É possível observar que parte das temperaturas "moderadamente frias" migraram para a classificação "levemente frias" e parte das temperaturas "levemente frias" migraram para "adequadas", sugerindo que apesar de majoritariamente permanecerem frias, as temperaturas migraram em direção a faixa de conforto. Por outro lado, houve um aumento considerável da ocorrência de temperaturas "quentes" e "muito quentes". Junto ao cenário 3.4, possuem as maiores ocorrências de temperaturas desta classificação.

O terceiro cenário mantém a tendência do primeiro em relação a distribuição de temperaturas ao longo do ano, com pequenas variações. No entanto, seu desempenho é ligeiramente inferior nos meses mais quentes e ligeiramente superior nos meses mais frios, apresentando menores ocorrências de temperaturas "moderadamente frias" e maiores de "muito quentes". Isso sugere que o isolamento pode estar comprometendo o desempenho térmico da edificação, dificultando o equilíbrio no processo de retenção e liberação de calor.

Por outro lado, o último cenário se assemelha ao segundo, exibindo uma distribuição de temperaturas semelhante. No entanto, os picos extremos de calor intensificam-se consideravelmente, enquanto os picos extremos de frio apresentam uma diminuição leve. Isso resulta em uma desproporção no controle de temperatura, onde o aumento do calor é significativo e a redução do frio é branda.

Ao classificar o melhor cenário com base na maior porcentagem de temperaturas adequadas durante o ano, temos o cenário 3.1 e 3.3 com resultados quase idênticos. A comparação das médias anuais pode ser observada na FIGURA 62.

FIGURA 62 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA CAMPO MOURÃO PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS SOBRE PILOTIS



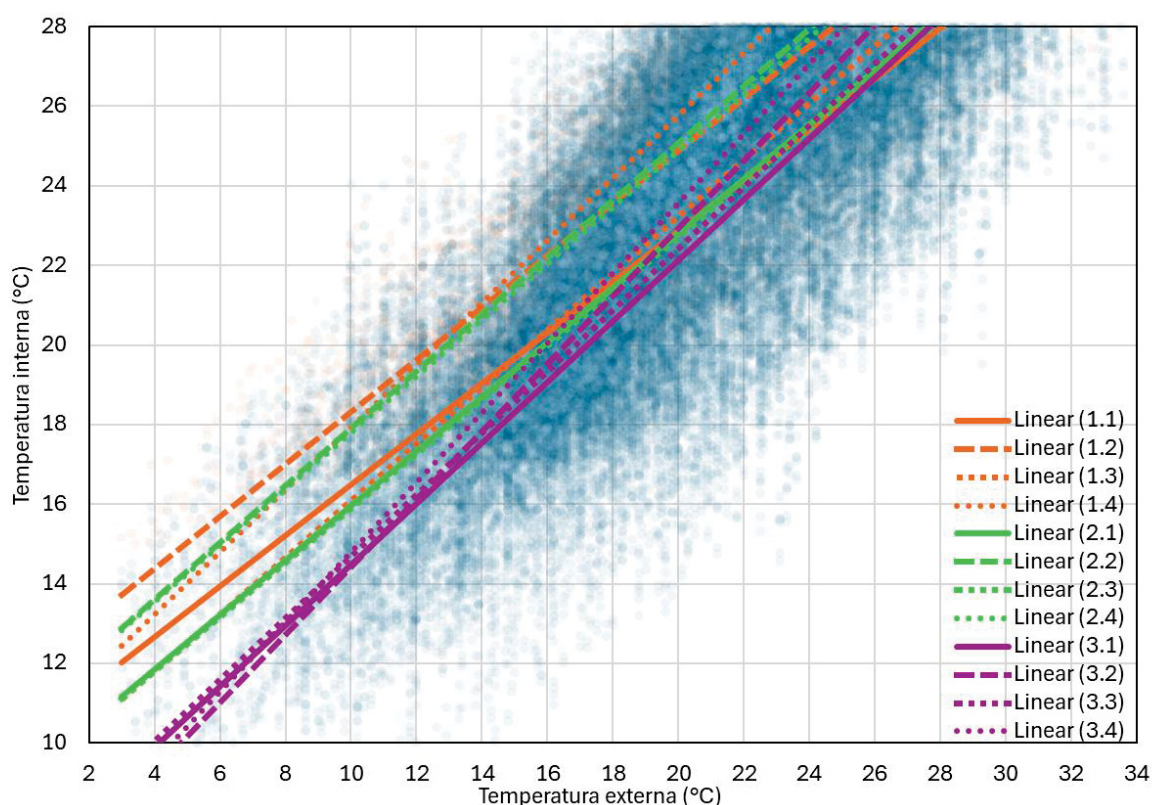
FONTE: A autora (2025).

Ao analisar todos os gráficos, observa-se que o cenário 3.3 se destaca como o mais favorável. Contudo, as diferenças de resultados não são significativas, permitindo concluir que o cenário 3.1 apresenta um desempenho equivalente.

5.1.3.4 COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS

São apresentados nessa seção os resultados das simulações através de gráficos que ilustram tanto a variação térmica interna em função das temperaturas externas (FIGURA 63) quanto a porcentagem de horas em que as temperaturas internas permanecem dentro, abaixo ou acima da faixa de conforto térmico (FIGURA 38) para a cidade de Campo Mourão.

FIGURA 63 – RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA INTERNA E EXTERNA PARA DIFERENTES CENÁRIOS DE EDIFICAÇÃO EM CAMPO MOURÃO



FONTE: A autora (2025).

Nos cenários de edificações em contato com o solo, observamos comportamentos térmicos distintos. As linhas de tendência para os cenários 1.1 e 1.2 apresentam inclinações muito semelhantes, indicando que tanto o cenário sem isolamento (1.1) quanto o cenário com isolamento na alvenaria (1.2) possuem uma resposta térmica parecida às variações de temperatura externa. Notavelmente, a linha 1.1, sem isolamento, está ligeiramente abaixo da linha 1.2, sugerindo que, embora o isolamento na alvenaria (cenário 1.2) contribua para um desempenho térmico um pouco mais estável, a diferença não é muito pronunciada. Essa proximidade nas

inclinações sugere que o efeito de amortecimento térmico do solo é significativo em ambos os casos.

O cenário 1.4, que combina isolamento na laje e na alvenaria, apresenta a maior inclinação entre os cenários em contato com o solo. Isso indica que essa configuração é mais sensível às variações de temperatura externa, possivelmente porque o isolamento adicional pode reduzir o efeito de amortecimento térmico natural do solo, resultando em uma maior resposta interna às mudanças externas. O cenário 1.3, que possui isolamento apenas na laje, começa com uma tendência inicial semelhante aos cenários 1.1 e 1.2, mas se torna mais inclinado à medida que as temperaturas aumentam. Isso sugere que o isolamento na laje oferece benefícios em temperaturas moderadas, mas sua eficácia diminui com temperaturas mais elevadas.

Para os cenários de edificações elevadas com porão (grupo 2), há uma interessante sobreposição de resultados. As linhas de tendência para os cenários 2.1 (sem isolamento) e 2.4 (com isolamento apenas na laje) quase se sobrepõem, indicando que não há diferença significativa no desempenho térmico entre essas duas configurações. Isso pode ser devido ao fato de que, sem ventilação e em um ambiente elevado, o isolamento na laje (cenário 2.3) não é suficiente para melhorar significativamente o controle térmico em comparação com o cenário sem isolamento (2.1). Da mesma forma, os cenários 2.2 (alvenaria isolada) e 2.4 (laje isolada + alvenaria isolada) também apresentam quase a mesma linha de tendência, sugerindo que, em edificações elevadas sem ventilação, adicionar isolamento tanto na alvenaria quanto na laje não proporciona uma vantagem substancial em termos de desempenho térmico.

É importante notar que, embora não haja uma diferença significativa na inclinação das linhas de tendência do grupo 2, há uma diferença notável na posição das linhas. As linhas dos cenários 2.2 e 2.4 se distanciam consideravelmente das linhas 2.1 e 2.3, indicando uma melhoria no controle térmico interno quando não há isolamento aplicado na alvenaria, com ou sem o adicional de isolamento na laje.

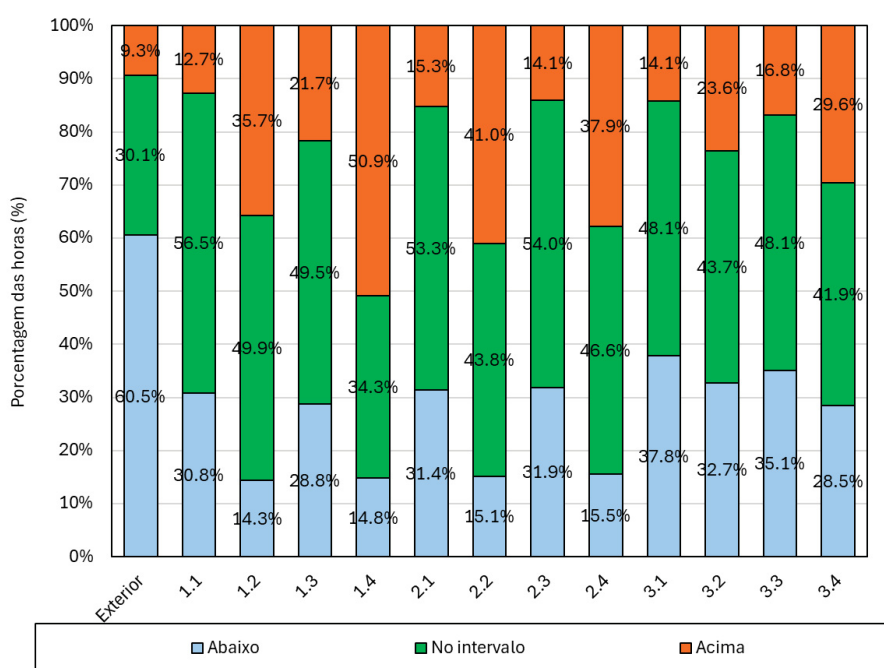
No grupo 3 (edificações elevadas com ventilação), os cenários, embora próximos, não se sobrepõem. As inclinações das linhas de tendência são quase idênticas para todos os cenários deste grupo, sugerindo que a ventilação é um fator determinante para o controle térmico, minimizando as diferenças de desempenho entre os tipos de isolamento. A linha que mais se distancia das outras neste grupo é

a 3.4 (laje isolada + alvenaria isolada), indicando que essa combinação, junto com a ventilação, proporciona o pior controle térmico entre as edificações elevadas.

Diante dessas observações, conclui-se que o cenário 1.1 é o mais eficaz em termos de controle térmico geral.

Outro aspecto relevante a ser analisado é a distribuição das porcentagens de horas em que a temperatura interna das edificações permanece abaixo, dentro ou acima da faixa de conforto térmico, conforme ilustrado na FIGURA 38. Essa distribuição permite uma avaliação mais detalhada do desempenho térmico dos diferentes cenários. Dentre eles, o cenário 1.1 se destaca, apresentando a maior porcentagem de horas dentro do intervalo de conforto térmico, com 56,5% das horas, indicando um melhor desempenho nesse aspecto.

FIGURA 64 – DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS HORAS DE TEMPERATURA INTERNA DENTRO, ABAIXO E ACIMA DO INTERVALO DE CONFORTO TÉRMICO PARA DIFERENTES CENÁRIOS EM CAMPO MOURÃO



FONTE: A autora (2025).

O grupo de edificações elevadas sem ventilação (2) apresentou cenários com desempenho térmico próximo ao do cenário 1.1, especialmente nos casos 2.1 e 2.3, que registraram até 54% das horas dentro da faixa de conforto térmico. No entanto, esse grupo também apresentou temperaturas frequentemente acima do limite superior da zona de conforto. Os cenários 2.2 e 2.3, em particular, se destacaram pelos altos

percentuais de horas com temperaturas acima da faixa de conforto, atingindo 41% e 37,9%, respectivamente.

Dentre todos os cenários analisados, o pior desempenho foi observado no cenário 1.4, que registrou o maior percentual de temperaturas acima da faixa de conforto, atingindo 50,9%. Já em relação às temperaturas abaixo da faixa de conforto, o grupo 3 apresentou o pior desempenho, com as maiores porcentagens de horas nessa condição.

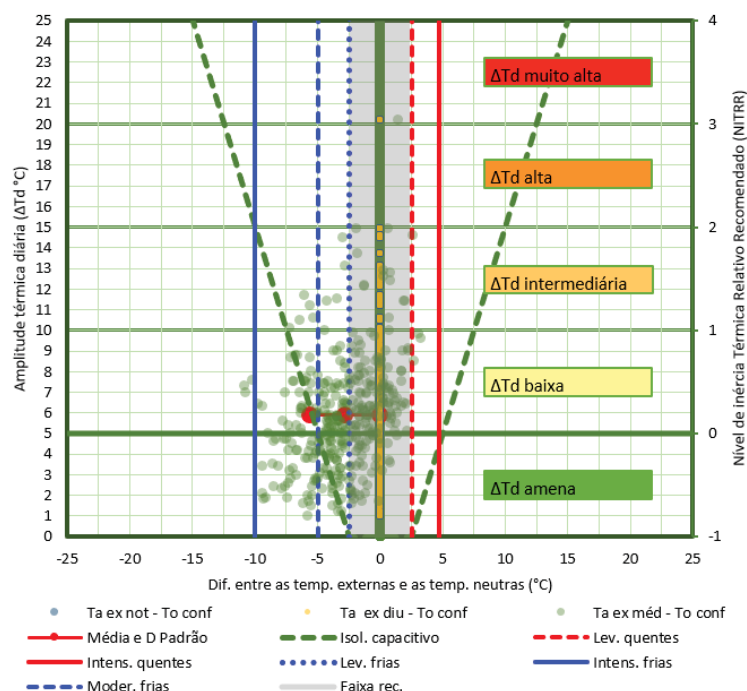
De forma geral, considerando todas as análises realizadas, a estratégia mais recomendada para a cidade de Campo Mourão é o contato direto com o solo sem isolamento. Esse cenário demonstrou melhor desempenho térmico ao reduzir a amplitude térmica interna e maximizar a ocorrência de temperaturas adequadas.

5.1.4 PARANAGUÁ

O Diagrama Antropoclimático ilustrado na FIGURA 65 oferece uma visão detalhada do clima de Paranaguá. Este diagrama revela que a cidade possui um perfil climático caracterizado por uma amplitude térmica diária considerada "baixa" a "intermediária", conforme indicado no eixo vertical do gráfico. Paranaguá experimenta temperaturas que, em grande parte, permanecem dentro ou próximas da faixa de conforto, com uma flutuação térmica relativamente contida. No entanto, observa-se a presença de temperaturas tanto "levemente frias" quanto "levemente quentes", sugerindo variações sazonais que afetam o conforto térmico. As diferenças entre as temperaturas externas e as temperaturas neutras horárias se mantêm em torno de $\pm 10^{\circ}\text{C}$, com um leve predomínio de temperaturas abaixo da faixa de conforto.

A faixa verde clara no diagrama representa condições de " ΔT_d amena," o que indica que a amplitude térmica diária não é extrema, permitindo uma melhor adaptação do ambiente construído ao clima local sem grandes oscilações térmicas. Já a distribuição das temperaturas ao longo do dia, marcada pelos pontos verdes no gráfico, indica que, embora o clima seja relativamente ameno, ainda há necessidade de intervenções para otimizar o conforto térmico, principalmente em relação às temperaturas mais frias registradas.

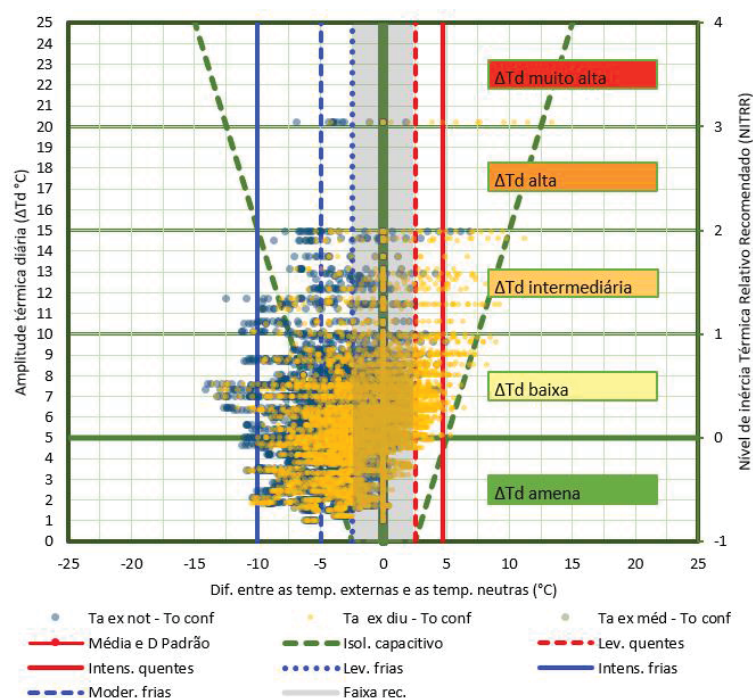
FIGURA 65 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 1: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS EXTERNAS DE PARANAGUÁ



FONTE: A autora (2024).

A diferença entre as temperaturas externas e as temperaturas neutras horárias varia de aproximadamente -20°C a $+10^{\circ}\text{C}$, conforme mostrado na FIGURA 66, mostrando que Paranaguá experimenta tanto desconforto por frio quanto por calor, embora o desconforto por frio seja mais prevalente. A amplitude térmica diária geralmente permanece dentro da faixa de " ΔT_d baixa" (abaixo de 7°C), o que sugere que o clima local tem flutuações moderadas, favorecendo um ambiente térmico relativamente estável.

FIGURA 66 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 1: MÉDIAS DIÁRIAS DAS TEMPERATURAS EXTERNAS DE PARANAGUÁ



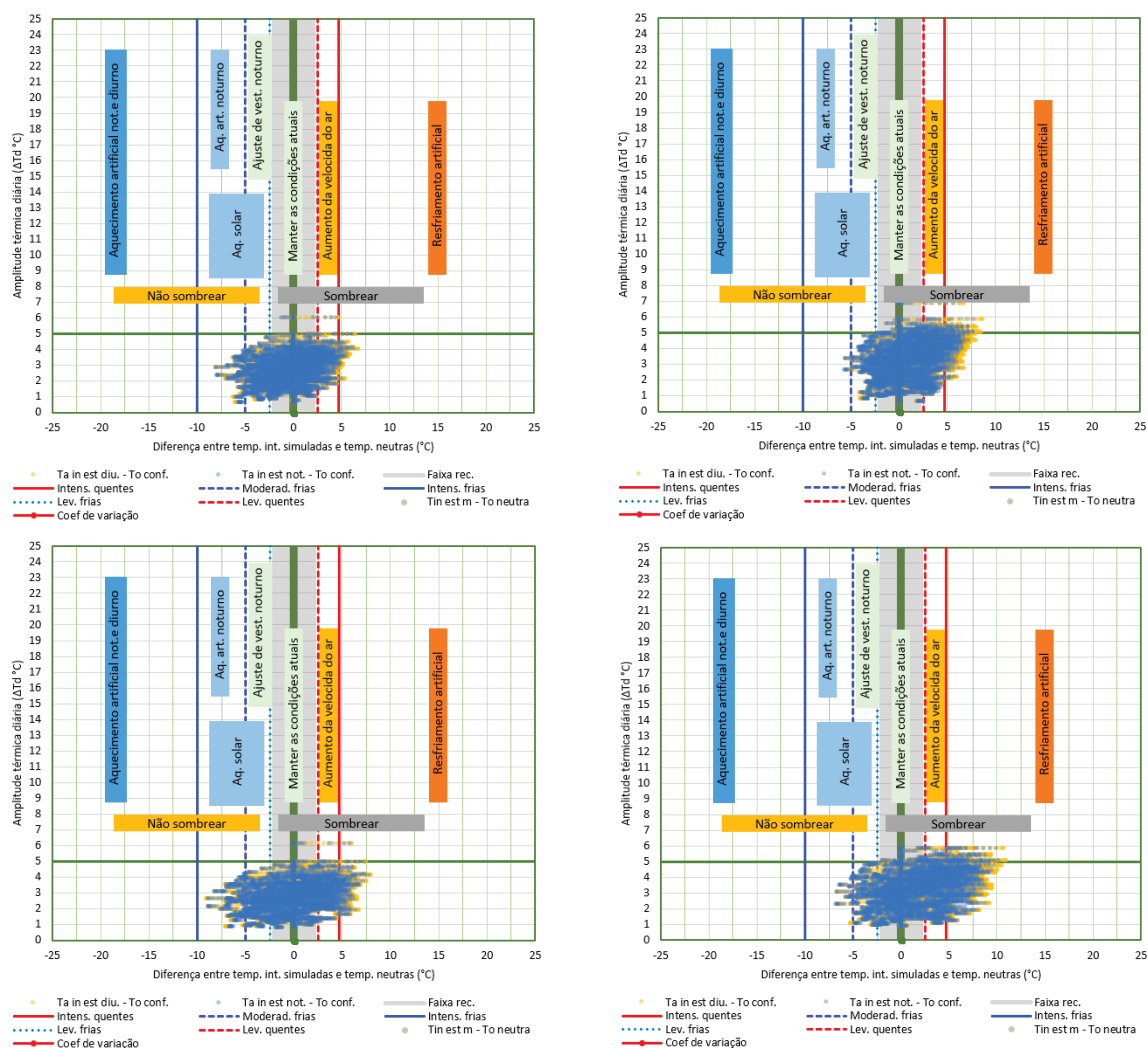
FONTE: A autora (2024).

Com base na análise climática, conclui-se que a cidade de Paranaguá clima relativamente ameno, mas ainda assim apresenta desafios térmicos significativos. Portanto, para garantir um ambiente interno confortável ao longo do ano, são necessárias soluções construtivas que incluam estratégias de isolamento térmico e inércia térmica, visando minimizar essas variações e manter as temperaturas internas dentro da faixa de conforto por um período maior. A análise subsequente investigará como as diferentes condições de contato com o solo e cenários construtivos responderam a este contexto climático específico.

5.1.4.1 CONTATO COM O SOLO

Os dados dos cenários analisados estão ilustrados na FIGURA 67.

FIGURA 67 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA PARANAGUÁ NO CENÁRIO EM CONTATO COM O SOLO



FONTE: A autora (2025).

Os quatro gráficos apresentados oferecem uma análise detalhada do comportamento térmico das edificações simuladas, considerando as diferentes condições construtivas. Cada gráfico ilustra como as temperaturas internas simuladas se comparam com as temperaturas neutras de conforto, além de mostrar a amplitude térmica diária.

No primeiro cenário, representado pelo gráfico superior esquerdo, temos uma edificação construída com alvenaria convencional e laje de concreto sem isolamento térmico. A análise revela que, embora muitos pontos estejam dentro da faixa de conforto, há um leve extravasamento à esquerda e à direita. A amplitude térmica diária, embora ainda presente, é minimizada em comparação com a temperatura externa, mostrando uma redução de cerca de 68%. Isso sugere que, apesar das

variações, o ambiente interno oferece uma certa moderação térmica, sendo confortável predominantemente em 60% do tempo. Para melhorar ainda mais o conforto, são recomendadas estratégias passivas como o ajuste de vestimenta, ventilação e aquecimento solar.

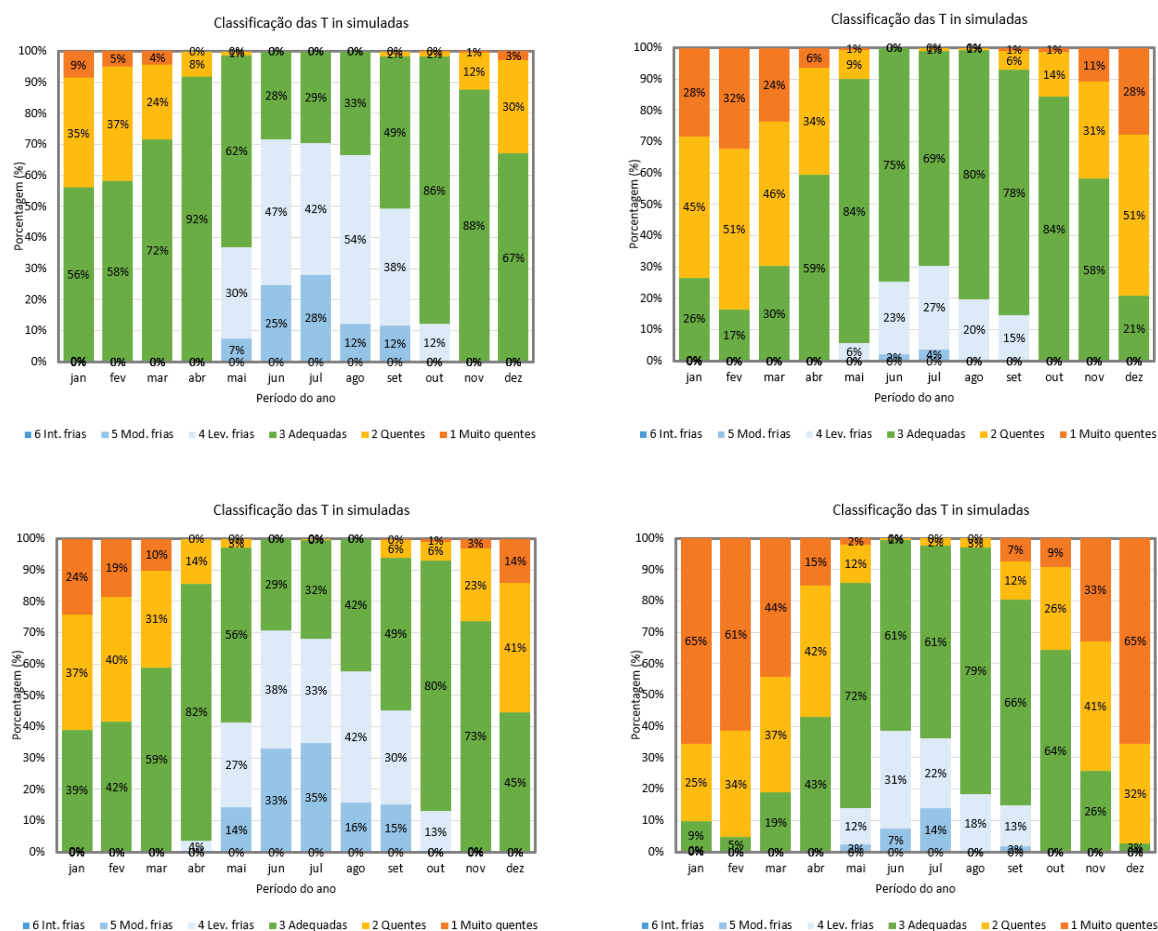
O segundo cenário, representado no gráfico superior direito, corresponde a edificações com alvenaria isolada e laje de concreto convencional. Em comparação ao primeiro cenário, o isolamento na alvenaria reduz a concentração de temperaturas dentro da faixa de conforto, resultando em um aumento na incidência de temperaturas "quentes" e "intensamente quentes". Há dispersão também à esquerda, porém, menos acentuada, sugerindo que o isolamento contribui para a redução das perdas de calor. Observa-se um aumento na amplitude térmica diária, apesar de as temperaturas internas permanecerem confortáveis em 57% do tempo. Para otimizar o conforto térmico nesse cenário, além do isolamento, recomenda-se a adoção de ventilação natural, ajustes na vestimenta e estratégias de resfriamento ativo.

O cenário 1.3, mostrado no gráfico inferior esquerdo, apresenta resultados semelhantes ao do primeiro, porém com maior dispersão aos extremos. As temperaturas internas são predominantemente confortáveis, também representando 52% do tempo, menor porcentagem entre os cenários analisados. Estratégias adicionais, como ventilação, ajuste da vestimenta e resfriamento ativo, são recomendadas para melhorar o conforto térmico.

No último cenário, representado pelo gráfico inferior esquerdo, as edificações contam com isolamento tanto na alvenaria quanto na laje. Este cenário, apresenta um desempenho inferior somente ao primeiro. A dispersão dos dados indica que o excesso de isolamento pode estar limitando o desempenho térmico, resultando em picos de temperatura mais altos. Observa-se uma alta frequência de temperaturas "intensamente quentes". Mesmo assim, as temperaturas internas permanecem confortáveis em 58% do tempo. Ventilação natural, resfriamento ativo e ajuste de vestimenta são as estratégias recomendadas para melhorar o desempenho térmico.

Olhando para um panorama anual, a ferramenta nos traz informações sobre a classificação das temperaturas internas mensais simuladas, como apresentado na FIGURA 68.

FIGURA 68 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA PARANGUÁ PARA EDIFICAÇÕES EM CONTATO COM O SOLO



FONTE: A autora (2025).

No primeiro cenário, representado no gráfico superior esquerdo, as temperaturas internas simuladas indicam que, durante a maior parte do ano, especialmente entre outubro e maio, predominam na faixa "adequada", variando entre 56% e 92%. No entanto, nos meses de inverno, como junho e julho, observa-se um aumento nas temperaturas classificadas como "moderadamente frias" e "levemente frias", atingindo picos de 28% e 54%, respectivamente. Esses dados sugerem que, embora o conforto térmico seja mantido na maior parte do ano, há uma tendência acentuada de desconforto nos meses mais frios.

No segundo cenário, representado pelo gráfico superior direito, há uma melhora nas temperaturas "adequadas" durante os meses frios, especialmente entre maio e setembro. No entanto, nos meses mais quentes, observa-se um aumento nas temperaturas "quentes" e "muito quentes," predominância dessas temperaturas entre dezembro e março. Isso indica que, embora o isolamento na alvenaria seja eficaz em

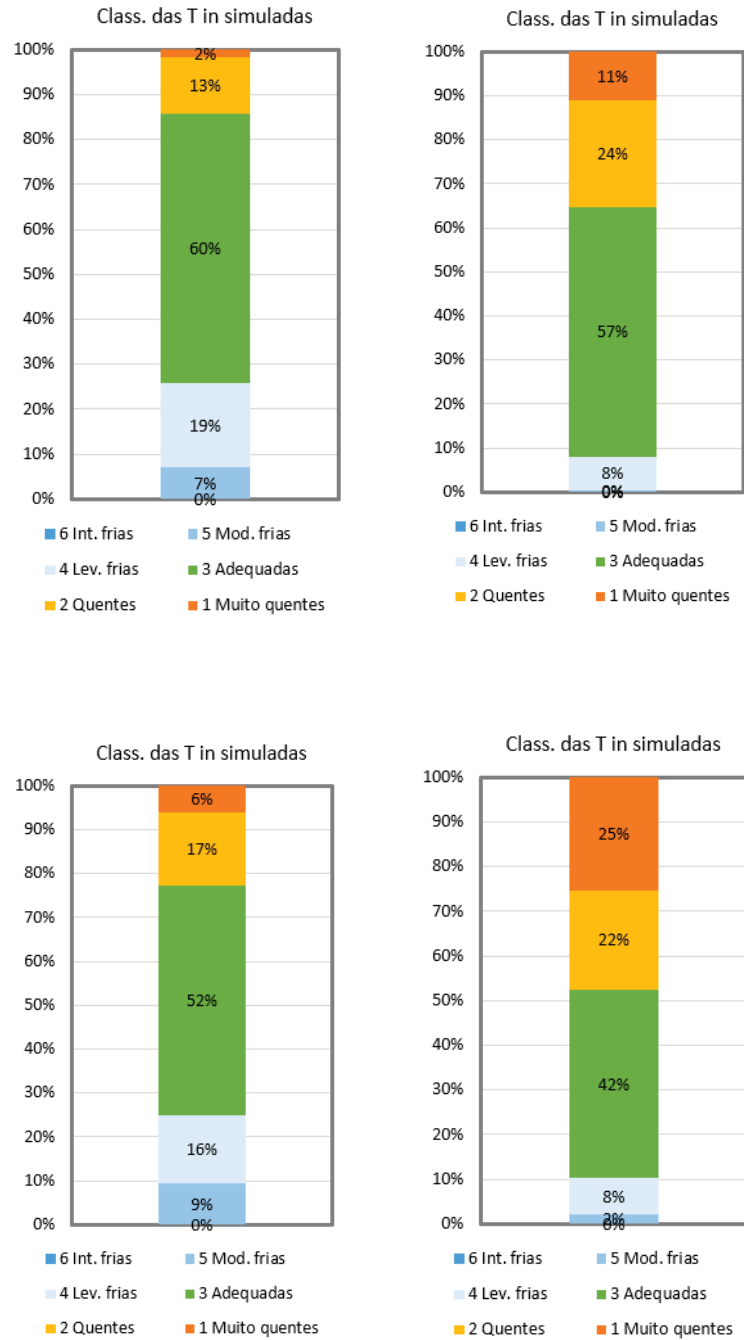
mitigar o frio nos meses de transição, ele também pode causar uma maior incidência de superaquecimento durante o verão.

No cenário 1.3, ilustrado pelo gráfico inferior esquerdo, há um aumento nas temperaturas "moderadamente frias" durante o inverno, especialmente em junho e julho, onde essas temperaturas atingem 33% e 35%, respectivamente, as maiores incidências entre todos os cenários. Em comparação com o cenário anterior, observa-se uma redução expressiva na ocorrência de temperaturas "muito quentes" e "quentes". Isso sugere que o isolamento na laje, pode estar contribuindo para temperaturas internas mais baixas durante o inverno, ao limitar as trocas de calor com o solo, resultando em maior desconforto térmico.

O último cenário, representado no gráfico inferior direito, apresenta um desempenho térmico inferior em relação aos cenários anteriores, com uma elevada incidência de temperaturas "quentes" e "muito quentes". Nos meses de dezembro e janeiro, as temperaturas classificadas como "muito quentes" alcançam até 65%. Além disso, observa-se uma redução na porcentagem de temperaturas "adequadas" em comparação ao cenário 1.2, especialmente nos meses mais frios. Esses resultados sugerem que o isolamento térmico excessivo nesse cenário pode estar comprometendo a capacidade da edificação de manter o conforto térmico ao longo do ano, resultando em um desempenho global menos eficiente.

Considerando a média geral do ano todo a maior porcentagem de temperaturas adequadas o melhor cenário é o 1.1 com 60%. A comparação das médias anuais pode ser observada na FIGURA 69.

FIGURA 69 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS ANUAIS SIMULADAS PARA PARANAGUÁ



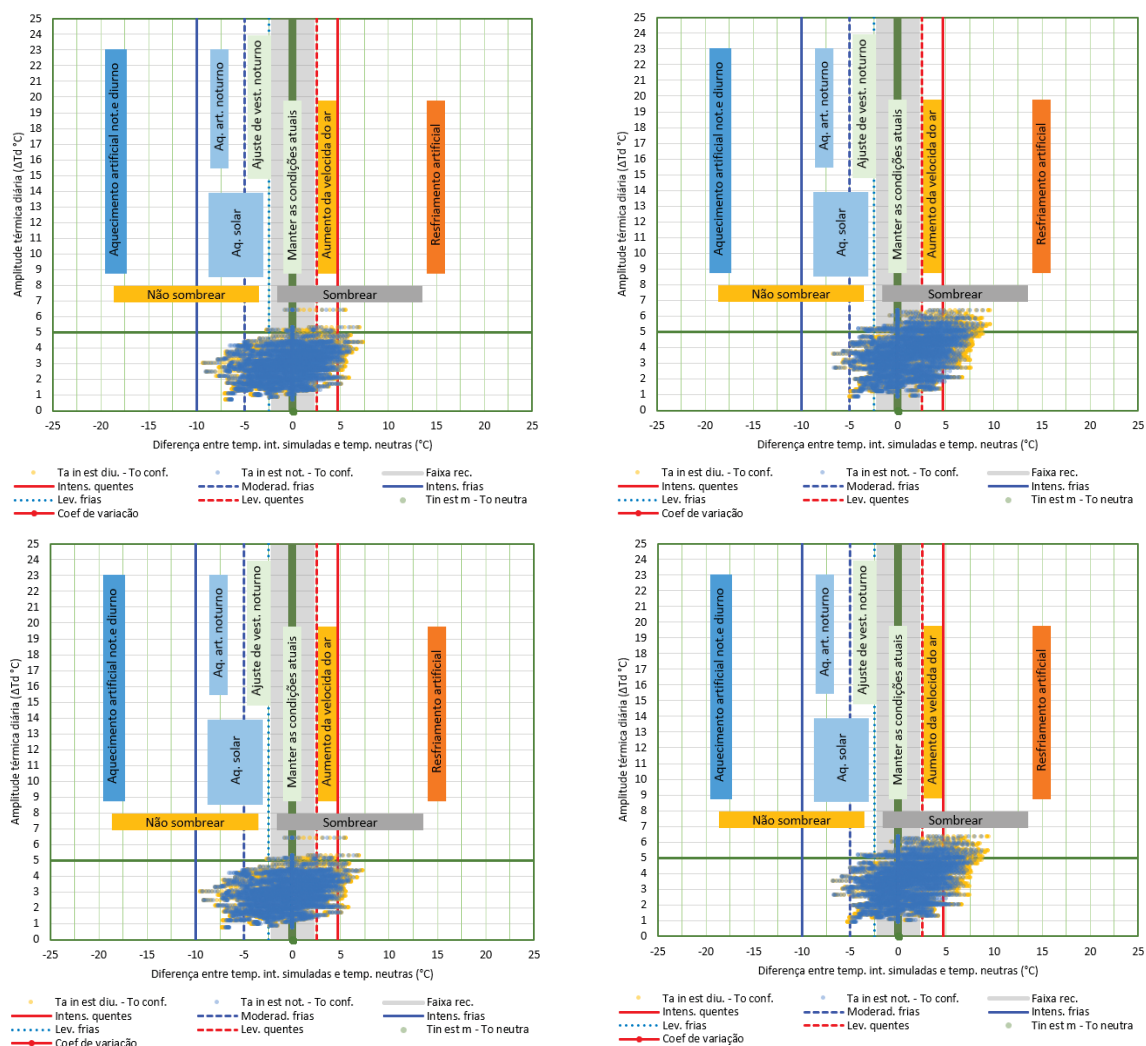
FONTE: A autora (2025).

Em resumo, a análise desses gráficos destaca o cenário 1.1 como o mais eficiente, sugerindo que a ausência de isolamento na envoltória e contato direto com o solo proporciona o melhor desempenho térmico ao longo do tempo. Esse cenário mantém as temperaturas internas mais próximas da faixa de conforto, reduzindo a necessidade de intervenções adicionais para manter o ambiente confortável.

5.1.4.2 ELEVADA COM CÂMARA DE NÃO VENTILADA (COM PORÃO)

Os resultados desse cenário mostram semelhança com os observados em edificações em contato direto com o solo. Observa-se, de maneira geral, uma redução significativa na amplitude térmica, com as temperaturas internas migrando para a faixa de conforto em determinados períodos. Há uma correspondência notável entre os cenários analisados, destacando-se a similaridade entre os cenários 2.1 (sem isolamento) e 2.3 (isolamento apenas na laje), bem como entre os cenários 2.2 (isolamento na alvenaria) e 2.4 (isolamento tanto na alvenaria quanto na laje), conforme ilustrado na FIGURA 70. Na sequência, os resultados serão detalhados, evidenciando a resposta da edificação em cada cenário.

FIGURA 70 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA PARANAGUÁ NO CENÁRIO ELEVADA COM PORÃO



FONTE: A autora (2025).

Em todos os gráficos, a maioria dos pontos plotados se concentra na faixa de conforto e na parte inferior, o que indica que a amplitude térmica diária permaneceu em níveis reduzidos na maior parte do tempo. Além disso, observa-se uma dispersão dos pontos tanto à direita quanto à esquerda do eixo central, sugerindo que as condições internas da edificação experimentaram variações significativas, alternando entre temperaturas frias e quentes.

No cenário 2.1, representado pelo gráfico superior esquerdo, observamos uma baixa variação térmica, com a maioria dos pontos concentrados na faixa de conforto. No entanto, há uma dispersão de pontos tanto à esquerda quanto à direita do ponto zero, indicando períodos de desconforto devido a temperaturas “levemente frias” e “quentes”, incluindo algumas “muito quentes”. A recomendação para manter

as condições atuais é predominante, representando 56% do tempo. A diferença máxima positiva entre as temperaturas horárias simuladas e as temperaturas neutras é de 7,4 °C, enquanto a diferença máxima negativa alcança 9,3°C.

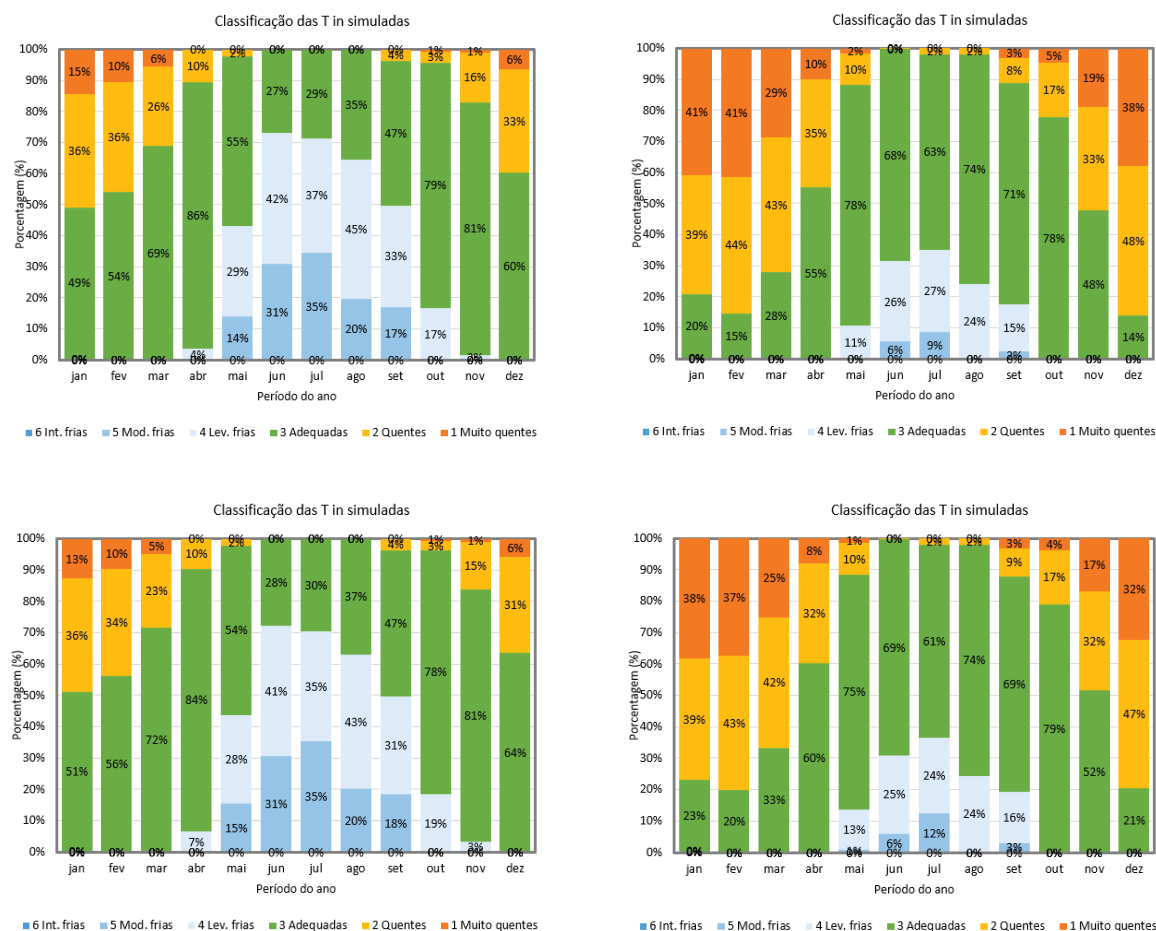
No cenário 2.2, representado pelo gráfico superior direito, as edificações são construídas com alvenaria isolada e laje convencional. Em comparação ao primeiro cenário, a presença de isolamento na alvenaria resulta em uma menor concentração de temperaturas dentro da faixa de conforto, além de uma maior variação térmica ao longo do dia, evidenciada pelo aumento da amplitude térmica diária. Embora ainda haja uma dispersão de pontos à esquerda do gráfico, indicando temperaturas levemente frias, essa dispersão é menos acentuada do que no cenário anterior. Por outro lado, a dispersão à direita é mais pronunciada, sugerindo que o isolamento na alvenaria é eficaz na redução das perdas de calor nos períodos frios, mas pode também dificultar a dissipação térmica nos períodos mais quentes, resultando em picos de temperatura elevada. A diferença máxima positiva entre as temperaturas horárias simuladas e as temperaturas neutras é de 9,7°C, enquanto a diferença máxima negativa chega a -6,7°C. Nesse cenário, as temperaturas permanecem dentro da faixa de conforto em 51% do tempo.

Já o cenário 2.3, representado pelo gráfico inferior esquerdo, refere-se a edificações com alvenaria convencional e laje isolada. Os resultados obtidos são semelhantes aos do primeiro cenário, apresentando uma amplitude térmica e uma dispersão comparáveis. A recomendação para manutenção das condições atuais ocorre em aproximadamente 56,6% do tempo, um aumento de 0,6% em relação ao cenário 2.1.

No último cenário, ilustrado no gráfico inferior direito, o desempenho térmico é bastante semelhante ao observado no cenário 2.2. Neste cenário, as condições de conforto são mantidas em 53% do tempo, representando um ligeiro aumento em relação ao cenário 2.2. A diferença máxima positiva entre as temperaturas horárias simuladas e as temperaturas neutras é de 9,4 °C, enquanto a diferença máxima negativa atinge 6,8 °C.

Na escala anual, a ferramenta nos traz informações sobre a classificação das temperaturas internas mensais simuladas, como apresentado na FIGURA 71.

FIGURA 71 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA PARANAGUÁ PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS COM PORÃO



FONTE: A autora (2025).

No primeiro cenário, a análise das temperaturas internas ao longo do ano mostra que, em geral, a maior parte do tempo é caracterizada por condições térmicas adequadas. No entanto, durante os meses de inverno, como junho e julho, as temperaturas caem significativamente, com até 35% do tempo sendo classificado como moderadamente frio, resultando em desconforto térmico.

Nos meses mais quentes, de outubro a abril, com exceção do mês de janeiro, as condições internas são predominantemente confortáveis, com a maioria das temperaturas dentro da faixa ideal. Mesmo em maio, que registra uma quantidade notável de temperaturas “levemente frias”, há uma predominância de períodos com temperaturas confortáveis. De novembro a março, parte das temperaturas internas são classificadas como “quentes” e “muito quentes”, mas o conforto geral ainda prevalece na maior parte do tempo.

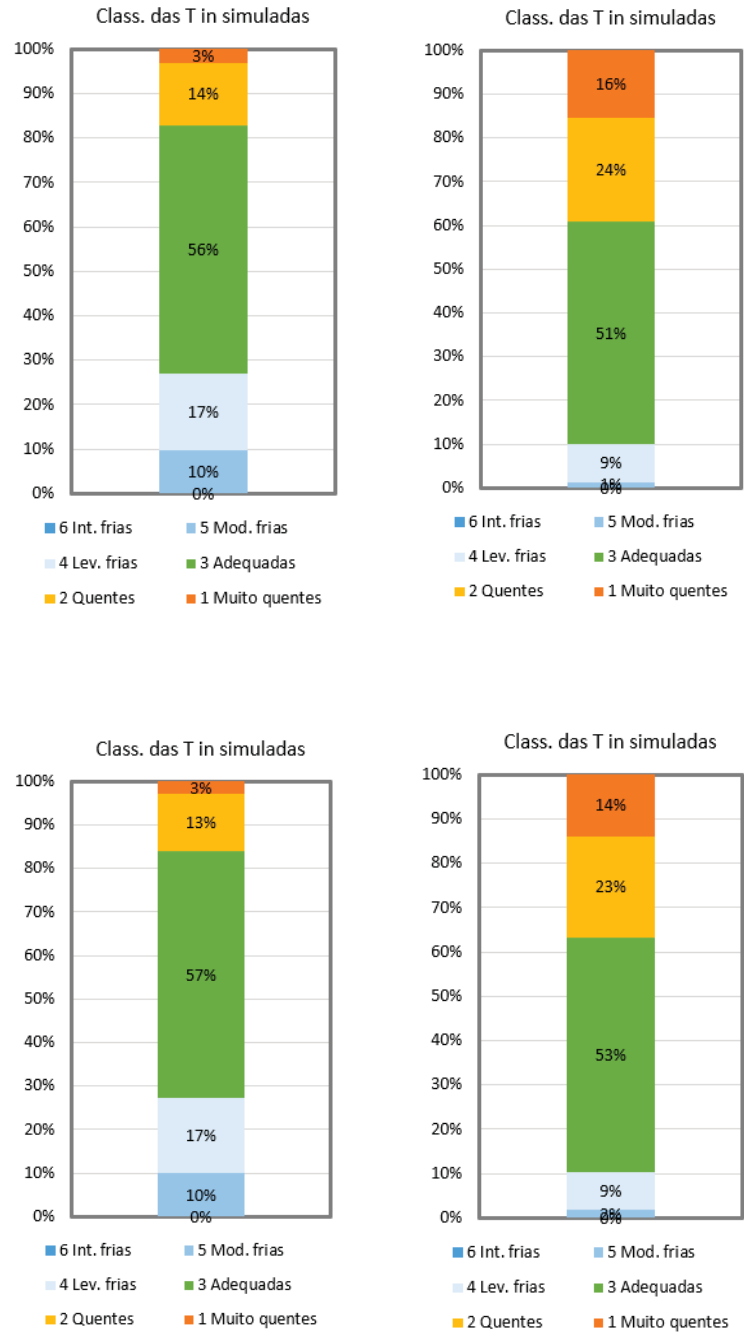
O segundo cenário apresenta uma melhora em relação ao primeiro nos períodos mais frios, com uma redução na porcentagem de temperaturas "moderadamente frias" e um aumento significativo de temperaturas consideradas "adequadas". Em contrapartida, seu desempenho piora nos meses mais quentes. Durante o verão, de dezembro a março, observa-se uma leve redução nas temperaturas "adequadas", acompanhada por um aumento nas temperaturas "quentes" e "muito quentes". O gráfico evidencia uma clara migração das temperaturas para a faixa de calor, reforçando essa tendência nos períodos mais quentes do ano.

Como previsto, o terceiro cenário apresenta um desempenho térmico semelhante ao do primeiro, com pequenas variações. Nos períodos frios, há um leve aumento nas temperaturas classificadas como "moderadamente frias", atingindo no máximo 1% a mais. A semelhança dos resultados com o cenário 2.1, que não inclui isolamento, reforça a ideia de que o isolamento na laje tem um impacto pouco significativo na melhoria do conforto térmico.

No último cenário, que inclui isolamento tanto na alvenaria quanto na laje, a distribuição de temperaturas "adequadas" ao longo do ano é praticamente idêntica à do cenário 2.2, apresentando apenas pequenas variações.

Ao avaliar o melhor cenário com base na maior porcentagem de temperaturas "adequadas" ao longo do ano, os cenários 2.1 e 2.3 se destacam. Ambos apresentam desempenhos muito semelhantes, podendo ser considerados equivalentes em termos de conforto térmico. A comparação das médias anuais, que reforça essa conclusão, pode ser visualizada na FIGURA 72.

FIGURA 72 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA PARANAGUÁ PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS COM PORÃO



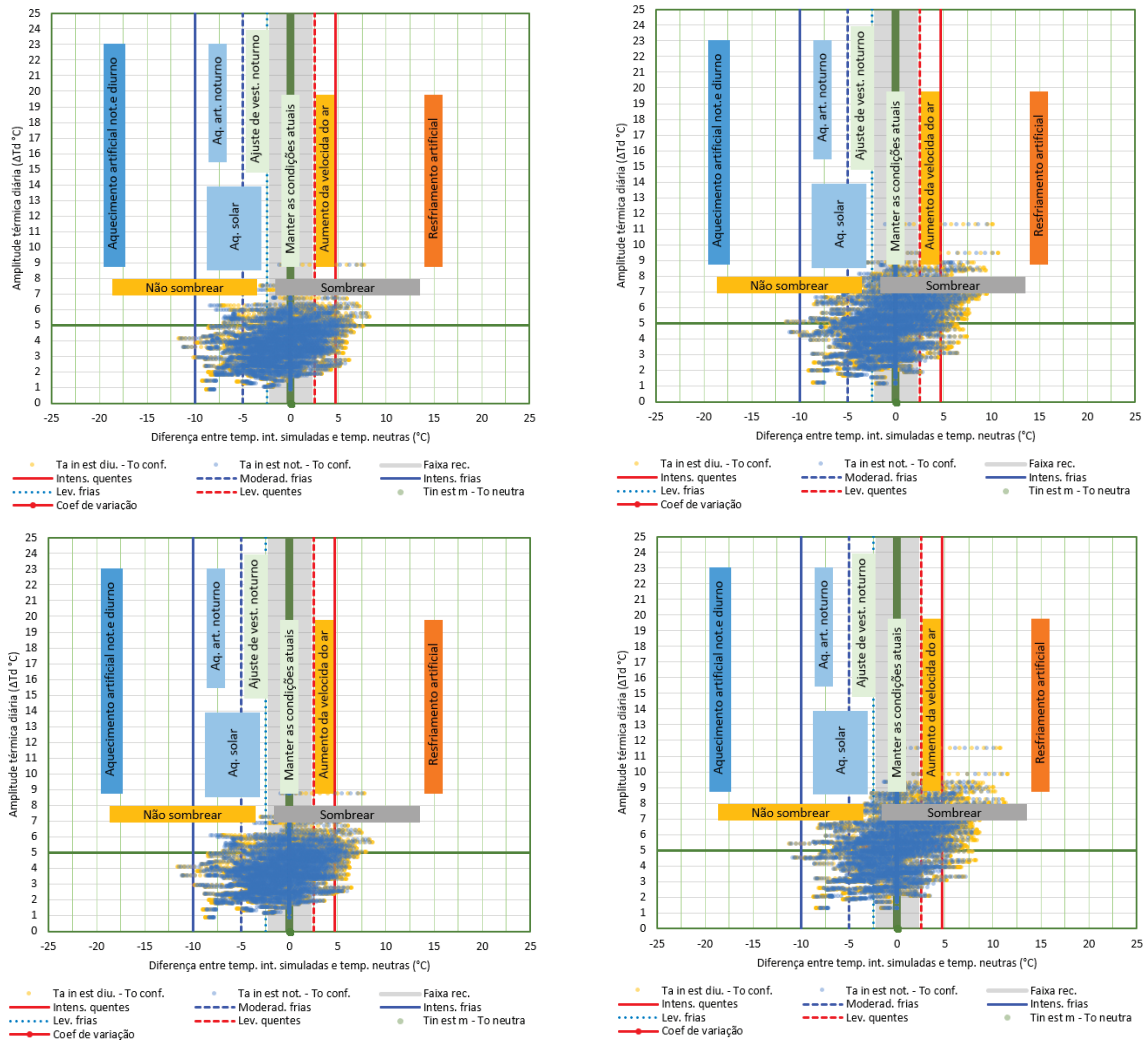
FONTE: A autora (2025).

5.1.4.3 ELEVADA COM CÂMARA DE AR VENTILADA (SOBRE PILOTIS)

A edificação simulada elevada sobre pilotis apresentou resultados favoráveis em termos de temperaturas internas em todos os cenários construtivos, quando comparadas às temperaturas externas, conforme ilustrado na FIGURA 77. A seguir,

serão detalhados os resultados específicos de cada cenário, destacando a resposta térmica da edificação em diferentes condições.

FIGURA 73 – DIAGRAMA ANTROPOCLIMÁTICO 2: MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS SIMULADAS PARA PARANAGUÁ NO CENÁRIO ELEVADA COM CÂMARA DE AR VENTILADA



FONTE: A autora (2025).

O gráfico superior esquerdo, que corresponde ao cenário 3.1 (com alvenaria convencional e laje de concreto convencional), evidencia uma alta concentração de pontos dentro da faixa de conforto térmico. No entanto, há uma dispersão significativa ao longo do eixo x, principalmente à esquerda, mas também com alguns pontos à direita, o que indica a presença de temperaturas tanto abaixo quanto acima das temperaturas neutras. Nesse cenário, a diferença máxima positiva entre as temperaturas horárias e as temperaturas neutras atinge 8,3°C, enquanto a diferença máxima negativa chega a 11,7°C. A maior parte das temperaturas registradas está

dentro da faixa adequada, representando 51% do total. Comparando-se com as temperaturas externas, as temperaturas internas apresentaram uma redução de 52%.

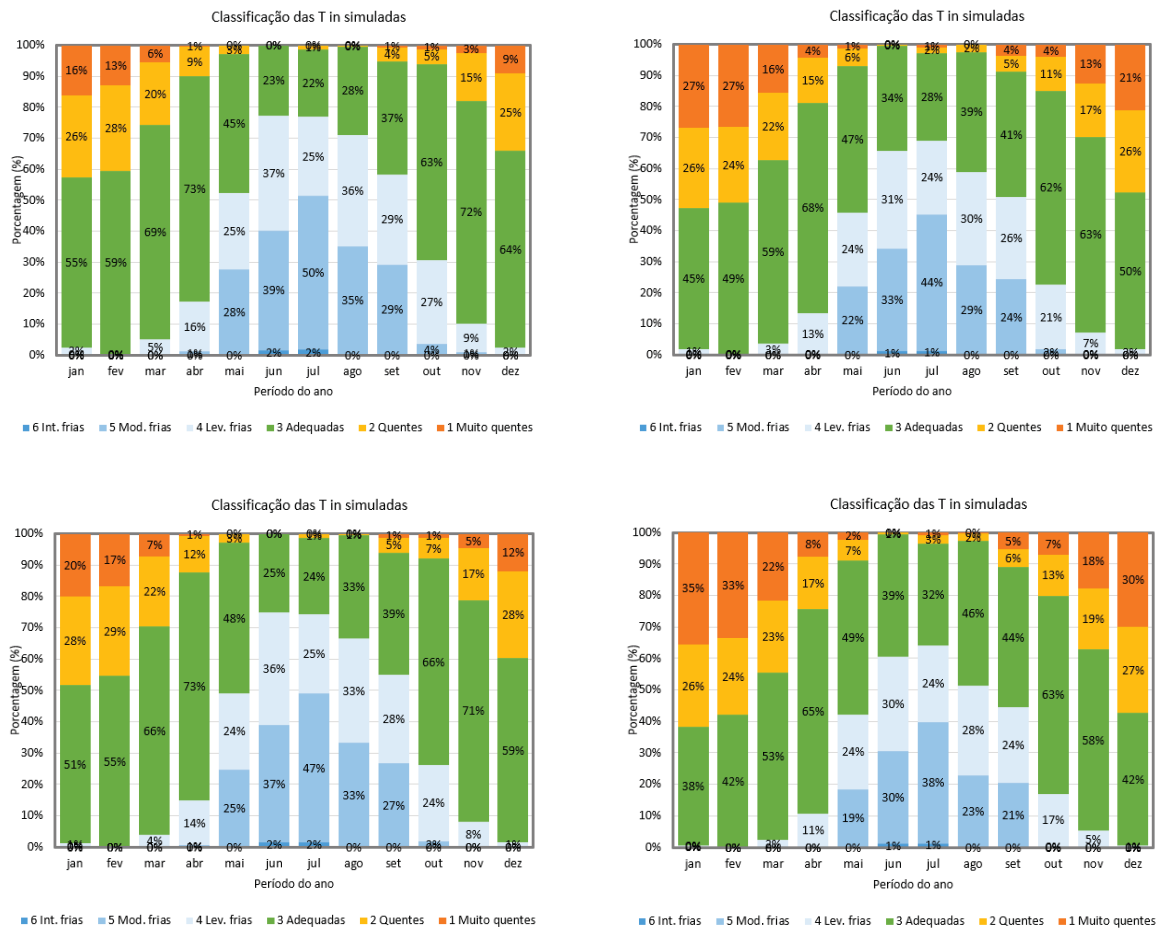
No gráfico superior direito, que corresponde ao cenário 3.2 (alvenaria com isolamento e laje de concreto convencional), percebe-se um aumento notável na amplitude térmica. Contudo, há uma migração atenuada das temperaturas internas em direção à zona de conforto, com uma tendência também em direção à faixa de temperaturas "muito quentes". Esse comportamento sugere uma redução nos picos extremos de frio, ao mesmo tempo que se observa um aumento nos picos extremos de calor. Neste cenário as temperaturas são predominantemente desconfortáveis em 51%, representando uma redução de 2% nas condições de conforto em relação ao cenário anterior.

No gráfico inferior esquerdo, que corresponde ao cenário 3.3 (alvenaria convencional e laje com isolamento), é possível observar a tendência dos outros grupos, de que o isolamento aplicado apenas na laje, sem a presença de isolamento na alvenaria, resulta em um comportamento térmico muito semelhante ao do cenário 3.1, sem isolamento algum. Observa-se uma distribuição de temperaturas mais dispersa e uma capacidade reduzida de manter as temperaturas internas dentro da faixa de conforto térmico. As amplitudes diárias máximas são similares, com 8,9°C no cenário 3.1 e 8,7°C no cenário 3.4. As diferenças máximas entre as temperaturas horárias e as temperaturas neutras, tanto positivas quanto negativas, são de 8,7°C e 11,6°C, respectivamente. No total, as temperaturas adequadas nesse cenário representam, assim como no primeiro cenário, 51% do tempo, evidenciando a ineficácia do isolamento unicamente na laje para otimizar o desempenho térmico da edificação.

O gráfico inferior direito, que representa o cenário 3.4 (alvenaria com isolamento e laje de concreto com isolamento), revela uma tendência similar ao 3.2 porém com uma maior dispersão tanto para a direita quanto para a esquerda. Isso sugere que há mais ocorrências de desconforto, tanto por frio quanto por calor. Nesse cenário, a diferença máxima positiva entre as temperaturas horárias e as temperaturas neutras é de 11,6°C, enquanto a diferença máxima negativa é de 11,2°C. A porcentagem de temperaturas que se mantêm na faixa de conforto é de 48%, o que indica um desempenho inferior em comparação aos outros cenários.

Ao longo de um ano, a ferramenta oferece uma análise detalhada da classificação das temperaturas internas simuladas para cada mês, conforme ilustrado na FIGURA 74.

FIGURA 74 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA PARANAGUÁ PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS SOBRE PILOTIS



FONTE: A autora (2025).

Ao analisar o gráfico da classificação das temperaturas internas simuladas, é evidente no cenário superior esquerdo (3.1) que as temperaturas "adequadas" predominam ao longo do ano, especialmente entre os meses de outubro e abril, quando mais de 50% das temperaturas internas se mantêm nessa categoria. Durante os meses mais frios, as temperaturas "moderadamente frias" chegam a representar até 50% do tempo, enquanto as "levemente frias" podem alcançar 37%. Nos meses mais quentes, observa-se uma pequena proporção de temperaturas "muito quentes", e "quentes".

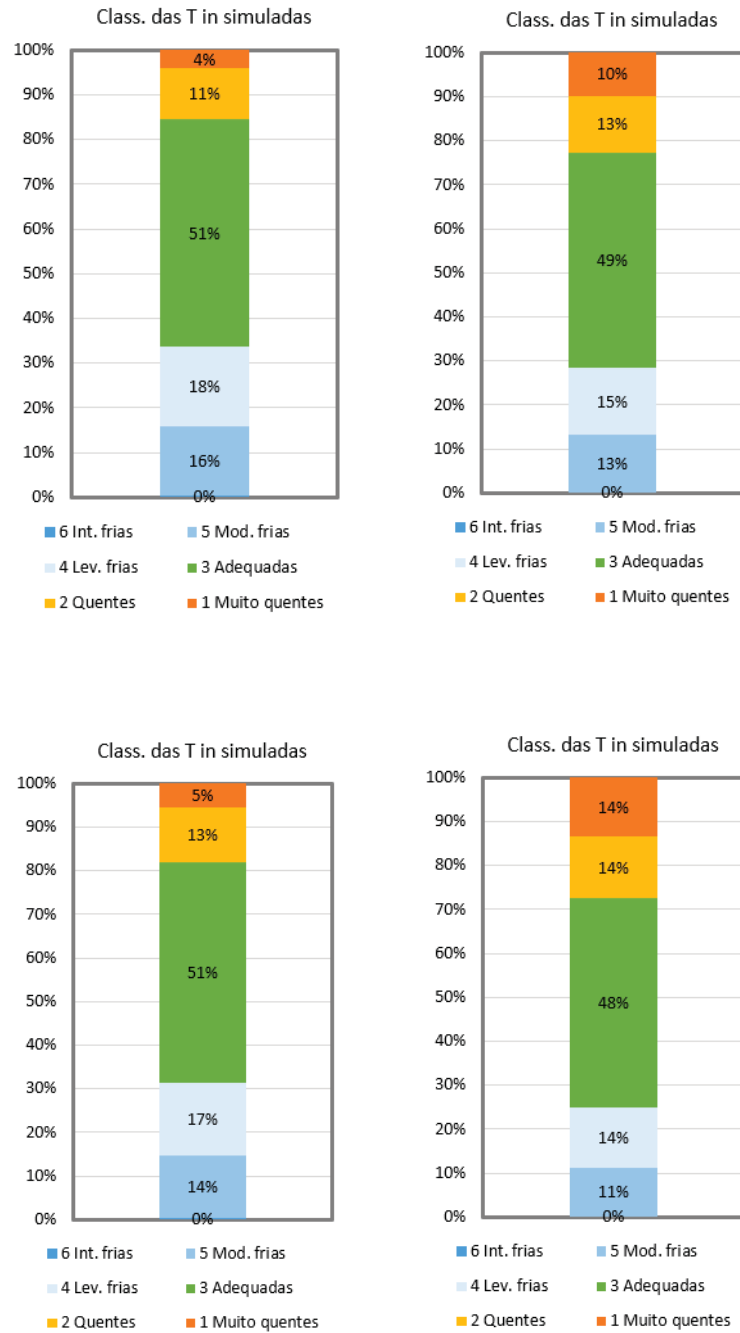
Seguindo a tendência observada nos grupos anteriores, o segundo cenário apresenta uma melhoria em relação ao primeiro, especialmente durante os períodos mais frios, com uma maior proporção de temperaturas classificadas como "adequadas". Nota-se que parte das temperaturas frias migraram para a categoria de temperaturas "adequadas". Isso indica que, apesar de o frio ainda predominar, as temperaturas se aproximaram mais da faixa de conforto. No entanto, durante os períodos mais quentes, houve um aumento nas porcentagens de temperaturas "muito quentes" e "quentes", sugerindo um aquecimento mais acentuado. Consequentemente, nesses meses, a porcentagem de temperaturas "adequadas" é significativamente reduzida.

O terceiro cenário apresenta um desempenho térmico semelhante ao do primeiro, com menores ocorrências de temperaturas "muito quentes" e uma distribuição de temperaturas frias que segue um padrão bem próximo.

O quarto cenário mantém a tendência de distribuição de temperaturas ao longo do ano do cenário 3.2, mas com algumas pequenas variações. O desempenho térmico é ligeiramente inferior ao dos cenários anteriores, apresentando menor ocorrência de temperaturas "adequadas". Observa-se um aumento na incidência de temperaturas "muito quentes" nos meses de novembro a março. Esses dados sugerem que o isolamento, neste contexto específico, pode ter contribuído negativamente para o desempenho térmico da edificação. Em geral, houve uma redução na porcentagem de temperaturas adequadas em quase todos os meses do ano, o que indica que a adição do isolamento na laje não foi benéfica, impactando desfavoravelmente o conforto térmico interno.

Ao analisar o desempenho dos cenários com base na maior porcentagem de horas em que as temperaturas operativas se mantêm dentro da faixa de conforto ao longo do ano, os cenários 3.1 e 3.3 destacam-se. A comparação das médias anuais, é ilustrado na FIGURA 75.

FIGURA 75 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS INTERNAS MENSAIS SIMULADAS PARA PARANAGUÁ PARA EDIFICAÇÕES ELEVADAS SOBRE PILOTIS



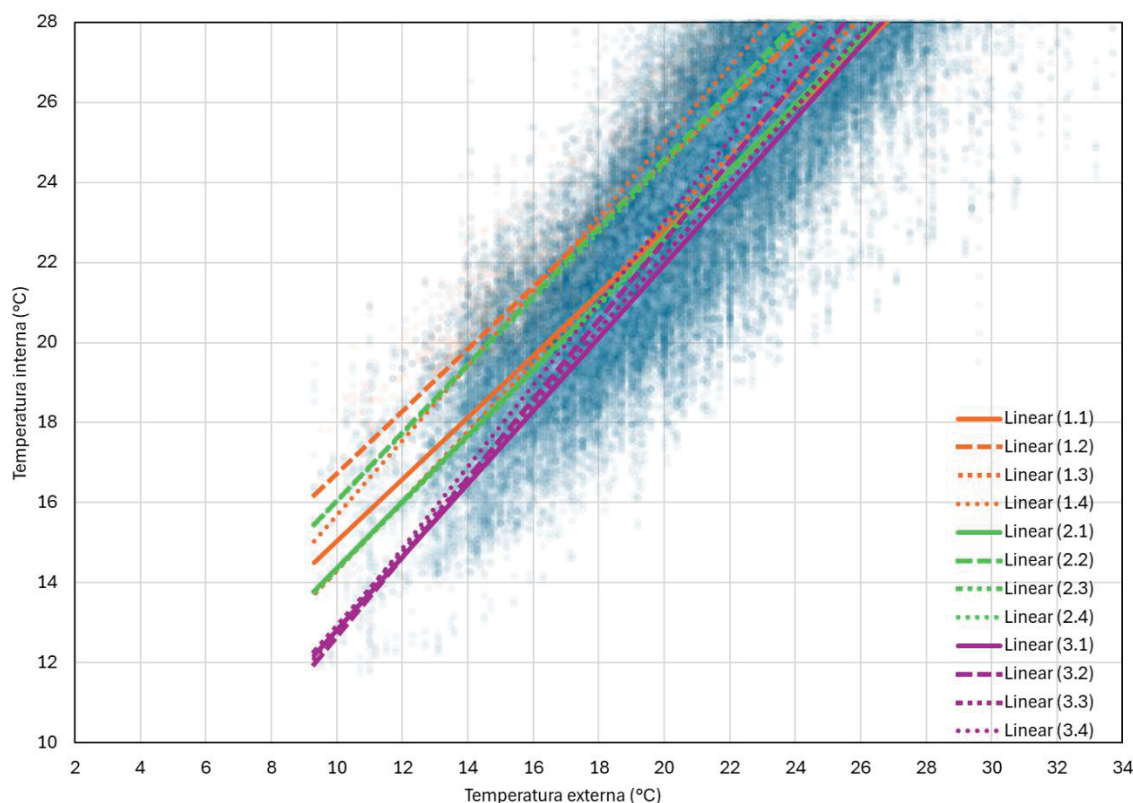
FONTE: A autora (2025).

5.1.4.4 COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS

São apresentados nessa seção os resultados das simulações através de gráficos que ilustram tanto a variação térmica interna em função das temperaturas externas (FIGURA 76) quanto a porcentagem de horas em que as temperaturas

internas permanecem dentro, abaixo ou acima da faixa de conforto térmico (FIGURA 63) para a cidade de Paranaguá.

FIGURA 76 – RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA INTERNA E EXTERNA PARA DIFERENTES CENÁRIOS DE EDIFICAÇÃO EM PARANAGUÁ



FONTE: A autora (2025).

Para a cidade de Paranaguá, os cenários de edificações em contato com o solo apresentam diferentes comportamentos térmicos. No cenário 1.1 (sem isolamento), a inclinação é moderada, indicando que a variação da temperatura interna é razoavelmente estável em resposta às variações da temperatura externa. Assim como nas análises anteriores, este cenário parece ser o mais equilibrado, mantendo uma melhor estabilidade térmica.

O cenário 1.2 (com isolamento na alvenaria), tem inclinação similar ao do primeiro. No entanto, a linha de tendência está acima da 1.1, o que indica que o isolamento na alvenaria altera a resposta térmica em relação ao cenário sem isolamento em direção a temperaturas mais quentes.

O cenário 1.3 (isolamento somente na laje), possui uma inclinação semelhante ao cenário 1.1, seguindo a tendência das análises anteriores.

O cenário 1.4 (isolamento na alvenaria e na laje), tem uma inclinação maior em comparação aos cenários anteriores. Isso indica que a combinação de isolamento na alvenaria e na laje leva a uma maior variação térmica interna.

No Grupo 2, que representa edificações elevadas não ventiladas (com porão), os cenários 2.1 (sem isolamento) e 2.3 (isolamento somente na laje) apresentam, assim como nas análises anteriores, linhas de tendência que praticamente se sobrepõem, indicando um comportamento térmico muito semelhante. Ambas as linhas são bastante inclinadas, sugerindo que a variação térmica interna não é bem controlada, resultando em uma edificação que é sensível às flutuações de temperatura externa.

Os cenários 2.2 (isolamento somente na alvenaria) e 2.4 (isolamento na alvenaria e na laje), embora apresentem uma leve redução na inclinação em comparação aos cenários 2.1 e 2.3, também possuem linhas que quase se sobrepõem. Isso indica que, apesar do isolamento, a redução na variação térmica interna é mínima. A semelhança nas inclinações dos cenários 2.2 e 2.4 com os cenários 2.1 e 2.3 sugere que, para edificações elevadas não ventiladas, as estratégias de isolamento testadas não foram suficientes para proporcionar um controle térmico interno satisfatório.

No Grupo 3, que analisa edificações elevadas ventiladas (sobre pilotis), repetindo a tendência deste grupo, as linhas de tendência são as mais inclinadas entre todos os grupos, indicando que a variação térmica interna é ainda menos controlada. O cenário 3.4 (isolamento na alvenaria e na laje) possui a linha mais inclinada de todas, destacando-se como o cenário com maior variação de temperatura interna em resposta às variações externas.

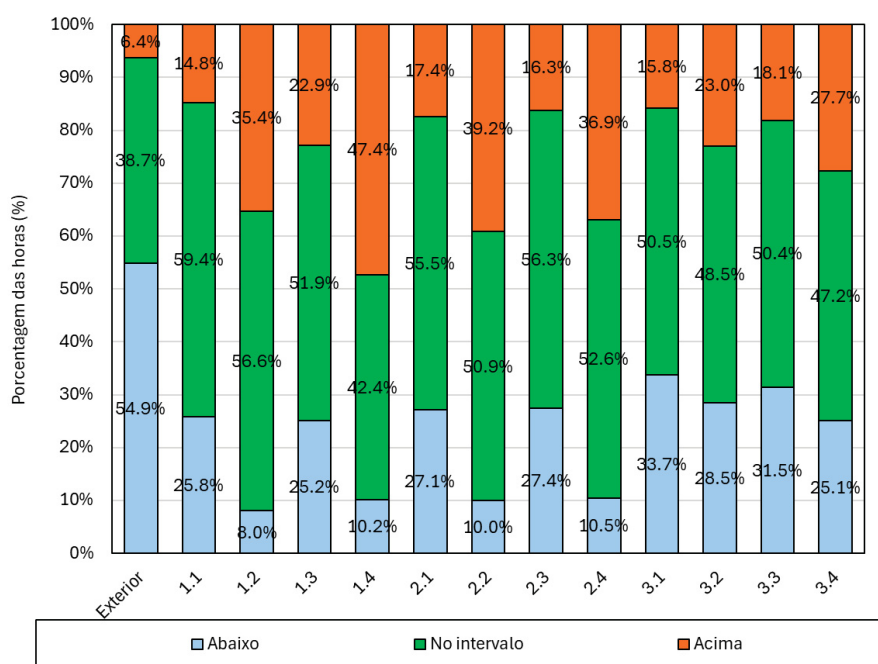
Por outro lado, o cenário 3.1 (sem isolamento) tem a linha menos inclinada dentro do Grupo 3, embora ainda seja bastante inclinada em comparação com os grupos 1 e 2, indicando que mesmo sem isolamento, a edificação sobre pilotis não consegue controlar bem a variação térmica interna.

As linhas dos cenários 3.2 (isolamento somente na alvenaria) e 3.3 (isolamento somente na laje) têm inclinações semelhantes e estão muito próximas, sugerindo que ambos os tipos de isolamento produzem um efeito térmico quase idêntico, com uma variação térmica interna significativa que não é bem controlada pela ventilação sob a residência.

Os resultados para Paranaguá, indicam que todos os grupos apresentam linhas bastante inclinadas, sugerindo que nenhum dos cenários conseguiu controlar pronunciadamente a variação térmica interna. O Grupo 3, que inclui edificações elevadas ventiladas, mostra o pior desempenho em termos de controle térmico, com todas as linhas altamente inclinadas, especialmente o cenário 3.3 (isolamento na alvenaria e na laje).

Após analisar a relação entre a temperatura interna e externa para os diferentes cenários de edificações na cidade de Paranaguá, o gráfico abaixo (FIGURA 77), apresenta a porcentagem de horas que as temperaturas internas permaneceram abaixo, dentro ou acima do intervalo de conforto térmico.

FIGURA 77 – DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS HORAS DE TEMPERATURA INTERNA DENTRO, ABAIXO E ACIMA DO INTERVALO DE CONFORTO TÉRMICO PARA DIFERENTES CENÁRIOS EM PARANAGUÁ



FONTE: A autora (2025).

No Grupo 1, que representa edificações em contato direto com o solo, o cenário 1.1 destaca-se como o mais eficaz, apresentando o maior percentual de horas dentro do intervalo de conforto térmico, com 59,4%, sendo o melhor cenário não apenas dentro do grupo, mas também entre todos os cenários analisados. Os cenários deste grupo, de forma geral, apresentaram os maiores percentuais de horas dentro

da faixa de conforto com exceção do 1.4: 1.2 com 56,6%, 1.3 com 51,9%, e 1.4 com 42,4%.

As variações mais significativas entre os cenários do Grupo 1 estão nas porcentagens de horas em que as temperaturas internas ficaram acima ou abaixo do intervalo de conforto. O cenário 1.4 tem a maior porcentagem de horas com temperaturas acima da faixa de conforto, com 47,4%, enquanto o cenário 1.1 apresenta a maior porcentagem de horas com temperaturas abaixo da faixa de conforto, com 25,8%.

Para o Grupo 2, os cenários que apresentam o maior percentual de horas dentro do intervalo de conforto térmico são o 2.1 (sem isolamento) e o 2.3 (isolamento na laje), com 55,5% e 56,3%, respectivamente. Enquanto os cenários 2.2 e 2.4 apresentam o maior percentual de horas acima do intervalo dentro do grupo, com 39,2% e 36,9%, respectivamente, indicando que, o isolamento pode levar a temperaturas internas mais elevadas.

No Grupo 3, que analisa edificações elevadas sobre pilotis, observa-se que este grupo possui as menores porcentagens de horas dentro do intervalo de conforto térmico, mostrando uma piora em relação aos grupos anteriores, especialmente no que se refere às temperaturas abaixo do intervalo de conforto. O cenário 3.1 (sem isolamento) tem a maior porcentagem de horas abaixo do intervalo de conforto, com 33,7%, enquanto o cenário 3.3 (isolamento somente na laje) também mostra uma alta porcentagem de horas abaixo da faixa de conforto, com 31,5%.

Esses resultados sugerem que, para edificações elevadas sobre pilotis, as estratégias de isolamento não são tão eficazes em manter as temperaturas internas dentro da faixa de conforto térmico em Paranaguá, comparado com os outros grupos, especialmente em termos de evitar temperaturas internas baixas.

A análise conjunta dos gráficos para Paranaguá indica que a estratégia mais recomendada para a região é o contato direto com o solo sem isolamento. Esse cenário apresentou a maior porcentagem de horas dentro da faixa de conforto e a melhor estabilidade térmica ao longo do tempo, destacando-se especialmente na mitigação de temperaturas extremas.

6 CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a influência do contato com o solo no desempenho térmico de edificações residenciais de pequeno porte, naturalmente ventiladas, em diferentes cidades do estado do Paraná: Campo Mourão, Curitiba, Ivaí e Paranaguá. Foram simuladas três condições de contato com o solo — edificação em contato direto com o solo, edificação elevada com porão e edificação elevada sobre pilotis — e diferentes composições construtivas para identificar a estratégia mais eficaz para cada clima. As simulações consideraram tanto modelos de referência quanto modelos "reais" para comparação.

Os resultados indicaram que o contato direto com o solo, sem isolamento térmico, se mostrou uma solução bioclimática eficiente para locais com temperaturas elevadas e menor amplitude térmica, como Paranaguá e Campo Mourão. Nesses casos, a inércia térmica do solo atua como um regulador natural da temperatura interna, reduzindo as variações térmicas ao longo do dia e minimizando picos de calor. Essa estratégia é especialmente relevante para climas onde a estabilidade térmica é um fator desejável e onde a perda de calor para o solo não representa um problema significativo. No entanto, em regiões com invernos rigorosos, como Curitiba e Ivaí, essa solução pode resultar em desconforto térmico, devido ao resfriamento excessivo dos ambientes internos. Para esse perfil climático, o contato com o solo ainda é a estratégias mais recomendada, porém com adição de isolamento.

A elevação da edificação com câmara de ar não ventilada (porão fechado) demonstrou um efeito intermediário entre o contato direto com o solo e a elevação sobre pilotis. Essa configuração pode ser vantajosa em climas com grande variação térmica diária, pois reduz a perda de calor para o solo durante o inverno, ao mesmo tempo em que evita o superaquecimento excessivo no verão. Entretanto, a falta de ventilação na câmara de ar pode gerar acúmulo de calor em períodos quentes, tornando essa solução menos eficiente para climas predominantemente quentes e úmidos.

A estratégia de elevação sobre pilotis apresentou o maior impacto na variação térmica interna, especialmente em regiões com maior amplitude térmica diária. A ventilação sob a edificação contribui para o resfriamento dos ambientes internos durante o dia, mas pode levar a perdas térmicas acentuadas em noites frias, tornando essa estratégia menos indicada para climas frios ou com grande variação sazonal. Em Curitiba e Ivaí, por exemplo, a elevação da edificação resultou em um aumento do

desconforto térmico por frio, enquanto em Campo Mourão e Paranaguá essa configuração apresentou um desempenho mais equilibrado.

A partir dessas observações, conclui-se que as estratégias de contato com o solo podem ser utilizadas como diretrizes bioclimáticas para o projeto de edificações naturalmente ventiladas, adaptando-se às condições climáticas locais. Em climas quentes e úmidos, como Paranaguá, o contato direto com o solo sem isolamento pode ser explorado como uma solução eficiente para garantir estabilidade térmica. Em regiões com invernos rigorosos, como Curitiba e Ivaí, estratégias que combinem isolamento térmico na envoltória com contato moderado com o solo podem proporcionar um equilíbrio mais adequado. Já em climas de transição, como Campo Mourão, a escolha entre contato direto com o solo ou elevação da edificação dependerá do nível de conforto térmico desejado e das estratégias passivas complementares adotadas.

Por fim, os resultados deste estudo reforçam a importância de considerar a relação entre a edificação e o solo no desenvolvimento de projetos bioclimáticos. O contato com o solo pode ser uma ferramenta importante para modulação térmica, reduzindo a dependência de sistemas ativos de climatização e contribuindo para edificações mais eficientes e sustentáveis.

Como possibilidades para estudos futuros, sugere-se a investigação de outras estratégias de isolamento térmico e ventilação natural em edificações elevadas, além de explorar a influência de diferentes configurações de contato com o solo em climas mais variados. A pesquisa também aponta para a necessidade de estudos mais aprofundados sobre o impacto de diferentes tipos de solo e sua capacidade de amortecimento térmico em edificações em contato direto com o solo.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220:** Desempenho térmico de edificações – 5 Partes. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4:** Edifícios habitacionais - Desempenho Parte 4: sistemas de vedações verticais externas e internas. Rio de Janeiro. 2013b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-5:** Edifícios habitacionais - Desempenho Parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas. Rio de Janeiro. 2013c.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575:** Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575:** Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2021.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE. **Thermal environmental conditions for human occupancy.** ANSI/ASHRAE Standard - 55-2020. ASHRAE.

ANDOLSUN, S. *et al.* EnergyPlus vs DOE-2.1 e: **The effect of ground coupling on cooling/heating energy requirements of slab-on-grade code houses in four climates of the US.** Energy and buildings, v. 52, p. 189-206, 2012.

BAVER, L.; GARDNER, W. R.; WILFORD, R. Gardner. **Física de suelos.** 1ª. en español, Ediciones UTEHA. México, 1973.

BAYLON, David. **Calculating the Impact of Ground Contact on Residential Heat Loss.** ASHRAE Transactions, v. 1, 2007.

BOGO, Amilcar *et al.* **Bioclimatologia aplicada ao projeto de edificações visando o conforto térmico.** Florianópolis: UFSC, 1994.

BRASIL, INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). Portaria nº 42 –**Instrução Normativa do Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas.** 2021.

CALADO, A. **Monitorização da Temperatura do Solo: Desenvolvimento e Estudo Experimental de um Permutador de Calor Ar-Solo.** 2016. Tese de Doutorado. Universidade da Beira Interior (Portugal).

CAMARGOS, Carolina Rodrigues *et al.* **Estado da arte da discussão sobre a Norma de Zoneamento Bioclimático Brasileiro.** 2013.

CELIS, A. M. C. *et al.* **Guia de Estratégias Bioclimáticas para Projetos Arquitetônicos no Clima Quente e Úmido**. Anais Ensus 2020, Florianópolis, v. 8, n. 1, p. 223-233, maio 2020. Anual. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1O82qxT_MWdUOknDWIDO82F058Ze3WycP/view. Acesso em: 30 maio 2023.

CHUANGCHID, P; KRARTI, M. Foundation heat loss from heated concrete slab-on-grade floors. *Building and Environment*, v. 36, n. 5, p. 637-655, 2001.

CHVATAL, K. M. S.; KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; LABAKI, L. C. **A prática do projeto arquitetônico em Campinas, SP e diretrizes para o projeto de edificações adequadas ao clima**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 1998.

CLEAVELAND, J. P.; AKRIDGE, J. M. **Slab-on-grade thermal loss in hot climates**. 1990.

CLEMENTS, E. **Three Dimensional Foundation Heat Transfer Modules for WholeBuilding Energy Analysis**. Pennsylvania, Estados Unidos: The Pennsylvania State University, 2004.

CORBELLA, O. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos: conforto ambiental**. Editorial Revan, 2009.

COSTA, V. A. C. da; RORIZ, V. F.; CHVATAL, K. M. S. **Modeling of slab-on-grade heat transfer in EnergyPlus simulation program**. *Ambiente Construído*, v. 17, p. 117-135, 2017.

COSTA, V. A. C. **Trocas de calor entre edificações térreas e o solo e sua modelagem no pré-processador Slab**. 2017, 237 p. Dissertação. (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de São Paulo. São Carlos/SP.

CRAWLEY, D. B. *et al.* **EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program**. *Energy and Buildings*, v. 33, n. 4, p. 319–331, abr. 2001.

DA GUARDA, E. L. A.; KRAMER, D.; MIZGIER, M. G. O. **Variação do potencial bioclimático em São Paulo frente ao cenário de mudanças climáticas**. *Paranoá*, v. 17, p. e43180-e43180, 2024.

DERU, M. P.; KIRKPATRICK, A. T. **Ground-Coupled Heat and Moisture Transfer from Buildings**; Part1: Analysis and Modeling (preprint). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2001.

DIAS, K. G. A. *et al.* **Avaliação da efetividade de uma ferramenta de apoio para o processo de projeto em arquitetura**. ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, v. 19, p. 1-12, 2022.

EERE - DEPARTMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **Auxiliary Programs Manual**. USA, 2016a.

EERE - DEPARTMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **Ground Heat Transfer in EnergyPlus. Documentation**, EnergyPlusTM Version 8.6. Version 7. ed. US, 2023.

EL SAIED, Ali *et al.* **Slab-on-grade thermal bridges: A thermal behavior and solution review**. *Energy and Buildings*, v. 257, p. 111770, 2022.

ENERGY PLUS VERSION 22.1 DOCUMENTATION. **Engineering Reference**. U.S. Department of Energy. 1697f. US, 2022.

ENERGY PLUS VERSION 8.6 DOCUMENTATION. **Engineering Reference**. U.S. Department of Energy. 1697f. US, 2016.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2020: Ano base 2019**. Rio de Janeiro, 2020.

EVANS, J. M. **Evaluating comfort with varying temperatures: a graphic design tool**. *Energy And Buildings*, [S.L.], v. 35, n. 1, p. 87-93, jan. 2003. Elsevier BV.

FAROUKI, O. **Thermal properties of soils**. Hanover, NH: US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1981.

FERNANDES, L. C. **Diagramas de apoio ao projeto baseados na ideia de conforto térmico adaptativo**. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 11, 2020.

FERNANDES, L. C. *et al.* **Equações preditivas de temperaturas internas horárias: Uma alternativa para geração de dados para avaliação do desempenho térmico de habitações de interesse social**. In: *Habitar 2015*, Belo Horizonte, Anais.... Belo Horizonte: Habitar, 2015.

FROTA, A. B., SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**, v. 4, 2016.

GIVONI, B. **Comfort, climate analysis and building design guidelines**. *Energy and Buildings*, jan. 1992. v. 18, n. 1, p. 11–23. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/037877889290047K>>. Acesso em: 30 maio 2023.

GIVONI, B. **Climate Considerations in Building and Urban Design**. Nova Iorque: Van Nostrand Reinhold, 1998. 480 p.

GONZALEZ, E. *et al.* **Proyecto clima y arquitectura** (3 vols.). México: G. Gili, 1986.

HAGENTOFT, C. E. **Introduction to building physics**. External organization, 2001.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 30 maio 2023.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais RTQ-R**. Rio de Janeiro, 2012.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Buildings: **A Source of Enormous Untapped Efficiency Potential**. 2021. Disponível em: < >. Acesso em: 30 maio 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7730: **Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**. Genebre, 2006.

JANSSEN, H.; CARMELIET, J.; HENS, H. **The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground**. Building and Environment, v. 39, n. 7, p. 825-836, 2004.

KEELER, M.; BURKE, B. **Fundamentos de Projeto de Edificações Sustentáveis**. Porto Alegre: Bookman, 2010. 362 p.

KOENIGSBERGER, O. H. *et al.* **Manual of Tropical Housing and Building: climatic design**. Londres: Longman, 1975. 320 p.

KOPPEN W.; GEIGER, R. **Handbuck der Klimatologie**: Berlin, 1961.

KRAMEL, C. **Inércia térmica para habitações unifamiliares nas diferentes regiões climáticas do estado do Paraná**. 2021. Universidade Federal do Paraná, 2021.

KUCZYŃSKI, T; STASZCZUK, A. **Impact of Uninsulated Slab-on-Grade and Masonry Walls on Residential Building Overheating**. Energies, v. 16, n. 22, p. 7558, 2023.

KUSUDA, T.; ARCHENBACH, P. **Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States**. ASHRAE Transaction, v. 71, n. 1, p. 61–75, 1965.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 2ª ed, revisada. São Paulo: ProLivros, 2004.

LEIVO, V.; RANTALA, J. **Heat flow into the ground from the heated slab-on-ground structure–field measurements**. In: Research in Building Physics and Building Engineering. CRC Press, 2020. p. 497-500.

LIU, Zhang *et al.* **An experimental study on the thermal effects of slab-edge-insulation for slab-on-grade housing in a moderate Australian climate**. Energy and Buildings, v. 235, p. 110675, 2021.

Lawrence Berkeley National Laboratory. 2007. **EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations**.

MACEY, H. H. **Heat Loss Through a Solid Floor**. Journal of the Institute of Fuel, v. 22, p. 369-371, 1949.

MACIEL, A. A. **Integração de conceitos bioclimáticos ao projeto arquitetônico**. [s.l.] Universidade Federal De Santa Catarina- UFSC, 2006.

MANZANO-AGUGLIARO, F. *et al.* **Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. v. 49, p. 736–755. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095>>. Acesso em: 30 maio 2023.

MAZZAFERRO, L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto Ground Domain no programa EnergyPlus**. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Florianópolis, 2015.

MICHALONSKI, M. F.; RABEL, C.. **Aplicabilidade de estratégias de conforto ambiental em acomodações do sistema único de saúde na cidade de Cascavel, Paraná**.

MUNN, R. E. **Descriptive micrometeorology**. Elsevier, 2013.

MĂGUREAN, A. M. *et al.* **Artificial intelligence based prediction model for the long-term heat flux losses through ground applied to large non-residential buildings**. Procedia Manufacturing, v. 32, p. 434-441, 2019.

NAWALANY, G.; SOKOŁOWSKI, P. **Building–soil thermal interaction: A case study**. Energies, v. 12, n. 15, p. 2922, 2019.

NUNES, G. H. *et al.* **Análise de métodos de cálculo para determinação da temperatura do solo em simulações computacionais**. ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, v. 15, p. 2169-2178, 2019.

OLGYAY, V. **Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1998. 216 p.

OLIVEIRA, R. P. **O projeto de arquitetura para clima quente e úmido: diretrizes para residências unifamiliares em Fortaleza-CE**. Revista Tecnologia, v. 33, n. 2, p. 165-176, 2012.

PARKER, Danny *et al.* **Evaluation of the impact of slab foundation heat transfer on heating and cooling in Florida**. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States); Building America Partnership for Improved Residential Construction, Cocoa, FL (United States), 2016.

PINTO, M.. **Importância da definição da temperatura do solo para o processo de simulação termoenergética de edificações**. 2012. Conference: XIV ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente ConstruídoAt: Juíz de Fora, Minas Gerais, Brasil

POKORSKA-SILVA, Iwona *et al.* **Calculation of building heat losses through slab-on-ground structures based on soil temperature measured in situ.** *Energies*, v. 15, n. 1, p. 114, 2021.

PORTO, M. M. **O processo de projeto e a sustentabilidade na produção da arquitetura.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2009.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do solo com problemas resolvidos.** 2.ed. Curitiba, 2015.

RANTALA, Jukka; LEIVO, V. **Heat losses from a slab-on-ground structure with a low temperature floor heating system in Nordic climate.** In: The 2005 World Sustainable Building Conference, Tokyo. 2005. p. 27-29.

RANTALA, Jukka; LEIVO, Virpi. **Heat loss into ground from a slab-on-ground structure in a floor heating system.** *International journal of energy research*, v. 30, n. 12, p. 929-938, 2006.

REES, S. W. *et al.* **Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 4, n. 3, p. 213-265, 2000.

REES, S. W.; ZHOU, Z.; THOMAS, H. R. **Ground heat transfer: A numerical simulation of a full-scale experiment.** *Building and environment*, v. 42, n. 3, p. 1478-1488, 2007.

RESENDE, B. C. **Influência do solo no desempenho térmico de habitações com cômodos subterrâneos.** 2017. 246 p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto/MG.

RESENDE, Bruna Cristina; SOUZA, Henor Artur de; GOMES, Adriano Pinto. **Modelagem da transferência de calor de ambientes subterrâneos no programa de simulação EnergyPlus.** *Ambiente Construído*, v. 19, n. 1, p. 161-180, 2019.

RICHARDS, P. G.; MATHEWS, E. H. **A thermal design tool for buildings in ground contact.** *Building and environment*, v. 29, n. 1, p. 73-82, 1994.

RISBERG, Mikael; RISBERG, Daniel. **Numerical calculation of heat losses for crawl space foundation at different locations in Sweden.** *Results in Engineering*, v. 7, p. 100141, 2020.

SAALY, Maryam *et al.* **Energy performance of below-grade envelope of an institutional building in cold regions.** *Journal of Building Engineering*, v. 27, p. 100911, 2020.

SAU-SOTO, Nicolás *et al.* **Structural analysis for a slab-on-grade cellular concrete foundation to reduce heat losses in temperate climate residential buildings.** *Journal of Building Engineering*, p. 109740, 2024.

SILVA, I. P. *et al.* **Calculation of Building Heat Losses through Slab-on-Ground Structures Based on Soil Temperature Measured In Situ.** *Energies*, v. 15, n. 1, p. 114, 2021.

SINGH, D. N.; DEVID, Ki. **Generalized relationships for estimating soil thermal resistivity.** *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 22, n. 3-4, p. 133-143, 2000.

SORGATO, M. J. *et al.* **Análise do procedimento de simulação da NBR 15575 para avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais.** *Ambiente Construído*, v. 14, n. 4, p. 83–101, dez. 2014.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Análise do Método de Simulação de Desempenho Térmico da Norma NBR 15575.** In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., Brasília, Anais..., 2013.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption.** *Energy and Buildings*, 2016. v. 133, p. 1–13. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.059>>. Acesso em: 30 maio 2023.

SPIGA, Marco; VOCALE, Pamela. **Effect of floor geometry on building heat loss via the ground.** *Heat transfer engineering*, v. 35, n. 18, p. 1520-1527, 2014.

STIELDORF, K.; KREČ, K. **Heat losses from large buildings through the ground.** In: Tagungsband" Building Physics Symposium. 1995.

SUPAN A. Die Temperaturzonen der Erde, Petermauns Geograph. Miyyrilungen, Gotha, 1879, vol. XXV, p. 349-358.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **PROJETEEEE.** Disponível em: <<http://projeteeee.mma.gov.br/>>. Acesso em: 24 maio. 2023.

VITRUVIO, M. **Da arquitetura.** São Paulo: Hucitec, 1999.

WIDERA, B. **Bioclimatic architecture.** *Journal of Civil Engineering and Architecture Research*, v. 2, n. 4, p. 567-578, 2015.

WILDE, P. de; VOORDEN, M. van Der. **Providing computational support for the selection of energy saving building components.** *Energy And Buildings*, [S.L.], v. 36, n. 8, p. 749-758, ago. 2004. Elsevier BV.

XING, L. U. **Estimations of undisturbed ground temperatures using numerical and analytical modeling.** Stillwater, OK, US: Oklahoma State University, 2014.

YU, Jia; KANG, Yanming; ZHAI, Zhiqiang John. **Advances in research for underground buildings: Energy, thermal comfort and indoor air quality.** *Energy and Buildings*, v. 215, p. 109916, 2020.

ZMITROWICZ, W. **As estruturas territoriais dos insetos.** *Estudos Avançados*, v. 15, p. 193-212, 2001.

ZUBAREV, Kirill; ZOBNA, Yulia. **Modern studies of heat losses of a building basement through a soil mass.** In: E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2023. p. 06007.