



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOANA ANNY MAFALDA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE CONTÊINER PARA USO COMO
RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR EM CLIMAS QUENTES**

Florianópolis

2024

JOANA ANNY MAFALDA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE CONTÊINER PARA USO COMO
RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR EM CLIMAS QUENTES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Construção Civil.

Orientador: Prof. EneDir Ghisi, Ph.D.

Florianópolis

2024

Oliveira, Joana Anny Mafalda de
ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE CONTÊINER PARA USO
COMO RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR EM CLIMAS QUENTES /Joana Anny
Mafalda de Oliveira ; orientador, EneDir Ghisi, 2024.
133 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Desempenho térmico. 3.
Construção com contêiner. 4. Climas quentes. 5.
Arquitetura modular. I. Ghisi, EneDir. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

Joana Anny Mafalda de Oliveira

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE CONTÊINER PARA USO COMO
RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR EM CLIMAS QUENTES**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 30 de agosto de 2024, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof^a Thalita Gorban Ferreira Giglio, Dr^a

Universidade Estadual de Londrina

Prof^a Ana Ligia Papst de Abreu, Dr^a

Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Deivis Luis Marinoski, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil.

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof^a Fernanda Fernandes Marchiori, Dr^a

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof. Enedir Ghisi, Ph.D.

Orientador

Florianópolis, 2024.

Aos meus pais Manoel Domingos Filho e Jocenara Tonis Mafalda, grandes professores, que conduziram e incentivaram minha educação formal.

Às minhas avós Joana Amélia Oliveira (*in memoriam*) e Anaclides de Fátima Tonis Mafalda (*in memoriam*), sábias mulheres analfabetas, com fé inabaláveis e sonhos extraordinários.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pelas Suas misericórdias e bênçãos que se manifestam em minha vida de maneira inesgotável. Ele tem sido minha companhia nas noites de solidão e choro, meu alicerce em momentos de instabilidade e meu Criador nas horas de vitória.

Aos meus pais, Nara e Manoel, humildes professores, grandes amigos e exploradores visionários, sou eternamente grata. Pelas conversas sinceras, auxílio financeiro, suporte emocional e visitas inesquecíveis. Sua companhia durante a minha jornada acadêmica foi essencial para o meu amadurecimento e crescimento pessoal. Não possuo palavras suficientes para descrever o meu sentimento de gratidão.

Ao professor Eneidir Ghisi, pelas críticas construtivas, revisões minuciosas e conhecimento compartilhado. Sua ajuda foi essencial para o refinamento do texto desse trabalho e minha escrita acadêmica.

À minha colega de laboratório, Marina Ribeiro Viana, expressei minha imensa gratidão pelas dúvidas esclarecidas, assistência nos trabalhos e leituras intermináveis. Sua presença foi um norteador neste trabalho, principalmente para as minhas questões metodológicas de pesquisa.

Ao meu amigo Jhonatha Brito, sua presença foi um refrigerio nos meus momentos de ansiedade. As longas caminhadas e debates pessoais enriqueceram minha alma e me fizeram ver além do ambiente acadêmico nos momentos de descanso.

Ao meu amigo João Gustavo Ferreira, agradeço pelas risadas, companhias e projetos futuros. O otimismo que aprendi com você, a leveza no ser e as conversas filosóficas que me foram apresentadas são inestimáveis. Sua presença tornou minha jornada acadêmica mais alegre e leve.

Aos meus colegas de laboratório, Luís Fernando Kidinho e Jéssica Kuntz Maykot, destaco minha gratidão pela companhia, risadas e revisões solicitadas. O apoio que me foi concedido me ajudou a entender as diferentes perspectivas de uma mesma problemática.

À professora Ana Paula Melo, pelas correções no texto de qualificação e dúvidas sanadas, expressei minha gratidão por seu suporte e ajuda no processamento dos meus resultados.

Aos professores Deivis Luis Marinoski, Ana Ligia Papst de Abreu e Thalita Gorban Ferreira Giglio, meus agradecimentos por aceitarem participar da avaliação deste trabalho. Suas análises e contribuições enriqueceram este estudo.

Ao meu grande parceiro de outra espécie, Teddy, cuja alegria e constante energia tornaram meus dias mais alegres e felizes. As caminhadas diárias me ajudaram a definir e reorganizar minhas ideias.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido durante os dois anos deste mestrado.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram, tanto direta quanto indiretamente, para o desenvolvimento e conclusão deste projeto de pesquisa. Minha gratidão é imensurável e esta jornada acadêmica não teria sido possível sem o apoio de todos vocês.

Resumo

Contêineres são construídos para transportar bens de consumo em embarcações náuticas. No entanto, o uso de contêineres na construção modular tem sido explorado. Devido às características térmicas do aço *corten*, material que compõe a envoltória dos contêineres, a adequação desses módulos se torna um desafio, principalmente em climas quentes, que cobrem uma parcela significativa do território brasileiro. Esta pesquisa avalia o desempenho térmico de residências unifamiliares utilizando contêineres em sua envoltória em climas quentes. Realizaram-se simulações e análises térmicas conforme os critérios e diretrizes da NBR 15575-1, que estabelece disposições de desempenho térmico em nível mínimo, intermediário e superior. As simulações ocorreram em dez cidades representativas com diferentes climas quentes de acordo com a classificação Köppen. O programa *EnergyPlus* foi utilizado para simulação térmica dos modelos, um de referência de acordo com as disposições normativas e outro com contêiner *dry cargo*. As simulações visam avaliar o percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa adequada, temperatura operativa máxima e carga térmica total. Observou-se que localidades mais úmidas não atendem ao nível mínimo somente com a adoção de isolamento térmico na envoltória, enquanto em climas quentes satisfazem o nível mínimo. Por meio do balanço térmico por convecção, foi possível determinar quais elementos construtivos apresentam as maiores contribuições nas trocas de calor. A partir das otimizações na envoltória, melhorou-se os indicadores de desempenho térmico. O pior caso de desempenho térmico inicial conseguiu atingir apenas o nível mínimo com as otimizações aplicadas, enquanto o melhor caso alcançou o nível intermediário. Destaca-se que, mesmo com as melhorias realizadas, nenhum dos casos analisados atingiu o nível superior determinado pela NBR 15575-1. Concluiu-se que o uso de contêineres em climas quentes deve ser acompanhado por estratégias passivas de resfriamento.

Palavras-chave: Desempenho térmico; Construção com contêiner; Climas quentes; Arquitetura modular.

Abstract

Containers are built to transport consumer goods on nautical vessels. However, the use of containers in modular construction has been explored. Due to the thermal characteristics of corten steel, which forms the envelope of containers, adapting these modules becomes a challenge, especially in hot climates that cover a significant portion of the Brazilian territory. This research evaluates the thermal performance of single-family houses using containers in their envelope in hot climates. Simulations and thermal analyses were conducted according to the criteria and guidelines of NBR 15575-1, which establishes provisions for thermal performance at minimum, intermediate, and superior levels. The simulations were carried out for ten representative cities with different hot climates according to the Köppen classification. The EnergyPlus programme was used to simulate the models, one as per regulatory provisions and another with dry cargo containers. The simulations aimed to assess the percentage of occupancy hours within the adequate operative temperature range, maximum operative temperature, and total thermal load. It was observed that more humid locations did not meet the minimum level solely with the adoption of thermal insulation in the envelope, whereas in hot climates they met the minimum level. Through convective thermal balance, it was possible to determine which construction elements contribute most to heat exchange. Improvements in thermal performance indicators were achieved through envelope optimizations. The worst initial thermal performance case managed to reach only the minimum level with the applied optimisations, while the best case reached the intermediate level. It is noteworthy that, even with the improvements made, none of the cases analysed achieved the highest level recommended by NBR 15575-1. It was concluded that the use of containers in hot climates should be accompanied by passive cooling strategies.

Keywords: Thermal performance; Container construction; Hot climates; Modular architecture.

Lista de figuras

Figura 1 - Clima Köppen para o Brasil	24
Figura 2 - Zoneamento bioclimático brasileiro	25
Figura 3 - Ciclo de vida de uma estrutura de contêiner	30
Figura 4 - Configurações de empilhamento	31
Figura 5 - Processo de design e construção sustentável	34
Figura 6 - Componentes de um contêiner	36
Figura 7 - Instalação do isolamento térmico	38
Figura 8 - Sistema de infiltração de ar pelas juntas do contêiner	39
Figura 9 - Danos não aceitáveis nas peças de canto	42
Figura 10 - Danos aceitáveis nas peças de canto	42
Figura 11 - Projeto ConHause e C3208	44
Figura 12 - Fluxograma síntese do método	52
Figura 13 – Parâmetros, índices e variáveis detalhados das macro etapas utilizadas no método	53
Figura 14 - Planta baixa da unidade habitacional	56
Figura 15 - Corte esquemático do modelo de referência da NBR 15575-1	57
Figura 16 - Corte esquemático dos modelos com contêiner dry cargo	57
Figura 17 - Temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar anual da base-padrão de arquivos climáticos das cidades selecionadas	59
Figura 18 – Período de acionamento dos sistemas de ventilação e condicionamento de ar nos APPs	68
Figura 19 - Padrão de ocupação dos APPs	70
Figura 20 – Padrão de uso do sistema de iluminação dos APPs	70
Figura 21 – Período de uso dos equipamentos dos APPs	71
Figura 22 - Zonas térmicas da unidade habitacional para o modelo de referência e com contêineres	74
Figura 23 - Carga térmica total anual dos modelos de referência e contêiner (com absorvância de referência e sem sombreamento)	87
Figura 24 - PHFT dos modelos de referência e contêiner (com absorvância de referência e sem sombreamento)	90
Figura 25 - Temperatura operativa máxima dos modelos de referência e contêiner (com absorvância de referência e sem sombreamento)	91

Figura 26 - Trocas de calor por convecção na sala/cozinha em Fortaleza no modelo com ventilação natural	97
Figura 27 - Trocas de calor por convecção na sala/cozinha em Fortaleza no modelo com condicionamento de ar	98
Figura 28 - Trocas de calor por convecção no ar na sala/cozinha em Paulo Afonso para o modelo com ventilação natural.....	99
Figura 29 - Trocas de calor por convecção no ar na sala/cozinha em Paulo Afonso para o modelo com condicionamento de ar.....	100
Figura 30 - Balanço térmico dos APPs para o inverno e o verão para o modelo com contêiner em Fortaleza.....	102
Figura 31 - Balanço térmico dos APPs para o inverno e o verão para o modelo com contêiner em Paulo Afonso	102
Figura 32 – Indicadores de desempenho térmico com otimizações da absorvância para Fortaleza e o Paulo Afonso para o modelo com contêiner	106
Figura 33 - Indicadores de desempenho térmico para otimização com veneziana .	109
Figura 34 - Indicadores de desempenho térmico com veneziana e otimização da absorvância.....	112

Lista de quadros

Quadro 1 - <i>Output</i> para o balanço térmico	82
Quadro 2 - Classificação da NBR 15575-1 para os modelos com isolamento	93
Quadro 3 - Classificação de desempenho térmico da otimização com venezianas	110

Lista de tabelas

Tabela 1 - Modelos de contêiner mais utilizados na construção civil	35
Tabela 2 - Caracterização climática das cidades selecionadas	58
Tabela 3 - Propriedades térmicas dos materiais no modelo com contêiner	60
Tabela 4 – Propriedades dos materiais isolantes no modelo com contêiner.....	61
Tabela 5 - Propriedades dos componentes construtivos no modelo com contêiner..	63
Tabela 6 - Absortâncias e emissividades dos componentes construtivos no modelo com contêiner.....	64
Tabela 7 - Propriedades das paredes e do piso no modelo de referência	64
Tabela 8 - Propriedades da cobertura no modelo de referência	64
Tabela 9 - Propriedades dos componentes construtivos no modelo de referência ...	64
Tabela 10 – Propriedades do vidro das janelas	65
Tabela 11 – Propriedades do vidro das janelas	65
Tabela 12 - Propriedades térmicas do solo argiloso seco	66
Tabela 13 – Taxa metabólica e fração radiante para os usuários	69
Tabela 14 – Densidade de potência instalada, fração radiante e fração visível para o sistema de iluminação	69
Tabela 15 – Densidade de cargas internas e fração radiante os equipamentos	69
Tabela 16 - Faixas de temperatura operativa para a determinação do PHFT	78
Tabela 17 - Informações sobre o modelo de veneziana adotado.....	86
Tabela 18 – Redução da carga térmica total em relação ao modelo de referência e ao com pior isolamento térmico para os modelos sem otimizações.....	88
Tabela 19 - Variação absoluta do PHFT do modelo de referência e do pior modelo com contêiner em relação à média do PHFT dos modelos com contêineres.....	90
Tabela 20 - Redução absoluta da temperatura operativa máxima do modelo de referência e do pior modelo com contêiner em relação à média dos modelos com contêineres.....	92
Tabela 21 - Trocas de calor por convecção para os componentes construtivos e cargas internas da unidade habitacional.....	103
Tabela 22 – Participação nas trocas de calor por convecção dos componentes construtivos na unidade habitacional	104
Tabela 23 - Classificação de desempenho térmico da NBR 15575-1 com otimização da absortância nos modelos com contêineres	107

Tabela 24 - Classificação de desempenho térmico final com otimizações de absorvância e com veneziana.....	113
---	-----

Lista de abreviaturas e siglas

BEN: Balanço Energético Nacional

EPE: Empresa de Pesquisa Energética

UNEP: *United Nations Environment Programme*

ISO: *International Organization for Standardization*

WSC: *World Shipping Council*

IICL: *Institute of International Container Lessors*

UCIRC: *Unified Container Inspection and Repair Criteria*

PHFT: Percentual de horas dentro da faixa de temperatura operativa

AVAC: Sistema de aquecimento, ventilação e ar-condicionado

HIS: Habitação de interesse social

APP: Ambiente de permanência prolongada

TBS_m: Temperatura externa média anual de bulbo seco

Sumário

1. Introdução	18
1.1. Justificativa	19
1.2. Objetivos	21
1.2.1. Objetivo geral	21
1.2.2. Objetivos específicos.....	21
1.3. Estrutura do trabalho	22
2. Revisão bibliográfica	23
2.1. Aspectos climáticos	23
2.1.1. Zonas bioclimáticas no Brasil	24
2.1.2. Climas quentes e as construções no Brasil	27
2.1.3. Contêineres e o clima.....	28
2.2. Contêineres marítimos e a economia circular na construção civil.....	31
2.2.1. Isolamento térmico	36
2.2.2. Estanqueidade.....	38
2.2.3. Patologias.....	40
2.3. Arquitetura construtiva com contêineres.....	42
2.4. NBR 15.575-1	44
2.5. <i>EnergyPlus</i> e simulação computacional	46
2.6. Balanço térmico de edificações	47
2.7. Síntese da revisão de literatura	48
3. Método	52
3.1. Pré-processamento.....	54
3.1.1. Unidade habitacional	54
3.1.2. Cidades	57
3.1.3. Materiais e componentes construtivos	60
3.1.4. Propriedades do solo.....	65
3.1.5. Condicionamento de ar e ventilação natural	66
3.1.6. Cargas térmicas internas.....	68
3.2. Simulação computacional	71
3.2.1. Período de simulação.....	71
3.2.2. Temperatura do solo não perturbado	72

3.2.3. Trocas de calor pelo piso.....	72
3.2.4. Padrão de uso e ocupação.....	72
3.2.5. Materiais e construção	73
3.2.6. Carga térmica interna.....	74
3.2.7. Ar-condicionado.....	75
3.2.8. Ventilação natural.....	75
3.2.9. Dados de saída	76
3.3. Pós-processamento inicial	77
3.4. Balanço térmico	80
3.5. Pós-processamento com otimizações	85
4. Resultados e discussões.....	87
4.1. Análise de diferentes materiais isolantes.....	87
4.2. Balanço térmico	94
4.2.1. Verificação do método de cálculo do balanço térmico do ambiente	95
4.2.2. Balanço térmico no ar dos ambientes de permanência prolongada	100
4.3. Otimização	104
4.3.1. Otimização da absorvância	105
4.3.2. Otimização com veneziana.....	108
4.3.3. Otimização da absorvância com venezianas	110
4.4. Síntese dos resultados	113
5. Conclusões	116
5.1. Limitações do trabalho.....	118
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	119
Referências.....	120

1. Introdução

A energia elétrica é fundamental para garantir o conforto e a qualidade de vida humana, além de subsidiar o desenvolvimento econômico e social (Borges, 2021). Segundo Cao, Dai e Liu (2016), o aumento no consumo de energia elétrica está associado ao crescimento populacional, ao aumento do tempo em ambientes fechados e à demanda por funcionalidades construtivas e qualidade ambiental interna.

Nesse contexto, surge uma crescente preocupação com a capacidade de suprir a demanda de energia elétrica. Estudos na área de sustentabilidade têm sido efetuados com foco em edificações energeticamente eficientes (Koke et al., 2021; Wang et al., 2021; Ferdous et al., 2019; Pacheco; Lamberts, 2013; Kolokotsa et al., 2011). Destaca-se que o setor de edificações, responsável por mais de um terço do consumo global de energia e emissões, está em crescimento acelerado, principalmente em países em desenvolvimento. Dessa forma, as decisões de projeto desempenham papel importante no uso da energia, assim como as tecnologias que proporcionam reduções significativas de energia e custos (IEA, 2023a).

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), os setores industrial, residencial e comercial são os setores que mais consomem energia elétrica no Brasil (BEN, 2024). O setor residencial é o segundo maior consumidor de energia elétrica, utilizando-a principalmente para iluminação, refrigeração de ambientes e operação de eletrodomésticos. Desde 2013, a energia elétrica tem atendido aproximadamente 44% do consumo energético total do setor residencial. Somente no ano de 2023, a eletricidade representou 48,40% do consumo total de energia desse setor, um aumento de 4,1% em relação a 2022 (BEN, 2024).

Em 2023, o consumo final de energia elétrica no Brasil apresentou aumento de 4,8% em relação ao ano anterior. Projeções indicam que até 2032, esse consumo será de 70% em relação às outras fontes energéticas no Brasil. Ressalta-se que as edificações serão responsáveis por cerca de metade do consumo de energia elétrica no país, destacando-se as residências, que representarão 26% desse consumo. Apesar desse aumento, as edificações serão as principais contribuintes para os ganhos de eficiência energética, conforme indicam os estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (BEN, 2024; EPE, 2022).

No Brasil, a Lei nº 10.295, regulamentada pelo Decreto nº 4.059 de 2001, propôs disposições sobre a política nacional de conservação e uso racional de energia (BRASIL, 2001a, 2001b). De acordo com essa lei, edificações construídas devem ter mecanismos que promovam a eficiência energética e o estabelecimento de níveis e indicadores de consumo específicos de energia.

Nesse cenário, destaca-se a importância de avaliar o desempenho térmico das edificações brasileiras. Em 2021, a NBR 15575-1 (ABNT, 2024a) estabeleceu os requisitos e os critérios de desempenho térmico aplicáveis às edificações habitacionais no Brasil, permitindo a avaliação tanto de forma isolada quanto de forma integrada dos diversos sistemas prediais. Dessa forma, projetos, sistemas prediais e materiais não convencionais podem ter seu desempenho térmico aferido conforme os critérios de desempenho estabelecidos pela norma. Assim, é possível analisar e comparar o desempenho térmico de diferentes soluções construtivas, contribuindo para o desenvolvimento de edificações termicamente eficientes.

Segundo o estudo conduzido por González-Torres et al. (2022), o projeto adequado da edificação diminui a necessidade de aquecimento e resfriamento por meio da implementação de medidas de conservação de energia, que envolvem a envoltória da construção e os dispositivos mecânicos. O envelope das edificações é fundamental para garantir construções eficientes, pois é a forma mais eficaz de reduzir as necessidades térmicas dos usuários. Diferente das outras tecnologias de eficiência energética, o envelope da construção deve ter a estrutura e os materiais adequados por causa da vida útil dos edifícios e do custo de construção (IEA, 2023b). Al-Saadi e Al-Jabri (2020) ressaltam que a melhoria no projeto da envoltória da edificação desempenha papel fundamental na minimização do consumo de energia em regiões de clima quente. Uma das principais estratégias de otimização consiste na aplicação de isolantes térmicos nas paredes e no telhado da estrutura. Diante desse cenário, análises do envelope da edificação são essenciais, especialmente em construções com uso de materiais não convencionais, como construções com contêineres.

1.1. Justificativa

O uso de contêineres para propósitos arquitetônicos oferece infinitas possibilidades de *designs* baseados na sua modularidade e são usados para todos os tipos de edificações públicas, residenciais e comerciais. Formas construtivas modulares são

interessantes devido à sua montagem rápida em comparação aos sistemas convencionais e à utilização de materiais primários como aço, madeira e concreto (Zukowski, 2022). As residências contêineres são exemplo desse tipo construtivo e se destacam nas tendências de arquitetura ecológica ao reutilizar contêineres descartados (Koke et al., 2021; Vijayalaxmi, 2010).

As estruturas dos contêineres de transporte feitas com aço, em geral possuem o formato cuboide, e são produzidas para serem resistentes e seguras, dessa forma suportam grandes trânsitos de carga. A vida útil da maioria dos contêineres é uma década, porém, com manutenções frequentes e sempre que forem encontrados pontos de ferrugem, pode-se estender a vida útil do módulo náutico. Entretanto, muitos são negligenciados por suas empresas proprietárias por motivos econômicos, tornando-os esquecidos e sem uso (Radwan, 2015).

Esse método construtivo, caracterizado pelo uso de contêineres, proporciona vantagens como baixo impacto ambiental, entrega rápida, flexibilidade de deslocamento e possibilidade de expansão de espaço. Zukowski (2022) destaca o reúso de contêineres abandonados em portos como resposta à demanda por edificações rápidas e econômicas.

Os contêineres marítimos têm emergido como alternativa viável do ponto de vista social, ambiental e econômico (Bertoli; Ribeiro, 2022). Conforme Sun, Mei e Ni (2017), o método construtivo com contêineres é considerado um modelo emergente de construção sustentável. A utilização do módulo náutico não apenas reduz o impacto ambiental, mas também diminui a necessidade de extração de aço e materiais virgens, resultando em uma redução nos impactos ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa associados à produção desses materiais de construção (Bertolini; Guardigli, 2020; Islam et al., 2016). Contudo, antes de reutilizar o contêiner, é necessário realizar uma avaliação para verificar a presença de contaminação, avaliar o estado estrutural e verificar qualquer elemento que possa comprometer a segurança dos futuros moradores (Justino et al., 2021).

Embora haja uma variedade de contêineres, os mais empregados na construção civil são o tipo *dry box* e *reefer*. O modelo *dry box* é projetado para o transporte de cargas gerais secas, enquanto o *reefer*, também conhecido como refrigerante, é destinado ao transporte de mercadorias perecíveis sob controle de temperatura. O modelo *dry box* é amplamente utilizado, contudo, requer isolamento

térmico, ao contrário do modelo refrigerante, que possui essa característica (Carbonari, 2015).

Apesar das inúmeras vantagens ambientais e arquitetônicas que as construções com contêineres marítimos apresentam, é fundamental garantir o isolamento térmico adequado para esse tipo de habitação em climas quentes. Segundo Elrayies (2017), o isolamento de piso, paredes e teto melhora significativamente o desempenho térmico dos contêineres marítimos. No entanto, devido à alta condutividade térmica do material, incertezas de disponibilidade, exigências de técnicas de construção específicas e características físicas incompatíveis com condições de climas quentes e úmidos, esse modelo ainda não é amplamente adotado nesses locais (Ismail; Al-Obaidi, 2015).

As incertezas em relação a esse método construtivo são válidas, principalmente no Brasil, que é um país que possui clima tropical em mais de 80% do seu território (Alvares et al., 2013). Dessa forma, apesar das vantagens promissoras e do potencial para construções sustentáveis, Ismail e Al-Obaidi (2015) destacam que mais pesquisas com considerações das condições climáticas locais em diferentes regiões são necessárias para garantir a adequação e aceitabilidade desse método construtivo.

Esta pesquisa propõe uma análise do desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial construída a partir de contêineres, examinando seu comportamento em climas quentes brasileiros. O estudo utiliza o método da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a) e explora a discrepância do uso de diferentes materiais isolantes em contêineres *dry box*, além de propor melhorias para sua implementação na construção civil.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho térmico da envoltória de uma habitação contêiner unifamiliar com o modelo de contêiner *dry box* por meio da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a) em diferentes climas quentes no Brasil.

1.2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

a) Comparar o impacto de diferentes isolamentos térmicos na transmitância térmica das paredes externas, piso e na cobertura da residência contêiner, considerando os indicadores da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a);

b) Realizar um balanço térmico nos ambientes para as localidades que apresentaram os piores e os melhores indicadores de desempenho térmico;

c) Propor otimizações para a envoltória, a fim de aferir se esse modelo construtivo atinge níveis de desempenho superiores e intermediários da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a).

1.3. Estrutura do trabalho

A dissertação está estruturada em cinco capítulos: introdução, revisão bibliográfica, método, resultados e conclusões. O primeiro capítulo introduz o tema do estudo, destacando sua relevância, justificativas e os objetivos gerais e específicos da pesquisa.

No segundo capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre trabalhos e pesquisas similares, explorando definições encontradas em periódicos científicos. Além disso, essa revisão oferece uma visão geral sobre o tema, de modo a demonstrar ao leitor a relevância e a fundamentação teórica nos principais assuntos abordados pela pesquisa.

O terceiro capítulo apresenta e descreve o método adotado para alcançar os objetivos da pesquisa. Nele, são descritos os procedimentos definidos para a execução do trabalho, incluindo limitações e definições estabelecidas. Também são apresentadas as informações sobre os modelos construtivos e os padrões de uso e ocupação.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados alcançados a partir da aplicação do método para a cumprir os objetivos propostos. O quinto capítulo apresenta as conclusões com as limitações do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

2. Revisão bibliográfica

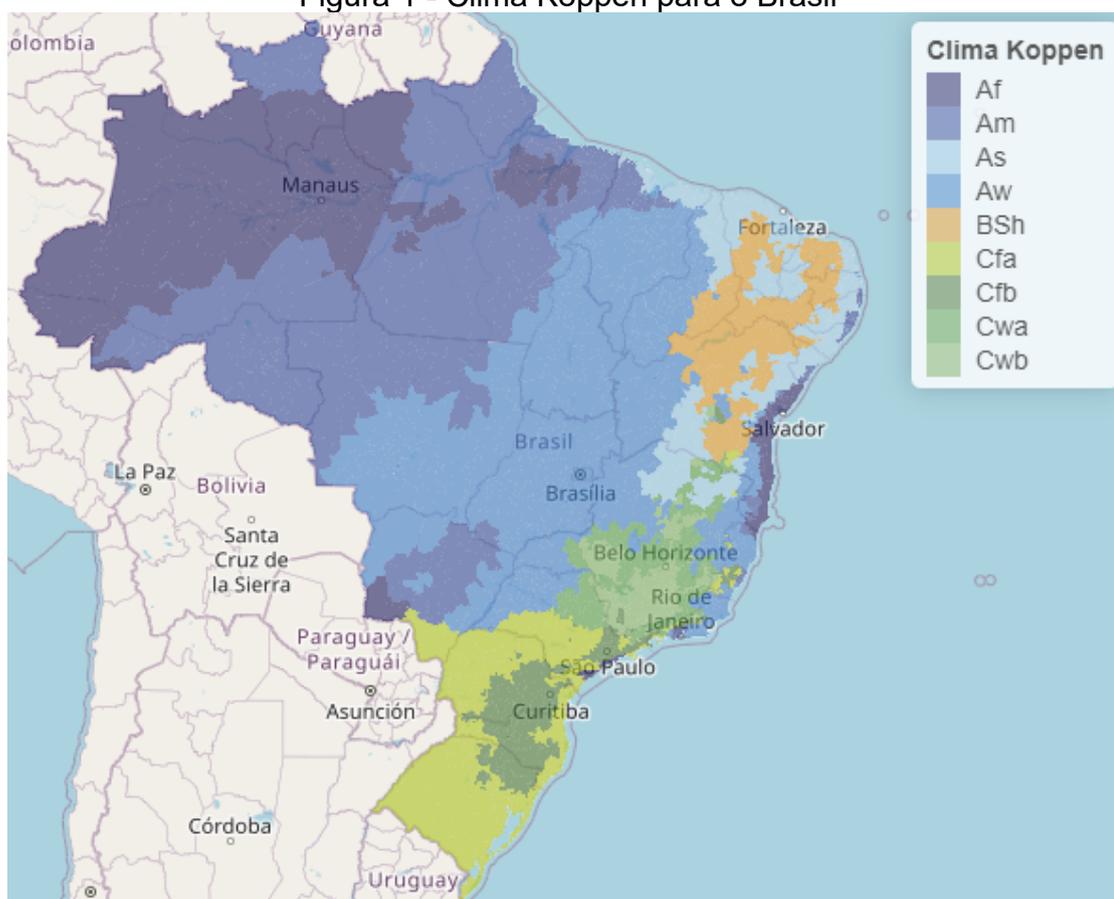
Considerando a importância da avaliação da envoltória de residências contêiner em climas quentes, este capítulo aborda os conceitos necessários para a compreensão da dissertação e estudos correlatos. A estrutura do capítulo foi organizada em seis seções principais, que abrangem: os aspectos climáticos no Brasil, a economia circular com contêineres, a arquitetura com contêineres, a aplicação da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a), o emprego de simulações computacionais pelo programa *EnergyPlus* e o balanço térmico de edificações. Por fim, é apresentada uma síntese, que reforça a importância do tema e destaca os principais pontos discutidos ao longo do capítulo.

2.1. Aspectos climáticos

O Brasil ocupa a quinta posição no *ranking* dos países com maior área territorial do mundo, e essa grande extensão resulta em uma diversidade climática significativa em seu território, como savanas, florestas tropicais e climas temperados. Essa variação climática é influenciada por diversos fatores, como a geografia, o movimento das massas de ar e a latitude. Barry e Chorley (2010) explicam que vários esquemas para relacionar os limites climáticos com os grupos de vegetação são baseados em dois critérios principais: o grau de aridez e o de calor. O grau de aridez é determinado pela "precipitação efetiva", que corresponde à precipitação menos a evaporação. Tanto a precipitação quanto a temperatura desempenham papéis fundamentais na diferenciação das zonas climáticas, sendo a classificação Köppen o principal exemplo. De acordo com Trewartha et al. (1980), a classificação Köppen é amplamente aceita devido aos seus méritos comprovados. Essa classificação é utilizada para caracterizar os diferentes climas no país, baseando-se nas médias anuais e mensais de temperatura, precipitação, além de outros fatores como radiação e vento.

Alvares et al. (2013) identificaram que o Brasil possui três zonas climáticas principais: tropical, seco e temperado. O clima tropical apresenta maior ocorrência no país, seguido do equatorial e o árido. Essas zonas são subdivididas em nove tipos climáticos específicos. A Figura 1 mostra a classificação e a distribuição climática Köppen para o Brasil.

Figura 1 - Clima Köppen para o Brasil



Fonte: Köppen Brasil (2024)

2.1.1. Zonas bioclimáticas no Brasil

O propósito de qualquer sistema de classificação é simplificar e generalizar as informações de forma eficiente. Várias tentativas foram feitas para classificar o clima, começando pelos gregos antigos, que dividiram a Terra em zonas tórridas, temperadas e frígidas. Essas zonas se baseiam na iluminação solar e diferem em temperatura, mas não consideram outros elementos importantes, como a precipitação (Miller, 2020).

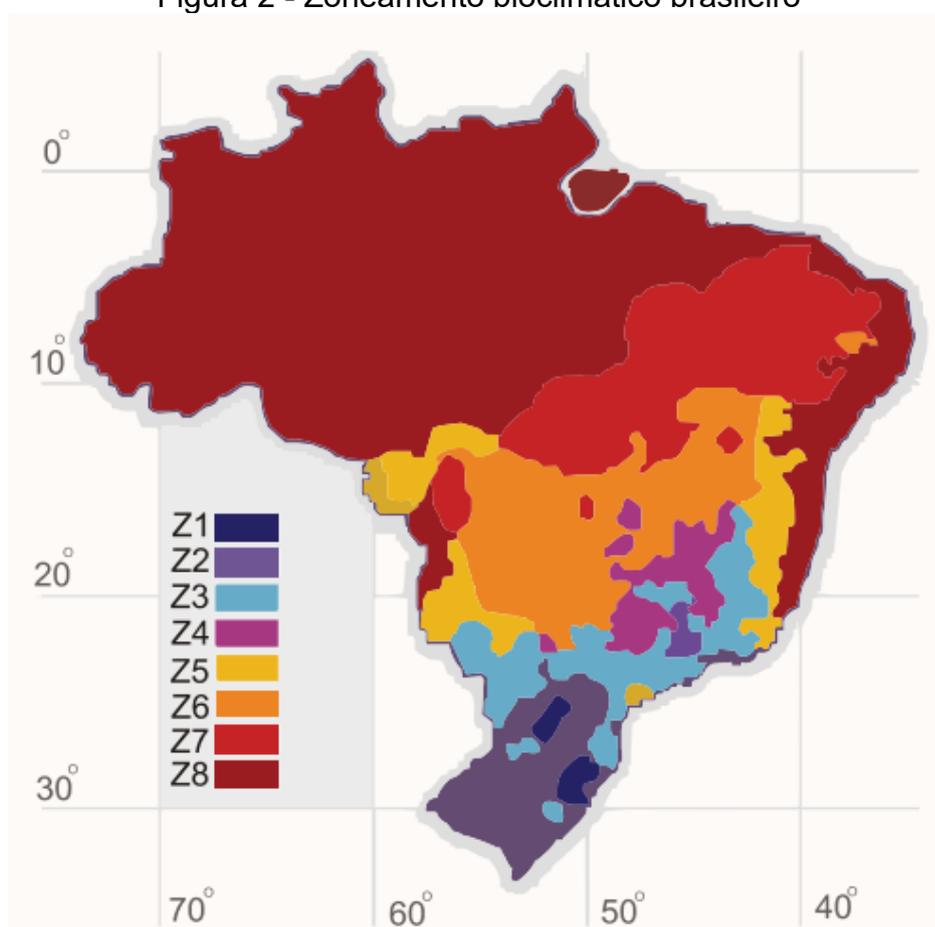
A norma técnica NBR 15220-3 (ABNT, 2005a) estabelece um zoneamento bioclimático para o território brasileiro, dividindo-o em oito zonas. Cada zona possui diretrizes construtivas específicas, visando otimizar o desempenho térmico das edificações em suas respectivas regiões. Destaca-se que essa norma foi revisada e, em 2024, o relatório técnico ABNT TR 15220-3-1:2024 (ABNT, 2024b) foi criado, de forma que foram fornecidas novas zonas bioclimáticas. Essa nova revisão da norma, atualmente em consulta pública, foi baseada no trabalho de Machado et al. (2024).

Porém, destaca-se que a NBR 15575-1 (ABNT, 2024a) ainda faz uso da NBR 15220-3 (ABNT, 2005a) em sua versão anterior à revisão. Assim, foram explorados trabalhos referentes à antiga versão da norma de zoneamento bioclimático.

No desenvolvimento das diretrizes da antiga norma de zoneamento (ABNT, 2005a), foram considerados diversos parâmetros relevantes, como o dimensionamento e a proteção das aberturas, as características das vedações externas e as estratégias de condicionamento térmico passivo. A Figura 2 ilustra o zoneamento bioclimático estabelecido pela norma.

É importante ressaltar que, apesar de a norma descrever os parâmetros de construção adequados para as zonas bioclimáticas, existem estudos que levantam questionamentos sobre essas adequações (Amorim; Carlo, 2017; Bogo, 2016; Martins; Bittencourt; Krause, 2012). No entanto, a NBR 15575-1 (ABNT, 2024a) utiliza o zoneamento proposto pela norma para definir os parâmetros a serem considerados no cálculo para classificação das residências.

Figura 2 - Zoneamento bioclimático brasileiro



Fonte: Santos et al. (2015)

As zonas 1 a 5 possuem menos representatividade territorial em comparação com as zonas 6, 7 e 8. As zonas 1, 2 e 3 são as mais frias em relação às outras, concentrando-se na região Sul e em algumas localidades da região Sudeste. As zonas 4 e 5, embora sejam mais quentes, têm distribuição distinta: a zona 4 está concentrada na região Sudeste, enquanto a zona 5 está dispersa entre as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste.

As zonas 6 e 7 têm importância estratégica no Brasil, abrangendo cerca de 12,6% do território nacional cada uma. A zona 6 está concentrada no Centro-Oeste, com extensões para o Sudeste e Nordeste, enquanto a zona 7 é mais proeminente no Nordeste, abrangendo também áreas do Centro-Oeste e Norte. A zona 8 se destaca pela sua grande extensão, incluindo a região Norte, parte do Centro-Oeste e o litoral brasileiro.

Nas zonas 1 a 4, as estratégias de parâmetros construtivos variam de acordo com as necessidades climáticas e se destacam o uso de aquecimento solar e vedações internas pesadas para a estação de inverno. Na zona 5, as edificações só necessitam de vedações externas leves com paredes refletoras e cobertura isolada. No entanto, no verão, surgem novas demandas: as zonas 2, 3 e 5 requerem ventilação cruzada, enquanto a zona 4 necessita de ventilação seletiva, resfriamento evaporativo e massa térmica. Em contraste, a zona 1 não considera a estação de verão em suas estratégias construtivas.

De acordo com a NBR 15220-3 (ABNT, 2005a), tanto a zona 6 quanto a zona 7 adotam estratégias semelhantes de condicionamento térmico, como desumidificação do ar, ventilação cruzada e sombreamento das aberturas. A diferença reside no fato de que a zona 6 necessita manter e até mesmo aquecer o interior das edificações. Por outro lado, a zona 8, além de apresentar alta umidade relativa do ar e temperatura elevada, utiliza estratégias semelhantes de condicionamento térmico às zonas 6 e 7, mas se distingue pelo uso de resfriamento artificial.

Essas discrepâncias nas estratégias adotadas também podem ser explicadas pela diversidade de climas presentes em cada zona. Por exemplo, a zona 6 possui uma variedade muito maior de climas Köppen em comparação com as zonas 7 e 8. Além do clima tropical e seco, a zona 6 também abriga o clima temperado (ABNT, 2005a; Alvares et al., 2013).

Por fim, é importante destacar que as zonas bioclimáticas intermediárias têm menos volume de recomendações construtivas, pois estudos focam em climas extremos ou medianos, como as zonas 1, 5 e 8, ou em climas de cidades populosas. Bavaresco et al. (2021) também destacam que municípios dentro da mesma zona bioclimática podem apresentar particularidades que influenciam nas recomendações construtivas.

2.1.2. Climas quentes e as construções no Brasil

O clima tropical predomina no Brasil, cobrindo 81,4% do território e presente em todas as regiões do país, exceto no Sul. Este clima é caracterizado por temperaturas médias superiores a 18°C e alta precipitação média mensal. Sua ampla distribuição no país deve-se à ausência de fatores limitantes relacionados à altitude, chuvas e temperaturas que favoreceriam outras tipologias climáticas. Dentre as subcategorias climáticas, destacam-se o clima tropical de monção (Am), presente em 27,5% do território, seguido do tropical de savana com chuva no verão (Aw), com 25,8%, do tropical equatorial (Af), com 22,6%, e do tropical de savana com chuva no inverno (As), com 5,5% (Alvares et al., 2013).

Por outro lado, o clima seco é o menos comum no Brasil, representando apenas 13,7% do território. Apesar de também apresentar temperaturas médias superiores a 18°C, difere do clima tropical por ter níveis de precipitação média inferiores a 800 mm. No Brasil, o clima seco é representado apenas pela subcategoria de clima semiárido quente (BSh).

Na arquitetura, a adaptação ao clima, de forma a criar espaços que ofereçam condições habitáveis, onde as pessoas possam desfrutar de bem-estar tanto para descansar quanto para trabalhar, é imprescindível. O envelope da edificação desempenha um fator importante ao proteger os indivíduos das condições atmosféricas e suas variações. A escolha dos materiais de construção em qualquer projeto é influenciada por diversos fatores, sendo os principais o clima local, o nível de desenvolvimento da sociedade e a disponibilidade de materiais (Elawa, 1981).

Assim, a maioria das construções deve considerar que a escolha dos materiais, o projeto a ser executado e as estratégias de resfriamento adotadas devem ser adaptados ao clima. O primeiro nível de adaptação ao clima é determinar a massa da construção, estabelecendo uma relação entre o volume construído e o espaço

enclausurado. Elawa (1981) ressalta que a função dos espaços e pátios entre os volumes construídos da edificação, juntamente com as aberturas, inclui proteger contra a radiação solar direta, fornecer sombreamento às paredes e, ao mesmo tempo, permitir a entrada de ventilação para resfriar a estrutura.

Guarda et al. (2018) destacam as adequações necessárias para diferentes zonas bioclimáticas brasileiras, principalmente as de baixo impacto. Entre as soluções, destaca-se a importância do papel das aberturas para a ventilação e iluminação, além do aumento da espessura do acabamento das paredes e a inserção de materiais. Reis e Castro (2022) também observam que a escolha dos materiais e dos métodos construtivos visando à eficiência energética e à sustentabilidade na construção civil ainda é algo relativamente novo no Brasil.

Devido à grande diversidade bioclimática do Brasil, não existe uma solução generalizada para melhorar as condições de desempenho energético. Portanto, as escolhas são condicionadas ao local da construção (Bavaresco et al., 2021). Apesar disso, novas tecnologias têm sido inseridas de forma inovadora no mercado construtivo brasileiro, especialmente aquelas que propõem um desempenho térmico adequado ao longo do ciclo de vida do edifício, como é o caso das edificações contêiner (Caldas; Abreu-Harbach; Hora, 2020).

2.1.3. Contêineres e o clima

O clima desempenha papel importante na concepção de edificações contêineres. De acordo com Slawik (2015), a viabilidade financeira do uso de contêineres como espaços habitáveis permanentes é maior em regiões onde o clima é ameno e seco, e onde a proteção contra perdas de calor e umidade não é a principal preocupação. Para edifícios destinados a serem espaços habitáveis permanentes e que devem atender a necessidades de longo prazo, é essencial que o projeto seja elaborado visando o conforto do usuário.

Os módulos de contêineres padronizados consistem em estruturas de aço, paredes, telhados, pisos, portas e cantoneiras corrugadas e isoladas em um invólucro (Radwan, 2015). Atualmente, essa forma de arquitetura modular é amplamente utilizada na indústria da construção pré-fabricada, especialmente na criação de espaços residenciais, como unidades unifamiliares (Berbesz; Szefer, 2018). Essa característica levanta preocupações sobre o uso desse método construtivo em climas

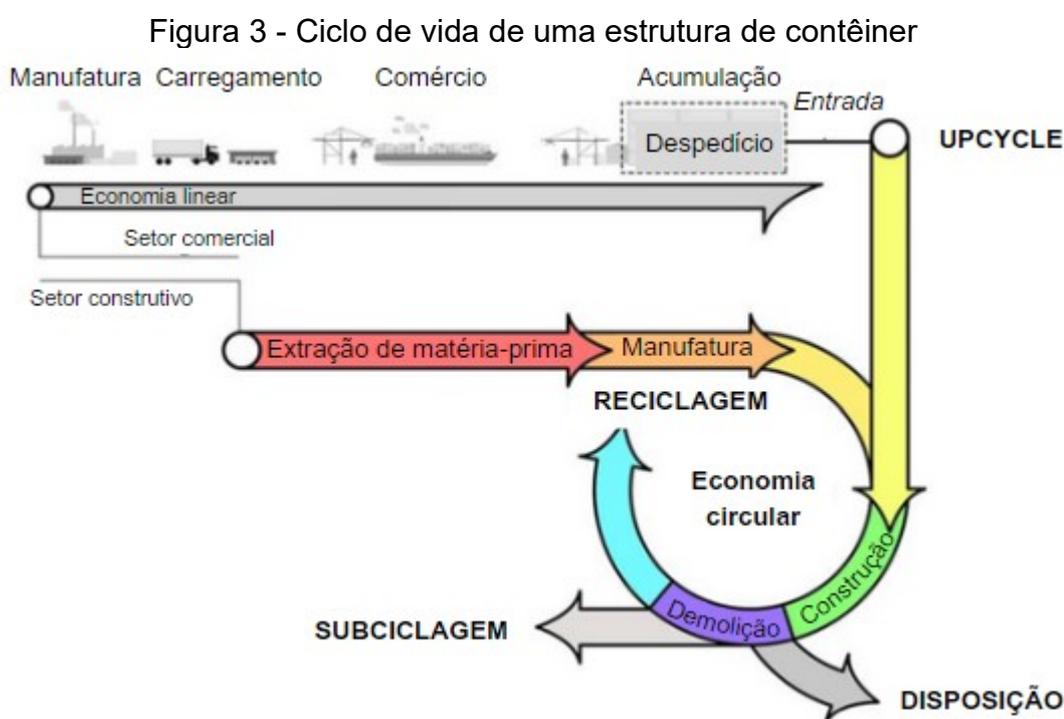
quentes, uma vez que a transferência de calor pode afetar o desempenho termoenergético da construção. Atualmente, esses contêineres de aço são frequentemente fabricados com aço *corten* de lenta corrosão. No entanto, também existem outras variantes, como contêineres com preenchimento de parede não estrutural de madeira (contêineres de compensado), aqueles feitos de alumínio (com metade do peso, mas mais caros), ou mais recentemente, contêineres feitos de plástico com estrutura de aço de suporte (Slawik, 2015). Ao planejar uma construção com contêineres feitos de outros materiais, a característica do material da envoltória deve ser considerada.

Ao observar o cenário internacional, é evidente que os contêineres estão amplamente disponíveis e são utilizados como módulos de construção em todo o mundo. No entanto, é importante ressaltar que o tipo e a frequência de uso, bem como a seleção do tipo de contêiner e seu propósito, variam significativamente de acordo com as considerações locais, especialmente em relação ao clima. Os requisitos de qualidade do invólucro climático são tão diversos quanto os próprios climas. Enquanto alguns países têm requisitos legais de isolamento térmico, em outras regiões isso pode não ser uma preocupação. Devido às condições climáticas amenas em algumas áreas, muitos projetos residenciais baseados em contêineres de transporte podem atender a requisitos modestos em termos de isolamento térmico (Slawik, 2015).

Conforme Zafra et al. (2021), os contêineres marítimos apresentam desafios em termos de regulação térmica, particularmente durante os meses quentes e secos, ressaltando a importância do isolamento térmico para garantir o conforto dos ocupantes. O estudo indica que o posicionamento solar não influencia significativamente as condições térmicas, e até mesmo soluções como janelas envidraçadas ou ventilação programada podem elevar a temperatura interna e a umidade relativa.

Por outro lado, Elrayies (2017) investigou o desempenho térmico de construções utilizando contêineres em climas quentes e úmidos. Os resultados não indicaram uma inferioridade dessas construções em relação aos edifícios tradicionais nessas condições climáticas. No entanto, destacou-se a escassez de estudos abrangentes sobre o desempenho térmico específico dessas construções em diversos climas, enfatizando a necessidade de mais pesquisas nessa área.

Outro ponto destacado por Bertolini e Guardigli (2020) são os impactos ambientais relacionados à escolha dos módulos em climas quentes, que incluem a acidificação e eutrofização devido à necessidade de materiais de massa térmica para garantir os benefícios da reutilização dos contêineres. Esses impactos são influenciados pela fase do produto e pelas substituições. Portanto, para preservar os benefícios ambientais dos contêineres em climas quentes, é necessário conduzir estudos sobre materiais secundários. A Figura 3 ilustra o ciclo de vida de uma estrutura de contêiner.

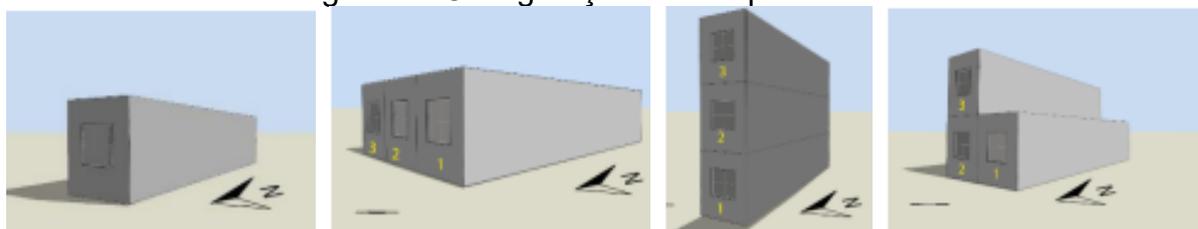


Fonte: Adaptado de Bertolini e Guardigli (2020)

Assim, pesquisas que propõem ideias para a integração de contêineres na construção civil em climas quentes têm sido desenvolvidas, como demonstrado no estudo conduzido por Taleb, Elsebaei e El-Attar (2019). No estudo, verificou-se a adoção de estratégias passivas e ativas em residências unifamiliares construídas com contêineres em climas quentes e áridos. A pesquisa apresentou que há redução significativa no consumo de energia com a aplicação de telhados verdes em construções contêiner. No entanto, há desafios em integrar essa tecnologia devido à falta de incentivo governamental.

Outra estratégia que também é analisada a fim de contornar as condições climáticas é a disposição de empilhamento dos contêineres. Hassan et al. (2022) destacam que, para condições de verão, o empilhamento vertical funciona melhor do que o horizontal. Porém, do ponto de vista estrutural, é possível empilhar esses contêineres para criar até três andares. Eles podem ser empilhados até quatro andares em casos excepcionais, mas as construções devem ser reforçadas nesse caso (Slawik, 2015). A Figura 4 apresenta os diferentes modelos de configuração de união de empilhamento.

Figura 4 - Configurações de empilhamento



Fonte: Adaptado de Hassan et al. (2022)

A maximização e a integração de estratégias passivas, tecnologias renováveis de baixo carbono e práticas construtivas em diferentes cenários climáticos devem ser analisadas. Devido às características logísticas, como estanqueidade ao ar, altura limitada do espaço e peso leve, o desempenho geral de um prédio contêiner ainda é questionável, especialmente em meio à deterioração climática. Atualmente, o *design* do ambiente interno adequado exige requisitos mais rigorosos tanto para o envelope quanto para a estrutura, o que impacta ainda mais o consumo total de energia (Shen et al., 2019). Shen et al. (2019) afirmam que as propostas de *design* adaptativo ao clima estão sujeitas a falhas conforme a progressão da deterioração climática do local analisado. Dessa forma, observa-se que a aplicação dos contêineres na construção está sujeita à disponibilidade do módulo, escolha dos materiais construtivos, estratégias de resfriamento passivo e à percepção do usuário sobre a edificação.

2.2. Contêineres marítimos e a economia circular na construção civil

A indústria da construção civil tem um impacto significativo no meio ambiente devido ao alto consumo de recursos, energia e a geração de resíduos (Pérez-Lombard; Ortiz; Pout, 2008). De acordo com Kibert (2021), uma parcela significativa da energia total

do ciclo de vida é destinada aos materiais de construção e à própria construção, podendo chegar a até 20% desse total. O relatório da *United Nations Environment Programme* (UNEP) de 2021 aponta que o setor de edificações e construção é responsável por cerca de 37% das emissões de CO₂ relacionadas à energia e processos, além de mais de 34% da demanda energética global. Além disso, a construção de edifícios consome aproximadamente 4% dos recursos, como concreto, alumínio e ferro, e cerca de 1% de materiais como tijolo e vidro (UNEP, 2022). No Brasil, o setor industrial foi o segundo maior consumidor de energia em 2023, apresentando aumento 2,9% em relação ao ano anterior (BEN, 2024).

O interesse de implementar o modelo econômico de economia circular fundamenta-se na busca pelo aprimoramento do gerenciamento de recursos na indústria da construção (Pomponi; Moncaster, 2017). Este modelo econômico abrange a redução, reutilização e reciclabilidade de materiais e componentes, promovendo o uso de materiais, a maximização da recuperação de recursos e a redução da geração desnecessária de resíduos, evitando seu descarte em aterros (Akanbi et al., 2018; Ghisellini; Ripa; Ulgiati, 2018; Herczeg; Akkerman; Hauschild, 2018). No entanto, a falta de métodos e práticas padronizadas que auxiliem profissionais para a implementação deste modelo no ambiente construído ainda representa um desafio. Além disso, a reutilização de materiais e a necessidade de estudar abordagens específicas para diferentes tipos de edifícios e usos são questões importantes a serem consideradas (Benachio; Freitas; Tavares, 2020).

As abordagens que utilizam estratégias de reutilização na indústria da construção levam a menores potenciais de aquecimento global, especialmente na fase de produção. No entanto, essa redução está condicionada à construção e à seleção dos materiais (Rasmussen; Birkved; Birgisdóttir, 2019). O potencial de reutilização de materiais e componentes pela indústria da construção pode ser impulsionado e acelerado por meio da identificação de oportunidades e de esforços de melhorias de longo prazo mais eficazes. A composição dos materiais exerce influência significativa nos impactos ambientais incorporados ao edifício e está relacionada ao número de reutilizações dos componentes, à vida útil dos materiais e do edifício (Eberhardt; Birgisdóttir; Birkved, 2018).

Um dos principais esforços para combater as mudanças climáticas no ambiente construído é a busca pela redução significativa das emissões de gases de

efeito estufa, por meio da mudança na forma como as edificações são planejadas. A reutilização de materiais descartados está se consolidando como uma solução cada vez mais adotada na construção civil (Batista, 2022). Nesse contexto, o potencial de reutilização dos contêineres como sucata pode contribuir significativamente para a redução dos problemas relacionados à extração de minério de ferro, bem como para a minimização do acúmulo e degradação irreversível de resíduos em depósitos (Bertolini; Guardigli, 2020). Ressalta-se que, somente no Brasil, em 2022, cerca de 128,4 milhões de toneladas de contêineres foram movimentadas (ANTAQ, 2023).

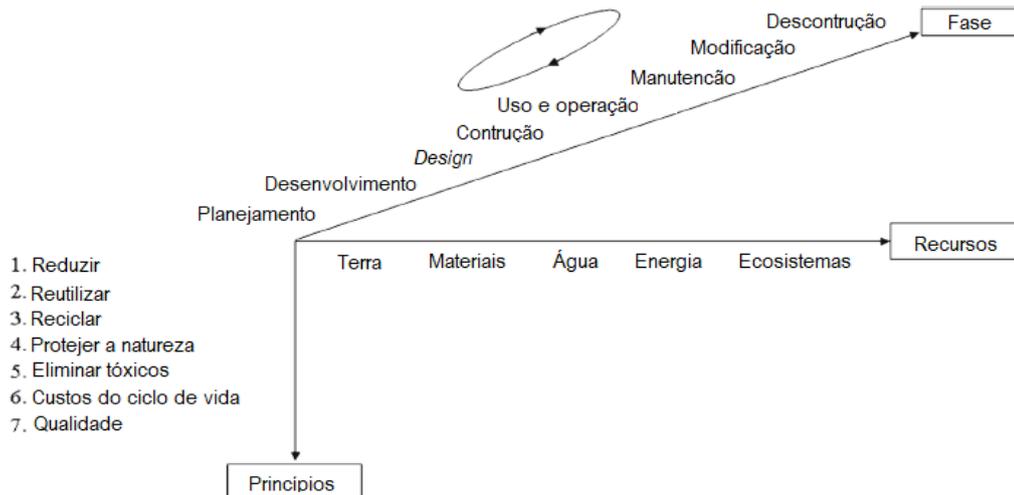
Um contêiner é uma estrutura que encapsula um volume de espaço utilizável e, dessa forma, define a fronteira entre interior e exterior. Assim, com dimensões espaciais que permitem a circulação interna, o contêiner atende aos requisitos para ser utilizado como módulo habitacional (Slawik, 2015). Diante disso, a aplicação de estratégias de *design* modular na arquitetura dos contêineres de transporte não apenas otimiza o processo de projeto, mas também estabelece um método operacional inovador para essa forma arquitetônica (Sun; Mei; Ni, 2017). O *Task Group 16* do *Conseil International du Bâtiment* estabeleceu sete Princípios da Construção Sustentável para orientar a tomada de decisões em todas as fases do processo de projeto e construção, abrangendo o ciclo de vida completo do edifício (Kibert, 2021). Esses princípios também se aplicam à avaliação dos componentes e recursos necessários para a construção. O fluxograma da Figura 5 mostra o processo de *design* e construção, fornecendo uma representação visual do método proposto. Essa representação visual permite melhor compreensão do processo envolvido na concepção e implementação das construções com contêineres marítimos.

Dentro dessa perspectiva, destaca-se a estratégia "*closed loop*", definida por Kibert (2021) como um processo que visa manter os materiais em uso produtivo por meio da reutilização, evitando o descarte como resíduos no final do ciclo de vida. Os contêineres são exemplos de produtos que, quando considerados nesse contexto, podem passar por desmontagem e reciclagem de seus materiais constituintes, promovendo um ciclo sustentável de uso e aproveitamento de recursos.

Assim, os contêineres usados para fins construtivos têm se tornado amplamente difundidos na indústria da construção, especialmente na Europa. Esses módulos são empregados principalmente em escritórios, espaços comerciais ou habitações devido à sua leveza e praticidade. No entanto, para construções

permanentes, os requisitos físicos são mais exigentes, o que muitas vezes implica em aumento da mão de obra e dos custos. Portanto, os contêineres de construção frequentemente são equipados apenas com o necessário, pois atender aos requisitos mínimos de habitabilidade implica em custos adicionais (Slawik, 2015).

Figura 5 - Processo de *design* e construção sustentável



Fonte: Adaptado de Kibert (2021).

Apesar de existirem diversos tipos de contêineres, com os mais diversos materiais, os contêineres *International Organization for Standardization (ISO)* são os mais comuns de serem utilizados na indústria naval, pois a padronização torna as operações mais eficientes uma vez que reduzem o tempo de carregamento. A Tabela 1 apresenta as características e medidas dos modelos mais utilizados no Brasil para a construção civil.

As medidas e a utilização dos módulos náuticos oferecem uma compreensão mais ampla sobre a aplicação dos contêineres marítimos na construção, bem como as considerações específicas necessárias em diferentes contextos. Portanto, é possível adotar abordagens mais eficientes e conscientes ao utilizar essas estruturas para promover a sustentabilidade na indústria da construção. A Figura 6 mostra os componentes de um contêiner.

As residências construídas a partir de contêineres têm sido analisadas e investigadas como uma opção pré-fabricada de alto desempenho, visando edifícios de energia quase zero ao aproveitar o contêiner marítimo no final de sua vida útil

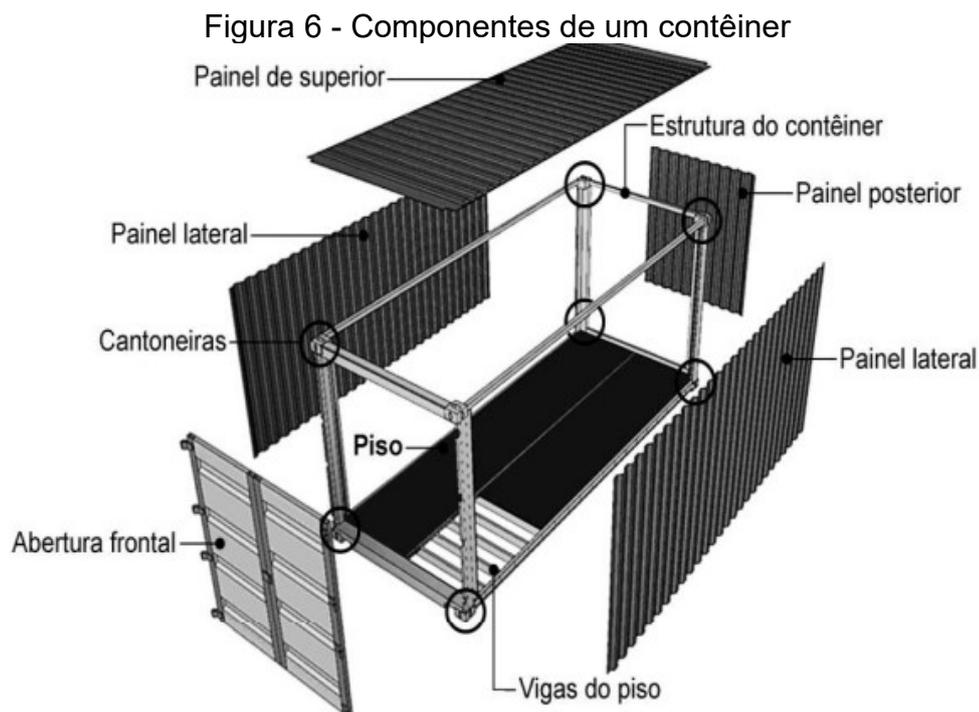
(Schiavoni et al., 2017). Dessa forma, o potencial de reutilização de um material descartado tem sido estudado como forma de melhorar as condições de moradia.

Tabela 1 - Modelos de contêiner mais utilizados na construção civil

Contêiner ISO		Função	Dimensões internas (m)			Dimensões externas (m)		
Tipo	Pés		C	L	H	C	L	H
Dry box	20'	Transporte de cargas gerais secas. contêineres feitos de aço, com estrutura paralelepipedal e portas frontais.	5,91	2,34	2,40	6,06	2,44	2,59
	40'		12,04	2,34	2,38	12,19	2,44	2,59
	HC 20		5,91	2,34	2,69	6,06	2,44	2,89
	HC 40		12,03	2,34	2,69	12,19	2,44	2,89
Ventilado	20'	Transporte de cargas que requerem ventilação. Este tipo possui aberturas nos fechamentos laterais e sistema de ventilação forçada.	5,90	2,32	2,37	6,06	2,44	2,59
	40'		12,02	2,34	2,38	12,19	2,44	2,59
Refrigerado	20'	Transporte de cargas perecíveis de temperatura controlada. Este tipo é um dos mais caros, pois possui o revestimento do piso em alumínio, portas de aço reforçadas e sistema de refrigeração acoplado	5,50	2,32	2,37	6,06	2,44	2,59
	40'		12,02	2,34	2,38	12,19	2,44	2,59
Granéis	20'	Transporte de granéis sólidos como produtos agrícolas. Este tipo dispensa o uso de embalagens e pode ser carregado pelas escotilhas superiores e descarregado pela abertura frontal. Usado também convencionalmente.	5,89	2,34	2,40	6,06	2,44	2,59
	40'		12,02	2,34	2,38	12,19	2,44	2,59
Tanque	20'	Transporte de líquidos e gases. Este tipo apresenta-se como um tanque de aço inoxidável inscrito em moldura de aço.	5,84	2,37	2,37	6,06	2,44	2,59
Flat Rack	20'	Transporte de cargas pesadas e grandes que excedam as dimensões do contêiner padrão. Este tipo é aberto superior e lateralmente, facilitando o embarque e desembarque de mercadorias.	5,91	2,39	2,32	6,06	2,44	2,59
	40'		12,02	2,23	1,99	12,19	2,44	2,59
Plataforma	20'	Transporte de cargas de grandes dimensões ou muito pesadas. Este tipo caracteriza-se como uma plataforma que estrutura a mercadoria acondicionada.	6,02	2,41	-	6,06	2,44	0,23
	40'		12,15	2,29	-	12,19	2,44	0,63
Open top	20'	Transporte de mercadorias que excedam a altura do contêiner ou que apresentam facilidade ao serem estivadas por cima. Este tipo é feito em aço e possui fechamento superior removível (tecido ou metálico).	5,89	2,36	2,69	6,06	2,44	2,89
	40'		12,03	2,35	2,37	12,19	2,44	2,59

Legenda: C é o comprimento; L é a largura; H é a altura.

Fonte: Adaptado de Carbonari (2015)



Fonte: Carbonari (2015)

2.2.1. Isolamento térmico

De acordo com a segunda lei da termodinâmica, um sistema possui uma exergia apreciável quando há uma grande diferença de temperatura. Essa exergia é convertida em anergia quando os dois níveis de temperatura se igualam. O isolamento térmico pode, portanto, ser considerado como um meio de retardar a entropia, destinado a manter as temperaturas de um ambiente ao prevenir o fluxo de calor (Diamant, 1986).

Alguns dos isolamentos térmicos utilizados no estudo de Elrayies (2017) em residências contêiner na cidade de Porto Said, no Egito, incluem: lã de rocha, lã, poliuretano e palha. No entanto, há materiais isolantes que não são adequados para regiões úmidas sem a proteção de materiais impermeáveis, como a lã e a lã de rocha, pois absorvem água, o que torna suas propriedades térmicas ineficientes. Esses materiais foram analisados devido às suas características térmicas e resistência à umidade, como o poliuretano; permeabilidade ao vapor e resistência a som e fogo, como a lã de rocha; ou por serem materiais ecológicos, como a lã e a palha (Elrayies, 2017).

Taleb, Elsebaei e El-Attar (2019) também realizaram uma análise em residências contêiner no Egito, na cidade de Assuã, que possui um clima quente e

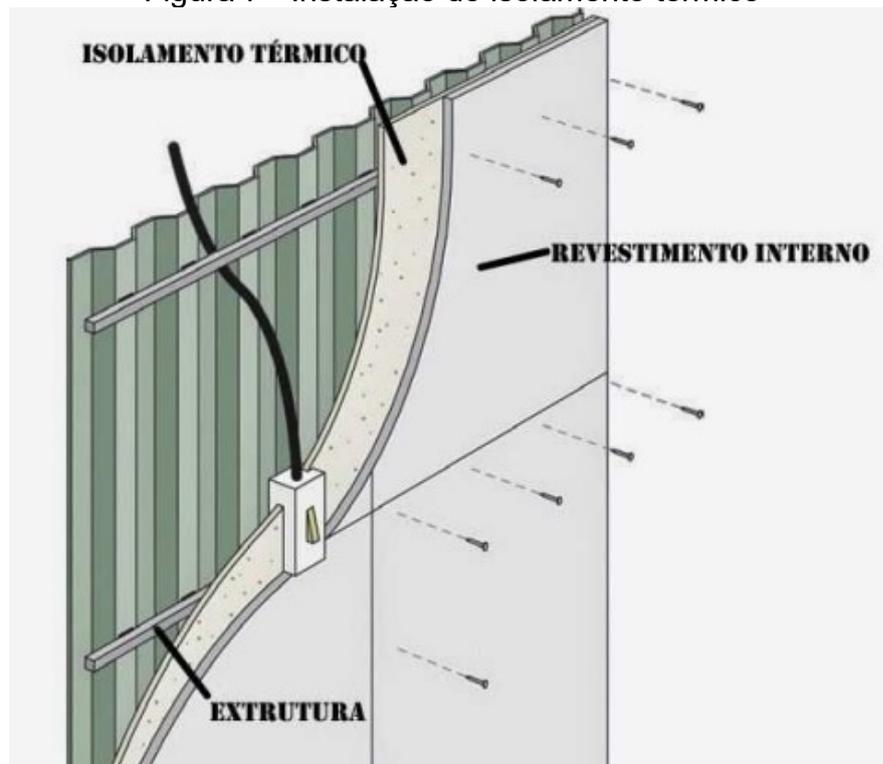
árido, investigando o uso de painéis de concreto reforçado com fibra de vidro e paredes sanduíche de espuma. A escolha desses materiais deve-se ao fato de serem os isolantes térmicos comuns no Egito. Constatou-se que ambos os isolamentos possuem bom desempenho térmico e são praticamente equivalentes, apesar da transmitância térmica da parede sanduíche ser menor do que a dos painéis.

Em suas análises, Zafra et al. (2021) consideraram um caso base sem isolamento, um modelo com espuma de poliuretano de dupla face, um modelo de isolamento mais robusto com manta de fibra de vidro R-21 nas paredes e R-49 no telhado, e um modelo com isolamento mais leve usando manta de fibra de vidro R-19 nas paredes e R-13 no telhado. Na análise realizada, verificou-se que o aumento da resistência térmica do contêiner não resultou em melhorias nas condições internas. Os principais motivos para isso se devem ao fato de que, apesar de o isolamento contribuir para a redução das amplitudes térmicas na habitação, em estações quentes o calor acaba ficando armazenado dentro da edificação.

Embora haja uma variedade de materiais disponíveis para melhorar o isolamento térmico de contêineres, a escolha de onde aplicar o isolamento, seja no interior ou exterior das paredes, depende das condições climáticas. Para climas frios, o isolamento externo é preferível, proporcionando uma estética tradicional à estrutura (Islam et al., 2016). Os estudos em climas quentes compreendem que o isolamento do contêiner deve ser feito na parte interna, porém também pode-se ter uma estética tradicional nesses climas (Elrayies, 2017; Taleb; Elsebaei; El-Attar, 2019). A Figura 7 ilustra a instalação do isolamento térmico em um contêiner.

Vários tipos de isolamento têm sido aplicados a contêineres, mas os contêineres *reefer*, ou refrigerados, dispensam a adição de material isolante. Essa característica decorre do fato de que são projetados para o transporte de cargas refrigeradas. No entanto, os módulos *reefer* têm a desvantagem de possuir uma área interna reduzida em comparação com os contêineres de transporte de cargas secas, devido à camada de isolamento de poliuretano de dez centímetros. Como o módulo é destinado à refrigeração, funciona como uma câmara fria, e integrado a ele há um motor que realiza o resfriamento interno por meio de combustível ou energia elétrica (Maillard, 2017; Vieira, 2019).

Figura 7 - Instalação do isolamento térmico



Fonte: Maillard (2017)

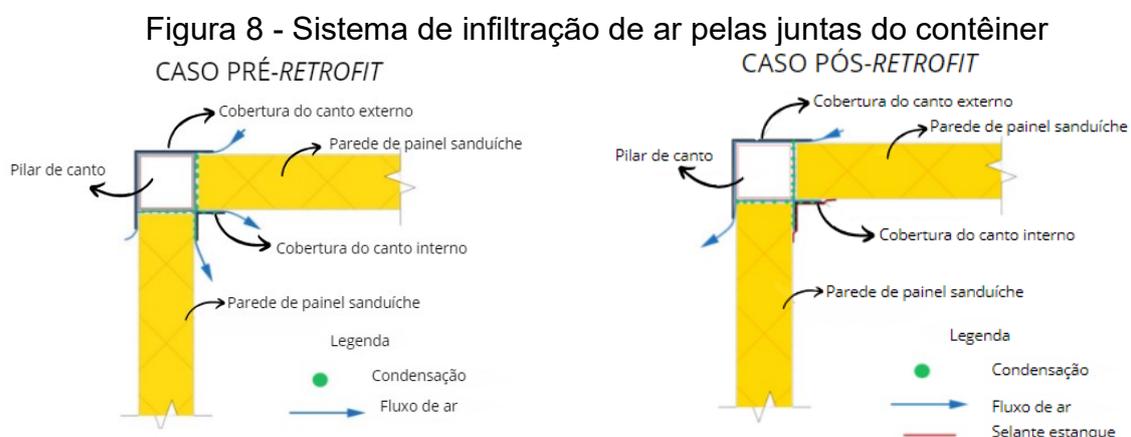
Copertaro, Principi e Fioretti (2016) conduziram uma investigação numérica sobre o comportamento energético de contêineres refrigerados ao substituir o poliuretano por materiais de mudança de fase. Essas análises foram realizadas para diversos materiais de mudança de fase, condições climáticas e exposições, resultando na redução e deslocamento das fases de carga térmica diária em comparação com o poliuretano. No entanto, mesmo que o material isolante tenha sido utilizado na construção, a finalidade do estudo concentrou-se na análise do envelope sem uso para a moradia humana.

2.2.2. Estanqueidade

A infiltração de ar refere-se ao movimento do ar por meio de qualquer abertura, como vazamentos, rachaduras, ou frestas, que podem existir naturalmente no envelope do edifício ou desenvolver-se ao longo do tempo. Uma medida de estanqueidade ao ar fornece uma indicação de quão permeável é o envelope do edifício. O parâmetro principal usado para quantificar a estanqueidade ao ar é o fluxo de ar por meio do envelope em uma pressão de referência específica (Santamouris; Wouters, 2015).

A análise da estanqueidade em quatro residências contêineres realizada por Tanyer, Tavukcuoglu e Bekboliev (2018) revelou valores de vazamento elevados, indicando que as casas contêineres também se enquadram na categoria de residências com vazamentos existentes. Essas características de baixa estanqueidade ao ar podem ser atribuídas ao envelope do edifício, onde as junções dos painéis e as bordas das aberturas estão localizadas. Para melhorar a estanqueidade e a resistência térmica do envelope de construções feitas com contêineres, é essencial garantir que as junções sejam devidamente vedadas e isoladas. Assim, a melhoria do envelope inclui a aplicação de quebras térmicas, que são materiais isolantes inseridos entre a face interior e exterior, além da utilização de selantes estanques nas junções. Adicionalmente, é recomendado o uso de um preenchimento de isolamento térmico mais espesso, levando em consideração as exigências climáticas.

Bekboliev (2015) afirma que após a aplicação de reformas, há melhorias significativas na estanqueidade de edificações contêiner e redução na demanda de energia. Além disso, para obter melhores resultados, a vedação do ar deve ser feita tanto nos lados externos quanto internos. Porém, ainda há problemas de condensação nas juntas, superfície de condensação na parede, pontes térmicas no canto das juntas e baixa resistência em toda a parede. Apesar de ainda persistirem algumas patologias, a eliminação de pontes térmicas com quebras térmicas e maior isolamento é necessária para adequar as edificações aos padrões de fabricação de edifícios pré-fabricados. A Figura 8 apresenta a interpretação esquemática da fuga de ar nas juntas dos contêineres.



Fonte: Adaptado de Bekboliev (2015)

2.2.3. Patologias

Depois do uso no transporte marítimo de cargas, os contêineres são armazenados ou até mesmo abandonados, podendo estar em bom estado de conservação ou não, e há a possibilidade de serem adquiridos novamente ou não (Santos, 2017). A principal preocupação nas construções com contêineres é a corrosão. No entanto, como são feitos com aço *corten*, em sua composição, há uma liga que isola a primeira camada do metal das demais, o que evita que o oxigênio entre em contato com os níveis mais profundos da estrutura (Giliot, 2006).

No entanto, muitas unidades de construções intermodais de aço, vêm com *primer* anticorrosivo de resistência industrial para evitar a corrosão superficial ou futura ferrugem, ou seja, se bem revestido há alta capacidade de resistir à corrosão (Islam et al., 2016). Justino et al. (2021) destacam que na seleção no módulo náutico deve-se ter atenção ao tipo de contêiner e carga que ele é destinado a transportar a fim de avaliar as contaminações e a estrutura do contêiner.

Na escolha do módulo, é essencial verificar sua condição quanto à contaminação visível. Assim, instituições como o *World Shipping Council (WSC)* e o *Institute of International Container Lessors (IICL)* estabelecem critérios para inspeção e reparo de contêineres. Segundo a *publicação Unified Container Inspection and Repair Criteria (UCIRC)*, danos que comprometam a segurança do contêiner, violem a Convenção Aduaneira sobre Contêineres, ou apresentem contaminação por pragas, redução na altura interna acima de 70 mm e/ou na largura interna acima de 50 mm, o tornem inadequado para carga, rachaduras e corrosão devido a falhas na pintura não são aceitáveis (WSC, 2024).

O boletim técnico *IICL Corner Fittings Inspection Criteria* fornece orientações adicionais para a inspeção adequada dos encaixes de canto e avaliação das condições danificadas, aplicável apenas aos modelos *dry box*, *reefer*, *flat rack* e *open top* (IICL, 2018). As condições não aceitáveis e que exigem reparo incluem:

- Cantos rachados, soltos, rasgados, quebrados ou ausentes;
- Qualquer deformação do encaixe que impeça ou comprometa o engajamento total da fixação ou elevação;
- Qualquer deformação que reduza a quantidade de material na área de suporte de carga da trava de torção;

- Danos que afetem a integridade das soldas do encaixe de canto em qualquer componente adjacente;
- Danos que comprometam a resistência do encaixe do canto no caminho de carga entre a área de rolamento da trava de torção, o poste de canto, as soldas laterais ou o trilho final;
- Qualquer tentativa de reparo realizada no encaixe de canto, exceto substituição ou ressolda nos componentes adjacentes.

Destaca-se que essas recomendações são direcionadas ao contêiner em sua vida útil para o transporte marítimo, mas o mesmo pode ser aplicado e melhorado para fins habitacionais (Justino et al., 2021). A Figura 9 apresenta exemplos de danos não aceitáveis nas peças de canto e nas alterações de formato e tamanho das aberturas, enquanto a Figura 10 mostra as condições aceitáveis, nas quais não são necessários reparos.

O boletim técnico *Floor Coating as an IICL Repair Method* destaca que os pisos dos contêineres podem ou não ser revestidos no momento da produção, sendo aplicados para atender a requisitos especiais do expedidor ou como método de reparo para ocultar manchas ou outras contaminações. Quando usados como método de reparo, os revestimentos podem ser aplicados sobre pisos extremamente contaminados por óleo, ocultando condições que poderiam degradar o piso. Depois da aplicação do revestimento, não é possível determinar a natureza dos danos no piso que estão ocultos sob o revestimento, o nível de contaminação, ou se foram realizadas preparação e limpeza adequadas da superfície antes da aplicação do revestimento (IICL, 2013).

Figura 9 - Danos não aceitáveis nas peças de canto



Fonte: IICL (2018)

Outro ponto importante sobre o piso dos contêineres é que, devido ao tempo prolongado de uso, há risco de contaminação tanto pelas cargas transportadas quanto pelos materiais utilizados na manutenção dessas caixas metálicas, especialmente o piso, que, por ser de madeira, recebe a aplicação de pesticidas para prolongar sua conservação. Logo, é necessário substituí-lo completamente (Milaneze et al., 2012; Occhi; Almeida, 2016).

Figura 10 - Danos aceitáveis nas peças de canto



Fonte: IICL (2018)

2.3. Arquitetura construtiva com contêineres

Em 1956, um caminhoneiro chamado Malcolm McLean, procurando uma alternativa econômica para transportar cargas entre Nova Jersey e o Texas, carregou 58

carcaças de reboque no navio-tanque da era da Segunda Guerra Mundial, o *TS Ideal X*, marcando o início do que se chama de "containerização" (IICL, 2018). Os contêineres são frequentemente utilizados na arquitetura para construções temporárias, além de serem valorizados por sua aparência.

O uso de contêineres como habitações temporárias em situações pós-desastre destaca-se por atender às necessidades de planejamento flexível e coordenado, embora nem todos os projetos sejam adequados para todas as situações (Zhang; Setunge; Van Elmpt, 2014). No entanto, um estudo conduzido por Caia, Ventimiglia e Maass (2010) revelou que sobreviventes de terremotos preferiram o uso de casas de madeira em vez de contêineres como moradia provisória, destacando a importância não apenas da funcionalidade, mas também do bem-estar proporcionado pelo ambiente de moradia temporária.

Apesar disso, sistemas de contêineres tornaram-se amplamente difundidos na arquitetura, principalmente na Europa, devido à sua versatilidade. Eles são frequentemente utilizados como escritórios, espaços comerciais e habitacionais, devido à sua leveza e praticidade. Outro ponto de destaque é que o uso de contêineres na construção adquiriu um certo "*status cult*", especialmente quando empregados em arquitetura de eventos (Slawik, 2015).

Schwarzer (2013) ressalta que, apesar de inicialmente parecer um elemento arquitetônico fora do comum, os contêineres proporcionam uma construção quase instantânea de complexos de edifícios, alinhando assim a produção arquitetônica com a velocidade e transitoriedade da vida contemporânea. Isso obriga a arquitetura a responder aos numerosos sistemas complexos e adaptativos da sociedade moderna. Projetos ao redor do mundo demonstram o uso eficaz desse sistema, como o *ConHouse* e o C3208 (Inhabitat, 2009; Slawik, 2015).

O *ConHouse*, um projeto de Jure Kotnik, consiste em uma mini residência construída a partir do empilhamento de dois contêineres, oferecendo flexibilidade para ser adaptada conforme as necessidades do proprietário. Por sua vez, o projeto C3208, desenvolvido pelos escritórios HyBrid e Cargotecture, é composto por dois contêineres de 20 pés, resultando em uma casa de 30 m². A Figura 11 mostra os projetos *ConHouse* e do C3208.

Figura 11 - Projeto ConHause e C3208



Fonte: Inhabitat (2009); Slawik (2015)

2.4. NBR 15.575-1

Em resposta à crise energética de 2001, o Governo Federal brasileiro implementou medidas para promover a eficiência energética em edifícios. O Decreto nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001, regulamenta a Lei nº 10.295, estabelecendo os níveis máximos de consumo de energia ou os mínimos de eficiência energética de máquinas, dispositivos e edifícios fabricados ou comercializados no país (Brasil, 2001b). Além disso, determinou a criação do Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética, responsável por coordenar esses níveis e regulamentações, sob a supervisão do Ministério de Minas e Energia.

A Lei nº 10.295, sancionada em 17 de outubro de 2001, estabeleceu a "Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia", atribuindo ao Poder Executivo a responsabilidade de desenvolver mecanismos que promovam a eficiência energética em edifícios construídos no país (Brasil, 2001a). Assim, as normas de desempenho foram elaboradas com a intenção de incentivar e balizar o desenvolvimento tecnológico, além de orientar a avaliação da eficiência técnica e econômica das inovações tecnológicas.

A NBR 15575-1 (ABNT, 2024a) estabelece os critérios e os requisitos de desempenho aplicáveis às edificações habitacionais. Essa norma permite a avaliação de desempenho tanto da edificação como um todo integrada, quanto como para sistemas isolados. A seção 11 da norma busca avaliar o desempenho térmico da habitação operando tanto com ventilação natural quanto com condicionamento

artificial. Destaca-se que o desempenho térmico das unidades habitacionais é categorizado em três níveis de desempenho: mínimo, intermediário e superior.

Para a avaliação do desempenho térmico, a norma descreve dois procedimentos: o procedimento simplificado, que permite a análise apenas para o nível mínimo de desempenho, e o procedimento de simulação computacional, que possibilita a avaliação da unidade habitacional para os níveis mínimo, intermediário e superior. O procedimento de simulação da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a) é utilizado pela INI-R para a avaliação e classificação da eficiência energética da envoltória (PBE Edifica, 2022).

De acordo com Soares et al. (2021), o procedimento de simulação computacional se mostrou mais efetivo em comparação com o procedimento simplificado, pois permite uma análise mais completa da situação térmica da unidade habitacional com dados mais confiáveis. Gerola (2023) afirma que, para edificações com melhores desempenhos térmicos, o procedimento de simulação deve fazer parte do processo de elaboração de projetos de arquitetura e implementação de programas habitacionais.

A NBR 15575-1 (ABNT, 2024a) apresenta critérios importantes para a avaliação de uma unidade habitacional, como temperaturas operativas máxima e mínima, redução de carga térmica total e o percentual de horas dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT). Oliveira e Ghisi (2023) ressaltam a necessidade de analisar esses parâmetros antes de projetar uma residência contêiner, especialmente em climas quentes. Na sua análise, aferiu-se que os critérios obtidos por meio do método de simulação com ventilação natural da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a), principalmente para a sala, não foram atendidos.

Destaca-se também que, mesmo que a norma se apresente adequada para a avaliação de uma unidade habitacional, Machado et al. (2022) pontuam melhorias a serem incluídas, como parâmetros de projeções climáticas futuras a fim de adequar as edificações às alterações climáticas. Essas projeções de desempenho térmico garantiriam que a edificação esteja adequada para sua utilização durante todo o período de vida útil.

2.5. *EnergyPlus* e simulação computacional

A otimização de projetos com base em simulações desempenha papel fundamental na busca por melhorias nas edificações. Essa relevância decorre do fato de que a otimização de projetos é uma técnica multidisciplinar que engloba diversas áreas do conhecimento, como matemática, engenharia, ciência ambiental, economia, entre outras (Nguyen; Reiter; Rigo, 2014).

Segundo Nguyen, Reiter e Rigo (2014), entre os vinte principais programas de simulação de edifícios utilizados em estudos de otimização, dois se destacam: o *EnergyPlus* e o *TRNSYS*. De acordo com Al Mindeel, Spentzou e Eftekhari (2024), 38% dos estudos que preveem o desempenho do edifício usam programas computacionais usuais, como *EnergyPlus*, *TRNSYS*, *eQUEST* e *IDA ICE*.

O *EnergyPlus* e o *BLAST* adotam um balanço energético que tem o potencial de ser o método mais preciso para calcular as cargas de aquecimento e resfriamento em um edifício. Essa abordagem leva em consideração os fluxos de energia em sua forma mais básica e fundamental (Wang; Zhai, 2016). O *EnergyPlus* se distingue por seu *status* de pesquisa, fornecimento de modelos genéricos e compatibilidade perfeita com interfaces de terceiros (Al Mindeel; Spentzou; Eftekhari, 2024).

A simulação de edificações abrange todos os componentes, como a envoltória do edifício e o sistema de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (AVAC). De acordo com Wang e Zhai (2016), essa simulação detalhada utiliza modelos matemáticos para cada componente do edifício. No entanto, a análise transiente do fluxo de calor na envoltória do edifício aumenta a complexidade e o custo computacional dos processos térmicos dinâmicos do edifício. Apesar disso, o esforço em desenvolver métodos aprimorados para realizar o cálculo transiente do fluxo de calor resulta em um progresso significativo na simulação energética de edifícios.

Além disso, estudos com técnicas de co-simulação para modelagens mais abrangentes utilizam a combinação entre dois ou mais programas, como *MATLAB* e *EnergyPlus*. Essa abordagem demonstra a integração estratégica de diversas ferramentas de simulação, ampliando a capacidade de análise e precisão dos resultados (Al Mindeel; Spentzou; Eftekhari, 2024).

Wang e Zhai (2016) também destacam que foram desenvolvidos módulos e interfaces para programas de simulação computacional, facilitando o uso desses programas de simulação energética. Alguns exemplos de módulos utilizados são o

Open Studio, DesignBuilder, Autodesk Ecotect e ClimateStudio (Al Mindeel; Spentzou; Eftekhari, 2024; Wang; Zhai, 2016).

O cálculo da demanda energética e da carga instalada na edificação utiliza alguns métodos, como o método de função de transferência de calor por condução, o método de função de resposta térmica, método de séries temporais radiante e modelos de parâmetro concentrados. O *EnergyPlus* permite a implementação de ferramentas de análise paramétrica adequadas, o que auxilia em análises de várias variáveis, como espessura do isolamento ou eficiência de sistemas AVAC, para avaliar os impactos da otimização. Embora a abordagem paramétrica seja direta, ela possui limitações de flexibilidade e requer objetos auxiliares. Portanto, para medidas mais complexas, essa ferramenta pode não ser apropriada (EnergyPlus, 2023).

2.6. Balanço térmico de edificações

A aplicação do método de balanço térmico por meio do programa *EnergyPlus* possibilita a compreensão do ganho e da perda de calor pelos elementos opacos. Esse processo considera os ganhos internos de iluminação, equipamentos, pessoas, infiltração e o sistema de ar-condicionado. Assim, o método de balanço térmico utilizando o programa *EnergyPlus* auxilia na obtenção de resultados mais precisos e na maior rapidez na análise dos parâmetros referentes às edificações (Melo; Lamberts, 2009). Este método permite avaliar a influência dos componentes do edifício na carga de aquecimento e resfriamento (Melo et al., 2015).

Estudos que utilizam o balanço térmico para climas quentes têm sido realizados a fim de determinar quais componentes construtivos são mais relevantes no ganho e na perda de calor. De acordo com Pinto e Westphal (2021), mesmo com melhorias nas unidades de vidro isoladas, em Boa Vista, uma cidade tropical com alta radiação solar, há a tendência de manter as mesmas características térmicas tanto em uma semana típica de verão quanto em uma de inverno, independentemente das orientações solares. Além disso, o balanço térmico apresentou somente ganho de calor tanto no verão quanto no inverno.

Na análise feita por Natanian (2023) em climas quentes e úmidos, o balanço termoenergético foi usado como um indicador para a otimização de edificações, auxiliando na seleção dos resultados de melhor desempenho para uma análise paramétrica dos indicadores de desempenho. A utilização do balanço térmico em

fases analíticas permite que os projetistas explorem manualmente o espaço de projeto em busca de melhores soluções.

Otimizações em fachadas residenciais em clima quente e úmido têm sido realizadas para promover edifícios de alto desempenho. O uso do balanço térmico com otimizações multiobjetivos oferece suporte na resolução de problemas conflitantes, pois a relação entre objetivos conflitantes pode ser analisada minuciosamente, permitindo a determinação da melhor solução (Salam; Lannon, 2023). Salam e Lannon (2023) afirmam que realizar um balanço térmico tanto para os climas presentes quanto futuros é necessário, principalmente para o desempenho termoenergético, pois o resfriamento e o ganho solar são considerados os parâmetros mais importantes.

2.7. Síntese da revisão de literatura

A arquitetura com contêineres tem sido explorada de diversas formas devido às suas características construtivas, que incluem a rápida velocidade de construção, o fácil acesso econômico e a ampla gama de modelos de módulos náuticos. Esses fatores são os principais motivos para sua popularidade. Esse método construtivo representa uma abordagem inovadora e versátil na indústria da construção, cuja origem remonta a 1956. Desde então, essas estruturas encontraram uma variedade de aplicações, desde habitações temporárias em situações pós-desastre até escritórios, espaços comerciais e residências, especialmente na Europa, onde sua leveza e praticidade são valorizadas. Contudo, muitas vezes são associadas a residências precárias e/ou de baixa qualidade, principalmente quando se reutilizam módulos deteriorados ou que carecem de isolamento térmico adequado, deixando os usuários em situações termicamente insalubres.

A utilização de contêineres pode ocorrer de maneiras variadas, adaptando-se a diferentes finalidades, climas e regiões. Além disso, a reutilização de contêineres descartados possui um apelo ambiental e social, ao abordar problemas habitacionais e ambientais. No entanto, adotar contêineres apenas pela estética ou modismos, sem considerar as necessidades operacionais ao longo de sua vida útil, é supérfluo e passageiro. Para verificar a viabilidade desse modelo em países tropicais, como o Brasil, é necessário realizar estudos em diferentes climas, especialmente em climas quentes, onde o uso desse método pode apresentar desafios.

As vantagens da arquitetura com contêineres são mais aplicáveis a regiões amenas e secas, sendo quase sempre utilizadas como formas de construção rápida e de baixo custo. Os desafios podem variar conforme a seleção e adaptação do módulo, que pode apresentar patologias significativas, como corrosão, pontes térmicas, baixa estanqueidade e isolamento térmico inadequado.

Os avanços atuais na engenharia têm possibilitado a construção com contêineres em diferentes climas, mesmo em áreas com alta umidade relativa e temperatura do ar. A região onde o edifício será construído influenciará diretamente na tipologia e nas características da edificação. Informações sobre o tipo de solo, disponibilidade de contêineres e materiais isolantes podem contribuir para uma adaptação mais eficiente da arquitetura com contêineres, especialmente em regiões sem portos. Em locais onde não há disponibilidade e fácil acesso aos contêineres, a construção com estruturas de contêiner pode não ser apropriada.

Exemplos de edificações com contêineres, principalmente como formas de expressão artística na arquitetura, têm sido encontrados ao redor do mundo. Contudo, a implementação bem-sucedida desse tipo de projeto requer um planejamento detalhado da tipologia climática para lidar com a transferência de calor pela envoltória. O custo de construção dessas estruturas também deve ser avaliado de forma criteriosa, a fim de garantir uma relação custo-benefício adequada. O desafio de adaptar os módulos ao clima pode ser superado por meio de um projeto estratégico, avaliando a viabilidade desse tipo construtivo para o local desejado.

Ao abordar os desafios relacionados ao clima, é possível explorar a eficiência térmica e energética desse modelo construtivo. Contêineres marítimos, em geral, são construídos com aço *corten*, um material que apresenta baixa resistência térmica. Essa característica se traduz em temperaturas interiores elevadas durante o dia e mais baixas durante a noite. Como resultado, a necessidade de consumo de energia elétrica para resfriamento e aquecimento é amplificada devido à menor constância na manutenção da temperatura interna do edifício.

A transferência de calor ocorre principalmente entre as superfícies externas do edifício e o solo. Ao aumentar a transmitância térmica da envoltória, a temperatura média interna se aproxima da temperatura média externa, resultando em maior amplitude térmica. O uso específico da edificação pode influenciar na carga térmica interna. Edifícios com baixa carga térmica interna são mais vantajosos para climas

quentes, o que pode ser um ponto de destaque para muitas cidades brasileiras. No entanto, a edificação deve ser eficaz tanto em climas quentes quanto frios para garantir sua funcionalidade e conforto ao longo do ano.

Os fatores da envoltória mais relevantes para edificações feitas com contêineres são os isolamentos inseridos nas paredes externas, cobertura e piso, a absorvância das paredes externas e da cobertura, e as estratégias de sombreamento. As paredes externas e a cobertura estão expostas à radiação solar direta e difusa, sendo que esses elementos construtivos recebem calor tanto por convecção quanto por radiação, e, se estiverem em contato com outra superfície, por condução. Como a temperatura superficial do solo é sensível às condições climáticas e tende a se aproximar da temperatura média do ar externo, a inserção de isolamento térmico no piso é essencial para reduzir as variações de temperatura interna. A condutividade térmica do solo é influenciada pela presença de umidade; portanto, quanto maior o teor de água no solo, maior será sua condutividade térmica.

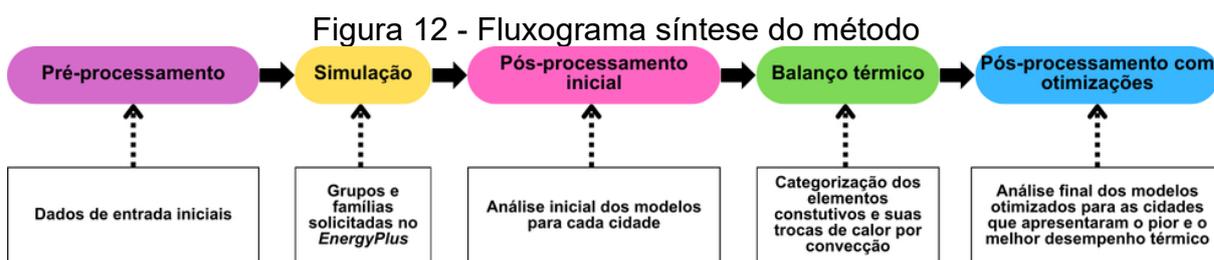
A indústria da construção civil, devido ao seu significativo impacto ambiental, deve adotar medidas para reduzir as suas ações na natureza. Edificações feitas com contêineres apresentam menos impactos relacionados à energia embutida na estrutura, pois reutilizam materiais descartados, reduzindo a necessidade de extrair minérios de jazidas e fabricar materiais tradicionais. No entanto, esse método pode resultar em alto impacto operacional, especialmente ao longo da vida útil da edificação. Assim, apesar de não demandarem as mesmas quantidades de materiais com alto consumo energético, as edificações com contêineres frequentemente resultam em consumo energético total superior, contribuindo para um balanço energético negativo.

A revisão da literatura abrangeu áreas caracterizadas por climas tanto quentes quanto frios. No entanto, a ausência de estudos direcionados aos climas brasileiros, especialmente os quentes, utilizando este método construtivo como residência, destaca uma lacuna significativa que merece atenção para uma melhor compreensão das técnicas construtivas. A utilização de residências contêineres tem se expandido no Brasil devido às suas vantagens. Essa expansão deve ser acompanhada por um desempenho térmico e energético adequado às diversas regiões e climas brasileiros.

Embora o tema esteja se tornando mais frequente, a pesquisa acadêmica ainda carece de estudos aprofundados. No contexto brasileiro, embora haja alguma abordagem desse tema, não há quantidade abundante de estudos, com apenas alguns relatos sobre o desempenho térmico, sem uma análise detalhada das técnicas adotadas e das melhorias propostas com base na análise da edificação (Milaneze et al., 2012; Carbonari, 2015; Maillard, 2017; Alves; Ferreira; Cavalcante, 2019; Vieira, 2019; Caldas; Abreu-Harbich; Hora, 2020; Justino et al., 2021; Bertoli; Ribeiro, 2022; Oliveira; Ghisi, 2023). A revisão da literatura destaca a existência de diversas lacunas que requerem investigação adicional quanto às edificações com contêineres.

3. Método

O método utilizado neste trabalho está ilustrado nas Figuras 12 e 13, seguindo uma ordem dividida em cinco macro etapas: pré-processamento, simulação, pós-processamento inicial, balanço térmico e pós-processamento com otimizações. As cinco macro etapas estão apresentadas na Figura 12. A Figura 13 apresenta todas as informações utilizadas para a realização de cada macro etapa.

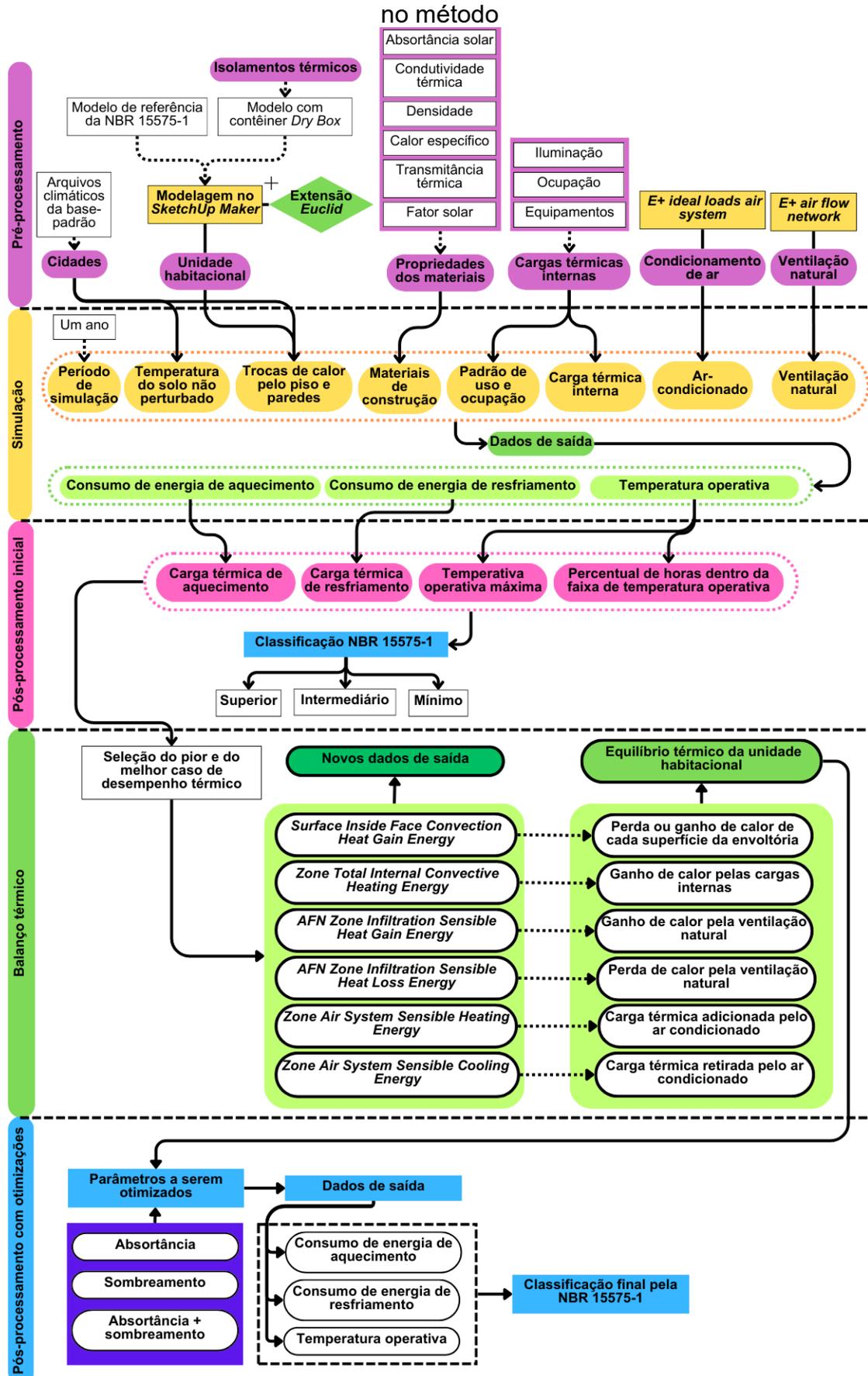


No pré-processamento, foram definidos os parâmetros iniciais, incluindo as cidades simuladas, a unidade habitacional, as propriedades dos materiais, as cargas térmicas internas, a configuração do sistema de aquecimento e resfriamento, assim como a ventilação natural. A Figura 13 apresenta quais informações foram coletadas para cada parâmetro e em quais dados de entrada foram inseridos na etapa de simulação.

A etapa de simulação seguiu o procedimento estabelecido na NBR 15575-1 (ABNT, 2024a), que compreende a simulação dos modelos habitacionais com e sem o uso da ventilação natural. O programa *EnergyPlus* (versão 23.2.0) foi utilizado para processar os dados de entrada e gerar os dados de saída específicos para cada modelo habitacional nas cidades selecionadas.

Na etapa de pós-processamento inicial, os resultados foram analisados e classificados de acordo com os critérios da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a). Essa análise possibilitou a identificação das diferenças resultantes da utilização dos materiais isolantes em edificações térreas de contêiner nas cidades selecionadas.

Figura 13 – Parâmetros, índices e variáveis detalhadas das macro etapas utilizadas



Depois da análise inicial, foi realizado o balanço térmico da unidade habitacional para identificar quais componentes construtivos impactavam nas trocas de calor com o ar nas localidades que apresentaram o pior e o melhor desempenho térmico. Dessa forma, foi possível avaliar quais componentes estão sujeitos a apresentar melhorias significativas com otimizações.

Por fim, uma otimização foi aplicada à envoltória para aferir as diferenças entre os indicadores de desempenho. Para a otimização, seguiu-se a Cartilha de Casos Otimizados (LABEEE; SNH; MDR, 2022) a fim de estabelecer quais diretrizes construtivas e geométricas poderiam ser adotadas. De acordo com este documento, as adaptações aplicáveis são: a utilização de absorvências menores que 0,40 e a instalação de venezianas nos ambientes de permanência prolongada (APPs).

3.1. Pré-processamento

O programa *EnergyPlus* integra as variáveis de entrada para o cálculo da energia de aquecimento e resfriamento. Dessa forma, na fase de pré-processamento, foram consideradas as informações necessárias para realizar as simulações, que incluem a unidade habitacional analisada, a caracterização das cidades selecionadas, as propriedades dos materiais e dos elementos construtivos, além das características do solo e a definição do sistema de condicionamento de ar e das cargas térmicas internas.

3.1.1. Unidade habitacional

A classificação foi realizada em uma residência unifamiliar térrea com área útil de 43 m². Esta unidade habitacional é uma adaptação do projeto padrão de habitação de interesse social (HIS), utilizado pela Caixa Econômica Federal em programas sociais do governo no Espírito Santo (Caixa Econômica Federal, 2007). Este projeto foi escolhido devido às características geométricas favoráveis à adaptação. A unidade, por ser uma adaptação, apresenta geometria retangular mais acentuada e possui dois dormitórios, um banheiro e uma sala com uma cozinha integrada.

Para adaptar a residência, foi realizada uma combinação com três contêineres *dry cargo* HC de 20 pés, devido à altura interna ser maior em comparação com os outros tipos de contêineres. Dessa forma, foi possível readequar as áreas dos

cômodos para a disposição dos módulos. Essa mudança visou a utilização dos módulos sem a necessidade de realizar cortes e soldas extras.

As coberturas dos modelos que foram simulados são diferentes. A cobertura do modelo de referência está de acordo com o disposto para o modelo de referência na NBR 15575-1 (ABNT, 2024a), enquanto a do modelo com o contêiner tipo *dry cargo* HC de 20 pés consiste no próprio contêiner com isolamento térmico e acabamento interno. A geometria da cobertura permaneceu a mesma.

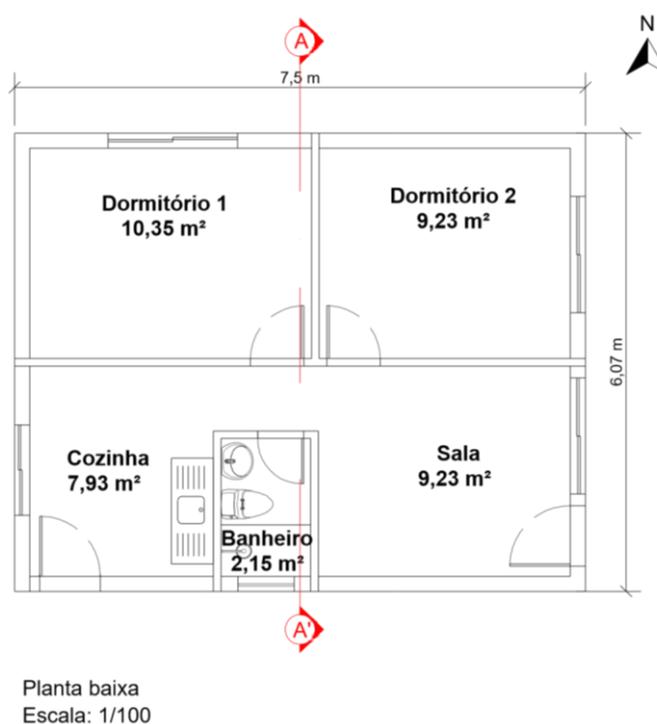
A planta baixa da unidade habitacional foi utilizada tanto para o modelo de referência quanto o com contêineres. A orientação solar foi mantida fixa, de modo que a sala tenha suas paredes externas voltadas para as direções sul e leste. Essa decisão foi tomada devido aos padrões de uso diurno predominantes na sala, enquanto os dormitórios são utilizados principalmente durante a noite. Assim, a residência possui seu maior comprimento voltado para as direções norte e sul, com a parede com a janela do dormitório 1 orientada para o norte, e as paredes da sala e do dormitório 2 com as janelas orientadas para o sul. A Figura 14 apresenta a planta baixa da unidade habitacional analisada com a orientação solar adotada. Essa unidade foi utilizada em todas as simulações realizadas. Destaca-se que não foram consideradas edificações no entorno, garantindo que os resultados obtidos reflitam exclusivamente as características térmicas da residência sem sombreamentos indiretos.

Os dormitórios 1 e 2 foram dimensionados com 10,35 m² e 9,23 m², respectivamente, enquanto o banheiro possui 2,15 m², a sala 9,23 m² e a cozinha 7,93 m². Todas as simulações foram realizadas considerando a unidade habitacional como um todo, porém, a análise foi focada na sala e nos dormitórios, que são considerados ambientes de permanência prolongada (APPs), de acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2024a). Além disso, como não há elementos de sombreamento externos fixos na fachada nos modelos sem otimizações, não foram considerados sombreamentos nas janelas e fachadas.

Para se adaptar aos critérios da norma, as janelas foram redimensionadas em relação ao projeto padrão da Caixa Econômica Federal (Caixa Econômica Federal, 2007) de acordo com os requisitos para os elementos transparentes, que devem corresponder a 17% da área dos APPs. Os dormitórios 1 e 2 foram projetados com 1,76 m² e 1,57 m² de área transparente, respectivamente, enquanto a sala possui uma

abertura de 1,57 m² e a cozinha 1,35 m². O banheiro possui a mesma área de elemento transparente que o projeto padrão da Caixa Econômica Federal (Caixa Econômica Federal, 2007). Além disso, as aberturas têm um fator de ventilação de 45% e o percentual de abertura para ventilação das esquadrias é de 7,56%. Os perfis das esquadrias foram adicionados aos modelos de simulação de acordo com as especificações da norma, assim como as propriedades térmicas dos perfis e vidros (ABNT, 2024a).

Figura 14 - Planta baixa da unidade habitacional



A única alteração entre os modelos analisados é relacionada aos materiais utilizados na envoltória. Com isso, foi avaliada a eficácia do uso de contêineres, e também foi investigado se a utilização de diferentes tipos de materiais resultaria em uma classificação superior da envoltória. As Figuras 15 e 16 apresentam cortes esquemáticos das edificações, demonstrando os materiais utilizados na envoltória em cada modelo. A Figura 15, que representa a residência de referência, detalha os materiais utilizados nas paredes, cobertura e piso. Enquanto a Figura 16, contempla o modelo com container *dry box HC 20* pés, respectivamente, demonstrando as diferenças de materiais utilizados na envoltória entre os modelos. Destaca-se que,

para realizar a modelagem da unidade habitacional, usou-se o programa *SketchUp Maker 2017* (versão 19.2.222) com a extensão *Euclid* (versão 0.9.4.4)

Figura 15 - Corte esquemático do modelo de referência da NBR 15575-1

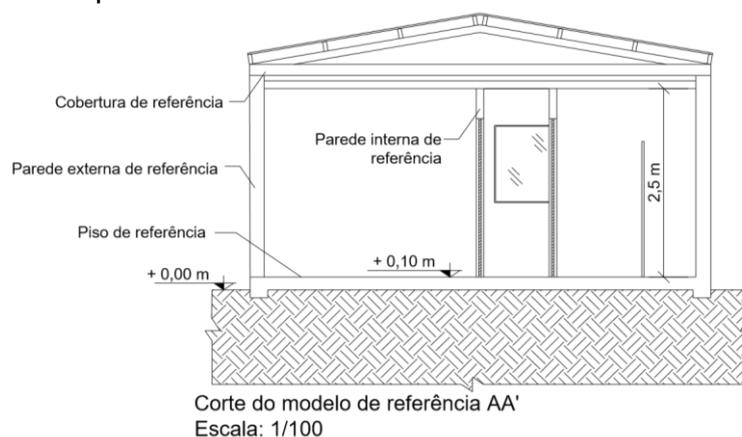
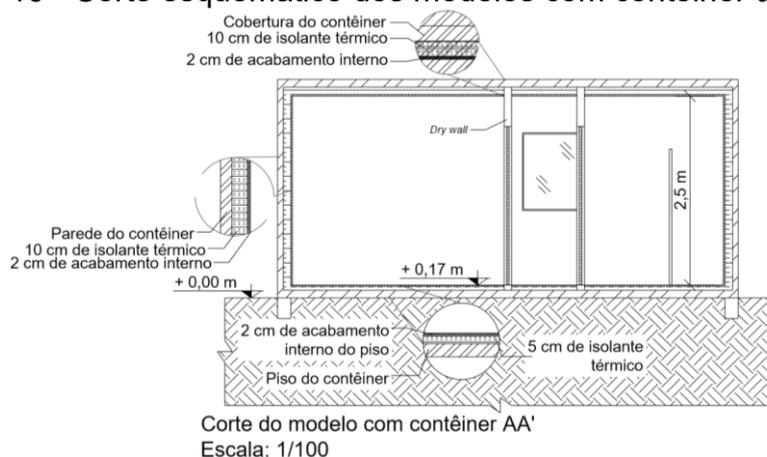


Figura 16 - Corte esquemático dos modelos com contêiner *dry cargo*



3.1.2. Cidades

A seleção das cidades para as simulações foi realizada considerando a disponibilidade de dados climáticos e abrangendo os diferentes climas tropicais e clima seco, de acordo com a classificação Köppen, no Brasil. Assim, conduziu-se uma análise para identificar as cidades com arquivos climáticos disponíveis. Para cada tipo de clima de Köppen, foram selecionados dois municípios, totalizando dez cidades. Os arquivos climáticos utilizados para a simulação são provenientes da base-padrão, descrita pela ABNT TR 15575 – 1 - 1: 2021 Versão Corrigida: 2021 (ABNT, 2021).

Para a definição dos indicadores de desempenho térmico, conforme o estipulado pela NBR 15575 - 1 (ABNT, 2024a), é necessário considerar a

caracterização climática, pois auxilia na determinação do intervalo de temperaturas externas em que as cidades se encontram em relação à faixa de temperatura operativa para cada cidade. A determinação do intervalo é realizada com base na média anual de temperatura externa de bulbo seco. Esse intervalo é uma categorização utilizada para identificar a faixa de temperatura externa média anual de bulbo seco, que está descrita na Tabela 16, conforme previsto na norma ABNT (ABNT, 2024a).

Os critérios usados para a seleção das cidades foram baseados na representatividade de diferentes tipos de climas segundo a classificação de Köppen e sua distribuição geográfica no Brasil. Cada tipo de clima tem duas cidades selecionadas para assegurar uma análise abrangente das características climáticas e suas implicações nas zonas bioclimáticas.

Na Tabela 2, estão listadas as cidades selecionadas, juntamente com seus respectivos climas Köppen, antigas zonas bioclimáticas, nova categorização de zoneamento bioclimático e intervalo de temperaturas externas, de acordo com a NBR 15220 - 3 (ABNT, 2005a), ABNT TR 15220 – 3 – 1 (ABNT, 2024b) e NBR 15575 – 1 (ABNT, 2024a). A Figura 17 apresenta a temperatura de bulbo seco e a umidade relativa do ar para cada cidade selecionada durante o ano.

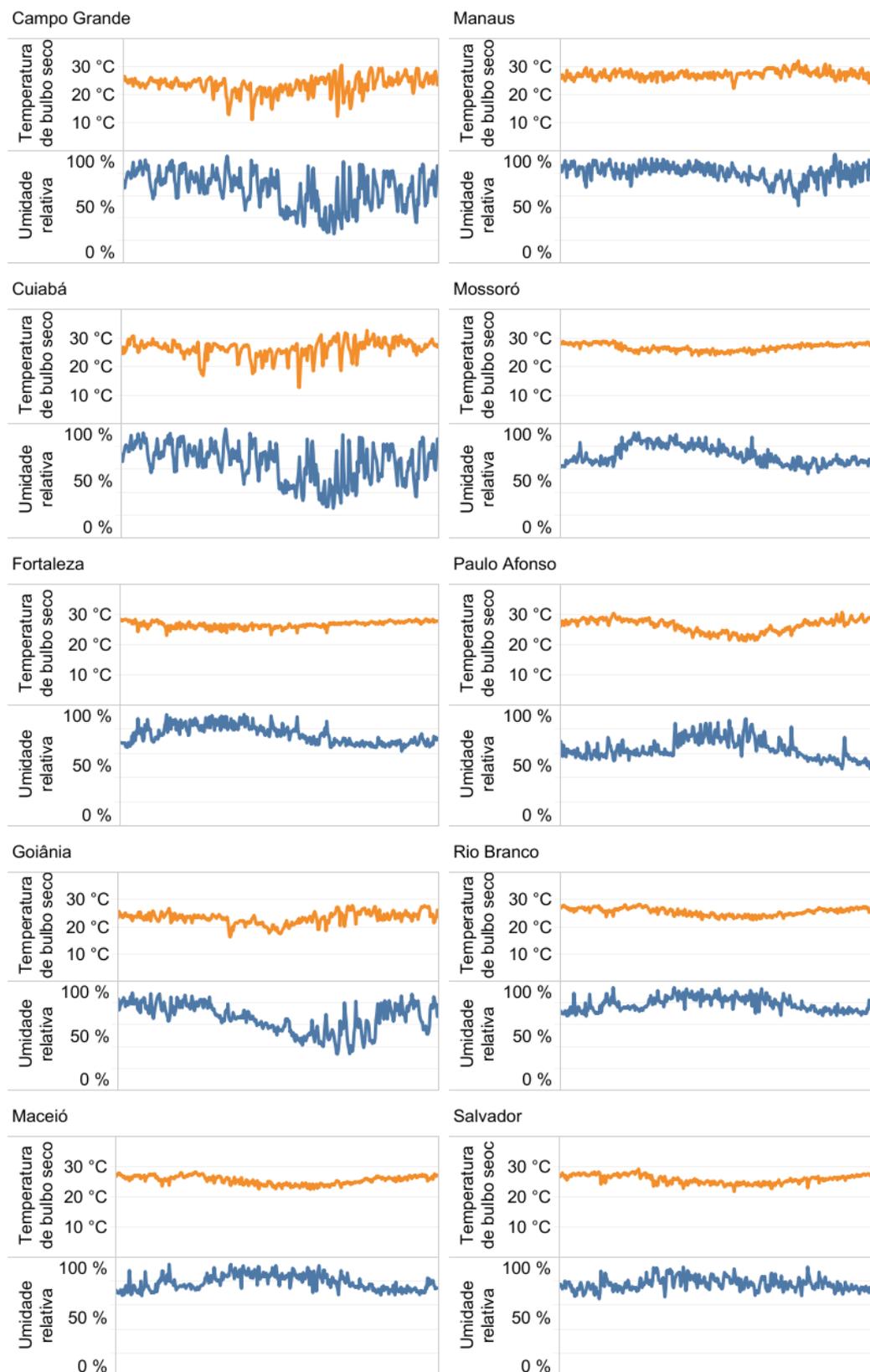
Tabela 2 - Caracterização climática das cidades selecionadas

Cidade	Clima Köppen	Antiga zona bioclimática	Nova zona bioclimática	Intervalo de temperaturas externas
Manaus	Af	8	6A	Intervalo 3 ($TBS_m \geq 27^\circ C$)
Fortaleza	As	8	6A	Intervalo 2 ($25^\circ C \leq TBS_m < 27^\circ C$)
Mossoró	Bsh	7	6A	Intervalo 2 ($25^\circ C \leq TBS_m < 27^\circ C$)
Paulo Afonso	Bsh	7	5B	Intervalo 2 ($25^\circ C \leq TBS_m < 27^\circ C$)
Maceió	Am	8	5A	Intervalo 2 ($25^\circ C \leq TBS_m < 27^\circ C$)
Rio Branco	Am	8	5A	Intervalo 2 ($25^\circ C \leq TBS_m < 27^\circ C$)
Salvador	Af	8	5A	Intervalo 2 ($25^\circ C \leq TBS_m < 27^\circ C$)
Cuiabá	Aw	7	5B	Intervalo 2 ($25^\circ C \leq TBS_m < 27^\circ C$)
Goiânia	Aw	6	4B	Intervalo 1 ($TBS_m < 25^\circ C$)
Campo Grande	As	6	4B	Intervalo 1 ($TBS_m < 25^\circ C$)

Legenda: TBS_m é a temperatura externa média anual de bulbo seco

Fonte: Alvares et al. (2013) e ABNT (2005a, 2024a, 2024b)

Figura 17 - Temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar anual da base-padrão de arquivos climáticos das cidades selecionadas



Fonte: ABNT (2021)

3.1.3. Materiais e componentes construtivos

Os materiais e componentes construtivos utilizados no estudo apresentam propriedades fundamentais que impactam na temperatura interna da residência e na energia necessária para aquecimento e resfriamento, como a condutividade térmica, espessura, densidade e calor específico. Destaca-se que o modelo de referência inclui uma camada de ar com resistência térmica de $0,21 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ entre a telha e a laje. Além disso, para as cidades localizadas na zona bioclimática 8, considerou-se o uso de isolamento com uma resistência térmica de $0,67 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$. Todas as informações térmicas dos materiais e componentes construtivos referentes ao modelo de referência foram obtidas pela NBR 15575-1 (ABNT, 2024a).

Ademais, o modelo de contêiner apresenta espessuras distintas entre paredes, cobertura e piso. Isso ocorre devido às características modulares dos contêineres. Portanto, as paredes do contêiner apresentam 7,5 cm de espessura, enquanto a cobertura e o piso possuem 10 cm. Para esse modelo, o acabamento interno foi definido como similar ao *drywall*, assim possui propriedades térmicas equivalentes ao gesso acartonado. Para a compartimentação interna, optou-se por paredes de *drywall*, sendo uma solução comum para compartimentação em construções contêineres por oferecer leveza e facilidade de instalação. Para o piso, considerou-se um acabamento interno de madeira compensada. A Tabela 3 apresenta as propriedades térmicas dos materiais utilizados no modelo com contêiner.

Tabela 3 - Propriedades térmicas dos materiais no modelo com contêiner

Material	Condutividade térmica (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)	Densidade (kg/m ³)	Espessura (mm)
Aço	55,00	460	7800	100 (piso e cobertura) 75 (paredes externas)
Gesso acartonado	0,35	1000	800	20
Madeira compensada	0,15	2300	650	20

Fonte: ABNT (2005b) e Carbonari (2015)

Os materiais isolantes que foram modificados para atender aos objetivos desse trabalho, estão apresentados na Tabela 4. A escolha da espessura de 10 cm para o isolamento das paredes externas e da cobertura foi baseada na prática comum em contêineres refrigerados utilizados para o transporte de cargas perecíveis (Alves; Ferreira; Cavalcante, 2019). Para o piso, optou-se por uma espessura de 5 cm de material isolante devido ao contato direto com o solo, ocasionando em maior

dissipação de calor. Além disso, essa escolha visa garantir um pé-direito de 2,50 m, mantendo a altura interna adequada e em conformidade com a subseção 16.1.1 da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a).

Tabela 4 – Propriedades dos materiais isolantes no modelo com contêiner

Materiais isolantes analisados	Condutividade térmica (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)	Densidade (kg/m³)
Lã de rocha	0,045	750	110,00
Lã de vidro	0,045	700	55,00
EPS	0,040	1420	25,00
Poliestireno extrudado	0,035	1420	32,50
Poliuretano	0,030	1670	35,00

Fonte: ABNT (2003)

Para determinar as propriedades dos componentes construtivos, utilizou-se as Equações 1 a 5 descritas pela NBR 15220-2 (ABNT, 2022). A resistência térmica de cada componente construtivo é definida pela resistência térmica superficial e pela transmitância térmica, conforme descrito na Equação 1. Para componentes construtivos que possuem camadas não homogêneas, a determinação da resistência térmica é realizada por meio da Equação 2.

$$R_{c,op} = \frac{1}{U} - R_{si} - R_{se} \quad (1)$$

Onde:

$R_{c,op}$ é a resistência térmica do componente ($m^2.K/W$);

R_{si} é a resistência térmica superficial interna ($m^2.K/W$);

R_{se} é a resistência térmica superficial externa ($m^2.K/W$);

U é a transmitância térmica ($W/m^2.K$).

$$R_{tot} = R_{si} + \sum R_n + R_{se} \quad (2)$$

Onde:

R_{tot} é a resistência total do componente construtivo ($m^2.K/W$);

R_{si} é a resistência térmica superficial interna ($m^2.K/W$);

R_n é a resistência térmica de cada material do componente construtivo ($m^2.K/W$);

R_{se} é a resistência térmica superficial externa ($W/m^2.K$).

A partir da Equação 2, pode-se determinar a transmitância térmica dos componentes construtivos por meio da Equação 3. A transmitância térmica é o inverso da resistência térmica.

$$U = \frac{1}{R_{\text{tot}}} \quad (3)$$

Onde:

U é a transmitância térmica do componente construtivo ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$);

R_{tot} é a resistência total do componente construtivo ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$).

Para determinar a capacidade térmica dos materiais construtivos, utilizou-se a Equação 4. A determinação da capacidade térmica total de um elemento construtivo não homogêneo é definida pela Equação 5.

$$C = e_i \times c_i \times \rho_i \quad (4)$$

Onde:

C é a capacidade térmica do material ($\text{kJ}/\text{m}^2\cdot\text{K}$);

e_i é a espessura do material (m);

c_i é o calor específico do material ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$);

ρ_i é a densidade do material (kg/m^3).

$$CT = \frac{\sum A_n}{\sum \frac{A_n}{C_n}} \quad (5)$$

Onde:

CT é a capacidade térmica total do componente construtivo ($\text{kJ}/\text{m}^2\cdot\text{K}$);

A_n é a área do material que compõe o componente construtivo (m^2);

C_n é a capacidade térmica do material que compõe o componente construtivo ($\text{kJ}/\text{m}^2\cdot\text{K}$).

Por meio dessas equações, é possível determinar as propriedades das paredes, cobertura e piso para os modelos com contêineres, conforme apresentado na Tabela 5. Essas informações destacam as diferenças entre as transmitâncias e capacidades térmicas adotadas em cada um dos elementos construtivos da edificação. As espessuras dos materiais isolantes e do acabamento térmico estão apresentadas na Figura 16 da subseção 3.1.1, enquanto a espessura da envoltória do contêiner e dos acabamentos estão na Tabela 3.

Tabela 5 - Propriedades dos componentes construtivos no modelo com contêiner

Elemento construtivo	Materiais isolantes analisados	Espessura de cada componente construtivo (cm)	Transmitância (W/m ² .K)	Capacidade térmica (kJ/m ² .K)
Paredes externas	Lã de rocha (10 cm)	19,5	0,411	16,01
	Lã de vidro (10 cm)	19,5	0,411	9,20
	EPS (10 cm)	19,5	0,369	31,78
	Poliestireno extrudado (10 cm)	19,5	0,326	10,60
	Poliuretano (10 cm)	19,5	0,282	12,64
Cobertura	Lã de rocha (10 cm)	22	0,413	16,09
	Lã de vidro (10 cm)	22	0,413	9,23
	EPS (10 cm)	22	0,371	32,10
	Poliestireno extrudado (10 cm)	22	0,327	10,64
	Poliuretano (10 cm)	22	0,283	12,69
Piso	Lã de rocha (5 cm)	17	0,383	13,22
	Lã de vidro (5 cm)	17	0,383	7,29
	EPS (5 cm)	17	0,364	29,17
	Poliestireno extrudado (5 cm)	17	0,342	8,47
	Poliuretano (5 cm)	17	0,316	10,22
Paredes internas	<i>Drywall</i>	10	0,530	32,00

Como os módulos de contêiner geralmente possuem pintura uniforme no seu envelope, considerou-se que o piso e a cobertura teriam as mesmas propriedades ópticas das paredes externas. A Tabela 6 apresenta as absorptâncias dos componentes construtivos nas unidades habitacionais analisadas. Destaca-se que a absorptância e a emissividade das paredes e da cobertura são iguais para todos os modelos sem otimizações.

Tabela 6 - Absortâncias e emissividades dos componentes construtivos no modelo com contêiner

Elemento construtivo	Emissividade de ondas longas	Absortância da radiação solar	Absortância da radiação de luz visível
Paredes externas	0,90	0,58	0,58
Cobertura	0,90	0,58	0,58
Piso	0,90	0,58	0,58
Paredes internas	0,90	0,50	0,50
Porta de madeira	0,90	0,50	0,50

Fonte: ABNT (2024a)

As propriedades térmicas para o modelo de referência estão apresentadas na Tabela 7, enquanto as propriedades da cobertura estão apresentadas na Tabela 8. Na Tabela 9, estão apresentadas as propriedades dos componentes construtivos calculadas para o modelo de referência.

Tabela 7 - Propriedades das paredes e do piso no modelo de referência

Elemento	Condutividade térmica (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)	Emissividade de ondas longas	Absortância da radiação solar	Densidade (kg/m³)	Espessura (cm)
Paredes externas	1,75	1000	0,90	0,58	2200	10
Paredes internas	1,75	1000	0,90	0,50	2200	10
Pisos	1,75	1000	0,90	0,50	2200	10

Fonte: ABNT (2024a)

Tabela 8 - Propriedades da cobertura no modelo de referência

Elemento	Condutividade térmica (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)	Emissividade de ondas longas	Absortância da radiação solar	Densidade (kg/m³)	Espessura (cm)
Telha	0,65	840	0,90	0,65	17000	0,6
Laje	1,75	1000	0,90	0,50	2200	10

Fonte: ABNT (2024a)

Tabela 9 - Propriedades dos componentes construtivos no modelo de referência

Elemento	Transmitância (W/m².K)	Capacidade térmica (kJ/m².K)
Paredes externas	4,40	240,0
Paredes internas	4,40	240,0
Pisos	4,40	240,0
Cobertura (Zona bioclimática 1 a 7)	2,42	252,8
Cobertura (Zona bioclimática 8)	0,92	255,0

Além do redimensionamento dos elementos transparentes e do percentual de abertura para ventilação, a NBR 15575-1 (ABNT, 2024a) determina as propriedades que devem ser aplicadas nas janelas. Essas propriedades englobam a utilização de vidro simples incolor como material transparente, assim como a descrição das

propriedades dos perfis das janelas. As Tabelas 10 e 11 apresentam as propriedades dos vidros e dos perfis das janelas, conforme a subseção 11.4.7.2 da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a). Essas propriedades das janelas foram utilizadas tanto nos modelos de referência quanto nos modelos com contêineres. Além disso, as áreas das janelas estão descritas na subseção 3.1.1 e são iguais em ambos os modelos.

Tabela 10 – Propriedades do vidro das janelas

Material	Condutividade (W/m.K)	Transmitância (W/m ² .K)	Fator solar	Percentual de abertura para ventilação (%)
Vidro simples incolor	0,90	5,70	0,87	7,65

Fonte: ABNT (2024a)

Tabela 11 – Propriedades do vidro das janelas

Absortância à radiação solar dos perfis	Emissividade de onda longa dos perfis	Condutividade térmica (W/m ² .K)	Largura dos perfis da esquadria (mm)
0,58	0,90	56	50

Fonte: ABNT (2024a)

3.1.4. Propriedades do solo

Neste estudo, os valores de densidade, calor específico e condutividade térmica do solo foram mantidos constantes para todas as cidades nas análises realizadas. Essa padronização foi necessária devido à inviabilidade de obter informações específicas sobre as propriedades do solo para cada localidade. No entanto, é importante reconhecer que essa padronização pode afetar a precisão dos resultados, pois as propriedades do solo variam significativamente de acordo com a sua composição e localização geográfica. Essa variação pode influenciar a transferência de calor entre o piso da edificação e o solo, impactando o desempenho térmico da construção.

Para o cálculo da transferência de calor entre o piso e o solo no programa *EnergyPlus*, são necessários parâmetros específicos sobre as propriedades do solo, incluindo temperatura superficial, condutividade térmica, calor específico e densidade. Para a obtenção dos dados referentes à temperatura superficial do solo, foram utilizadas as informações da base-padrão dos arquivos climáticos de cada cidade. Optou-se por simular o comportamento de um solo argiloso seco, considerando a disponibilidade pela norma NBR 15220-2:2005 Versão Corrigida:2008, que está cancelada (ABNT, 2005b). Os valores adotados para as propriedades do solo argiloso seco estão apresentados na Tabela 12.

Destaca-se que as propriedades térmicas do solo, detalhadas na Tabela 12, foram utilizadas em todos os modelos. Essas propriedades não foram alteradas nos modelos a fim de observar somente as alterações provenientes da envoltória; portanto, o solo foi padronizado em todos os modelos.

Tabela 12 - Propriedades térmicas do solo argiloso seco

Solo	Condutividade térmica (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)	Densidade (kg/m ³)
Argiloso seco	0,52	840	1700

Fonte: ABNT (2005b)

3.1.5. Condicionamento de ar e ventilação natural

O controle da temperatura interna depende diretamente da ventilação natural dos ambientes. Quando a temperatura interna excede ou fica abaixo dos limites desejados, o sistema de condicionamento de ar é acionado para regular a temperatura. Os critérios para a aplicação desse modelo, com e sem o uso da ventilação natural, estão detalhados na seção 11 da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a).

A ventilação natural é utilizada nos ambientes quando estão ocupados. A abertura e o fechamento das janelas dependem da diferença de temperatura entre o ar interno e externo. As janelas abrem apenas quando o ambiente de permanência prolongada está ocupado e de acordo com dois critérios de temperatura: quando a temperatura de bulbo seco interna é igual ou superior a 19°C e quando a temperatura de bulbo seco interna é superior à externa, conforme a subseção 11.4.7.4 da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a). Além disso, durante a ventilação natural, as portas internas são consideradas abertas, exceto a porta do banheiro que permanece fechada, assim como as portas externas.

O modelo com condicionamento de ar também opera durante o período de ocupação dos APPs, conforme ilustrado na Figura 18, onde “1” indica ocupação e “0” indica desocupação. Nesse modelo, o programa *EnergyPlus* calcula a carga térmica ideal para resfriamento e aquecimento de cada APP, resultando na carga térmica total para toda a unidade habitacional. Apenas as temperaturas de *setpoint* para resfriamento (23°C) e aquecimento (21°C) são consideradas, conforme a subseção 11.4.7.4 da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a). No entanto, é importante discutir a adequação desses *setpoints*. A escolha das temperaturas de 23°C para resfriamento e 21°C para aquecimento pode não refletir a realidade das preferências e comportamentos dos usuários. Normalmente, as pessoas podem ligar o ar-

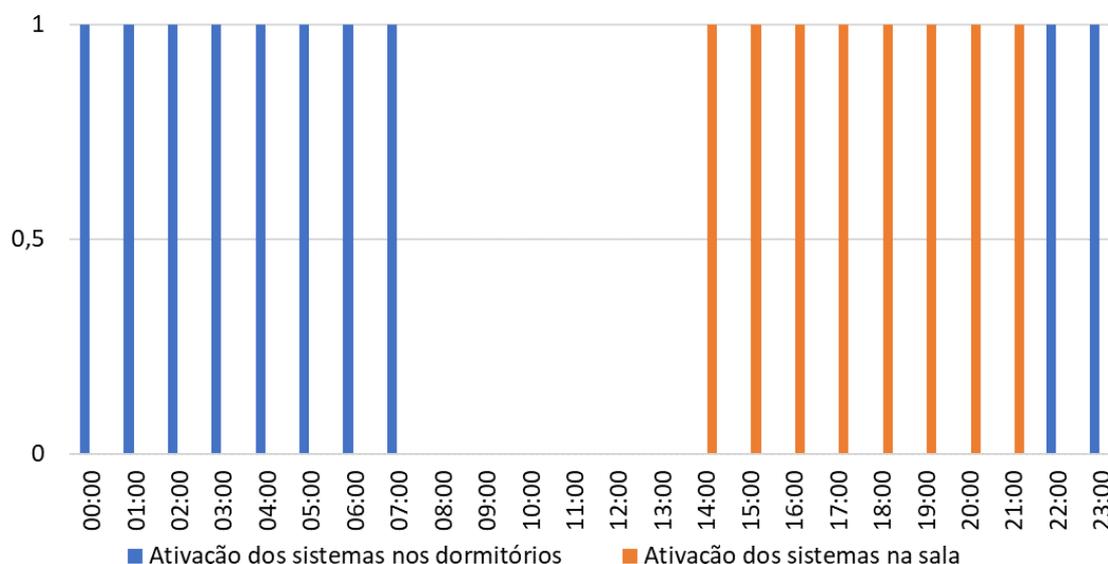
condicionado quando a temperatura ambiente está acima de 23°C, mas muitos preferem temperaturas mais elevadas, como 24°C ou 25°C, antes de ligar o ar-condicionado. Da mesma forma, a maioria das pessoas pode acionar o aquecimento quando a temperatura ambiente está em torno de 20°C ou até mais baixa, como 18°C ou 19°C, dependendo da temperatura desejada. Assim, é crucial analisar criticamente essas temperaturas e considerar diferentes comportamentos de usuários que melhor reflitam as necessidades dos ocupantes e a eficiência energética dos sistemas.

As portas e janelas permanecem fechadas durante a operação do sistema de condicionamento de ar. Destaca-se que o modelo com condicionamento de ar deve ser considerado ideal, ou seja, que opere sem perdas de energia na retirada de calor do APP.

Ao contrário do modelo com ventilação natural, que utiliza a ventilação natural para auxiliar na regulação da temperatura interna, o modelo sem ventilação natural depende exclusivamente do sistema de condicionamento de ar para manter as temperaturas de *setpoint* desejadas. A Figura 18 apresenta o acionamento dos sistemas de ventilação e condicionamento de ar nos APPs da unidade habitacional, de acordo com a NBR 15575-1, onde "1" significa que os sistemas estão ativados e "0" desativados.

Assim, todos os modelos foram simulados duas vezes: uma simulação considerando somente a ventilação natural e outra considerando somente o condicionamento de ar. Como o acionamento dos sistemas só ocorre quando há pessoas no APP, a Figura 18 detalha qual ambiente será ventilado naturalmente ou terá condicionamento de ar de acordo com as horas do dia.

Figura 18 – Período de acionamento dos sistemas de ventilação e condicionamento de ar nos APPs



Fonte: ABNT (2024a)

3.1.6. Cargas térmicas internas

As cargas térmicas internas representam um fator crucial na determinação da quantidade de calor gerada em cada APP da residência. Elas são influenciadas principalmente pela ocupação, iluminação e equipamentos elétricos. As Figuras 19 a 21 mostram os períodos diários de ocupação de pessoas, uso do sistema de iluminação e uso dos equipamentos em cada ambiente, respectivamente. O valor "1" indica ocupação total, "0" indica ambiente desocupado, e valores intermediários representam ocupação parcial. De acordo com a subseção 11.4.7.3 da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a), deve-se considerar dois ocupantes por dormitório existente na edificação. Assim, a ocupação da sala é determinada em função do número de dormitórios, com o limite máximo de quatro ocupantes. Como a unidade habitacional possui dois dormitórios, considerou-se que há quatro ocupantes.

É importante ressaltar que, no caso dos dormitórios, considerou-se "1" para a ocupação de dois ocupantes, enquanto a quantidade de ocupantes da sala foi determinada em função do número de dormitórios, de forma que "1" para a sala considera-se quatro ocupantes, "0,5" dois ocupantes e "0" desocupada, conforme a norma (ABNT, 2024a).

A taxa metabólica e a fração radiante para os usuários estão apresentadas na Tabela 13, enquanto a densidade de potência instalada, a fração radiante e visível

para iluminação, e a densidade de cargas internas e fração radiante para os equipamentos estão descritas nas Tabelas 14 e 15, respectivamente (ABNT, 2024a). Quando o sistema de iluminação e equipamentos estiverem acionados, o programa *EnergyPlus* utilizará toda a potência instalada definida.

Tabela 13 – Taxa metabólica e fração radiante para os usuários

Ambiente	Calor produzido por área superficial corporal (W/m ²)	Calor produzido por uma pessoa com 1,80 m ² de área de superfície corporal (W)	Fração radiante
Dormitório	45	81	0,30
Sala	60	108	0,30

Fonte: ABNT (2024a)

Tabela 14 – Densidade de potência instalada, fração radiante e fração visível para o sistema de iluminação

Ambiente	Densidade de potência instalada (W/m ²)	Fração radiante	Fração visível
Dormitório	5,00	0,32	0,23
Sala	5,00	0,32	0,23

Fonte: ABNT (2024a)

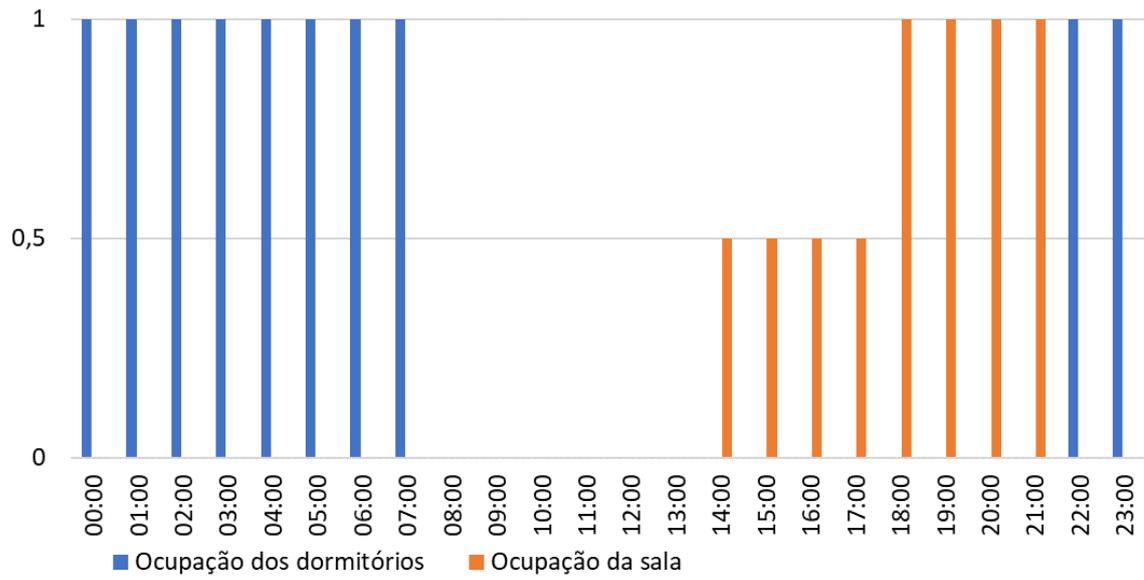
Tabela 15 – Densidade de cargas internas e fração radiante os equipamentos

Ambiente	Potência(W)	Fração radiante
Sala	120,00	0,30

Fonte: ABNT (2024a)

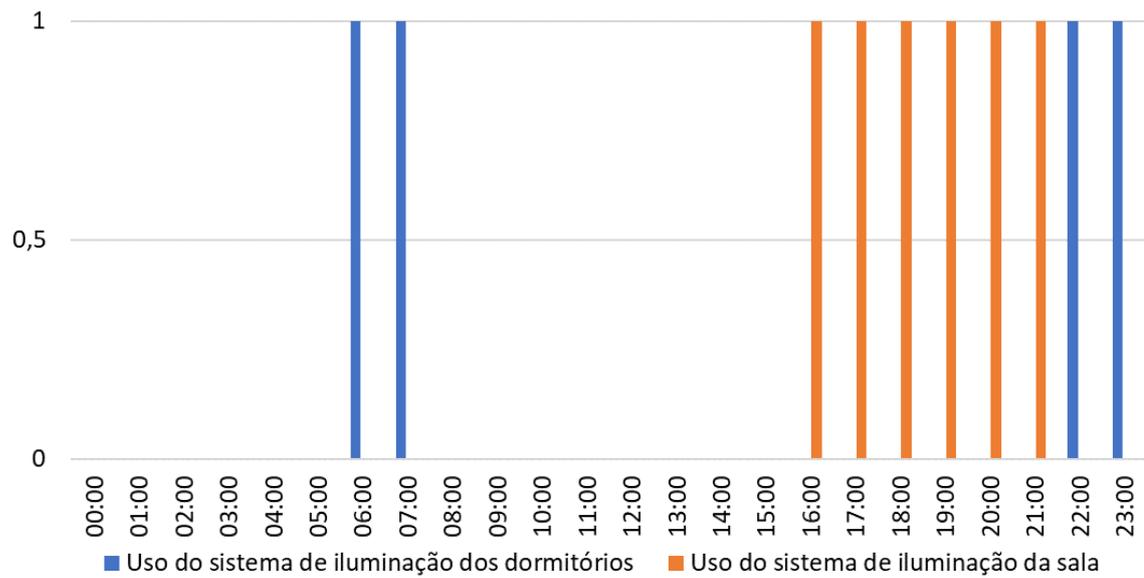
A Figura 19 apresenta o padrão de ocupação dos APPs. A Figura 20 apresenta o padrão de uso da iluminação dos APPs ao longo do dia, enquanto a Figura 21 mostra o padrão de uso dos equipamentos dos APPs.

Figura 19 - Padrão de ocupação dos APPs

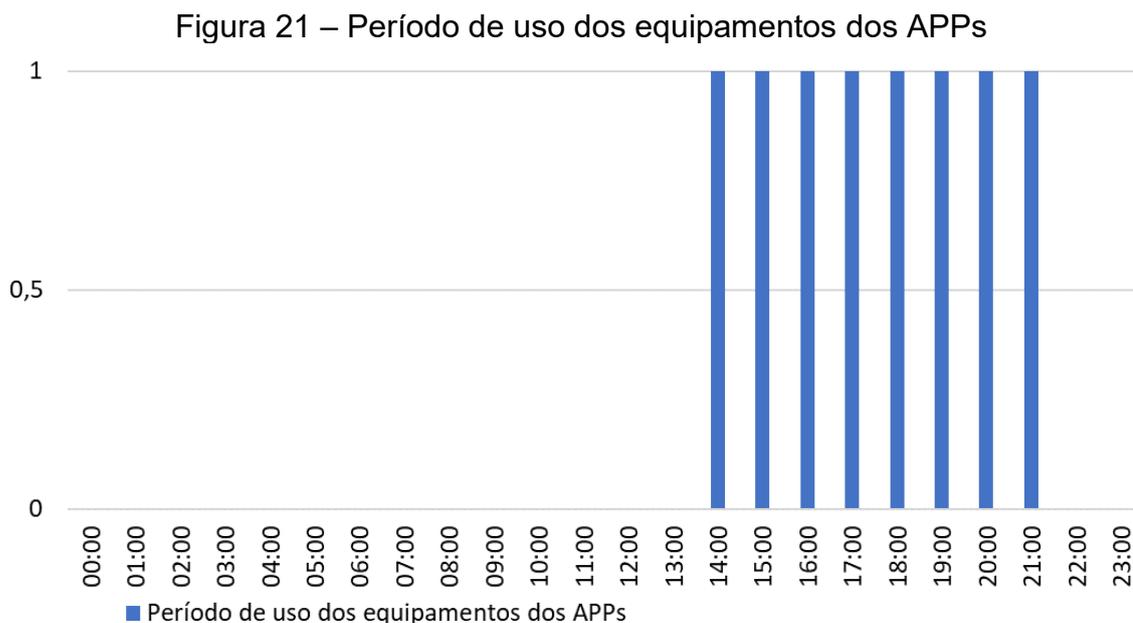


Fonte: ABNT (2024a)

Figura 20 – Padrão de uso do sistema de iluminação dos APPs



Fonte: ABNT (2024a)



Fonte: ABNT (2024a)

3.2. Simulação computacional

As simulações foram conduzidas conforme o procedimento de simulação computacional da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a). A seção 11 da norma, principalmente a subseção 11.4, fornece diretrizes de como deve ser executado o processo de simulação, juntamente com os requisitos e critérios normativos. A classificação de desempenho térmico da envoltória foi realizada nos APPs da unidade habitacional. Com base nos resultados do modelo de referência, foi realizada a classificação e a comparação entre os materiais isolantes da envoltória do modelo de residência com contêiner tipo *dry box*.

3.2.1. Período de simulação

Para realizar a simulação computacional abrangente durante um ano, foram utilizados os parâmetros definidos no objeto *RunPeriod*, conforme o *Input-Output Reference* (EnergyPlus, 2024). Esse objeto é necessário para a execução das simulações, especificando as datas e o período de tempo a serem considerados.

O objeto foi configurado para o período de um ano completo, iniciando em 1º de janeiro e terminando em 31 de dezembro. Foram desconsiderados feriados, horário de verão, dados de chuva e neve. Dessa forma, simulou-se os modelos para um ano completo.

3.2.2. Temperatura do solo não perturbado

O objeto *Site:GroundTemperature:Undisturbed:KusudaAchenbach* permite a utilização da correlação desenvolvida por Kusuda-Achenbach (Kusuda; Achenbach, 1965). Neste estudo, as temperaturas do solo não perturbado foram coletadas do arquivo climático e inseridas manualmente no arquivo IDF dos modelos para cada cidade. Optou-se por essa abordagem pois o *Input-Output Reference* (EnergyPlus, 2024) não recomenda a extração automática dessas informações pelo próprio programa.

Os parâmetros de entrada do objeto incluem condutividade térmica, densidade e calor específico do solo. Para todas as cidades simuladas, foram consideradas as mesmas propriedades, conforme consta na seção 3.1.4. Porém, como as temperaturas foram inseridas manualmente para cada cidade, usou-se o objeto *Site:GroundTemperature:Shallow*, que tem como variáveis as temperaturas mensais da superfície do solo.

3.2.3. Trocas de calor pelo piso

De acordo com o documento *Input-Output Reference* (EnergyPlus, 2024), o objeto *Site:GroundDomain:Slab* é usado para simular acoplamento ao solo com superfícies horizontais. Assim, múltiplas superfícies podem ser acopladas ao mesmo objeto no *EnergyPlus*. Nas simulações deste estudo, o objeto *Site:GroundDomain:Slab* foi utilizado para modelar as trocas de calor entre o piso da edificação e o solo, com o objetivo de avaliar o impacto da condutividade térmica do solo no desempenho energético da edificação.

O objeto *Site:GroundDomain:Slab* requer a definição de parâmetros específicos, detalhados na seção 3.2.2 do *Input-Output Reference* (EnergyPlus, 2024). A posição da laje em relação ao solo foi considerada como uma configuração “*on-grade*”, ou seja, a superfície inferior da laje do modelo de referência e do contêiner estão em contato com o solo.

3.2.4. Padrão de uso e ocupação

No grupo *Schedules*, foram utilizados dois objetos para inserir o padrão de uso e ocupação. O objeto *ScheduleTypeLimits* define tipos de padrão de uso e ocupação e

seus valores limites, utilizados para validar a consistência interna dos padrões de uso e ocupação e garantir a simulação precisa do comportamento da edificação. Conforme o *Input-Output Reference* (EnergyPlus, 2024), as programações anuais são validadas apenas por classe. Essa validação garante que os valores dos padrões de uso e ocupação sejam compatíveis com os tipos de dados definidos no modelo.

O objeto *Schedule:Compact* oferece a vantagem de concentrar todas as funcionalidades de um cronograma em um único comando, simplificando a modelagem e facilitando a leitura do código. Nesse objeto, foram inseridos os cronogramas do uso do sistema de iluminação, equipamentos, ocupação, período de ventilação natural e de condicionamento de ar. A inserção dos padrões de uso e ocupação desses elementos seguiu as subseções 11.4.7.3 e 11.4.7.4 da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a) conforme detalhado nas seções 3.1.5 e 3.1.6 deste trabalho, onde os requisitos específicos da norma para cada tipo de padrão de uso foram descritos e analisados.

3.2.5. Materiais e construção

As propriedades dos materiais e da construção são incorporadas nos objetos *Material* e *Construction*, respectivamente. No objeto *Material*, foram inseridos os materiais utilizados nas paredes, telhados, pisos e demais elementos construtivos do modelo de referência e do modelo com contêiner. Os parâmetros do objeto *Material* foram preenchidos com as propriedades térmicas e físicas de cada material, como condutividade térmica, densidade e calor específico, conforme detalhado na seção 3.1.3.

Depois de terem sido definidos os materiais em cada modelo, estes foram combinados no objeto *Construction* para criar as camadas dos elementos construtivos, como paredes, telhados, pisos, portas e janelas. Cada camada é composta por um ou mais materiais, e a ordem das camadas define a estrutura do elemento construtivo. No objeto *Construction*, a ordem das camadas é necessária para definir a composição correta dos elementos construtivos, e também é necessário especificar quais materiais estão na face externa e interna de cada elemento. Os detalhes desse objeto também estão descritos na seção 3.1.3.

O objeto *BuildingSurface:Detailed* permite modelar as superfícies de transferência de calor da edificação, como paredes, telhados, pisos, portas e janelas,

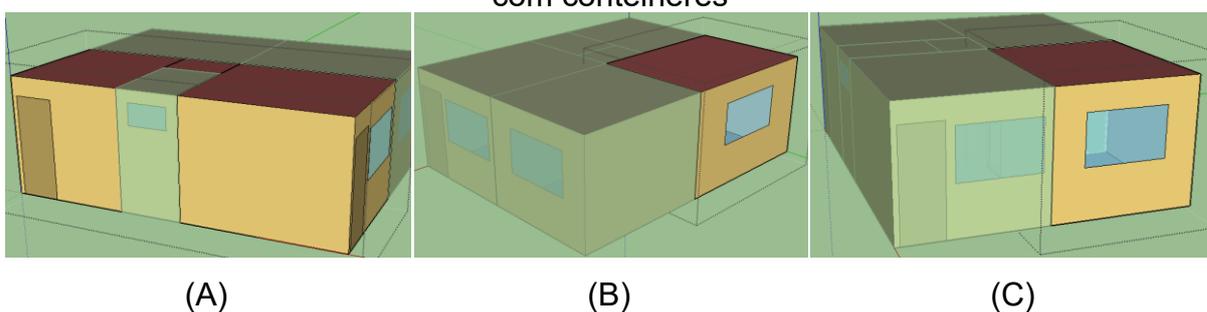
levando em consideração suas propriedades térmicas, geometria e orientação. Neste objeto, cada superfície das zonas térmicas, banheiro, sala com cozinha e dormitórios, é definida e classificada como externa, interna, ou em contato com o solo.

Para modelar as subsuperfícies das superfícies de transferência de calor, como portas e janelas, foi utilizado o objeto *FenestrationSurface:Detailed*. Este objeto permite a modelagem precisa das propriedades térmicas, geométricas e ópticas das subsuperfícies, como tipo de vidro, caixilhos, persianas e dispositivos de sombreamento, considerando também a orientação e o sombreamento por outras partes da edificação (EnergyPlus, 2024). Não foram considerados proteções nas janelas.

3.2.6. Carga térmica interna

No grupo *Internal Gains*, foram adicionados dados nos objetos *People*, *Lights* e *ElectricEquipment*. No objeto *People*, foram fornecidas informações sobre a zona térmica, a quantidade de pessoas em cada cronograma e a fração radiante que estão descritos na Tabela 13 e na Figura 19. Esse objeto é utilizado para modelar o efeito dos ocupantes nas condições de espaço. A Figura 22 apresenta as zonas térmicas analisadas da unidade habitacional, tanto no modelo de referência quanto no modelo com contêineres.

Figura 22 - Zonas térmicas da unidade habitacional para o modelo de referência e com contêineres



Legenda: (A) é a zona da sala conjugada com a cozinha, (b) é o dormitório 1 e (c) é o dormitório 2.

Para especificar as informações sobre o sistema de iluminação elétrica de cada zona, utilizou-se o objeto *Lights*. Foram inseridos a densidade de potência instalada, a fração radiante e visível para iluminação, e o padrão de uso, conforme

apresentados na Tabela 14 e na Figura 20. Nesse objeto, é possível configurar o cronograma de iluminação para cada zona térmica.

No objeto *ElectricEquipment*, foram inseridas as informações da zona térmica, o padrão de uso, a potência e a fração radiante, que estão detalhadas na Tabela 15 e na Figura 21. Esse objeto modela os equipamentos da zona térmica que consomem eletricidade, como computadores, televisores e equipamentos de cozinha. Todos os valores inseridos nesses objetos estão descritos na seção 3.1.6.

3.2.7. Ar-condicionado

Para as simulações que utilizam equipamentos de ar-condicionado, foram utilizados dois objetos do grupo *HVAC Templates*: o objeto *HVACTemplate:Thermostat* e o *HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem*. Esse grupo permite a especificação de termostatos de zonas simples e sistemas AVAC.

No objeto *HVACTemplate:Thermostat*, foram inseridos os *setpoints* de aquecimento e resfriamento, que, de acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2024a), são 21°C e 23°C, respectivamente. Esse objeto permite que os *setpoints* sejam especificados como constantes para toda a simulação ou que sejam executados de acordo com os cronogramas.

Para inserir as informações das zonas térmicas com sistema de ar ideal que atende as cargas de aquecimento e resfriamento, utilizou-se o objeto *HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem*. Esse objeto proporciona um sistema ideal de AVAC.

Destaca-se que o uso do sistema de condicionamento de ar foi considerado apenas quando o ambiente estava ocupado, utilizando-se o cronograma de ocupação da Figura 18 para determinar em quais zonas térmicas o sistema estaria em funcionamento. Além disso, conforme a norma (ABNT, 2024a), o sistema de condicionamento de ar deve ser considerado ideal, conforme determinado na seção 3.1.5.

3.2.8. Ventilação natural

Nas simulações que envolveram ventilação natural, foram utilizados objetos do grupo *AirFlow Network*. Esse modelo oferece a capacidade de simular fluxos de ar em várias zonas por meio do vento e sistemas de distribuição de ar forçados. Para inserir os

parâmetros básicos de execução desse tipo de simulação, utilizou-se o objeto *AirflowNetwork:SimulationControl*.

Para controlar simultaneamente as aberturas de portas e janelas exteriores e interiores das zonas térmicas, utilizou-se o objeto *AirflowNetwork:MultiZone:Zone*. Esse objeto é necessário para o cálculo dos fluxos de ar. O objeto *AirflowNetwork:MultiZone:Surface* foi empregado para especificar as propriedades das conexões das superfícies por meio das quais o ar flui. Foram informados o modo de controle das aberturas e o padrão de uso delas, conforme apresentados na Figura 18 e na seção 3.1.5. Por fim, também foi utilizado o objeto *AirflowNetwork:MultiZone:Component:DetailedOpening* para especificar as propriedades do fluxo de ar pelas portas e janelas quando estão fechadas ou abertas, conforme o disposto na seção 11.4.7.4 da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a).

3.2.9. Dados de saída

A partir das informações fornecidas ao *EnergyPlus*, foi necessário definir quais dados de saída eram necessários para a execução da análise. Para isso, foram utilizados cinco objetos do grupo *Output Reporting*. O primeiro objeto utilizado foi o *Output:VariableDictionary*, que produz uma lista resumida das variáveis de saída e dos medidores disponíveis para o relatório dos modelos simulados. Nesse objeto, optou-se pela opção "*regular*" para a geração de uma listagem das zonas térmicas analisadas.

O objeto *Output:Surfaces:Drawing* produz os relatórios e arquivos que podem ser renderizados graficamente ou importados para outros programas. Foi especificado que o tipo de relatório produzido deveria ser em formato DXF e com a especificação *ThickPolyline*.

O terceiro objeto utilizado foi o *Output:Table:SummaryReports*, que permite definir os tipos de relatórios predefinidos que aparecerão com os relatórios tabulares. Selecionou-se a opção "*AllSummary*", que é a mais abrangente, além de produzir todos os relatórios resumidos, com exceção dos de carga de componentes.

Para controlar como todos os relatórios padronizados são produzidos, selecionou-se o objeto *OutputControl:Table:Style*. Optou-se pela opção HTML no separador de colunas, pois produz arquivos que podem ser abertos com navegadores e apresenta os valores em formato tabular de fácil visualização. O campo de

conversão de unidades foi preenchido com a informação "JtoKWH", que converte Joules para kWh.

Por fim, o quinto objeto utilizado foi o *Output:Variable*. Esse objeto é usado para solicitar os relatórios dos resultados, ou seja, para relatar dados de série temporal em várias frequências. Nas simulações com ventilação natural, foram solicitadas as temperaturas operativas horárias das zonas térmicas e o cronograma de ocupação de cada zona. Nas simulações com condicionamento de ar, foram solicitadas as cargas ideais de energia total para o aquecimento e resfriamento de cada zona térmica.

3.3. Pós-processamento inicial

Nesta seção, apresenta-se como foi realizada a análise referente à classificação de desempenho térmico da envoltória da residência. O objetivo dessa análise é determinar o nível de desempenho térmico da envoltória da residência, considerando os diferentes tipos de materiais isolantes utilizados na sua construção, em conformidade com os critérios da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a).

A partir dos dados gerados pelo programa *EnergyPlus*, os resultados foram analisados conforme os requisitos estabelecidos pela NBR 15575-1 (ABNT, 2024a). Esses critérios foram submetidos a todos os modelos nas dez cidades. Nos modelos com ventilação natural, foram obtidos dois indicadores: o PHFT e as temperaturas operativas anuais máximas. Apesar de a norma também solicitar o indicador de temperatura operativa mínima, este não foi considerado necessário para esta avaliação, pois deve ser analisado apenas para cidades nas zonas bioclimáticas 1 a 4. Como nenhuma das cidades escolhidas está nessas zonas, o cálculo desse indicador não foi realizado.

Nos modelos com condicionamento de ar foram obtidos os dados referentes à carga térmica de resfriamento e aquecimento. Esses indicadores são gerados a partir da simulação da unidade habitacional neste estudo, considerando o modelo de referência e o modelo com contêiner, que representa o modelo real conforme a norma (ABNT, 2024a). Por meio destes indicadores foi possível submeter os modelos aos critérios de classificação de desempenho térmico da envoltória e, conseqüentemente, analisar e comparar os modelos.

O cálculo do percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa é determinado por meio da Equação 6. Esse indicador depende dos dados

de temperatura externa de bulbo seco de cada cidade, da faixa de temperatura operativa e do período de ocupação dos APPs.

$$PHFT = \frac{Nh_{FT}}{Nh_{Ocup}} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

PHFT é o percentual de horas dentro da faixa de temperatura operativa (%);

Nh_{FT} é o número de horas em que o APP se encontra ocupado e com temperaturas operativas dentro da faixa de temperatura operativa, estabelecida na Tabela 16, ao longo do ano (h);

Nh_{Ocup} é o número de horas em que o APP é ocupado ao longo do ano, equivalente a 2920 h para as salas e 3650 h para dormitórios (h).

Para determinar a faixa de temperatura operativa, é necessário calcular a temperatura externa média anual de bulbo seco (TBS_m) e classificar em qual intervalo cada cidade se enquadra. A TBS_m foi calculada utilizando os arquivos climáticos da base-padrão e o programa *EnergyPlus*, por meio do *output Site Outdoor Air Drybulb Temperature*. A classificação foi feita por meio da Tabela 16.

Intervalos de temperaturas externas	Faixa de temperatura operativa a ser considerada
Intervalo 1	$18,0^{\circ}\text{C} < T_{OAPP} < 26,0^{\circ}\text{C}$
Intervalo 2	$26,0^{\circ}\text{C} < T_{OAPP} < 28,0^{\circ}\text{C}$
Intervalo 3	$28,0^{\circ}\text{C} < T_{OAPP} < 30,0^{\circ}\text{C}$

Legenda: T_{OAPP} é a temperatura operativa do APP, que atende aos limites estabelecidos na Tabela 16
 Fonte: ABNT, (2024a)

O intervalo de temperaturas externas de cada cidade está descrito na Tabela 2. Assim, utilizando esses dados e as disposições fornecidas pela NBR 15575-1 (ABNT, 2024a), é possível calcular o PHFT, que representa a quantidade de horas no ano em que o ambiente esteve ocupado e com temperatura operativa dentro da faixa aceitável. Esse valor é obtido por meio do número total de horas em que o APP é ocupado ao longo do ano. O PHFT da unidade habitacional é calculado como a média dos valores de cada APP, conforme estabelecido pela NBR 15575-1 (ABNT, 2024a).

As temperaturas operativas máximas também foram obtidas com base nos dados de temperatura horária e ocupação dos APPs. Ao analisar as horas de ocupação de cada ambiente ao longo do ano, é possível identificar as temperaturas máximas em cada APP. A temperatura operativa anual máxima da unidade habitacional é determinada como a maior temperatura entre os APPs.

No cálculo das cargas térmicas de resfriamento e aquecimento, o período de ocupação e as cargas térmicas de resfriamento e aquecimento foram dados obtidos por meio do processo de simulação com condicionamento de ar. O valor da carga térmica é considerado somente nos momentos em que o APP está ocupado e a temperatura operativa não está dentro da faixa de temperatura aceitável estabelecida pelo intervalo de TBS_m da cidade. Esse procedimento é realizado para cada APP e, em sequência, calcula-se a carga térmica total de cada APP. Para as cidades no intervalo 1, a carga térmica total é a soma da carga térmica de resfriamento com a de aquecimento, enquanto que para as cidades nos intervalos 2 e 3, a carga térmica total corresponde apenas à carga térmica de resfriamento, conforme as subseções 11.4.7.4 e 11.4.7.8 da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a). A redução da carga térmica total da unidade habitacional do modelo com contêineres em relação ao modelo de referência é obtida por meio da Equação 7.

$$\text{RedCgTT} = \left[1 - \frac{CgTT_{\text{real}}}{CgTT_{\text{ref}}} \right] \times 100 \quad (7)$$

Onde:

RedCgTT é a redução de carga térmica total da unidade habitacional real em relação ao modelo de referência (%);

$CgTT_{\text{real}}$ é a carga térmica total da unidade habitacional no modelo real (kWh/ano);

$CgTT_{\text{ref}}$ é a carga térmica total da unidade habitacional no modelo de referência (kWh/ano).

A NBR 15575-1 estabelece três níveis de desempenho térmico: mínimo, intermediário e superior. O nível mínimo avalia o cumprimento do modelo real aos critérios dos mínimos de desempenho. Para o atendimento desse nível pelo método de simulação devem ser realizadas análises somente com ventilação natural. Os

indicadores necessários para as análises do critério mínimo são: PHFT da unidade habitacional, temperaturas operativas máxima e mínima. Esses indicadores devem ser coletados tanto do modelo de referência quanto do modelo com contêineres. Os critérios referentes ao nível mínimo são: o PHFT do modelo real deve ser maior do 90% do que o do modelo de referência. Além disso, a temperatura operativa máxima do modelo real deve ser igual ou inferior à do modelo de referência, com uma adição de até 2°C.

Para a classificação intermediária e superior, os indicadores de temperatura operativa devem cumprir os critérios do nível mínimo, porém, para o critério de PHFT, deve ser calculado o incremento do PHFT do modelo real em relação ao modelo de referência. O incremento do PHFT deve ser maior ou igual ao mínimo estabelecido para os níveis intermediário e superior, que variam de acordo com o PHFT do modelo real e a carga térmica total. Os níveis intermediários e superiores requerem, além da simulação com ventilação natural, simulação da unidade habitacional somente com condicionamento de ar para o modelo real e o de referência. Por meio da simulação sem ventilação natural, devem ser calculadas as reduções de carga térmica. Para o atingimento dos níveis, essas reduções devem ser menores ou iguais às reduções mínimas necessárias para os níveis intermediário e superior.

3.4. Balanço térmico

O balanço térmico é uma ferramenta necessária para avaliar quais elementos construtivos apresentam mais interferências no desempenho térmico da edificação, especialmente em ambientes de permanência prolongada como residências e escritórios. Por meio dessa análise, é possível identificar quais elementos construtivos apresentam os maiores fluxos de calor na envoltória, permitindo otimizar o projeto. Assim, nesta seção, foram apresentados todos os procedimentos, equações e descrições de como foi realizado o balanço térmico na unidade habitacional. Destaca-se que o balanço térmico foi feito somente para os modelos que apresentaram o melhor e o pior desempenho térmico.

Neste trabalho, foi aplicado o método proposto por Melo (2015) em seu estudo sobre isolamento térmico em edificações comerciais, com foco nas trocas de calor por convecção que ocorrem em cada intervalo de tempo ("*time step*") nos APPs. Seguiu-

se também as disposições descritas e analisadas por Eli (2020). A análise considerou as seguintes variáveis:

- Trocas de calor por convecção;
- Cargas térmicas internas;
- Infiltração;
- Condicionamento de ar.

Ressalta-se que, além da convecção, outras formas de transferência de calor também influenciam o desempenho térmico, como radiação e condução. No entanto, a convecção é responsável pela troca de calor entre um elemento construtivo e o ar em seu entorno. As trocas por condução e radiação, por sua vez, estão englobadas na análise da convecção, pois influenciam diretamente na temperatura do ar e na taxa de transferência de calor por convecção.

Para o cálculo do balanço térmico, os dados de saída da simulação computacional devem incluir as seguintes informações: trocas por convecção das superfícies da envoltória, ganho por cargas térmicas internas, trocas por infiltração e a carga térmica que será adicionada ou retirada do ambiente a cada intervalo de tempo. O Quadro 1 apresenta os objetos solicitados para a saída de dados, a nomenclatura e o significado de cada objeto.

Com a solicitação desses dados de saída, realizou-se uma verificação do método de cálculo do balanço térmico dos ambientes com o intuito de identificar quais elementos apresentam maior significância nas trocas de calor por convecção. A verificação se fez necessária a fim de demonstrar que todas as fontes de calor estão contabilizadas no balanço térmico do ambiente. A verificação do método do cálculo de balanço térmico foi realizada para o dia que apresentou maior temperatura operativa na unidade habitacional. A Equação 8 descreve o cálculo de equilíbrio térmico dos ambientes em cada *time step*.

Quadro 1 – Dados de saída do *EnergyPlus* para o balanço térmico

Dados de saída	Nomenclatura	Significado
<i>Surface Inside Face Convection Heat Gain Energy [J]</i>	Superfícies	Calor transferido ou retirado do ambiente por meio da convecção que ocorre em cada superfície da envoltória.
<i>Zone Total Internal Convective Heating Energy [J]</i>	Cargas internas	Calor gerado pelas cargas internas (iluminação, equipamentos e pessoas) e é transferido por convecção.
<i>AFN Zone Infiltration Sensible Heat Gain Energy [J]</i>	Ganhos por ventilação natural	Calor sensível transferido para o ambiente por meio da ventilação natural.
<i>AFN Zone Infiltration Sensible Heat Loss Energy [J]</i>	Perdas por ventilação natural	Calor sensível retirado do ambiente por meio da ventilação natural.
<i>Zone Air System Sensible Heating Energy [J]</i>	Aquecimento	Carga térmica adicionada no ambiente, para satisfazer o limite de temperatura estipulado no termostato (21°C).
<i>Zone Air System Sensible Cooling Energy [J]</i>	Refrigeração	Carga térmica retirada do ambiente, para satisfazer o limite de temperatura estipulado no termostato (23°C).

Fonte: Adaptado de Eli (2020)

$$ET_n = |Env_n + CI_n + VN_{G,n} + CgTA_n| - |VN_{P,n} + CgTR_n| = 0 \quad (8)$$

Onde:

ET_n é o Equilíbrio Térmico dos ambientes de permanência prolongada no *time step* n (J);

Env_n é a perda ou o ganho de calor de cada superfície da envoltória no *time step* n (J);

CI_n é o ganho de calor dos ambientes pelas cargas internas no *time step* n (J);

$VN_{G,n}$ é o ganho de calor pela ventilação natural no *time step* n (J);

$CgTA_n$ é a carga térmica adicionada pelo ar-condicionado no *time step* n (J);

$VN_{P,n}$ é a perda de calor pela ventilação natural no *time step* n (J);

$CgTR_n$ é a carga térmica retirada pelo condicionamento de ar no *time step* n (J).

Destaca-se que o valor relacionado às superfícies pode ser tanto positivo quanto negativo, depende do fluxo de calor no *time step*. Assim, para a verificação do balanço térmico, o resultado da Equação 3 deve ser zero ou muito próximo desse valor. Neste caso indica-se que todas as trocas realizadas na análise foram consideradas, não existindo fontes de ganhos ou de perdas não contabilizadas.

Assim, após a verificação do cálculo, a análise de balanço térmico dos ambientes de permanência prolongada pode ser realizada. O balanço térmico foi calculado para um ano completo, porém foi discriminado para duas estações, inverno e verão, a fim de reduzir o mascaramento das variações que ocorrem ao longo do ano devido às mudanças sazonais. Apesar disso, os demais indicadores são integrados ao longo do ano, de forma que mostrem o balanço anual das variações climáticas no desempenho térmico, o que justifica essa consideração.

As superfícies foram agrupadas em seis grupos: paredes internas, paredes externas, piso, cobertura, portas e janelas. Para a análise do balanço térmico, o valor das trocas de calor de cada grupo foi calculado por meio da Equação 9. Assim, ao longo do ano, somou-se a quantidade de energia adicionada pela retirada de calor do ambiente em cada APP dos modelos que apresentaram o pior desempenho térmico. Se a soma apresentar um valor anual positivo, significa que as superfícies adicionaram mais calor ao ambiente do que retiraram; se for negativo, ocorreu o inverso.

$$BT_{Env} = \sum APP_{Adc,n} - \sum APP_{Ret,n} \quad (9)$$

Onde:

BT_{Env} é o balanço térmico anual das superfícies (J/ano);

APP_{Adc} é o calor adicionado no APP pela superfície em cada *time step* n (J);

APP_{Ret} é o calor retirado do APP pela superfície em cada *time step* n (J).

A presença de pessoas, equipamentos e sistema de iluminação contribui para a carga interna do ambiente, sempre com efeito positivo no fluxo de calor. Essa carga interna é considerada no cálculo da carga total adicionada ao ambiente ao longo do ano, conforme detalhado na Equação 10.

$$CI = \sum CI_n \quad (10)$$

Onde:

CI é a carga interna anual do APP (J/ano);

Cl_n é a carga interna do APP em cada *time step* n (J).

Os dados de ventilação natural e do sistema de condicionamento foram obtidos pela parcela de ganhos e perdas da simulação computacional. Logo, cada dado foi adicionado ao somatório ao longo do ano, como está descrito nas Equações 11 e 12. Considerou-se os valores de ganhos positivos e o de perdas negativos.

$$VN_{G,P} = \sum VN_{G,P,n} \quad (11)$$

Onde:

$VN_{G,P}$ é o ganho e a perda de calor do APP pela ventilação natural durante o ano (J/ano);

$VN_{G,P,n}$ é o ganho e a perda de calor do APP pela ventilação natural em cada *time step* n (J).

$$CgTA_R = \sum CgTA_{R,n} \quad (12)$$

Onde:

$CgTA_R$ é a carga térmica adicionada pelo aquecimento ou removida pela refrigeração do APP por meio do condicionamento de ar durante o ano (J/ano);

$CgTA_{R,n}$ é a carga térmica adicionada pelo aquecimento ou removida pela refrigeração do APP por meio do condicionamento de ar em cada *time step* n (J).

Assim, considerou-se os grupos: cargas internas, paredes externas, paredes internas, portas, janelas, piso, cobertura, ganhos pela ventilação natural, perdas pela ventilação natural, carga térmica de aquecimento e refrigeração. O balanço térmico considerou cada grupo de acordo com seu valor sazonal separadamente, de forma a garantir a consistência na comparação. Os dados referentes ao balanço térmico foram convertidos para kWh a fim de padronizar as unidades. Como 1 kWh equivale a 3.600.000 Joules, todos os dados em Joules foram divididos por 3.600.000.

3.5. Pós-processamento com otimizações

Nesta seção são apresentadas as otimizações propostas a fim de melhorar o desempenho térmico da unidade habitacional. Por meio do balanço térmico, pode-se averiguar quais elementos construtivos apresentaram as maiores trocas de calor, assim aplicou-se as estratégias da Cartilha de Casos Otimizados (LABEEE; SNH; MDR, 2022).

Devido às características construtivas de edificações com contêineres, não serão alteradas as transmitâncias térmicas e a capacidade térmica das paredes externas da envoltória assim como o percentual de elementos transparentes no ambiente. Porém, destaca-se que em climas quentes e úmidos, de baixa amplitude térmica diária, o emprego de isolantes térmicos pode não resultar em bom desempenho térmico. Dessa forma, alterou-se a absorptância das paredes externa e da cobertura e adotou-se a estratégia de sombreamento com venezianas nas janelas dos ambientes analisados. Para avaliar o impacto de cada otimização na unidade habitacional, analisou-se o desempenho térmico das otimizações aplicadas separadamente e em conjunto.

Devido à localização das cidades selecionadas em zonas bioclimáticas entre 6 e 8, os valores de absorptância foram menores do que no modelo de referência, que é 0,58 (ABNT, 2024a). Por isso, adotaram-se valores de absorptância entre 0,10 e 0,40. Embora o valor mínimo não seja possível de ser replicado em uma edificação real, ele foi considerado a fim de mostrar o desempenho nesse tipo de edificação. A absorptância foi variada em incrementos de 0,05 para realizar uma análise sobre a interferência da absorptância no desempenho térmico da unidade habitacional.

A estratégia de sombreamento com venezianas seguiu as disposições da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a). Assim, quando a temperatura externa de bulbo seco for menor ou igual a 26°C as venezianas abrem, e quando for maior fecham. Destaca-se que as venezianas só foram inseridas no modelo com contêiner, pois o modelo normativo de referência não deve possuir esse dispositivo. As venezianas foram consideradas tanto na simulação com ventilação natural quanto na simulação com condicionamento de ar. As informações sobre o modelo de veneziana estão na Tabela 17.

Tabela 17 - Informações sobre o modelo de veneziana adotado

Orientação das palhetas	Largura das palhetas (m)	Espaçamento entre as palhetas (m)	Espessura das palhetas (m)	Ângulo das palhetas (°)	Condutividade (W/m.K)
Horizontal	0,05	0,03	0,0042	45	0,29

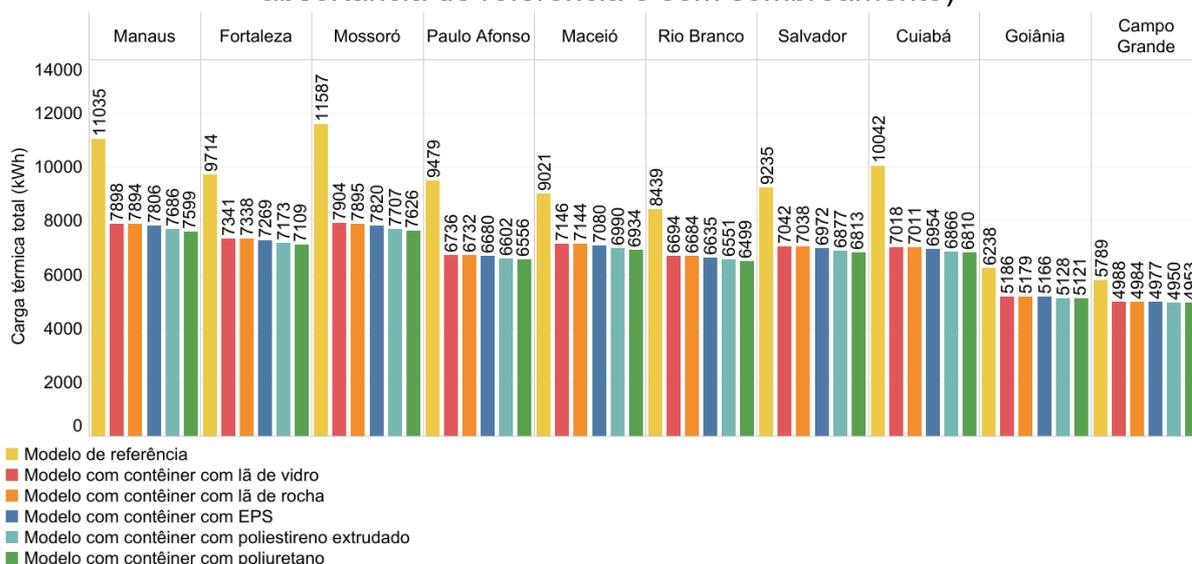
Para cada estratégia adotada, foram retirados os indicadores de desempenho e submetido ao critérios na NBR 15575-1 (ABNT, 2024a), que estão descritos na seção 3.3. Essas otimizações visam aumentar a classificação de desempenho térmico do melhor e do pior caso de desempenho térmico.

4. Resultados e discussões

4.1. Análise de diferentes materiais isolantes

Foram realizadas 120 simulações no *EnergyPlus*, combinando cinco materiais isolantes com as paredes externas, a cobertura e o piso da residência contêiner, além do modelo de referência, em dez climas diferentes. A carga térmica total da unidade habitacional, obtida para todas as variações da envoltória e clima, é apresentada na Figura 23. Destaca-se que as cargas térmicas são solicitadas apenas para o modelo com ar-condicionado conforme disposto na NBR 15575-1 (ABNT, 2024a). Por meio deste indicador, é possível calcular a redução da carga térmica em relação à variação dos materiais isolantes da envoltória.

Figura 23 - Carga térmica total anual dos modelos de referência e contêiner (com absorvância de referência e sem sombreamento)



A Tabela 18 apresenta as reduções percentuais da carga térmica anual dos modelos com contêineres em relação ao modelo de referência, obtidas por meio da Equação 7, e as reduções dos modelos com contêineres em relação ao pior modelo de carga térmica dos modelos com contêineres. Destaca-se que esse indicador é o único obtido por meio da simulação com ar-condicionado.

Tabela 18 – Redução da carga térmica total em relação ao modelo de referência e ao com pior isolamento térmico para os modelos sem otimizações

Cidades	Material isolante nos modelos com contêiner	Redução da carga térmica total em relação ao modelo de referência (%)	Redução da carga térmica dos modelos com contêineres em relação ao modelo com pior isolamento (%)
Manaus	Lã de vidro	28,4	0,0
	Lã de rocha	28,5	0,1
	EPS	29,3	1,2
	Poliestireno extrudado	30,3	2,7
	Poliuretano	31,1	3,8
Fortaleza	Lã de vidro	24,4	0,0
	Lã de rocha	24,5	0,0
	EPS	25,2	1,0
	Poliestireno extrudado	26,2	2,3
	Poliuretano	26,8	3,2
Mossoró	Lã de vidro	31,8	0,0
	Lã de rocha	31,9	0,1
	EPS	32,5	1,1
	Poliestireno extrudado	33,5	2,5
	Poliuretano	34,2	3,5
Paulo Afonso	Lã de vidro	28,9	0,0
	Lã de rocha	29,0	0,1
	EPS	29,5	0,8
	Poliestireno extrudado	30,4	2,0
	Poliuretano	30,8	2,7
Maceió	Lã de vidro	20,8	0,0
	Lã de rocha	20,8	0,0
	EPS	21,5	0,9
	Poliestireno extrudado	22,5	2,2
	Poliuretano	23,1	3,0
Rio Branco	Lã de vidro	20,7	0,0
	Lã de rocha	20,8	0,1
	EPS	21,4	0,9
	Poliestireno extrudado	22,4	2,1
	Poliuretano	23,0	2,9
Salvador	Lã de vidro	23,8	0,0
	Lã de rocha	23,8	0,1
	EPS	24,5	1,0
	Poliestireno extrudado	25,5	2,4
	Poliuretano	26,2	3,3
Cuiabá	Lã de vidro	30,2	0,0
	Lã de rocha	30,2	0,1
	EPS	30,7	0,9
	Poliestireno extrudado	31,6	2,2
	Poliuretano	32,2	3,0
Goiânia	Lã de vidro	16,9	0,0
	Lã de rocha	17,0	0,1
	EPS	17,2	0,4
	Poliestireno extrudado	17,8	1,1
	Poliuretano	17,9	1,3
Campo Grande	Lã de vidro	13,8	0,0
	Lã de rocha	13,9	0,1
	EPS	14,0	0,2
	Poliuretano	14,4	0,7
	Poliestireno extrudado	14,5	0,8

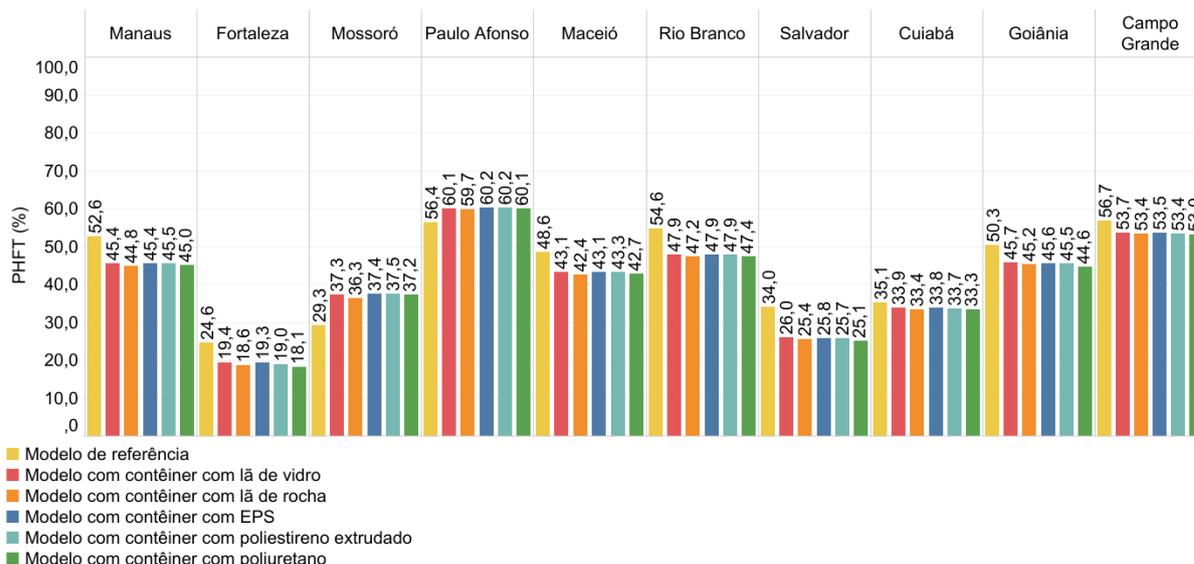
Nos modelos analisados, observou-se que para todas as cidades o uso de contêiner diminui a carga térmica total em relação ao modelo de referência, principalmente em Mossoró. Ressalta-se que, entre os materiais isolantes, os modelos que utilizam lã de rocha e lã de vidro apresentam reduções de cargas térmicas menores do que os que utilizam poliestireno extrudado e poliuretano. No entanto, em algumas cidades, como Campo Grande e Goiânia, essa diferença é menos acentuada em comparação com as outras cidades, que apresentaram discrepâncias maiores com a troca dos isolantes.

Destaca-se também que Goiânia e Campo Grande apresentaram as menores reduções em comparação com as demais cidades. Assim, verifica-se que a variação dos isolantes apresenta maiores reduções de carga térmica em localidades onde a temperatura média de bulbo seco é mais elevada.

Ao analisar as envoltórias, verifica-se que os menores valores de carga térmica total são obtidos para o modelo com poliuretano e poliestireno extrudado. Campo Grande apresentou a menor carga térmica total para o modelo com poliestireno extrudado, enquanto Mossoró obteve a maior carga térmica para o modelo com lã de vidro. No entanto, a maior redução de carga térmica ocorreu para a cidade de Mossoró com o modelo com poliuretano. A menor redução ocorreu para o modelo com lã de vidro em Cuiabá. A análise entre as cidades é necessária para entender como o clima de cada cidade interfere nos indicadores de desempenho térmico.

Embora as informações sobre a carga térmica da residência sejam relevantes, a norma exige outros indicadores para a classificação da residência. Um deles é o percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT), apresentado na Figura 24. Este indicador é obtido por meio da simulação com ventilação natural.

Figura 24 - PHFT dos modelos de referência e contêiner (com absorvência de referência e sem sombreamento)



A maioria das cidades atinge um valor de PHFT inferior a 50%, com exceção de Campo Grande e Paulo Afonso. A Tabela 19 apresenta as reduções absolutas dos modelos de referência e do pior modelo com contêiner em relação à média do PHFT dos modelos com contêineres para cada cidade.

Tabela 19 - Variação absoluta do PHFT do modelo de referência e do pior modelo com contêiner em relação à média do PHFT dos modelos com contêineres

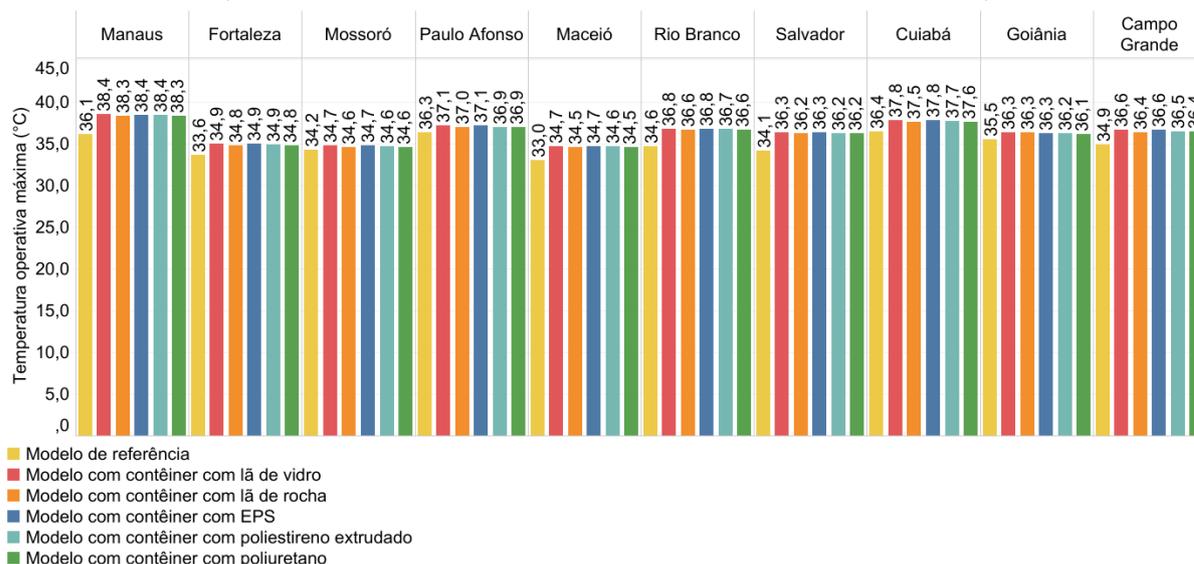
Cidades	Média do PHFT dos modelos com contêineres (%)	Variação absoluta do PHFT do modelo de referência em relação à média dos modelos com contêineres (%)	Variação absoluta do PHFT do pior modelo com contêiner em relação à média dos modelos com contêineres (%)
Manaus	45,24	-16,2	0,9
Fortaleza	18,86	-30,4	4,3
Mossoró	37,13	21,1	2,3
Paulo Afonso	60,05	6,1	0,6
Maceió	42,94	-13,2	1,2
Rio Branco	47,66	-14,6	0,9
Salvador	25,58	-32,8	2,1
Cuiabá	33,60	-4,5	1,0
Goiânia	45,33	-10,9	1,5
Campo Grande	53,41	-6,2	0,8

É importante destacar que o PHFT do modelo de referência é superior para todas as cidades, exceto Mossoró e Paulo Afonso, que possuem clima quente e seco. Mossoró não atingiu 50% do PHFT em nenhum dos modelos analisados. No entanto, o modelo de referência possui PHFT menor do que os modelos com contêineres. Paulo Afonso apresentou o maior valor de PHFT entre todas as cidades, com 60,2%

para o modelo com poliestireno extrudado. A cidade que apresentou os piores PHFTs foi Fortaleza, principalmente para o modelo com poliuretano.

O último indicador analisado foi a temperatura operativa máxima, visto que nenhuma cidade se encontra nas zonas bioclimáticas que exigem o cálculo da temperatura operativa mínima. Os valores de temperatura operativa máxima estão apresentados na Figura 25.

Figura 25 - Temperatura operativa máxima dos modelos de referência e contêiner (com absorptância de referência e sem sombreamento)



A Tabela 20 apresenta as reduções absolutas dos modelos de referência e do pior modelo com contêiner em relação à média dos modelos com contêineres para cada cidade. Observa-se que nenhum modelo com isolamento térmico apresenta temperatura operativa máxima inferior à do modelo de referência, apesar de algumas cidades atenderem a esse critério devido à tolerância de 2°C estabelecida na norma.

Observa-se que, mesmo com a redução da carga térmica, a temperatura operativa máxima foi superior para o modelo com contêiner em todos os isolamentos térmicos. Como as cidades estão em regiões de clima quente, e a obtenção dos índices de temperatura operativa e de PHFT é realizada por meio de simulação com ventilação natural, a unidade habitacional está sujeita às variações de temperatura de bulbo seco externas, além de estar isolada termicamente, dificultando a retirada de calor pela envoltória. Assim, é compreensível o motivo desses dois indicadores terem sido piores do que o de carga térmica.

Tabela 20 - Redução absoluta da temperatura operativa máxima do modelo de referência e do pior modelo com contêiner em relação à média dos modelos com contêineres

Cidades	Média da temperatura operativa dos modelos com contêineres (°C)	Redução absoluta da temperatura operativa máxima do modelo de referência em relação à média dos modelos com contêineres (°C)	Redução absoluta da temperatura operativa máxima do pior modelo com contêiner em relação à média dos modelos com contêineres (°C)
Manaus	38,36	2,2	0,1
Fortaleza	34,86	1,3	0,1
Mossoró	34,64	0,4	0,1
Paulo Afonso	37,00	0,7	0,1
Maceió	34,61	1,6	0,1
Rio Branco	36,68	2,1	0,1
Salvador	36,21	2,1	0,1
Cuiabá	37,67	1,3	0,1
Goiânia	36,21	0,8	0,1
Campo Grande	36,47	1,6	0,1

O método de classificação, descrito na seção 3.3, indica que nenhum dos modelos com contêineres atingiu o nível superior ou intermediário de desempenho energético nas cidades analisadas, de acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2024a). Alguns modelos, em determinadas cidades, atingiram o nível mínimo, enquanto outros não alcançaram nem mesmo esse nível em todos os cenários simulados. Entre os modelos que não atenderam ao nível mínimo em nenhum caso, estão Manaus, Rio Branco, Salvador, Fortaleza e Maceió. O Quadro 2 apresenta as cidades, os modelos simulados e a classificação de desempenho de cada modelo.

O principal indicador que não foi aprovado nos modelos que não atingiram o nível mínimo é o PHFT, que, de acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2024a), deve ser maior do que 90% do PHFT do modelo de referência, conforme apresentado na seção 3.3. Para os modelos que atingiram o nível mínimo, o não atendimento do critério de PHFT para os níveis intermediários e superiores também foi o principal motivo pelo qual não obtiveram melhor desempenho.

Diante dos resultados, torna-se evidente a necessidade de implementar medidas de aprimoramento no modelo contêiner com o objetivo de otimizar seu desempenho térmico e atender aos critérios normativos, principalmente o PHFT. A cidade de Fortaleza, em particular, requer atenção especial, pois apresentou os piores valores de PHFT e uma quantidade considerável de carga térmica total, especialmente para o modelo com poliuretano.

Quadro 2 - Classificação de desempenho térmico da NBR 15575-1 para os modelos com contêineres sem otimização

Cidades	Material isolante	Classificação NBR 15575-1
Manaus	Lã de rocha	Não atinge o nível mínimo
	Lã de vidro	Não atinge o nível mínimo
	EPS	Não atinge o nível mínimo
	Poliestireno extrudado	Não atinge o nível mínimo
	Poliuretano	Não atinge o nível mínimo
Rio Branco	Lã de rocha	Não atinge o nível mínimo
	Lã de vidro	Não atinge o nível mínimo
	EPS	Não atinge o nível mínimo
	Poliestireno extrudado	Não atinge o nível mínimo
	Poliuretano	Não atinge o nível mínimo
Salvador	Lã de rocha	Não atinge o nível mínimo
	Lã de vidro	Não atinge o nível mínimo
	EPS	Não atinge o nível mínimo
	Poliestireno extrudado	Não atinge o nível mínimo
	Poliuretano	Não atinge o nível mínimo
Fortaleza	Lã de rocha	Não atinge o nível mínimo
	Lã de vidro	Não atinge o nível mínimo
	EPS	Não atinge o nível mínimo
	Poliestireno extrudado	Não atinge o nível mínimo
	Poliuretano	Não atinge o nível mínimo
Paulo Afonso	Lã de rocha	Mínimo
	Lã de vidro	Mínimo
	EPS	Mínimo
	Poliestireno extrudado	Mínimo
	Poliuretano	Mínimo
Campo Grande	Lã de rocha	Mínimo
	Lã de vidro	Mínimo
	EPS	Mínimo
	Poliestireno extrudado	Mínimo
	Poliuretano	Mínimo
Cuiabá	Lã de rocha	Mínimo
	Lã de vidro	Mínimo
	EPS	Mínimo
	Poliestireno extrudado	Mínimo
	Poliuretano	Mínimo
Goiânia	Lã de rocha	Não atinge o nível mínimo
	Lã de vidro	Mínimo
	EPS	Mínimo
	Poliestireno extrudado	Mínimo
	Poliuretano	Não atinge o nível mínimo
Mossoró	Lã de rocha	Mínimo
	Lã de vidro	Mínimo
	EPS	Mínimo
	Poliestireno extrudado	Mínimo
	Poliuretano	Mínimo
Maceió	Lã de rocha	Não atinge o nível mínimo
	Lã de vidro	Não atinge o nível mínimo
	EPS	Não atinge o nível mínimo
	Poliestireno extrudado	Não atinge o nível mínimo
	Poliuretano	Não atinge o nível mínimo

Em contrapartida, a cidade de Paulo Afonso se destacou pelo melhor desempenho térmico, mesmo apresentando carga térmica total elevada. Esse bom desempenho se deve aos maiores valores de PHFT, com destaque para o modelo com poliestireno extrudado. Porém, esse indicador também deve ser melhorado nessa cidade a fim de que a unidade habitacional obtenha melhor classificação.

Como o PHFT foi o indicador que depreciou a classificação dos modelos, selecionaram-se as cidades que apresentaram os piores e os melhores valores, que são Fortaleza e Paulo Afonso, respectivamente. Em Fortaleza, escolheu-se o modelo com contêineres que apresentou o pior valor de PHFT, que é o modelo com poliuretano. Em Paulo Afonso, escolheu-se o modelo com poliestireno extrudado por possuir o maior valor de PHFT.

De acordo com Oliveira e Ghisi (2023), o poliuretano apresenta melhores indicadores de desempenho térmico. No entanto, apenas a inserção de isolamento térmico na envoltória não é suficiente em climas quentes. A adoção de estratégias adicionais é necessária para melhorar os indicadores de desempenho e alcançar uma classificação superior da unidade habitacional.

De acordo com Tong et al. (2022), a escolha do isolamento térmico em edificações contêiner é variável, pois além da economia de energia, deve-se avaliar também o retorno monetário. Além disso, é importante considerar análises referentes à relação custo e emissão de CO₂.

4.2. Balanço térmico

A análise do balanço térmico é uma ferramenta que detalha e identifica os elementos construtivos que apresentam maiores ganhos e perdas de calor em uma edificação. Neste trabalho, essa análise foi fundamental para compreender o desempenho térmico da envoltória do sistema construtivo com contêiner e, conseqüentemente, averiguar em quais elementos as medidas de otimização serão mais eficientes.

De maneira similar à análise de desempenho térmico anterior, que utilizou os indicadores de carga térmica total anual, percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa e temperatura operativa máxima da unidade habitacional, o balanço térmico também foi realizado apenas para os APPs, que são a sala com cozinha conjugada e os dormitórios.

A análise foi aplicada nas envoltórias que apresentaram o maior número de casos com o pior e o melhor desempenho térmico, considerando os indicadores PHFT e carga térmica total. Foram analisados os sistemas com ventilação natural e com condicionamento de ar propostos pela norma de desempenho.

Essa análise foi realizada para as cidades Fortaleza e Paulo Afonso, que, devido às características de desempenho previamente avaliadas, apresentaram os piores e melhores resultados em relação aos indicadores. A cidade de Fortaleza apresentou os piores indicadores de PHFT para todos os materiais isolantes, com destaque para o isolamento com poliuretano. Por outro lado, Paulo Afonso obteve os melhores valores de PHFT, com destaque para o modelo com isolamento de poliestireno extrudado. Com base nesses resultados, os modelos que apresentaram o melhor e o pior valor de PHFT foram selecionados para a realização de um balanço térmico.

4.2.1. Verificação do método de cálculo do balanço térmico do ambiente

Por meio da Equação 1, descrita na seção 3.4 deste estudo, para calcular o balanço térmico a cada intervalo de tempo da simulação, foi constatado que os resultados dos ganhos e perdas convergem para valores iguais ou próximos de 0 kWh. Isso indica que o balanço térmico no ar ambiente considera todos os ganhos e perdas que ocorrem no ambiente. As Figuras 26 e 27 apresentam as trocas de calor que foram verificadas na sala com cozinha conjugada durante o dia 29 de novembro, dia que apresentou a temperatura operativa máxima em Fortaleza. A análise considera a envoltória da casa container com isolamento de poliuretano, para a cidade de Fortaleza.

As Figuras 26 e 27 mostram o equilíbrio térmico no ar descrito na Equação 8, onde os ganhos e perdas de calor se compensam, resultando em um estado de equilíbrio térmico, para o modelo com ventilação natural e condicionamento de ar, respectivamente. Esse estado ocorre porque, em um sistema termicamente equilibrado, a quantidade de calor ganha pelo ar por meio de fontes como radiação solar e ganho interno (pessoas, equipamentos, iluminação) é igual à quantidade de calor perdida por meio de processos como ventilação natural, trocas térmicas com superfícies internas e perda por infiltração. Assim, o equilíbrio térmico do ar é fundamental para validar o balanço térmico, garantindo que todos os elementos que

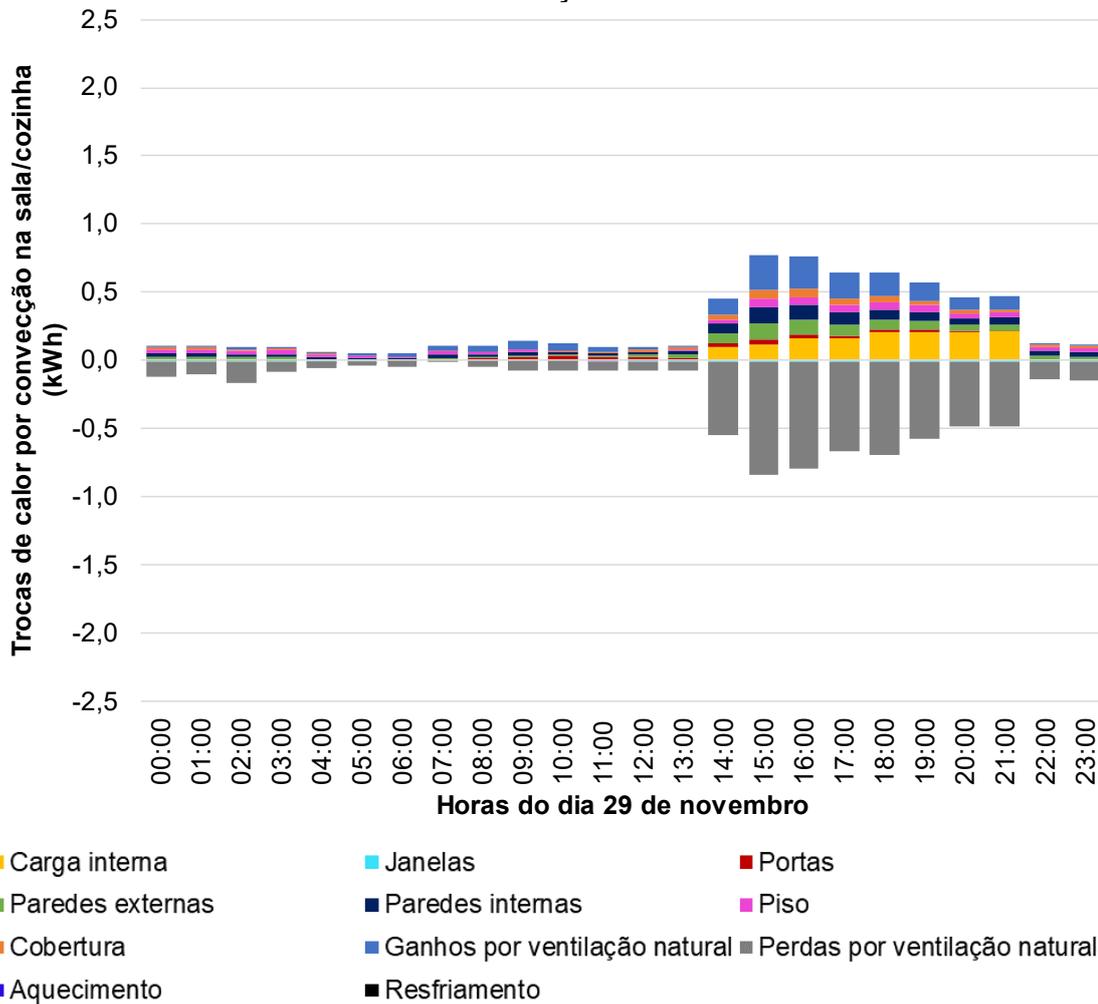
contribuem para as alterações na temperatura interna da unidade habitacional sejam identificados e categorizados.

Essa avaliação foi realizada para ambos os modelos, ventilação natural e ar-condicionado, em todos os APPs ao longo de um ano completo. A seção 4.2.2 apresenta os resultados anuais. O modelo com ventilação natural apresenta mais variações nas trocas de calor ao longo do dia, diferente do modelo com ar-condicionado, que possui trocas concentradas. Como ambos os sistemas estão sujeitos à ocupação dos usuários, é normal que se concentrem nos horários de ocupação. As maiores trocas de calor ocorrem no período da tarde, por volta das 14h, horário em que o APP começa a ser ocupado.

Em alguns horários, como às 23h, o equilíbrio térmico não é total, ou seja, há uma discrepância de -0,11 e -0,01 kWh de energia para os modelos com ar-condicionado e ventilação natural, respectivamente. Dessa forma, essa parcela de energia não é representada por nenhum dos grupos considerados no balanço térmico. Essa parcela não se encaixa em nenhum dos grupos analisados, o que pode se referir às perdas ou aos ganhos de calor pela ventilação natural. Considerando que Fortaleza é uma cidade quente e úmida, ocorrem tanto trocas de calor latente quanto sensível. Além disso, existem incertezas relacionadas ao programa de simulação, que podem resultar em erros como estes.

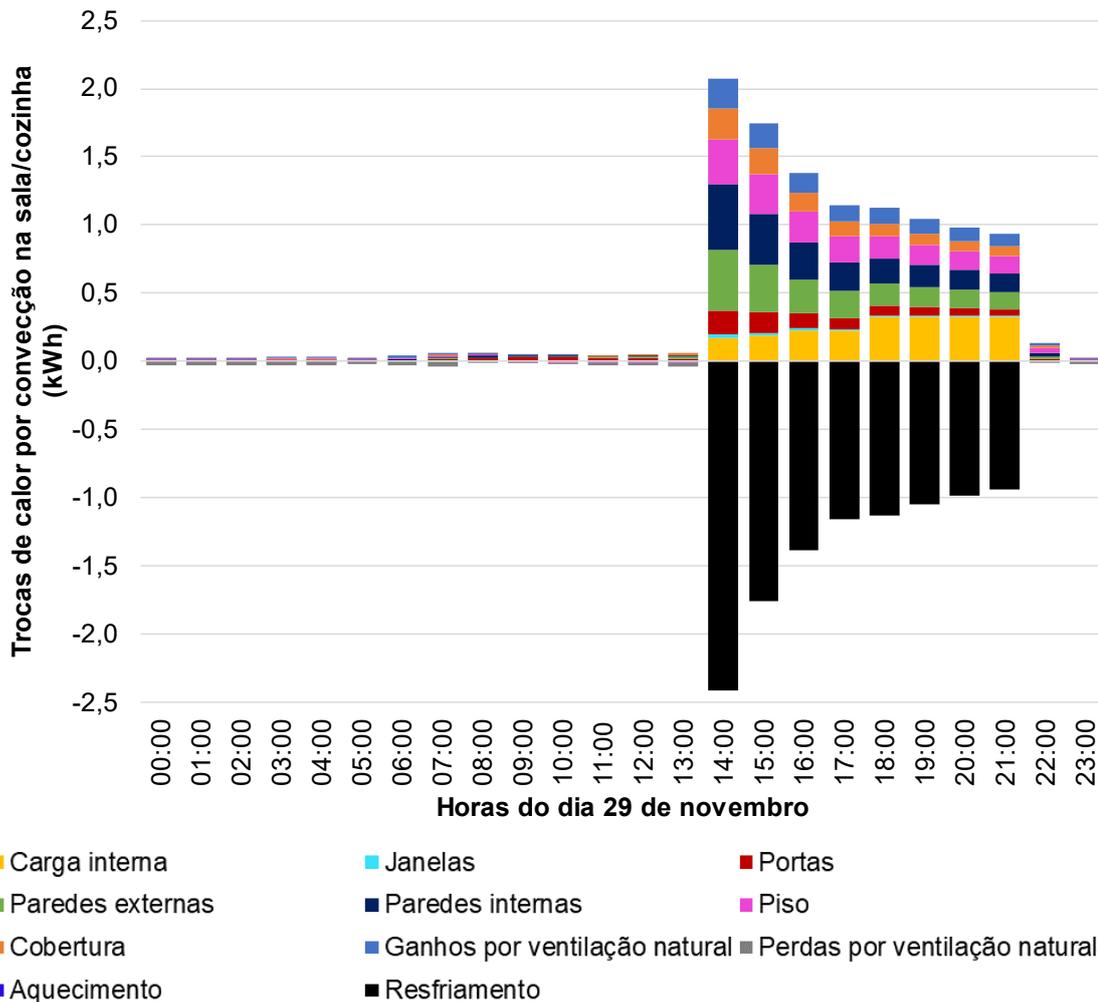
A Figura 26 mostra as trocas térmicas no modelo com ventilação natural, ou seja, sem o uso de nenhum sistema de condicionamento de ar, em Fortaleza. As janelas do APP são abertas apenas quando há ocupação. Nota-se que, mesmo quando o APP não está ocupado, ocorrem trocas de calor por meio da ventilação natural, indicando infiltrações de ar pelas esquadrias.

Figura 26 - Trocas de calor por convecção na sala/cozinha em Fortaleza no modelo com ventilação natural



A Figura 27 mostra as trocas térmicas no modelo com condicionamento de ar. Nesse modelo, há ganhos e perdas por ventilação natural devido às infiltrações de ar que ocorrem nas esquadrias da unidade habitacional. Nota-se que, ao considerar apenas o condicionamento de ar, há aumento significativo das trocas de calor.

Figura 27 - Trocas de calor por convecção na sala/cozinha em Fortaleza no modelo com condicionamento de ar



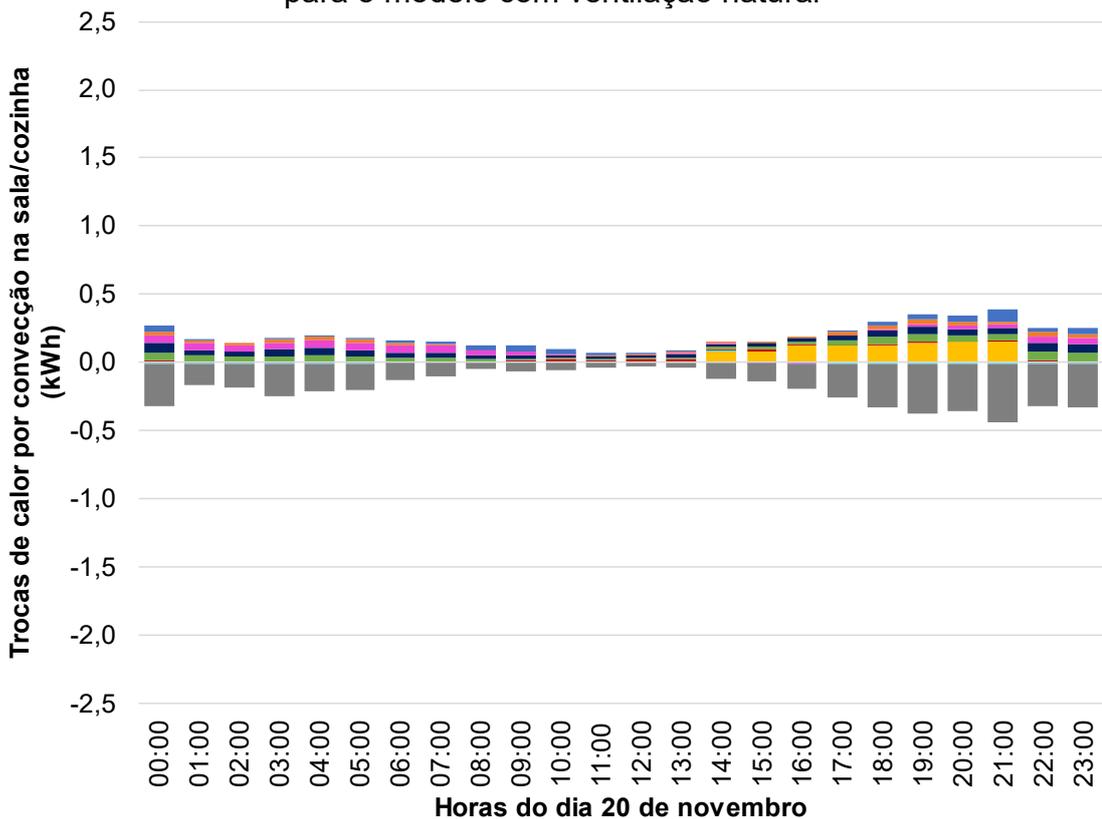
As Figuras 28 e 29 apresentam as trocas de calor para Paulo Afonso, utilizando o modelo com poliestireno extrudado. Para Paulo Afonso, foi analisado o dia 20 de novembro, que apresenta a maior temperatura operativa. Assim como em Fortaleza, Paulo Afonso também apresentou horários sem equilíbrio térmico total, como às 23h, onde foi observada uma discrepância de 0,15 kWh e -0,07 kWh de energia para os modelos com ar-condicionado e ventilação natural, respectivamente.

Assim como em Fortaleza, no APP de Paulo Afonso, as maiores trocas de calor ocorrem quando o ambiente está ocupado, ou seja, das 14h até as 21h59min. Esse fenômeno ocorre porque, de acordo com os padrões de uso dispostos na norma (ABNT, 2024a), apenas nos horários em que o APP está ocupado, as janelas estão sujeitas a abrir no modelo com ventilação natural e há o acionamento do sistema de ar-condicionado no modelo com condicionamento de ar.

Observa-se que os modelos com ventilação natural estão sujeitos a mais infiltrações e trocas de calor, principalmente porque as portas internas estão abertas, facilitando as trocas entre as zonas térmicas mesmo em horários sem ocupação. Diferentemente, no modelo com condicionamento de ar, as portas internas são consideradas fechadas. Assim, nota-se que os padrões de uso e ocupação da unidade habitacional afetam significativamente as trocas de calor dos elementos construtivos.

Por meio da Figura 28, nota-se que, no dia mais quente de Paulo Afonso, as trocas térmicas não se concentram apenas quando o APP está ocupado, diferentemente do modelo de ventilação natural em Fortaleza. Em comparação com Fortaleza, Paulo Afonso apresenta menores amplitudes nas trocas diárias de calor nos componentes e uma maior distribuição dessas trocas.

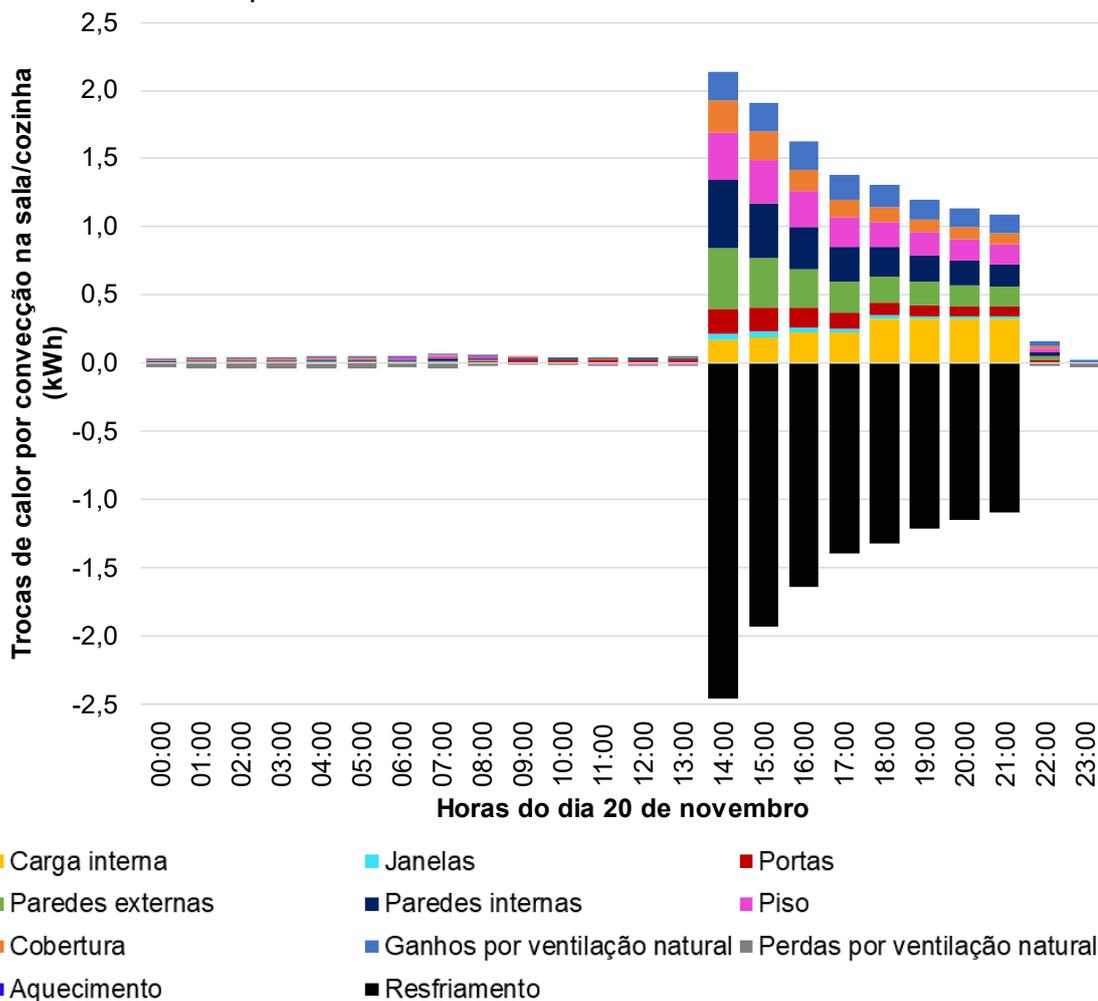
Figura 28 - Trocas de calor por convecção no ar na sala/cozinha em Paulo Afonso para o modelo com ventilação natural



- Carga interna
- Paredes externas
- Cobertura
- Aquecimento
- Janelas
- Paredes internas
- Ganhos por ventilação natural
- Resfriamento
- Portas
- Piso
- Perdas por ventilação natural

A Figura 29 mostra que o APP em Paulo Afonso possui trocas de calor similares às de Fortaleza quando há apenas o condicionamento de ar durante a ocupação do APP, resultando em aumento e concentração das trocas de calor. Portanto, destaca-se que, em Paulo Afonso, também devem ser favorecidas estratégias que promovam as perdas de calor por ventilação natural.

Figura 29 - Trocas de calor por convecção no ar na sala/cozinha em Paulo Afonso para o modelo com condicionamento de ar



4.2.2. Balanço térmico no ar dos ambientes de permanência prolongada

Também se analisou o balanço térmico dos APPs para o inverno e o verão, conforme mostrado nas Figuras 30 e 31. A Figura 30 apresenta a contribuição das categorias de elementos construtivos que mostraram diferenças significativas em Fortaleza, como as paredes externas e a cobertura. A Figura 31 faz o mesmo para Paulo Afonso.

Enquanto em Paulo Afonso os ganhos anuais na sala para o modelo com ventilação natural chegam a 2400 kWh, em Fortaleza o mesmo modelo alcança 2100 kWh.

Entre os casos simulados, constatou-se que a carga interna tem maior relevância em relação às outras categorias. A carga interna impacta significativamente nos modelos com ventilação natural, exceto no dormitório 2. Apesar disso, o dormitório 1 com o modelo de ventilação natural para a cidade de Paulo Afonso apresenta a maior contribuição de carga térmica interna. As paredes externas, a cobertura e o piso, partes que possuem contêiner em sua composição, contribuem com cerca de 39% na sala em Paulo Afonso e 41% em Fortaleza. O principal elemento da envoltória que contribui para o ganho de energia são as paredes externas, que chegam a 20%. A cobertura é uma fonte de ganho de calor, mas é o elemento da envoltória que menos contribui nesse sentido em comparação com outros elementos. Este comportamento foi corroborado pelo estudo realizado por Eli (2020) e é justificado pelo tipo de balanço térmico realizado, bem como pelo padrão de uso e ocupação do ambiente. Embora o balanço térmico por convecção não destaque as trocas por condução e radiação solar, a cobertura e as paredes externas são os elementos construtivos sujeitos às mudanças de temperatura externas e de radiação solar.

Como a convecção foi considerada na análise do balanço térmico, as janelas não obtiveram grande contribuição nas trocas de calor, mesmo tendo sido utilizado um vidro simples conforme o padrão da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a). Este elemento construtivo tem maior representatividade em análises que consideram a radiação solar, mas, como o ganho foi analisado por convecção, o ganho é representado em outras superfícies devido à radiação incidente, como o piso. É possível observar esse comportamento mais detalhadamente na Tabela 21.

Figura 30 - Balanço térmico dos APPs para o inverno e o verão para o modelo com contêiner em Fortaleza

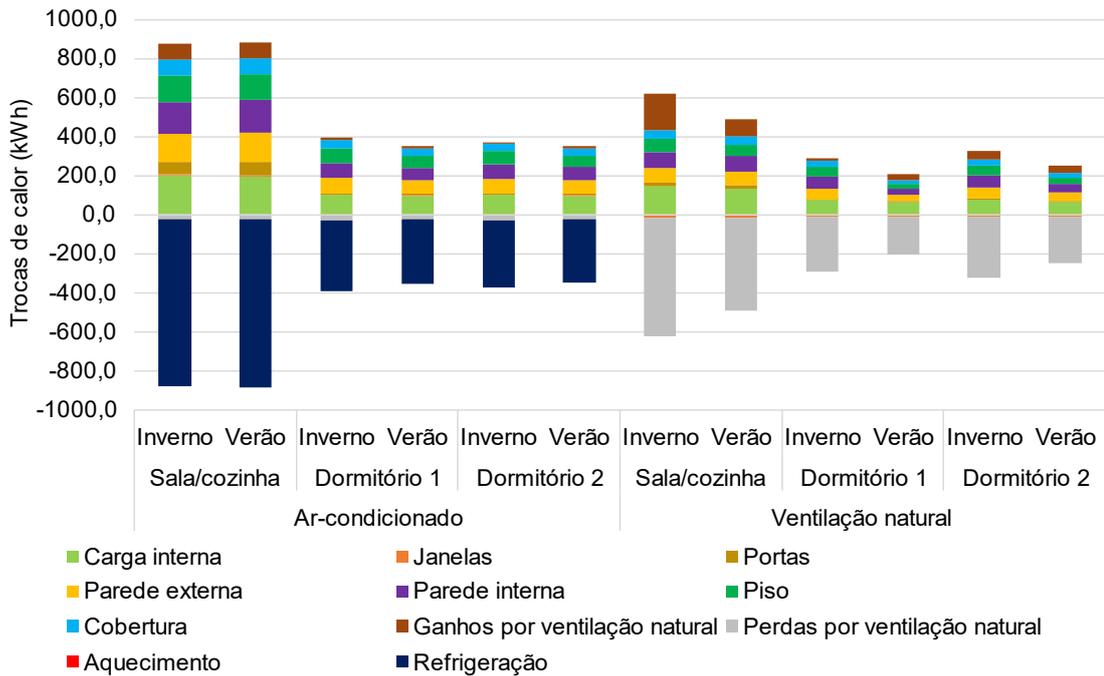
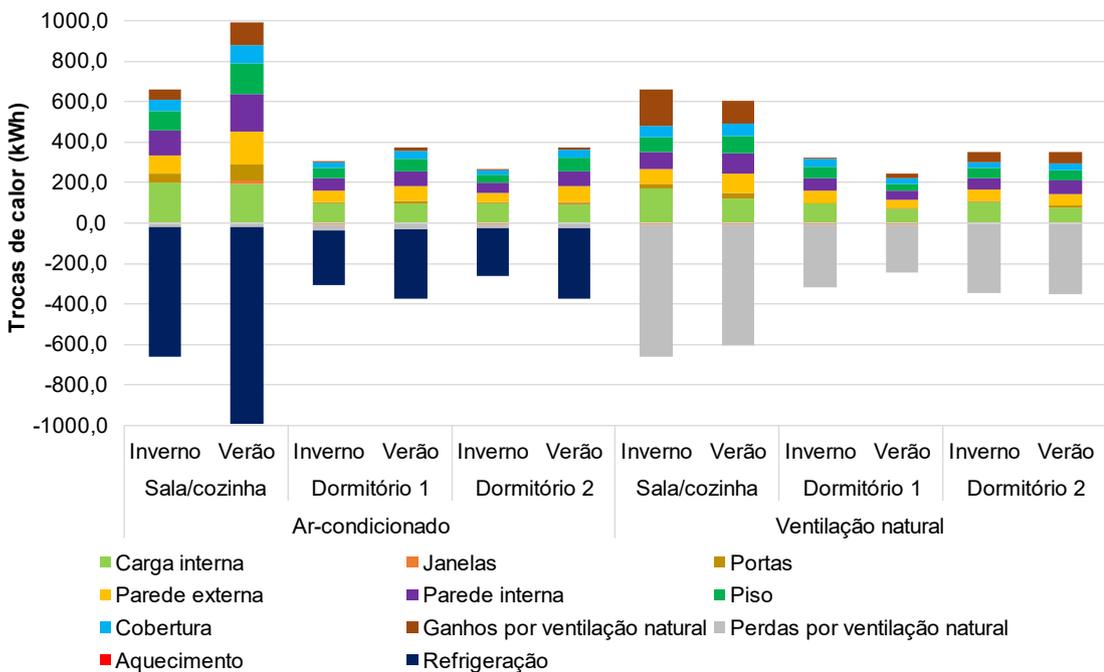


Figura 31 - Balanço térmico dos APPs para o inverno e o verão para o modelo com contêiner em Paulo Afonso



Ao analisar as perdas e os ganhos por ventilação natural, destaca-se que, especialmente na sala, há um ganho relevante pela ventilação natural, mesmo que as perdas por ventilação sejam altas. Como a sala é utilizada em horários diurnos,

quando a temperatura do ar não favorece as perdas, é necessária a implementação de estratégias que garantam a diminuição desse ganho. Na análise com condicionamento de ar, a infiltração é responsável pelos ganhos e perdas por ventilação natural.

A Tabela 21 apresenta os elementos construtivos e suas respectivas trocas de calor em cada estação do ano, assim como a parcela de trocas de calor pelas cargas internas. Por meio dessa discriminação, é possível observar quais desses elementos contribuem para os ganhos e as perdas de calor na unidade habitacional. Nas trocas por convecção, as cargas internas contribuem mais do que os componentes construtivos. Entre os elementos construtivos, as paredes internas apresentaram a maior contribuição, enquanto as janelas possuem as menores contribuições.

Tabela 21 - Trocas de calor por convecção para os componentes construtivos e cargas internas da unidade habitacional

Cidade	Modelo APPs	Estação do ano	Trocas de calor (%)											
			CI	J	P	PE	PI	PS	CO	GVN	PVN	A	R	
Fortaleza	Ar-condicionado	Sala/cozinha	Inverno	22,9	0,9	7,2	16,3	18,8	15,1	9,4	9,4	-2,5	0,0	-97,5
			Verão	21,8	1,4	7,6	16,9	18,8	15,0	9,6	9,0	-2,8	0,0	-97,2
		Dormitório 1	Inverno	25,7	-0,2	1,6	20,6	19,8	19,0	10,6	2,7	-7,9	0,0	-91,9
			Verão	27,6	0,9	1,9	19,5	18,9	17,0	10,4	3,8	-6,1	0,0	-93,9
		Dormitório 2	Inverno	26,9	-0,1	1,8	20,8	20,0	18,2	10,0	2,4	-7,5	0,0	-92,5
			Verão	27,4	0,8	1,9	20,1	19,2	17,3	10,1	3,2	-6,6	0,0	-93,4
	Ventilação natural	Sala/cozinha	Inverno	23,6	-2,6	3,4	11,3	13,6	10,8	6,6	30,7	-97,4	0,0	0,0
			Verão	26,9	-3,0	4,4	13,9	16,3	11,9	7,9	18,8	-97,0	0,0	0,0
		Dormitório 1	Inverno	25,8	-3,7	1,8	19,5	20,5	16,8	10,1	5,5	-96,3	0,0	0,0
			Verão	31,5	-5,5	1,8	15,0	16,5	11,9	8,4	15,0	-94,5	0,0	0,0
		Dormitório 2	Inverno	23,9	-2,6	1,9	17,9	19,0	15,0	8,6	13,7	-97,4	0,0	0,0
			Verão	26,5	-3,4	1,9	16,3	18,0	13,3	8,5	15,4	-96,6	0,0	0,0
Paulo Afonso	Ar-condicionado	Sala/cozinha	Inverno	30,0	-0,5	6,3	15,3	18,3	13,8	8,5	7,8	-2,7	0,0	-96,8
			Verão	19,3	1,8	7,9	16,7	18,8	15,0	9,4	11,0	-2,2	0,0	-97,8
		Dormitório 1	Inverno	33,0	-3,0	1,2	18,8	18,7	17,9	9,2	1,1	-9,2	0,0	-87,8
			Verão	26,0	1,2	1,9	19,9	19,3	17,0	10,5	4,1	-7,8	0,0	-92,2
		Dormitório 2	Inverno	37,8	-2,9	1,4	17,9	18,1	15,5	8,3	0,9	-6,4	0,0	-90,7
			Verão	25,7	0,9	1,9	20,6	19,5	18,1	10,3	3,0	-7,1	0,0	-92,9
	Ventilação natural	Sala/cozinha	Inverno	26,6	-1,7	3,3	11,4	13,3	11,2	6,3	27,9	-98,3	0,0	0,0
			Verão	20,4	-1,5	5,2	15,2	17,3	14,3	8,6	19,0	-98,5	0,0	0,0
		Dormitório 1	Inverno	31,1	-2,6	1,6	19,5	20,1	17,9	9,6	0,2	-97,4	0,0	0,0
			Verão	30,3	-3,7	1,8	17,4	17,8	14,6	9,3	8,8	-96,3	0,0	0,0
		Dormitório 2	Inverno	29,6	-1,6	1,8	16,2	17,0	14,0	7,5	14,0	-98,4	0,0	0,0
			Verão	22,7	-1,3	2,0	17,4	18,3	15,5	8,7	15,4	-98,7	0,0	0,0

Legenda: CI são as cargas internas; J são as janelas; P são as portas; PE são as paredes externas; PI são as portas internas; PS é o piso; CO é a cobertura; GVN são os ganhos por ventilação natural; PVN são as perdas por ventilação natural; A é o aquecimento por condicionamento de ar; R é o resfriamento por condicionamento de ar

A Tabela 22 considera somente os componentes construtivos da unidade habitacional, apresentando a contribuição destes no ganho de calor. Essa discriminação permite identificar quais componentes são mais interessantes para serem otimizados, orientando as intervenções de melhoria no desempenho térmico da unidade.

Tabela 22 – Participação nas trocas de calor por convecção dos componentes construtivos na unidade habitacional

Cidade Modelo	APPs	Estação do ano	Participação nos ganhos de calor nos ganhos de calor (%)							
			Janelas	Portas	Paredes externas	Paredes internas	Piso	Cobertura		
Fortaleza	Ar-condicionado	Sala/cozinha	Inverno	1,3	10,6	24,1	27,8	22,3	13,9	
			Verão	2,0	11,0	24,4	27,1	21,6	13,9	
		Dormitório 1	Inverno	-0,3	2,2	28,9	27,7	26,6	14,8	
			Verão	1,3	2,8	28,4	27,6	24,8	15,2	
		Dormitório 2	Inverno	-0,1	2,5	29,4	28,3	25,7	14,1	
			Verão	1,2	2,7	29,0	27,7	24,9	14,6	
	Ventilação natural	Sala/cozinha	Inverno	-6,0	7,9	26,2	31,6	25,1	15,3	
			Verão	-5,8	8,6	27,0	31,7	23,2	15,4	
		Dormitório 1	Inverno	-5,7	2,8	30,0	31,5	25,8	15,5	
			Verão	-11,4	3,7	31,2	34,3	24,7	17,5	
		Dormitório 2	Inverno	-4,3	3,2	29,9	31,8	25,1	14,4	
			Verão	-6,2	3,5	29,9	33,0	24,4	15,6	
	Paulo Afonso	Ar-condicionado	Sala/cozinha	Inverno	-0,8	10,2	24,8	29,7	22,4	13,8
				Verão	2,6	11,4	24,0	27,0	21,6	13,5
Dormitório 1			Inverno	-4,8	1,9	29,9	29,8	28,5	14,6	
			Verão	1,7	2,7	28,5	27,7	24,4	15,0	
Dormitório 2			Inverno	-5,0	2,4	30,7	31,0	26,6	14,2	
			Verão	1,3	2,7	28,9	27,3	25,4	14,4	
Ventilação natural		Sala/cozinha	Inverno	-3,9	7,5	26,0	30,4	25,6	14,4	
			Verão	-2,5	8,8	25,7	29,3	24,2	14,6	
		Dormitório 1	Inverno	-3,9	2,4	29,5	30,4	27,1	14,5	
			Verão	-6,5	3,1	30,4	31,1	25,5	16,3	
		Dormitório 2	Inverno	-2,9	3,3	29,5	31,0	25,5	13,7	
			Verão	-2,1	3,3	28,7	30,2	25,6	14,4	

4.3. Otimização

A partir dos balanços térmicos realizados, nota-se que a cobertura e as paredes externas são responsáveis por uma parcela significativa das trocas de calor na residência. Assim, foram propostas otimizações com a diminuição da absorvância e a inserção de sombreamento nas janelas. Mesmo que as janelas não tenham apresentado ganhos significativos no balanço térmico, é importante ressaltar que o balanço térmico realizado foi feito por convecção. Dessa forma, os ganhos por radiação nas janelas refletem em outros componentes, como piso e paredes internas.

Essas otimizações foram propostas para as cidades que apresentaram o melhor e o pior desempenho, de acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2024a).

Destaca-se que, devido às particularidades de uma edificação contêiner, alguns parâmetros foram alterados e novos elementos construtivos foram adicionados. Em seguida à realização das simulações com as otimizações aplicadas à residência, uma segunda análise dos indicadores de desempenho foi realizada. As otimizações foram baseadas na Cartilha de Casos Otimizados (LABEEE; SNH; MDR, 2022).

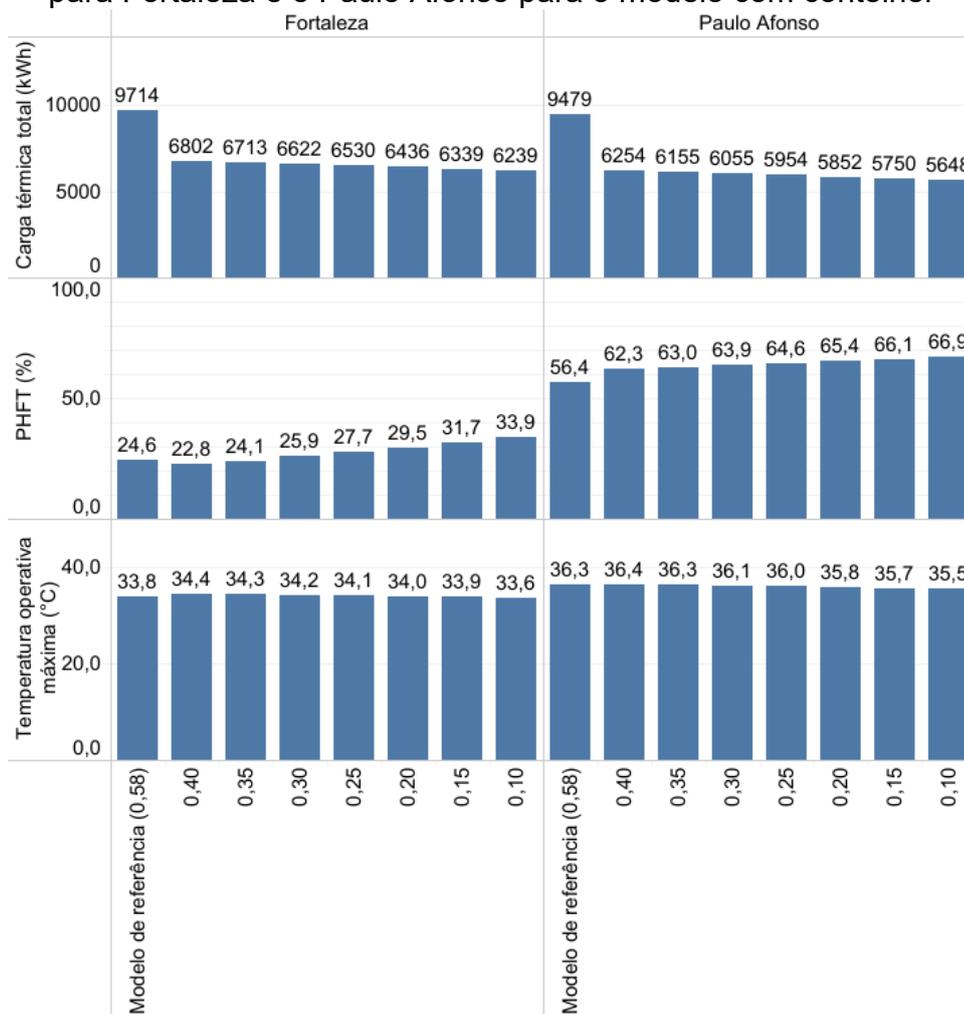
4.3.1. Otimização da absorvância

Por meio da Cartilha de Casos Otimizados (LABEEE; SNH; MDR, 2022), foram implementadas algumas diretrizes construtivas nos modelos selecionados. Como Fortaleza se encontra na zona bioclimática 8 e Paulo Afonso na 7, algumas diretrizes coincidem, como a absorvância da cobertura e das paredes externas, que deve ser menor que 0,4. Para avaliação dessa diretriz, adotaram-se valores de 0,1 a 0,4. Essa otimização foi feita para o pior e melhor modelo, que são, respectivamente, o modelo com poliuretano em Fortaleza e o com poliestireno extrudado em Paulo Afonso.

Na Figura 32, são apresentados os indicadores de desempenho térmico. Observa-se que a carga térmica reduziu com a redução da absorvância. A variação entre a menor e a maior absorvância é de 563 e 606 kWh/ano para Fortaleza e Paulo Afonso, respectivamente. Porém, com a otimização da absorvância, o modelo com contêiner de absorvância 0,40 possui carga térmica menor do que o modelo com contêiner sem otimização. A diferença entre o modelo sem otimização e com melhorias na absorvância é de 307 kWh/ano para Fortaleza e 348 kWh para Paulo Afonso, respectivamente. Destaca-se que o modelo de referência é o mesmo disposto na norma, que possui absorvância igual a 0,58 nas paredes externas.

Ao observar o indicador de PHFT para os modelos com otimização, nota-se que os modelos com contêiner na cidade de Fortaleza possuem valores superiores aos de referência quando a absorvância é igual ou menor a 0,30. Essa variação na absorvância também afeta os modelos com contêiner na cidade de Paulo Afonso. No entanto, a maior absorvância otimizada nos modelos com contêiner, que é 0,40, apresenta PHFT menor do que o modelo de referência, assim como ocorre nos modelos sem otimização.

Figura 32 – Indicadores de desempenho térmico com otimizações da absorvância para Fortaleza e o Paulo Afonso para o modelo com contêiner



A temperatura operativa máxima para a cidade de Fortaleza, nos modelos com otimização de absorvância, é maior do que a do modelo de referência, com exceção do modelo com absorvância 0,10. Paulo Afonso apresenta comportamento similar, porém somente para as absorvâncias 0,35 e 0,40; para as outras absorvâncias, a temperatura operativa máxima é menor do que a do modelo de referência.

Essa variação ocorre devido ao impacto da absorvância na capacidade dos materiais da envoltória de absorverem e dissiparem calor. Uma absorvância mais baixa, como 0,10, reduz significativamente a quantidade de calor absorvido pela superfície externa, resultando em menores temperaturas internas e, conseqüentemente, menor temperatura operativa máxima.

Por outro lado, uma absorvância mais alta, como 0,35 e 0,40, permite que mais calor seja absorvido pela superfície externa. Esse calor pode ser transferido para o

interior da unidade habitacional, aumentando a temperatura operativa máxima. No caso de Paulo Afonso, os modelos com absorptâncias intermediárias (0,35 e 0,40) ainda apresentam temperaturas operativas mais altas devido a esse maior ganho de calor, enquanto as absorptâncias mais baixas resultam em temperaturas operativas mais baixas.

Essa melhoria se apresentou positiva, principalmente para Fortaleza, que resultou no alcance mínimo de desempenho térmico. Paulo Afonso, que sem otimização possuiu o desempenho mínimo, apesar de obter melhorias nos indicadores de desempenho, não alcançou uma classificação superior à mínima pela avaliação de desempenho térmico da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a). A Tabela 23 apresenta as classificações de desempenho com otimização na absorptância.

Destaca-se que, mesmo com melhorias, a temperatura operativa máxima apresenta valores muito elevados. Assim, mudar apenas a absorptância das paredes externas e da cobertura não é suficiente para melhorar esse indicador, que, assim como o PHFT, é calculado apenas para o modelo com ventilação natural.

Tabela 23 - Classificação de desempenho térmico da NBR 15575-1 com otimização da absorptância nos modelos com contêineres

Cidade	Absortância	Classificação NBR 15575-1
Fortaleza	0,10	Mínimo
	0,15	Mínimo
	0,20	Mínimo
	0,25	Mínimo
	0,30	Mínimo
	0,35	Mínimo
	0,40	Mínimo
	Paulo Afonso	0,10
0,15		Mínimo
0,20		Mínimo
0,25		Mínimo
0,30		Mínimo
0,35		Mínimo
	0,40	Mínimo

De acordo com Cândido, Dornelles e Lukiantchuki (2023), para zonas bioclimáticas mais quentes e com menor latitude, a utilização de absorptâncias mais baixas contribui para a melhoria do desempenho térmico da edificação. A Figura 32 e a Tabela 23 corroboram com essa afirmação. No entanto, é importante ressaltar que isso requer manutenção frequente para evitar a degradação térmica, que é a redução

da eficiência dos materiais e componentes em isolar ou controlar a transferência de calor ao longo do tempo.

Assim, apesar das melhorias apresentadas, a influência da exposição ao intemperismo natural também deve ser investigada para avaliar a capacidade de absorção e reflexão da radiação solar pela unidade habitacional (Dornelles; Araújo, 2022; Coelho; Gomes; Dornelles, 2017). Além disso, Caldas, Abreu-Harbach e Hora (2020) destacam que para cidades localizadas nas antigas zonas bioclimáticas 7 e 8, como Paulo Afonso e Fortaleza, respectivamente, a absorvância dos materiais influencia significativamente o desempenho térmico de edifícios construídos com contêineres.

4.3.2. Otimização com veneziana

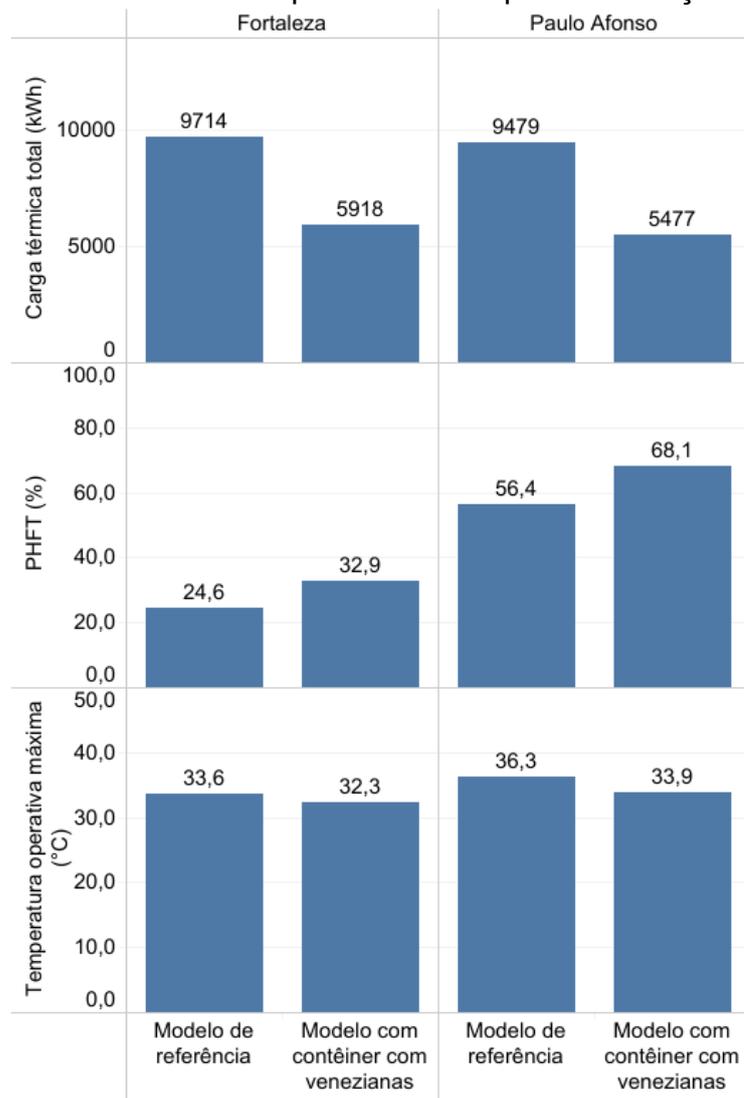
Outra diretriz adotada foi a inserção de venezianas nas janelas. Como está descrito na subseção 4.3, as janelas não contribuem diretamente nos ganhos por convecção, porém a radiação solar que passa pelas janelas afeta superfícies, como piso e paredes internas. Assim, foram instaladas venezianas nos dormitórios e na sala conjugada com a cozinha. O sistema de venezianas foi instalado nas aberturas dos APPs com funcionamento de abertura e fechamento detalhados pela NBR 15575-1 (ABNT, 2024a). De acordo com a norma, as venezianas devem ser abertas quando a temperatura de bulbo seco externa for menor do que 26°C, e fechadas quando for maior do que 26°C. Destaca-se que as venezianas foram consideradas somente para os modelos reais, que são os modelos com contêineres, e não para o modelo de referência. A Figura 33 apresenta os índices de desempenho, que são: carga térmica total, PHFT e temperatura operativa máxima. Assim, são realizadas comparações da otimização com venezianas do pior e do melhor modelo com contêiner em relação ao modelo de referência.

Ao avaliar os indicadores da seção 4.1, nota-se que a carga térmica sofreu redução para ambas as cidades. Em Fortaleza, a redução foi de 1191 kWh em relação ao modelo com poliuretano, enquanto em Paulo Afonso foi de 1125 kWh em relação ao modelo com poliestireno extrudado. Nota-se também que somente com a inserção de venezianas, a carga térmica total reduziu mais do que apenas mudando a absorvância das paredes externas e da cobertura para ambas as cidades.

Ao realizar a análise com ventilação natural, Fortaleza e Paulo Afonso obtiveram aumentos de 14,9% e 7,9%, respectivamente, para o PHFT. Porém, mesmo com esse aumento, o índice de PHFT ainda é menor do que 50% para Fortaleza, logo, somente essa estratégia não é suficiente para essa cidade. Paulo Afonso obteve um aumento menor, porém ainda superior ao da otimização da absorvância.

Ressalta-se que os modelos de referência utilizados para a comparação são os mesmos apresentados na Figura 23, cada um para sua respectiva cidade de análise. Assim, nessa comparação, ambos os modelos possuem a mesma absorvância de referência (0,58). Porém, os modelos com contêineres estão otimizados com venezianas nas janelas dos APPs.

Figura 33 - Indicadores de desempenho térmico para otimização com veneziana



As temperaturas operativas máximas reduziram 2,4°C para Fortaleza e 2,8°C em Paulo Afonso, mas ainda assim permanecem muito altas. Assim, destaca-se a necessidade de medidas adicionais para melhorar o desempenho térmico.

Para ambas as cidades com otimização, esse indicador é menor do que o do modelo de referência, diferente dos modelos sem nenhuma otimização. Outro destaque é a diferença entre esse indicador para o modelo com otimização de absorvância e o modelo com veneziana. Com venezianas, as temperaturas máximas são menores do que no modelo com a menor absorvância.

Apesar da otimização com venezianas ter se mostrado mais promissora do que a alteração das absorvâncias, nenhum dos modelos conseguiu atingir o nível intermediário. Porém, Fortaleza conseguiu alcançar o nível mínimo exigido. O Quadro 3 mostra as classificações pela NBR 15575-1 dos modelos com veneziana.

Quadro 3 - Classificação de desempenho térmico da otimização com venezianas

Cidades	Classificação NBR 15575-1
Fortaleza	Mínimo
Paulo Afonso	Mínimo

De acordo com Souza, Soares e Alves (2018), o sombreamento com venezianas apresenta resultados superiores em relação a outros tipos de dispositivos, especialmente nas zonas bioclimáticas 6 a 8. No entanto, o uso inadequado dessa estratégia pode afetar o conforto ambiental dos ocupantes do APP, principalmente o visual.

A presença de venezianas tem impactos significativos no desempenho térmico de uma tipologia construtiva, conforme observado na Figura 30 e no Quadro 3. No entanto, a otimização com venezianas deve considerar as necessidades específicas de cada caso construtivo avaliado (Chvatal; Marques, 2016).

4.3.3. Otimização da absorvância com venezianas

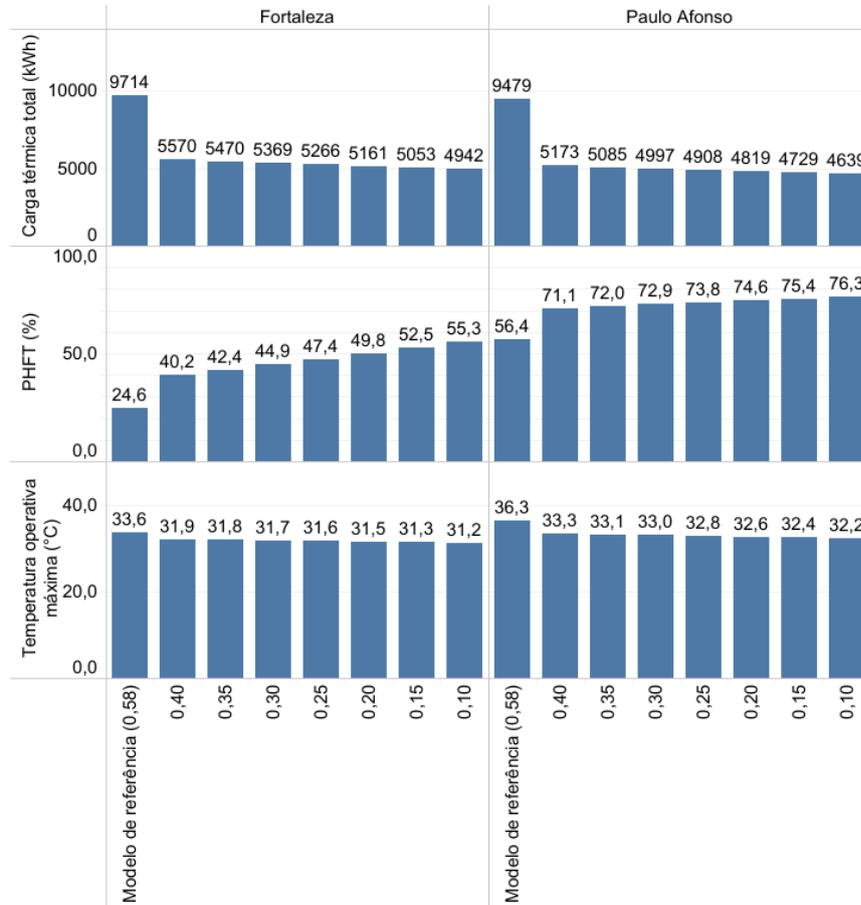
Ao adotar as duas otimizações, pode-se verificar se as cidades podem atingir os níveis intermediário e superior. A otimização com venezianas mostrou-se mais eficiente do que a alteração da absorvância. Porém, ao implementar as duas, obtiveram-se novos indicadores de desempenho térmico, que estão apresentados na Figura 34. Ressalta-se que o modelo de referência é o determinada pela NBR 15575-1 (ABNT, 2024a)

Ao comparar com os modelos sem otimizações, observa-se que há melhorias significativas em todos os indicadores. A maior carga térmica do modelo com ambas as otimizações apresenta uma diferença de cerca de 1500 kWh e 1400 kWh para Fortaleza e Paulo Afonso, respectivamente. Em relação ao modelo de referência estabelecido pela NBR 15575-1 (2024a), pode-se observar que a redução de carga térmica para a cidade de Fortaleza varia entre 40% e 55%, de acordo com a absorvância das paredes externas e da cobertura, enquanto para Paulo Afonso varia de 71% a 76%.

Ao analisar o PHFT, observa-se uma melhoria na qualidade térmica interna, especialmente em Fortaleza, que, sem otimização, apresenta 18,05% de PHFT no modelo com poliuretano. Além disso, a temperatura operativa máxima foi menor para todas as variações da absorvância. Essas estratégias se mostraram essenciais para a garantia de um desempenho térmico mais adequado.

Paulo Afonso, que obteve o melhor PHFT entre os modelos sem otimizações, também apresentou melhorias significativas, com aumento nos índices de PHFT e diminuição da temperatura operativa máxima. A temperatura interna do contêiner da cidade, em comparação com o modelo sem melhorias, apresentou aumento de 10,84% no PHFT e redução de 3,61°C na temperatura operativa máxima em relação ao modelo otimizado com maior absorvância. A Tabela 24 apresenta a classificação final de desempenho térmico.

Figura 34 - Indicadores de desempenho térmico com veneziana e otimização da absorção



Apesar das melhorias, a temperatura operativa máxima ainda permanece elevada. No entanto, destaca-se que essa temperatura máxima é obtida pelo método com ventilação natural e representa a máxima anual, sendo assim um valor extremo. Observa-se também que, com o aumento do PHFT, as temperaturas operativas anuais estão dentro da faixa determinada pela Tabela 13.

Nota-se que mesmo com as melhorias, Fortaleza não conseguiu atingir o nível intermediário e superior da NBR 15575-1 (ABNT, 2024) para nenhum dos modelos otimizados, indicando que outras estratégias devem ser adotadas. Apesar dos indicadores de redução de carga térmica e temperatura operativa máxima permitirem uma classificação intermediária, o indicador PHFT não atendeu ao critério desse nível de desempenho. Para uma classificação superior, além do indicador PHFT, a redução de carga térmica total deve ser maior.

Paulo Afonso, por outro lado, conseguiu a classificação intermediária para todos os modelos otimizados. Para obter a classificação superior, o modelo deveria

ter obtido uma redução de carga térmica total maior, pois tanto o indicador de PHFT quanto o de temperatura operativa estavam adequados para a classificação superior. Destaca-se que os dados referentes ao modelo de referência estão apresentados na subseção 4.1.

Tabela 24 - Classificação de desempenho térmico final com otimizações de absorvância e com veneziana

Cidade	Absortância dos modelos com veneziana	Classificação final pela NBR 15575-1
Fortaleza	0,10	Mínimo
	0,15	Mínimo
	0,20	Mínimo
	0,25	Mínimo
	0,30	Mínimo
	0,35	Mínimo
	0,40	Mínimo
	Paulo Afonso	0,10
0,15		Intermediário
0,20		Intermediário
0,25		Intermediário
0,30		Intermediário
0,35		Intermediário
0,40		Intermediário

4.4. Síntese dos resultados

Elrayies (2017) destaca que os requisitos energéticos e os impactos ambientais de uma edificação contêiner estão em um conflito de julgamentos, opiniões e resultados, mesmo em estudos baseados em medições. Este estudo, por meio de seus resultados, constata que a utilização de diferentes estratégias de otimização traz resultados térmicos e energéticos variados em residências feitas com contêineres. Os resultados variam de acordo com o clima da cidade, o material isolante da envoltória e a estratégia de otimização adotada. Assim, esse tipo de construção pode proporcionar habitações dignas em climas quentes em projetos que visem a reutilização de contêineres.

A umidade relativa de uma cidade é determinada pela tipologia climática. Assim, fatores como geografia, precipitação e altitude afetam a umidade relativa do ar de uma localidade. As cidades que apresentam alta umidade relativa do ar não atingiram o nível mínimo de desempenho, evidenciando a necessidade de otimizações para contornar o baixo desempenho térmico da unidade habitacional. Em contraste, as cidades com umidades relativas mais baixas obtiveram a classificação mínima sem a necessidade de otimizações.

A influência climática no desempenho das edificações é respaldada por Nadeem et al. (2021), que enfatizam o papel do clima no potencial de economia de energia proporcionado pelo envelope das edificações. Os resultados das simulações confirmam que o clima quente exerce impacto significativo nos indicadores de desempenho térmico de residências, especialmente aqueles que dependem da ventilação natural.

ProjetEEE (2024) salienta que a utilização de elevada inércia térmica na envoltória auxilia na redução das flutuações térmicas diárias. É destacado que a edificação deve ser fechada durante o dia para minimizar a entrada de calor. No entanto, no cronograma determinado pela NBR 15575-1 (ABNT, 2024a), essa recomendação está sujeita a não ser seguida. Nesta pesquisa, a utilização de diferentes materiais isolantes resultou na redução da carga térmica, mas, mesmo assim, implicou no aumento da temperatura operativa máxima e na diminuição do PHFT em relação ao modelo de referência.

Nos modelos com contêiner, os elementos construtivos que possuem maior contato com a radiação solar são as paredes externas, a cobertura, as janelas e as portas da sala e da cozinha. Essa informação, por si só, pode explicar a frequência elevada com que as residências feitas com contêineres não alcançaram o nível mínimo de desempenho térmico. Porém, avaliando os componentes por meio do balanço térmico por convecção, nota-se que a carga térmica interna e as paredes internas são os elementos que mais contribuem. No entanto, Eli (2020) destaca que, em balanços térmicos por convecção, não são consideradas as trocas por radiação, o que afeta elementos secundários como o piso e as paredes internas.

A utilização de otimizações, que são necessárias mesmo para construções tradicionais em climas quentes, melhorou os indicadores de desempenho térmico. No entanto, mesmo com todas as otimizações, não foi possível alcançar o nível de desempenho superior da norma, apenas o intermediário. Observa-se que há diferenças nos indicadores de desempenho quando as otimizações são analisadas separadamente. A inserção de venezianas nas janelas dos APPs mostrou-se mais eficiente para a redução da temperatura operativa máxima e o aumento do PHFT do que melhorias na absorvância das paredes externas e da cobertura. Ayodele et al. (2020) destacam que proteções para sombreamento de janelas são melhores para a redução dos ganhos solares e das temperaturas internas.

Ayodele et al. (2020) conduziram uma revisão sobre intervenções de *retrofit* para residências em climas quentes e úmidos. Em sua análise, destacam que as melhorias são mais eficazes quando integradas ao envelope da edificação, especialmente no envidraçamento. O estudo evidencia que a redução do ganho de calor é maior quando há mudanças nas áreas envidraçadas.

Ao analisar estudos que avaliaram o desempenho de edificações contêiner, a maioria focou nos materiais isolantes utilizados na envoltória, como Elrayies (2017), Zafra et al. (2021), Hassan et al. (2022), Taleb, Elsebaei e El-Attar (2019), e Bertolini e Guardigli (2020). Esses estudos, assim como este, observaram que o comportamento térmico de uma edificação contêiner está sujeito à localidade, ao material isolante e à finalidade da edificação. Neste trabalho, avaliou-se uma residência contêiner conforme diretrizes da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a), e, assim, as limitações da norma também afetam os indicadores de desempenho térmico.

5. Conclusões

A construção com contêineres no Brasil representa uma mudança significativa na forma de construir, pois combina as vantagens de uma construção modular com as necessidades dos usuários. A flexibilidade do uso de contêineres em diversos projetos arquitetônicos oferece um potencial para suprir a demanda habitacional no Brasil. No entanto, há o desafio técnico de tornar esses módulos náuticos habitáveis do ponto de vista térmico, especialmente em climas quentes. Embora regiões com temperaturas elevadas apresentem desafios para a maioria dos modelos construtivos, é fundamental que o projeto considere as variáveis que afetam os elementos construtivos da edificação para otimizar e viabilizar a implementação dos módulos.

No processo de projeto e planejamento, o uso de simulações computacionais auxilia na tomada de decisões referentes tanto aos aspectos térmicos quanto energéticos do projeto. Devido às características térmicas do aço *corten*, as simulações de edificações são uma ferramenta essencial para que os projetistas tomem decisões baseadas nos parâmetros térmicos e energéticos da residência. A construção e a manutenção dessas edificações exigem cuidado, uma vez que a execução deve garantir um ambiente termicamente adequado, além de permitir a identificação de patologias na envoltória da edificação. Embora a implementação de contêineres possa enfrentar preconceitos iniciais, os benefícios do uso desses módulos podem ser significativos, especialmente se houver redução no consumo de energia com as melhorias dos módulos.

As residências que inicialmente atenderam ao nível mínimo revelam uma ampla diversidade de locais onde apenas a implementação de isolamento térmico contribui para o controle térmico. No entanto, ao analisar os componentes construtivos por meio do balanço térmico por convecção, observa-se que há ganhos de calor por convecção principalmente nas paredes internas. Isso indica que outras zonas térmicas também estão contribuindo para o aumento de calor no ambiente. Ao aplicar melhorias na edificação, é possível identificar quais indicadores de desempenho apresentam melhorias significativas. No entanto, é necessário ressaltar que os indicadores obtidos por meio da ventilação natural, como o PHFT e a temperatura operativa máxima, são os que apresentam maiores desafios. A cidade de Fortaleza, no modelo com contêiner e isolamento térmico de poliuretano, apresentou PHFT de 18,1%, enquanto Paulo

Afonso se destacou com PHFT de 60,2% no modelo com contêiner e isolamento de poliestireno extrudado.

Por meio das otimizações propostas na Cartilha de Casos Otimizados (LABEEE; SNH; MDR, 2022), foram avaliadas as melhorias viáveis para serem adotadas nesse modelo construtivo. Alterar apenas a cor da envoltória é suficiente para melhorar o desempenho térmico da residência. No entanto, a adoção de sombreamentos nas janelas mostrou-se ainda mais eficaz, pois os indicadores de desempenho térmico, que dependem da ventilação natural, apresentaram melhorias superiores em comparação à simples alteração da absorvância. Ao combinar ambas as otimizações, observou-se que o modelo com o maior PHFT inicial atingiu o nível intermediário da norma de desempenho, enquanto o modelo com o menor valor inicial alcançou apenas o nível mínimo.

Os resultados demonstram que o clima das cidades exerce influência considerável no potencial de economia de energia. Cidades com alta umidade relativa do ar, em sua maioria, não atingiram os níveis mínimos de desempenho inicialmente. Essas áreas apresentam temperaturas externas elevadas, e ao analisar o PHFT dessas cidades, que está sujeito às faixas de temperatura normativas (ABNT, 2024a), o indicador não atende ao critério solicitado. Nessas cidades, é necessário implementar otimizações na envoltória dos contêineres para cumprir os requisitos mínimos de desempenho. Mesmo com as otimizações, o pior caso ainda precisa melhorar o indicador de PHFT para alcançar o nível intermediário de desempenho, enquanto o melhor caso necessita de uma redução maior na carga térmica total para obter desempenho superior. Nos modelos com contêineres em Paulo Afonso e Fortaleza, a carga térmica total mínima alcançada após a aplicação das otimizações foi de 4639 e 4942 kWh por ano, respectivamente.

Quanto aos indicadores de temperatura operativa máxima, embora sejam cumpridos em todos os modelos e para todas as cidades, os valores se mostraram elevados e até mesmo insalubres termicamente. Esse indicador apresenta melhorias significativas com a adoção de sombreamento nas janelas dos contêineres analisados. Ao analisar o indicador de carga térmica, observa-se que ele é atendido até mesmo no pior modelo, mas apenas para o nível intermediário.

O uso de contêineres está se tornando cada vez mais comum em diversas regiões. Porém, apesar de apresentarem resultados mais satisfatórios em regiões

frias e secas, as residências localizadas em cidades com temperaturas médias mais elevadas no Brasil apresentam resultados variados quando avaliadas conforme os critérios da NBR 15575-1 (ABNT, 2024a). Essas variações nos resultados podem ser atribuídas a diversos fatores, como a radiação solar incidente, a umidade relativa, a pressão atmosférica e a precipitação, o excesso de isolamento das paredes externas, entre outros.

A troca de materiais tradicionais pelo aço proveniente de contêineres nos climas quentes brasileiros não se revelou tão interessante para algumas localidades. Apenas em determinadas regiões com climas quentes é possível obter o nível de desempenho intermediário, sendo necessárias outras estratégias para alcançar o nível superior. Devido ao clima quente e úmido de determinadas regiões, além das estratégias apresentadas neste trabalho, outras abordagens devem ser exploradas. Portanto, a utilização desse método construtivo em climas quentes deve considerar a adoção de estratégias passivas desde a sua concepção.

5.1. Limitações do trabalho

As limitações desta pesquisa estão relacionadas principalmente aos seguintes aspectos:

- A inclusão de outras cidades com climas quentes e diferentes amplitudes térmicas na simulação é importante para a obtenção de dados mais abrangentes e representativos. Isso permitirá definições e avaliações mais robustas das características das regiões quentes no Brasil, principalmente para edificações contêineres;
- A utilização de um modelo habitacional térreo com parâmetros fixos foi necessária para as avaliações realizadas. No entanto, análises em residências com mais de um pavimento, considerando a posição e o tamanho das aberturas, além da disposição dos cômodos nesses ambientes, possibilitaria a avaliação de outras estratégias de resfriamento passivo;
- As propriedades do solo estão sujeitas a variações significativas em determinadas regiões. Portanto, medições específicas são necessárias para obter resultados mais precisos em cada cidade;
- A análise se concentrou em cronogramas de uso e ocupação determinados pela norma, como ocupação do ambiente, *setpoints* de aquecimento e refrigeração,

uso do ambiente, e avaliações individuais dos sistemas de resfriamento por ventilação natural e ar-condicionado, entre outros. Explorar outros métodos de uso e ocupação dos usuários em climas quentes seria interessante para verificar como o comportamento do usuário pode afetar edificações feitas com contêineres.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Algumas sugestões para trabalhos futuros sobre o uso de contêineres em edificações residenciais:

- Investigar outras estratégias passivas e seu impacto no desempenho térmico e energético de edifícios residenciais feitos com contêineres;
- Investigar o uso de diferentes padrões de uso e ocupação e como eles afetam os indicadores de desempenho térmico das edificações;
- Investigar outros modelos de edificação utilizando contêineres e quais alterações projetuais podem melhorar o desempenho térmico em climas quentes;
- Investigar o desempenho térmico das edificações com contêineres ao variar as transmitâncias das paredes da edificação por meio da variação das espessuras dos materiais isolantes, em climas quentes;
- Investigar o desempenho térmico das edificações considerando cenários de clima futuro, levando em conta possíveis mudanças climáticas e suas implicações.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, 2005a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-2:2005 Versão Corrigida:2008**. Rio de Janeiro, 2005b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações Parte 2 - Componentes construtivos das edificações - Resistência e transmitância térmica - Métodos de cálculo (ISO 6946:2017 MOD)**. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT TR 15575-1-1:2021 Versão Corrigida:2021: Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1-1: Base-padrão de arquivos climáticos para a avaliação do desempenho térmico por meio do procedimento de simulação computacional**. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2024a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT TR 15220-3-1: Desempenho térmico de edificações Parte 3-1: Zoneamento bioclimático por desempenho — Lista de cidades brasileiras**. Rio de Janeiro, 2024b.
- Agência Nacional de Transportes Aquaviário - ANTAQ. **Estatístico Aquaviário**. 2023. Disponível em: <https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/movcontainer.html#>. Acesso em: 26 jun. 2023.
- AKANBI, Lukman A.; OYEDELE, Lukumon O.; AKINADE, Olugbenga O.; AJAYI, Anuoluwapo O.; DELGADO, Manuel Davila; BILAL, Muhammad; BELLO, Sururah A. Salvaging building materials in a circular economy: a bim-based whole-life performance estimator. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 129, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.026>.
- AL MINDEEL, T.; SPENTZOU, E.; EFTEKHARI, M. Energy, thermal comfort, and indoor air quality: Multi-objective optimization review. **Renewable and**

- Sustainable Energy Reviews**, v. 202, p. 114682, 2024. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114682.
- AL-SAAD, Saleh N.; AL-JABRI, Khalifa S. Optimization of envelope design for housing in hot climates using a genetic algorithm (GA) computational approach. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101712, 2020. DOI: 10.1016/j.job.2020.101712.
- ALVARES, Clayton Alcarde; STAPE, José Luiz; SENTELHAS, Paulo Cesar; DE MORAES GONÇALVES, José Leonardo; SPAROVEK, Gerd. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. a. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- ALVES, José Victor Pontes; FERREIRA, Rosimery Da Silva; CAVALCANTE, Roberta Paiva. Containers – uma nova alternativa para a construção civil. Estudo direcionado para projetos residenciais. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, v. 1, n. 46, p. 19, 2019. DOI: 10.18265/1517-03062015v1n46p19-32.
- AMORIM, Alexandre Cypreste; CARLO, Joyce Correna. Análise das propostas de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro: estudo de caso de Colatina, ES. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 373–391, 2017. DOI: 10.1590/s1678-86212017000100140.
- AYODELE, Tunmise Timothy; TAKI, Ahmad; OYINLOLA, Muiyiwa; SUBHES, Bhattacharyya. A Review of Retrofit Interventions for Residential Buildings in Hot Humid Climates. **International Journal of Environmental Science and Development**, v. 11, n. 5, p. 251–257, 2020. DOI: 10.18178/ijesd.2020.11.5.1258.
- BARRY, Roger G.; CHORLEY, Richard J. **Atmosphere, weather, and climate**. 9th ed. London ; New York: Routledge, 2010.
- BATISTA, Marcelo Lopes. Gestão de resíduos na construção civil: ênfase no desenvolvimento sustentável / waste management in civil construction. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 4, p. 23356–23373, 2022.
- BAVARESCO, Mateus V.; CUCHIVAGUE, Hamilton Yair Ortiz; SCHINAZI, Alexandre; GHISI, Eneide. Aspectos impactantes no desempenho energético de habitações de interesse social brasileiras: revisão de literatura. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 1, p. 263–292, 2021. DOI: 10.1590/s1678-86212021000100505.

- BEKBOLIEV, MIRBEK. **Assessing the Airtightness Performance of Container-Like Buildings in Relation to its Effect on Energy Efficiency**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência da Construção na Arquitetura - Middle East Technical University, Ancara, 2015.
- BEN - BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. **BEN Relatório Síntese**. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf. Acesso em: 2 abr. 2024.
- BENACHIO, Gabriel Luiz Fritz; FREITAS, Maria do Carmo D.; TAVARES, Sergio Fernando. Circular economy in the construction industry: a systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, p. 121046, 2020.
- BERBESZ, A. M.; SZEFER, I. M. Innovations in shaping the residential and retail buildings. Functional and pro-environmental potential of shipping containers in architecture. **Iop Conference Series**, Materials Science and Engineering. v. 415, Materials Science and Engineering, p. 012052, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/415/1/012052>.
- BERTOLI, D. G.; RIBEIRO, E. O reuso de containers marítimos na construção civil sob a perspectiva da economia circular. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 10, n. 2, p. 107–119, 2022.
- BERTOLINI, Mattia; GUARDIGLI, Luca. Upcycling shipping containers as building components: an environmental impact assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 6, p. 947–963, 2020. DOI: 10.1007/s11367-020-01747-3.
- BOGO, Amilcar José. Reflexões críticas quanto as limitações do texto das normas brasileiras de desempenho NBR 15220-3 e NBR 15575. **HOLOS**, v. 7, p. 290–298, 2016. DOI: 10.15628/holos.2016.4389.
- BORGES, F. Q. Crise de energia elétrica no brasil - uma breve reflexão sobre a dinâmica de suas origens e resultados. **RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar**, v. 2, n. 10, p. e210809, 2021.
- BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Brasília, DF. 17 out. 2001 a, 1, p. 1.
- BRASIL. Decreto nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001. Congresso. Brasília, DF. 19 dez. 2001 b.

- CAIA, Giovanna; VENTIMIGLIA, Fabrizio; MAASS, Anne. Container vs. dacha: The psychological effects of temporary housing characteristics on earthquake survivors. **Journal of Environmental Psychology**, v. 30, n. 1, p. 60–66, 2010. DOI: 10.1016/j.jenvp.2009.09.005.
- CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Projeto padrão: casas populares - 42 m²**. 2007. Disponível em: https://www.caixa.gov.br/Downloads/banco-projetos-projetos-HIS/casa_42m2.pdf. Acesso em: 4 abr. 2024.
- CALDAS, Lucas Rosse; ABREU-HARBICH, Loyde Vieira De; HORA, Karla Emmanuela Ribeiro. Avaliação ambiental de alternativas construtivas de um edifício contêiner. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 11, p. e020008, 2020. DOI: 10.20396/parc.v11i0.8654887.
- CÂNDIDO, Carolina Dieguez; DORNELLES, Kelen Almeida; LUKIANTCHUKI, Marieli Azoia. Impacto da absorvância no conforto térmico em três zonas bioclimáticas. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 14, p. e023003, 2023. DOI: 10.20396/parc.v14i00.8668202.
- CAO, Xiaodong; DAI, Xilei; LIU, Junjie. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 198–213, 2016. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.06.089.
- CARBONARI, Luana Toralles. **Reutilização de Contêineres ISO na Arquitetura: aspectos projetuais, construtivos e normativos do desempenho térmico em edificações no sul do brasil**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- CHVATAL, Karin Maria Soares; MARQUES, Tássia Helena Teixeira. Avaliação de Diferentes Alternativas de Modelagem de Habitações de Interesse Social no Programa de Simulação de Desempenho Térmico Energyplus. **Revista Tecnológica**, v. 25, n. 1, p. 67–79, 2016. DOI: 10.4025/revtecnol.v25i1.28690.
- COELHO, Thamys Da Conceição Costa; GOMES, Carlos Eduardo Marmorato; DORNELLES, Kelen Almeida. Desempenho térmico e absorvância solar de telhas de fibrocimento sem amianto submetidas a diferentes processos de envelhecimento natural. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 147–161, 2017. DOI: 10.1590/s1678-86212017000100129.

- COPERTARO, Benedetta; PRINCIPI, Paolo; FIORETTI, Roberto. Thermal performance analysis of PCM in refrigerated container envelopes in the Italian context – Numerical modeling and validation. **Applied Thermal Engineering**, v. 102, p. 873–881, 2016. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.04.050.
- DIAMANT, R. M. E. **Thermal and acoustic insulation**. London ; Boston: Butterworths, 1986.
- DORNELLES, Kelen Almeida; ARAÚJO, Ana Carolina Hidalgo. Estação de envelhecimento natural para análise de degradação da absorvância de telhas e monitoramento de temperaturas superficiais. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 2, p. 247–267, 2022. DOI: 10.1590/s1678-86212022000200603.
- EBERHARDT, Leonora Charlotte Malabi; BIRGISDÓTTIR, Harpa; BIRKVED, Morten. Life cycle assessment of a Danish office building designed for disassembly. **Building Research & Information**, v. 47, n. 6, p. 666–680, 2018.
- ELAWA, Sami. **Housing Design in Extreme Hot Arid Zones with Special Reference to Thermal Performance**. 1981. Tese (Departament of Building Science) - University of Lund, Sweden, 1981.
- ELI, Letícia Gabriela. **O Impacto do Padrão de Uso no Desempenho Térmico de Edificações Unifamiliares no Brasil**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.
- ELRAYIES, Ghada Mohammad. Thermal Performance Assessment of Shipping Container Architecture in Hot and Humid Climates. **International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology**, v. 7, n. 4, p. 1114, 2017.
- ENERGYPLUS. **EnergyPlus Essentials**. 2023. Disponível em: https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v23.2.0/EnergyPlusEssentials.pdf.
- ENERGYPLUS. **Input Output Reference**. U.S. Department of Energy, 2024. Disponível em: https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v24.1.0/InputOutputReference.pdf. Acesso em: 23 abr. 2024.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032: demanda e eficiência energética**. Brasília: Superintendência de Estudos Econômicos e Energéticos, 2023. Disponível em:

https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/Caderno%20de%20Efici%20e%20Demanda%20-%20PDE%202032%20final_20230313.pdf. Acesso em: 26 jun. 2023.

FERDOUS, W.; BAI, Y.; NGO, T. D.; MANALO, A.; MENDIS, P. New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings—A state-of-the-art review. **Engineering structures**, v. 183, p. 883–893, 2019.

GEROLA, Gleison. Avaliação do desempenho energético de habitação de interesse social no aglomerado Paiçandu – Maringá - Sarandi/PR. **arq.urb**, n. 36, p. 18–27, 2023. DOI: 10.37916/arq.urb.vi36.609.

GHISELLINI, Patrizia; RIPA, Maddalena; ULGIATI, Sergio. Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 618–643, 2018.

GILLOT, Gilmar. **Aproveite as vantagens de construir com aço**. 2006. Disponível em: <https://casa.abril.com.br/construcao/aproveite-as-vantagens-de-construir-com-aco>. Acesso em: 29 fev. 2024.

GONZÁLEZ-TORRES, M.; PÉREZ-LOMBARD, L.; CORONEL, Juan F.; MAESTRE, Ismael R.; YAN, Da. A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. **Energy Reports**, v. 8, p. 626–637, 2022. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.11.280.

GUARDA, Emeli Lalesca Aparecida Da; DURANTE, Luciane Cleonice; CALLEJAS, Ivan Julio Apolonio; JORGE, Stefany Hoffmann Martins; BRANDÃO, Raphael Pinto. Estratégias Construtivas Para Adequação da Envoltória de uma Habitação de Interesse Social às Zonas Bioclimáticas Mato-Grossenses. **E&S Engineering and Science**, v. 7, n. 1, p. 45–57, 2018. DOI: 10.18607/ES201876138.

HASSAN, A. S.; BOTROS, C. R.; KAMAL, M. N.; MORSI, N. M.; ELFEKY, Y. S. Thermal Performance Assessment for Stacking Shipping Containers as habitable spaces: Cairo Case Study. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1056, n. 1, p. 012024, 2022. DOI: 10.1088/1755-1315/1056/1/012024.

- HERCZEG, Gábor; AKKERMAN, Renzo; HAUSCHILD, Michael Zwicky. Supply chain collaboration in industrial symbiosis networks. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 1058–1067, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.046.
- IEA. **IEA Energy System - buildings**. 2023a. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/buildings>. Acesso em: 10 jan. 2024.
- IEA. **IEA Energy System - building envelopes**. 2023b. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/buildings/building-envelopes>. Acesso em: 10 jan. 2024.
- IICL - INSTITUTE OF INTERNATIONAL CONTAINER LESSORS. **Floor Coating as an IICL Repair Method**. Disponível em: https://www.iicl.org/iiclforms/assets/File/public/news/2013/TB_011_April_2013.pdf. Acesso em: 29 fev. 2024.
- IICL - INSTITUTE OF INTERNATIONAL CONTAINER LESSORS. **IICL Corner Fittings Inspection Criteria**. Disponível em: https://www.iicl.org/iiclforms/assets/File/public/news/2018/pr_062918.pdf. Acesso em: 29 fev. 2024.
- INHABITAT. **PREFAB FRIDAY: Containers Manufactured For Housing**. 2009. Disponível em: <https://inhabitat.com/prefab-friday-conhouse-jurekotnik/attachment/18073/>. Acesso em: 1 mar. 2024.
- ISLAM, Hamidul; ZHANG, Guomin; SETUNGE, Sujeeva; BHUIYAN, Muhammed A. Life cycle assessment of shipping container home: A sustainable construction. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 673–685, 2016. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.07.002.
- ISMAIL, Mazran; AL-OBAIDI, Karam M. Container Architecture in the Hot-Humid Tropics: Potential and Constraints. *Em*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL RESEARCH AND TECHNOLOGY 2015, Penang, Malaysia. **Anais [...]**. *Em*: THE 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL RESEARCH AND TECHNOLOGY. Penang, Malaysia: eng Tjoon Tow, Yusri Yusup, Widad Fadhlullah, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1528.4322>. Acesso em: 26 jun. 2023.
- JUSTINO, B. M. P.; PINHO, G. C. S.; ANDRADE, R. G. M.; BARROCA, D. A. S. Contêiner: do descarte portuário à aplicação arquitetônica / Marine container:

- from abandonment to architectural application. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 14632–14652, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n2-201.
- KIBERT, Charles J. **Sustainable construction: green building design and delivery**. Fifth edition ed. Hoboken, NY: Wiley, 2021.
- KOKE, J.; SCHIPPMANN, A.; SHEN, J.; ZHANG, X.; KAUFMANN, P.; KRAUSE, S. Strategies of Design Concepts and Energy Systems for Nearly Zero-Energy Container Buildings (NZECBs) in Different Climates. **Buildings**, v. 11, n. 8, p. 364, 2021. DOI: 10.3390/buildings11080364.
- KOLOKOTSA, D.; ROVAS, D.; KOSMATOPOULOS, E.; KALAITZAKIS, K. A roadmap towards intelligent net zero- and positive-energy buildings. **Solar Energy**, v. 85, n. 12, p. 3067–3084, 2011. DOI: 10.1016/j.solener.2010.09.001.
- KOPPEN BRASIL. **Classificação climática de Köppen para os municípios brasileiros**. 2024. Disponível em: <https://koppenbrasil.github.io/>. Acesso em: 3 fev. 2024.
- KUSUDA, T.; ACHENBACH, P. R. **Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States**. Washington: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1965.
- LABEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações; SNH - Secretaria Nacional de Habitação; MDR - Ministério de Desenvolvimento Regional. **Cartilha de casos otimizados**. 2022. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/Cartilha_CasosOtimizados_Janeiro2022.pdf. Acesso em: 19 jun. 2024.
- MACHADO, J. M.; MALTA, N. S.; BUSSOLOTTI, V. M.; FERRÃO, A. L. S.; NICORODRIGUES, E. A.; ALVAREZ, C. E. Impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de edificações residenciais brasileiras. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 13, p. e022025, 2022. DOI: 10.20396/parc.v13i00.8665832.
- MACHADO, R. M. E. S.; BRE, F.; MAZZAFERRO, L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R.. Bioclimatic zoning for building performance using tailored clustering method and high-resolution climate data. **Energy and Buildings**, v. 311, p. 114157, 2024. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114157.

- MAILLARD, L. **Análise do Uso de Contêiner na Construção de Habitações na Região de Campo Mourão**. 2017. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2017.
- MARTINS, T. A. L.; BITTENCOURT, L. S.; KRAUSE, C. M. L. B. Contribuição ao zoneamento bioclimático brasileiro: reflexões sobre o semiárido nordestino. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 2, p. 59–75, 2012. DOI: 10.1590/S1678-86212012000200005.
- MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto. Envelope Insulation and Heat Balance in Commercial Buildings. *Em*: 2009, Glasgow. **Anais** [...]. *Em*: Eleventh International Ibpsa Conference. Glasgow p. 7–30. DOI: 10.26868/25222708.2015.2188. Disponível em: https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=bs2015_2188. Acesso em: 21 jun. 2024.
- MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto; VERSAGE, Rogério de Souza; ZHANG, Yi. Is Thermal Insulation Always Beneficial in Hot Climates? *Em*: 2015, **Anais** [...]. *Em*: 2015 Building Simulation Conference. DOI: 10.26868/25222708.2015.2188. Disponível em: https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=bs2015_2188. Acesso em: 21 jun. 2024.
- MILANEZE, G. L. S.; BIELSHOWSKY, B. B.; BITTENCOURT, L. F.; SILVA, R.; MACHADO, L. T. A utilização de containers como alternativa de habitação social no município de Criciúma/SC. **Revista Técnico-Científica do IFSC**, v. 3, n. 1, p. 615–624, 2012.
- MILLER, A. Austin. **Climatology**. Abingdon, Oxon: Routledge, 2020.
- NADEEM, A.; ABZHANOV, Y.; TOKBOLAT, S.; MUSTAFA, M.; SØRENSEN, Bjørn R. The Impacts of Climate Zone, Wall Insulation, and Window Types on Building Energy Performance. *Em*: EL DIMEERY, Ibrahim; BARAKA, Moustafa; AHMED, Syed M.; AKHNOUKH, Amin; ANWAR, Mona B.; EL KHAFIF, Mahmoud; HANNA, Nagy; ABDEL HAMID, Amr T. (org.). **Design and Construction of Smart Cities**. Sustainable Civil Infrastructures Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 270–277. DOI: 10.1007/978-3-030-64217-4_31. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-64217-4_31. Acesso em: 11 jul. 2024.

- NATANIAN, Jonathan. Optimizing mixed-use district designs in hot climates: A two-phase computational workflow for energy balance and environmental performance. **Sustainable Cities and Society**, v. 98, p. 104800, 2023. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104800.
- NGUYEN, Anh-Tuan; REITER, Sigrid; RIGO, Philippe. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, v. 113, p. 1043–1058, 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.08.061.
- OCCHI, T.; ALMEIDA, C. C. O. Uso de Containers na Construção Civil: Viabilidade Construtiva e Percepção dos Moradores de Passo Fundo-RS. **Revista de Arquitetura IMED**, v. 5, n. 1, p. 16–27, 2016. DOI: 10.18256/2318-1109/arqimed.v5n1p16-27.
- OLIVEIRA, Joana; GHISI, Eneidir. Desempenho térmico de residências container em climas quentes. *Em: 2023, Anais [...]. Em: XVII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído.* p. 1–9. DOI: 10.46421/encac.v17i1.4042. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/4042>. Acesso em: 25 jan. 2024.
- PACHECO, Miguel; LAMBERTS, Roberto. Assessment of technical and economical viability for large-scale conversion of single family residential buildings into zero energy buildings in Brazil: Climatic and cultural considerations. **Energy Policy**, v. 63, p. 716–725, 2013. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.07.133.
- PBE EDIFICA. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R)**. 2022. Disponível em: <https://pbeedifica.com.br/inir>. Acesso em: 10 jan. 2024.
- PÉREZ-LOMBARD, Luis; ORTIZ, José; POUT, Christine. A review on buildings energy consumption information. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 3, p. 394–398, 2008. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
- PINTO, Mônica Martins; WESTPHAL, Fernando Simon. Heat balance analysis of an office building with fully glazed façade in tropical and temperate climates in Brazil. *Em: 2021, Anais [...]. Em: 2021 Building Simulation Conference.* DOI: 10.26868/25222708.2021.30444. Disponível em: https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=bs2021_30444. Acesso em: 8 jul. 2024.

- POMPONI, Francesco; MONCASTER, Alice. Circular economy for the built environment: A research framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 710–718, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.055.
- PROJETEEEE. **ProjeteEEE - Envelope de alta inércia térmica**. 2024. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteeee/implementacao/envelope-de-alta-inercia-termica/?cod=itr>. Acesso em: 11 jul. 2024.
- RADWAN, Ahmed Hosney. Containers Architecture Reusing Shipping Containers in making creative Architectural Spaces. **International Journal of Scientific and Engineering Research**, v. 6, n. 11, p. 1562–1577, 2015. DOI: 10.14299/ijser.2015.11.012.
- RASMUSSEN, F.; BIRKVED, M.; BIRGISDÓTTIR, H. Upcycling and Design for Disassembly – LCA of buildings employing circular design strategies. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 225, p. 012040, 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/225/1/012040.
- REIS, Ana Carolina Ruivo; CASTRO, Rosécélia Moreira Da Silva. Arquitetura bioclimática regional: táticas construtivas e materiais alternativos. **Conjecturas**, v. 22, n. 11, p. 464–478, 2022. DOI: 10.53660/CONJ-1443-Z09.
- SALAM, Nur Nasuha Abd; LANNON, Simon. Residential Façade Optimisation for Daylight-Thermal Balance and Climate Change Impact in a Hot and Humid Climate. *Em: 2023, Anais [...]. Em: 2023 Building Simulation Conference*. DOI: 10.26868/25222708.2023.1319. Disponível em: https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=bs2023_1319. Acesso em: 8 jul. 2024.
- SANTAMOURIS, Mat; WOUTERS, Peter (ORG.). **Building ventilation: the state of the art**. Abington Ney York: earthscan from Routledge, 2015.
- SANTOS, Carolina Neiva. **Construção Modular: Utilização de Containers como Ambiente Construído**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Ciência da Contrução na Arquitetura - Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2017.
- SANTOS, Joaquim César Pizzutti Dos; KOTHE, Kamila Kappaun; MOHAMAD, Gihad; VAGHETTI, Marcos Alberto Oss; RIZZATTI, Eduardo. Comportamento térmico de fechamentos em alvenaria estrutural para a Zona Bioclimática 2 brasileira.

- Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 20, n. 4, p. 1030–1047, 2015. DOI: 10.1590/S1517-707620150004.0106.
- SCHIAVONI, Samuele; SAMBUCCO, Sara; ROTILI, Antonella; D’ALESSANDRO, Francesco; FANTAUZZI, Francesco. A nZEB housing structure derived from end of life containers: Energy, lighting and life cycle assessment. **Building Simulation**, v. 10, n. 2, p. 165–181, 2017. DOI: 10.1007/s12273-016-0329-9.
- SCHWARZER, Mitchell. **The Emergence of Container Urbanism**. Public scholarship on architecture, landscape, and urbanism. 2013. Disponível em: <https://placesjournal.org/article/the-emergence-of-container-urbanism/?cn-reloaded=1>. Acesso em: 1 mar. 2024.
- SHEN, Jingchun; COPERTARO, Benedetta; ZHANG, Xingxing; KOKE, Johannes; KAUFMANN, Peter; KRAUSE, Stefan. Exploring the Potential of Climate-Adaptive Container Building Design under Future Climate Scenarios in Three Different Climate Zones. **Sustainability**, v. 12, n. 1, p. 108, 2019. DOI: 10.3390/su12010108.
- SLAWIK, Han (ORG.). **Container Atlas: a practical guide to container architecture**. 5th print ed. Berlin: Die Gestalten Verl, 2015.
- SOARES, Renan Gustavo Pacheco; RODRIGUES, Gustavo Gutierrez De Oliveira; SANTANA, Erick Jose Moraes De; PACHECO, Carla Renata Xavier; MOURA, Lyneker Souza De; CARNEIRO, Arnaldo Manoel Pereira; OLIVEIRA, Romilde Almeida De. Comparação de metodologias para determinação do desempenho térmico de casas com sistema estrutural do tipo paredes de concreto. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. e0310716004, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i7.16004.
- SOUZA, Roberta Vieira Gonçalves De; SOARES, Carla Patrícia Santos; ALVES, Tatiana Paula. Avaliação de dispositivos de sombreamento no RTQ-R do ponto de vista térmico e luminoso. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 4, p. 139–159, 2018. DOI: 10.1590/s1678-86212018000400298.
- SUN, Zexin; MEI, Hongyuan; NI, Ruixian. Overview of Modular Design Strategy of the Shipping Container Architecture in Cold Regions. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 63, p. 012035, 2017. DOI: 10.1088/1755-1315/63/1/012035.

- TALEB, Hanan; ELSEBAEI, Mohamed; EL-ATTAR, May. Enhancing the sustainability of shipping container homes in a hot arid region: A case study of Aswan in Egypt. **Architectural Engineering and Design Management**, v. 15, n. 6, p. 459–474, 2019. DOI: 10.1080/17452007.2019.1628002.
- TANYER, Ali Murat; TAVUKCUOGLU, Ayse; BEKBOLIEV, Mirbek. Assessing the airtightness performance of container houses in relation to its effect on energy efficiency. **Building and Environment**, v. 134, p. 59–73, 2018. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.02.026.
- TONG, Yurou; YANG, Hui; BAO, Li; GUO, Baoxia; SHI, Yanzhuo; WANG, Congcong. Analysis of Thermal Insulation Thickness for a Container House in the Yanqing Zone of the Beijing 2022 Olympic and Paralympic Winter Games. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 24, p. 16417, 2022. DOI: 10.3390/ijerph192416417.
- TREWARTHA, Glenn Thomas; HORN, Lyle H.; SALE, Randall D. **An introduction to climate**. 5th ed ed. New York St Louis San Francisco: McGraw Hill, 1980.
- UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM. **Global Status Report for Buildings and Construction. Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector**: Global Status Report. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>. Acesso em: 21 jun. 2023.
- VIEIRA, J. V. **Utilização de Containers Marítimos na Construção Civil**. 2019. Universidade do Sul de Santa Catarina - UNISUL, Palhoça, 2019.
- VIJAYALAXMI, J. Towards sustainable architecture – a case with Greentainer. **Local Environment**, v. 15, n. 3, p. 245–259, 2010. DOI: 10.1080/13549830903575596.
- WANG, H.; ZHAI, Z. (John). Advances in building simulation and computational techniques: A review between 1987 and 2014. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 319–335, 2016. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.06.080.
- WANG, J.; HAN, X.; MAO, J.; LI, W.. Design and practice of prefabricated zero energy building in cold plateau area. **Energy and Buildings**, v. 251, p. 111332, 2021. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111332.
- WSC - World Shipping Council. **Unified Container Inspection and Repair Criteria (UCIRC)**. Disponível em: <https://www.worldshipping.org/news/new-unified->

container-inspection-amp-repair-criteria-address-contaminating-pests?rq=contamination%20cleaning%20. Acesso em: 29 fev. 2024.

ZAFRA, R. G.; MAYO, J. R. M.; VILLAREAL, P. J. M.; PADUA, V. M. N.; CASTILLO, M. H. T.; SUNDO, M. B.; MADLANGBAYAN, M. S. Structural and Thermal Performance Assessment of Shipping Container as Post-Disaster Housing in Tropical Climates. **Civil Engineering Journal**, v. 7, n. 8, p. 1437–1458, 2021. DOI: 10.28991/cej-2021-03091735.

ZHANG, G.; SETUNGE, S.; VAN ELMPT, S. Using Shipping Containers to Provide Temporary Housing in Post-disaster Recovery: Social Case Studies. **Procedia Economics and Finance**, v. 18, p. 618–625, 2014. DOI: 10.1016/S2212-5671(14)00983-6.

ZUKOWSKI, M. A Small Modular House as a Response to the Energy Crisis. **Energies**, v. 15, n. 21, p. 8058, 2022.