

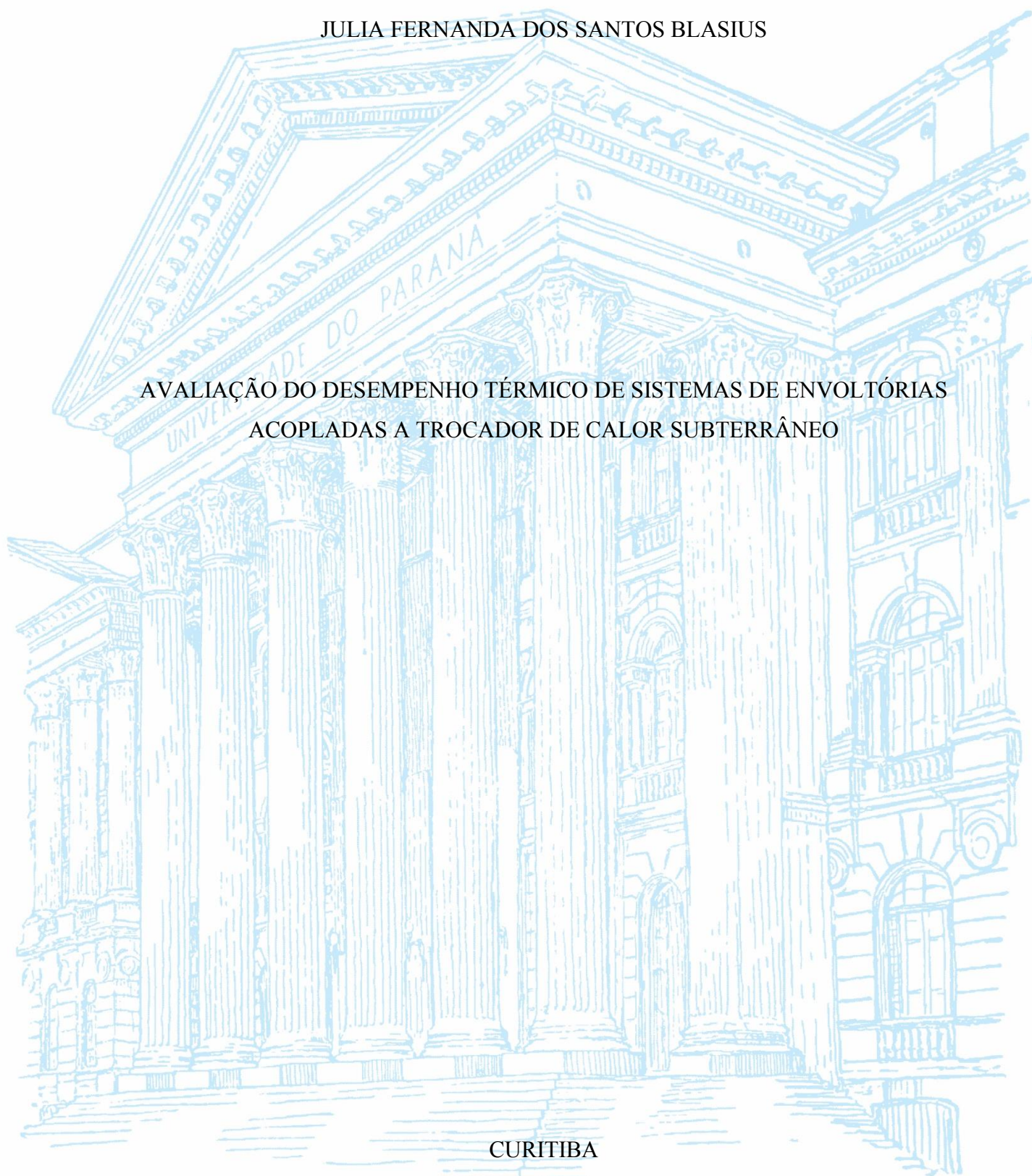
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JULIA FERNANDA DOS SANTOS BLASIUS

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE SISTEMAS DE ENVOLTÓRIAS  
ACOPLADAS A TROCADOR DE CALOR SUBTERRÂNEO

CURITIBA

2020



JULIA FERNANDA DOS SANTOS BLASIUŠ

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE SISTEMAS DE ENVOLTÓRIAS  
ACOPLADAS A TROCADOR DE CALOR SUBTERRÂNEO

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

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Francine Aidie Rossi

Coorientador: Prof. Dr. Ing. Aloísio Leoni Schmid

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

B644a Blasius, Julia Fernanda dos Santos  
Avaliação do desempenho térmico de sistemas de envoltórias acopladas a trocador de calor subterrâneo [recurso eletrônico] / Julia Fernanda dos Santos Blasius. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2020.

Orientador: Francine Aidie Rossi – Coorientador: Aloísio Leoni Schmid

1. Engenharia térmica. 2. Edifícios – Propriedades térmicas. 3. Permutadores térmicos. 4. Calor – Transmissão. I. Universidade Federal do Paraná. II. Rossi, Francine Aidie. III. Schmid, Aloísio Leoni. IV. Título.

CDD: 621.402

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **JULIA FERNANDA DOS SANTOS BLASIUS** intitulada: **Avaliação do desempenho térmico de sistemas de envoltórias acopladas a trocador de calor subterrâneo**, sob orientação da Profa. Dra. FRANCINE AIDIE ROSSI, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

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

CURITIBA, 16 de Dezembro de 2020.

Assinatura Eletrônica

19/12/2020 10:47:11.0

FRANCINE AIDIE ROSSI

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

18/12/2020 08:43:07.0

LEANDRO CARLOS FERNANDES

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

18/12/2020 16:15:31.0

HENOR ARTUR DE SOUZA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à CAPES pelo período em que os estudos foram financiados.

À Universidade Federal do Paraná e ao PPGCEC, pela oportunidade de cursar o mestrado.

Ao coorientador Aloísio Leoni Schmid, pela sugestão do tema e conhecimentos repassados.

À orientadora, Francine Aidie Rossi, cuja generosidade e profissionalismo tornaram possível a conclusão deste trabalho e que, para mim, se tornou uma referência de ser humano e profissional.

Aos meus colegas e amigos, em especial, agradeço à Cristiane, pelas conversas, aflições e alegrias compartilhadas nesse processo e fora dele.

Ao meu noivo e companheiro, Jonatan, fonte inesgotável de afeto, apoio e motivação. Contar contigo faz a vida mais leve.

À minha família, pelo acolhimento de sempre.

A todas as pessoas que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

A busca por soluções construtivas mais sustentáveis passa pelo cumprimento de vários objetivos. A redução do consumo de energia para climatização das edificações e a redução da energia incorporada no edifício são alguns deles. Motivado por estes objetivos de construção mais sustentável, este trabalho apresenta um estudo do desempenho térmico de soluções de envoltória acopladas a um trocador de calor instalado no subterrâneo. Esse sistema de climatização por dutos subterrâneos (SCDS) busca, a partir da alta capacidade térmica do subsolo, estabelecer a climatização de fonte geotérmica ao edifício, reduzindo o consumo energético. Quando acoplado às paredes da envoltória, passa a atuar de forma conjunta, climatizando indiretamente o ambiente interno. Nesse sentido, este estudo propõe a investigação de diferentes materiais e suas propriedades térmicas aplicadas na envoltória, com o intuito de determinar quais materiais e propriedades, em associação ao sistema SCDS, oferecem maior potencial na redução da demanda por climatização. Para isso são formuladas seis soluções de envoltória a partir dos seguintes materiais: cerâmica, madeira e concreto celular, sem isolante térmico, (1A, 2A e 3A); cerâmica, madeira e concreto celular, com isolante térmico em lã de rocha (1B, 2B e 3B). Foram considerados os climas das cidades de Curitiba e Cuiabá, com condições de operação definidas. Duas situações de demanda são consideradas: ocupação mínima e ocupação máxima. Simulações anuais foram conduzidas para a determinação da temperatura interna do ambiente nas diferentes soluções e cidades propostas. Utilizando um intervalo de temperaturas para determinação do conforto, 18°C como limite para aquecimento e 27°C como limite para resfriamento, são calculados os graus-hora anuais de demanda de climatização. Os resultados demonstram a influência das soluções de envoltória no desempenho térmico do sistema. Para o clima temperado de altitude de Curitiba, as soluções elaboradas em madeira e concreto, resultam em menores demandas por aquecimento. A adição do isolante térmico potencializa o sistema que, com ocupação máxima, é capaz de operar dentro dos limites de temperatura estabelecidos ao longo de todo o ano. Inversamente, no clima da cidade de Cuiabá, o material que apresenta a menor demanda de climatização no caso de ocupação máxima é a cerâmica. O sistema associado às soluções de envoltória apenas se mostra eficiente na redução da temperatura interna, quando a taxa de produção de calor é reduzida, com baixa densidade ocupacional. Os resultados apresentados colaboram para a compreensão do funcionamento dos sistemas SCDS em diferentes contextos construtivos e climáticos, fornecendo parâmetros de comparação para elaboração de projetos em climas contrastantes como os de Curitiba e Cuiabá.

Palavras-chave: Desempenho térmico. Edificações. Envoltória. Trocador de calor subterrâneo.

## ABSTRACT

To reach a more sustainable constructive solution, one depends on the fulfillment of multiple objectives. The reduction of energy consumption for building air conditioning and the reduction of energy incorporated in the building represent part of this equation. Motivated by the goal of a more sustainable construction, here is presented a study of the thermal performance that evaluates envelope solutions coupled to a heat exchanger installed on the underground. This underground duct air conditioning system (SCDS) seeks, based on the high thermal capacity of the subsoil, to establish the air conditioning of a geothermal source to the building, reducing energy consumption. When coupled to the walls of the envelope, together wall-SCDS, indirectly act acclimating the internal environment. This study proposes the investigation of different materials and their thermal properties applied to the envelope, in order to determine which materials and properties, in association with the SCDS system, offer the greatest potential in reducing the demand for air conditioning. Six envelope solutions were formulated from the following materials: ceramic, wood and cellular concrete, without thermal insulation, (1A, 2A and 3A); ceramic, wood and cellular concrete, with thermal insulation in rock wool (1B, 2B and 3B). The cities of Curitiba and Cuiabá provide the climatic data, also the operating conditions are predefined. Two situations are considered: minimum occupancy and maximum occupancy. Annual simulations were conducted to determine the internal temperature of the environment in different solutions and cities. A temperature range is used to determine comfort, with 18°C as a limit for heating and 27°C as a limit for cooling, the annual degrees-hour of demand for air conditioning are calculated. The results demonstrate the influence of the envelope solutions on the thermal performance of the system. For the temperate climate of altitude in Curitiba, the solutions made in wood and concrete, result in lower demands for heating. The addition of thermal insulation enhances the system, which, with maximum occupancy, is capable of operating within the temperature limits established throughout the year. Conversely, in the climate of the city of Cuiabá, the material that has the lowest demand for air conditioning in the case of maximum occupancy is ceramics. The system associated with the envelope solutions is only efficient in reducing the internal temperature, when the rate of heat production is reduced, with low occupational density. The results presented collaborate for the understanding of the functioning of the SCDS systems in different construction and climatic contexts, providing parameters of comparison for the elaboration of projects in contrasting climates like those of Curitiba and Cuiabá.

Key-words: Thermal performance. Buildings. Building envelope. Underground heat exchanger.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - OFERTA DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTE.....	19
FIGURA 2 - O USO DE EQUIPAMENTOS DE AR-CONDICIONADO NO SETOR RESIDENCIAL BRASILEIRO.....	20
FIGURA 3 - PAREDE PLANA EM MODELO DE DIFERENÇAS FINITAS DE DOIS NÓS .....	26
FIGURA 4 - O EFEITO DA ESPESSURA DA PAREDE NO VALOR DA TAXA DE PRODUÇÃO DE CALOR.....	34
FIGURA 5 - ILUSTRAÇÃO DE PAREDE TROMBE CLÁSSICA .....	40
FIGURA 6 - TIPOS DE FACHADA DUPLA VENTILADA .....	41
FIGURA 7 - ILUSTRAÇÃO DE ESQUEMA CHAMINÉ SOLAR VERTICAL .....	41
FIGURA 8 - ILUSTRAÇÃO DE ESQUEMA DE PAREDE SOLAR.....	42
FIGURA 9 - ILUSTRAÇÃO DE FACHADA FOTOVOLTAICA VENTILADA .....	43
FIGURA 10 - ILUSTRAÇÃO DE ESQUEMA DE FACHADA VERDE DIRETA .....	43
FIGURA 11 - ILUSTRAÇÃO DE ESQUEMA PAREDE DE ALVENARIA DUPLA .....	44
FIGURA 12 - TRANSMISSÃO DE CALOR EM FUNÇÃO DO GRAU DE SATURAÇÃO PARA SOLOS ARENOSOS.....	48
FIGURA 13 - TRANSMISSÃO DE CALOR EM FUNÇÃO DO GRAU DE SATURAÇÃO PARA SOLOS ARGILOSOS .....	48
FIGURA 14 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DO SOLO ( <i>IN LOCO</i> ) .....	49
FIGURA 15 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DO SOLO ( <i>IN LOCO</i> ) .....	50
FIGURA 16 - SISTEMA DE DUTOS SUBTERRÂNEOS SCDS, CICLO.....	51
FIGURA 17 - SISTEMA <i>REMOTE THERMAL CAPACITY</i> .....	51
FIGURA 18 - DESEMPENHO TÉRMICO DE RESFRIAMENTO DE UM SCDS NO MÊS DE JULHO PARA A REGIÃO DE ATENAS, GRÉCIA. ....	53
FIGURA 19 - MAPA MENTAL DE PESQUISA .....	59
FIGURA 20 - SISTEMA TROCADOR DE CALOR SUBTERRÂNEO - PAREDE .....	63
FIGURA 21 - MODELO DO DUTO TROCADOR DE CALOR.....	64
FIGURA 22 - MODELO E VARIÁVEIS .....	66
FIGURA 23 -SOLUÇÃO 1A .....	69
FIGURA 24 -SOLUÇÃO 1B .....	69



FIGURA 25 -SOLUÇÃO 2A .....	70
FIGURA 26 -SOLUÇÃO 2B .....	70
FIGURA 27 -SOLUÇÃO 3A .....	70
FIGURA 28 -SOLUÇÃO 3B .....	71
FIGURA 29 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA - 1A - OCUPAÇÃO MÍNIMA. .....	74
FIGURA 30 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA - 1A - OCUPAÇÃO MÁXIMA .....	75
FIGURA 31 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE INVERNO – 1A .....	75
FIGURA 32 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 1B - OCUPAÇÃO MÍNIMA .....	76
FIGURA 33 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 1B - OCUPAÇÃO MÁXIMA .....	76
FIGURA 34 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE INVERNO – 1B .....	77
FIGURA 35 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 2A - OCUPAÇÃO MÍNIMA .....	77
FIGURA 36 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 2A - OCUPAÇÃO MÁXIMA.....	78
FIGURA 37 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE INVERNO – 2A .....	78
FIGURA 38 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 2B - OCUPAÇÃO MÍNIMA .....	79
FIGURA 39 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 2B - OCUPAÇÃO MÁXIMA .....	79
FIGURA 40 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE INVERNO – 2B .....	79
FIGURA 41 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 3A - OCUPAÇÃO MÍNIMA .....	80
FIGURA 42 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 3A - OCUPAÇÃO MÍNIMA .....	80
FIGURA 43 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE INVERNO – 3A .....	81
FIGURA 44 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 3B - OCUPAÇÃO MÍNIMA .....	81
FIGURA 45 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 3B - OCUPAÇÃO MÁXIMA .....	82

FIGURA 46 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE INVERNO – 3B .....	82
FIGURA 47 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 1A - OCUPAÇÃO MÍNIMA .....	84
FIGURA 48 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 1A - OCUPAÇÃO MÁXIMA.....	84
FIGURA 49 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE VERÃO – 1A.....	85
FIGURA 50 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 1B - OCUPAÇÃO MÍNIMA .....	85
FIGURA 51 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA –1B - OCUPAÇÃO MÁXIMA .....	86
FIGURA 52 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE VERÃO – 1B.....	86
FIGURA 53 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 2A - OCUPAÇÃO MÍNIMA .....	87
FIGURA 54 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 2A - OCUPAÇÃO MÁXIMA.....	87
FIGURA 55 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE VERÃO – 2A.....	88
FIGURA 56 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 2B - OCUPAÇÃO MÍNIMA .....	88
FIGURA 57 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 2B - OCUPAÇÃO MÁXIMA .....	89
FIGURA 58 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE VERÃO – 2B.....	89
FIGURA 59 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 3A - OCUPAÇÃO MÍNIMA .....	90
FIGURA 60 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 3A - OCUPAÇÃO MÁXIMA.....	90
FIGURA 61 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE VERÃO – 3A.....	90
FIGURA 62 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 3B - OCUPAÇÃO MÍNIMA .....	91
FIGURA 63 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 3B - OCUPAÇÃO MÁXIMA .....	91
FIGURA 64 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE VERÃO – 3B.....	92
FIGURA 65 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 1A .....	94
FIGURA 66 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 1B.....	94

FIGURA 67 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 2A .....	94
FIGURA 68 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 2B.....	94
FIGURA 69 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 3A .....	95
FIGURA 70 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 3B.....	95
FIGURA 71 - SIMULAÇÃO ANUAL DEMANDA EM GRAUS-HORA - CURITIBA .....	96
FIGURA 72 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 1A .....	96
FIGURA 73 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 1B.....	96
FIGURA 74 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 2A .....	97
FIGURA 75 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 2B.....	97
FIGURA 76 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 3A .....	97
FIGURA 77 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 3B.....	97
FIGURA 78 - SIMULAÇÃO ANUAL DEMANDA EM GRAUS-HORA – CUIABÁ .....	98
FIGURA 79 - DEMANDA EM GRAUS-HORA ANUAIS – CURITIBA E CUIABÁ .....	99

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1 PROBLEMA</b> .....	<b>14</b>
<b>1.2 OBJETIVO</b> .....	<b>17</b>
<b>1.3 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>17</b>
1.3.1 Aspectos ambientais.....	18
1.3.2 Aspectos socioeconômicos.....	19
1.3.3 Aspectos tecnológicos .....	21
<b>1.4 CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA</b> .....	<b>21</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>23</b>
<b>2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM EDIFICAÇÕES</b> .....	<b>23</b>
2.1.1 Características térmicas dos materiais .....	28
<b>2.2 SOLUÇÕES DE ENVOLTÓRIA</b> .....	<b>30</b>
2.2.1 Envoltória como meio de armazenamento de calor .....	33
2.2.2 Envoltórias leves e adaptabilidade .....	35
2.2.3 Câmaras de ar.....	39
<b>2.3 SISTEMAS GEOTÉRMICOS</b> .....	<b>44</b>
2.3.1 Transferência de calor no solo .....	45
2.3.2 Trocador de calor e variáveis relacionadas.....	49
<b>3 MÉTODO</b> .....	<b>56</b>
<b>3.1 DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE PESQUISA</b> .....	<b>56</b>
3.1.1 Unidade de análise .....	57
3.1.2 Delimitação do trabalho.....	57
3.1.3 Mapa mental de pesquisa .....	59
3.1.4 Justificativa da escolha a partir do objetivo .....	59
3.1.5 Testes de validade.....	60
<b>3.2 PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS</b> .....	<b>61</b>
3.2.1 Dados climáticos .....	61
3.2.2 Definição das temperaturas de base.....	62
3.2.3 Definição do sistema e cálculo da temperatura interna .....	62
3.2.4 Configurações de envoltória.....	68
3.2.5 Cálculo da demanda de aquecimento e resfriamento .....	71

<b>4 DESEMPENHO TÉRMICO DE SISTEMAS DE ENVOLTÓRIAS ACOPLADOS A TROCADOR DE CALOR SUBTERRÂNEO.....</b>	<b>73</b>
<b>4.1 SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA INTERNA.....</b>	<b>73</b>
4.1.1 Temperatura interna por solução de envoltória - Curitiba .....	74
4.1.2 Temperatura interna por solução de envoltória – Cuiabá .....	83
<b>4.2 DESEMPENHO TÉRMICO EM GRAUS-HORA .....</b>	<b>93</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>100</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>102</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A envoltória da edificação atua como barreira térmica, pois se localiza na interface entre o ambiente externo e o ambiente interno. Por essa razão, a envoltória se relaciona com a manutenção da temperatura interna da edificação e, conseqüentemente, com o consumo energético para climatização. A partir dessas implicações energéticas, a tecnologia construtiva aplicada na envoltória se torna um fator a ser considerado e investigado no contexto da redução do consumo de energia para operação das edificações. O desenvolvimento de envoltórias otimizadas pode promover de forma antecipada um edifício de menor consumo energético e de maior conforto térmico.

A composição material da envoltória apresenta implicações na quantidade de energia embutida no edifício. Diversas combinações de materiais e espessuras podem ser utilizadas no desenvolvimento de uma solução de envoltória. É neste ponto que se torna controversa a utilização de materiais construtivos pesados<sup>1</sup> em soluções de envoltória consideradas passivas. A contradição se dá pela quantidade significativa energia empregada nos processos de fabricação desses materiais, que acabam por incorporar à edificação o ônus energético ainda na fase pré-operacional.

Como alternativa mais sustentável, as envoltórias podem ser desenvolvidas com materiais leves. O emprego de sistemas leves apresenta vantagens que vão desde a redução da energia embutida e dos resíduos construtivos até o menor tempo de construção, que é parcialmente fabril. Além disso, existe a possibilidade de fixação de carbono através da utilização de componentes de madeira. A leveza dos materiais, que significa também menor quantidade de energia incorporada, resulta em baixa capacidade térmica nos elementos construtivos. Dessa forma, materiais leves contribuem menos que os materiais pesados em estratégias de climatização que utilizam processo de inércia térmica.

Os sistemas geotérmicos, especificamente os trocadores de calor do tipo sistemas de climatização por dutos subterrâneos (SCDS), são uma alternativa de climatização para as edificações. Tal sistema, usualmente empregado em regiões de grande amplitude térmica anual, utiliza do potencial geotérmico do solo para climatização. A temperatura estável do subsolo é

---

<sup>1</sup> Nesta pesquisa foram considerados pesados os materiais construtivos cujas densidades sejam superiores a 1000kg/m<sup>3</sup>.

utilizada como fonte para o trocador de calor, promovendo a amenização da temperatura no ambiente construído. Um inconveniente, no entanto, é que este sistema, da forma como é convencionalmente construído, lança diretamente no ambiente interno um grande fluxo de ar, fator que pode causar desconforto ao usuário. Como alternativa otimizada, um sistema híbrido, que propõe o acoplamento do SCDS diretamente ao interior das paredes, foi proposto pelo professor Dr. Aloísio Leoni Schmid.

Nesta pesquisa propõe-se a avaliação do desempenho térmico desse sistema de trocador-parede em associação a diferentes soluções de envoltória. Para isso, foram considerados seis diferentes tipos de envoltórias com propostas de utilização de materiais popularmente empregados na construção civil nacional (cerâmica, madeira e concreto celular). As seis versões do sistema são testadas para as cidades de Curitiba e Cuiabá, com condições e operação bem estabelecidas.

## **1.1 PROBLEMA**

A necessidade de redução do consumo energético tem implicações para os diversos ramos industriais. No caso particular das edificações, a energia consumida para operação é geralmente superior àquela empregada na fabricação. Isso acontece devido à utilização de energia para realização de muitas funções operacionais dos edifícios, por exemplo, climatização artificial, iluminação e movimentação vertical.

Em relação à climatização, são várias as estratégias para a redução do consumo de energia, uma delas é reforçar a barreira existente entre o edifício e o seu exterior. Essa barreira é proporcionada pela envoltória, composta pelo conjunto de superfícies externas da edificação. Uma analogia particularmente útil é feita quando se observa o edifício como um organismo, assim, percebe-se que a pele está para o corpo, como a envoltória está para o edifício. Dessa maneira, por constituir o limite entre o microclima externo e interno, a eficiência energética e o conforto térmico no ambiente construído estão ligados à solução de envoltória adotada em projeto.

Sobre esta temática, Pirró (2015) argumenta que, considerando o projeto de edificações energeticamente mais eficientes, para que se obtenha um produto de alto desempenho, é preciso, além de conhecimento do projetista e da observação dos fatores do entorno, que a envoltória se torne verdadeiro elemento passivo, capaz de controlar ganhos e

perdas de calor, quantidade de luz natural e ventilação. Nesse sentido, uma das práticas relevantes para a manutenção da temperatura interna e controle do microclima artificial diz respeito a concentração de massa térmica na envoltória.

No Brasil, a norma NBR 15220 (ABNT, 2005) recomenda a adoção de um envelope feito por paredes de alvenaria pesada para regiões de grande amplitude térmica, a fim de estabelecer maior estabilidade à temperatura interior. Blocos maciços ou vazados, feitos a partir de argila, concreto cimentício, pedra, mármore e outros fragmentos de rochas, além do próprio solo, são exemplos de materiais com grande capacidade térmica. A alta densidade dessas substâncias associada ao grande volume de material empregado resulta em maior capacidade térmica, que, por sua vez, causa o efeito de inércia térmica necessário na suavização da variação de temperatura no interior da edificação.

Práticas de construção pesadas, baseadas em alta massa térmica, remontam ao princípio das civilizações, tempos onde as questões relativas à disponibilidade de recursos eram diferentes das enfrentadas hoje. Já no cenário energético mais recente, a quantidade expressiva de material requerida nestas técnicas também representa o ônus de uma carga considerável de energia embutida no edifício. Com a Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) é possível quantificar a energia dispendida nas várias fases da vida dos edifícios, sendo relevante o impacto ambiental gerado na fabricação desses materiais (fase pré-operacional). Para além da questão energética, o edifício cujo invólucro é composto por pesadas paredes e cobertura oferece outras desvantagens como menor flexibilidade para ampliações e demolições. Esses edifícios também têm maior peso próprio e exigem mais do sistema estrutural e de fundações, adicionando custos ao projeto.

A discussão energética iniciada no consumo operacional dos edifícios pode ser expandida, tornando-se uma reflexão maior sobre a vida útil das edificações e quais medidas podem ser tomadas a fim de ampliá-la. Uma alternativa são construções mais leves, desmaterializadas, que surgiram, a princípio, em resposta à escassez de materiais após as devastações causadas por guerras e conflitos (MIGUEL, 2002). Tais sistemas possuem estruturas leves em madeira e aço, com fechamentos opacos em painéis compostos de madeira e camadas isolantes, entre outras tecnologias. Nesse sentido, edifícios leves, próprios para a desconstrução, são uma forma de ampliação do ciclo de vida da edificação, discussões a esse respeito são feitas em Rocha, Pereira e Yokoyama (2016), Fischer (2017) e Freitas (2017).



O ponto frágil desses sistemas, no entanto, está na ausência de capacidade térmica dos materiais. Essa ausência pode ser compensada, por exemplo, com o emprego de camada isolante<sup>2</sup>. Essa camada, que em geral aumenta de espessura em climas extremos, é normalmente formada por materiais com potencial poluente. Muito embora existam opções mais sustentáveis, materiais como o poliuretano expandido são amplamente utilizados na indústria, elevando o risco ambiental.

Alternativamente, pode-se promover o aumento do desempenho térmico desses sistemas construtivos leves através da utilização do subterrâneo como fonte de capacidade térmica. A associação do edifício aos sistemas subterrâneos pode ser explicada pela alta capacidade térmica disponível no subsolo. Enquanto o solo, a três ou quatro metros de profundidade, mantém uma temperatura próxima à temperatura média anual, a amplitude térmica anual elevada aumenta seu potencial de aquecimento ou resfriamento para um ambiente à medida que a diferença entre a temperatura do subsolo e do ar também aumenta (ALVES; SCHMID, 2015).

Sistemas de climatização por dutos subterrâneos (ALVES; SCHMID, 2015; SCHMID; REIS, 2011), bem como as bombas de calor instaladas no subsolo (ROMANÍ; PÉREZ; GRACIA, 2017), trabalham tirando proveito da capacidade térmica do solo para estabilização da temperatura de um fluido - geralmente ar ou água - como trocadores de calor. O ar que advém do sistema é injetado dentro da edificação - direta ou indiretamente - estabelecendo o balanço térmico com as cargas internas próprias da edificação. O inconveniente, no entanto, é que para atingir valores próximos da faixa de conforto, dada a pequena diferença de temperatura entre o sistema trocador de calor e o interior da edificação, o fluxo de ar necessário deve ser intenso no interior do prédio, podendo causar desconforto aos usuários.

A otimização dos trocadores de calor SCDS visa reduzir tal desconforto, mantendo consumo energético baixo para climatização. A proposta de um sistema híbrido vem nesse contexto. Idealizado pelo professor Dr. Aloísio Leoni Schmid, este sistema é formado pelo acoplamento do SCDS diretamente conectado ao interior das paredes de uma edificação. Dessa

---

<sup>2</sup> Neste trabalho o termo isolantes se refere exclusivamente aos isolantes resistivos. Cujas características estão relacionadas a soluções construtivas leves.

maneira, a climatização interna acontece de forma indireta. O ar climatizado no subsolo circula pelo interior das paredes, climatizando indiretamente o interior do edifício.

Assim, partindo de um sistema SCDS acoplado às paredes como uma alternativa de climatização e, ainda, sob o enfoque do papel da envoltória como barreira térmica da edificação e as vantagens da utilização de materiais leves como solução construtiva capaz de ampliar o ciclo de vida de edificações e promover projetos modulares e adaptáveis, é colocada a seguinte questão problema: *Considerando a resposta térmica fornecida por um sistema trocador – parede para o ambiente interno, como o uso de diferentes materiais na envoltória interfere nessa resposta?* Com este trabalho busca-se, portanto, determinar se uma composição de materiais é mais ou menos benéfica que outra, em termos de desempenho térmico, quando associada a um trocador de calor subterrâneo. Considera-se também a variação da resposta térmica frente aos climas contrastantes das cidades de Curitiba e Cuiabá, de forma a compreender a influência dos materiais utilizados na resposta do sistema às demandas do clima local.

## **1.2 OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é determinar a influência de diferentes materiais no desempenho térmico de um sistema trocador de calor tipo duto subterrâneo (SCDS) acoplado às paredes de uma edificação, considerando diferentes soluções construtivas.

## **1.3 JUSTIFICATIVA**

Desde a crise do petróleo, deflagrada em 1973, se tornou evidente a necessidade de exploração de novas fontes de energia para a manutenção do ritmo de desenvolvimento das nações. A partir disso, o debate em torno das energias renováveis chegou também à indústria de construção civil, grande consumidora de energia. É nesse contexto que se inicia a exploração da fonte geotérmica para fins de climatização de edifícios. Para tal, são utilizados sistemas que tomam partido da grande capacidade térmica do solo como forma de energia limpa. A partir das décadas de 1970 e 1980, sucessivas pesquisas apresentaram sistemas como dutos subterrâneos e, posteriormente, bombas de calor instalados no subsolo (LABS, 1989; MIHALAKAKOU et al., 1994; KWORK; GRONDZIK, 2007; SCHMID; REIS, 2011, ALVES, 2014).

No mesmo contexto, a tecnologia aplicada nas envoltórias se torna cada vez mais relevante em virtude do seu papel de barreira reguladora das trocas energéticas da edificação. A importância do estudo do sistema aqui apresentado pode, portanto, ser justificada por diferentes aspectos, tais como: aspectos ambientais, socioeconômicos e tecnológicos, que serão apresentados a seguir.

### 1.3.1 Aspectos ambientais

A questão da gestão dos resíduos sólidos é um desafio ambiental, só no Brasil a indústria da construção civil chega a ser responsável por 50% a 70% da massa dos resíduos sólidos urbanos (BRASIL, 2005 *apud* IPEA, 2012). Isso implica em toneladas de resíduos que devem ser destinados a aterros ou outras formas de destino final. Neste âmbito, a Lei nº 12.305 de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS contém os instrumentos para o manejo adequado dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010). Já a Resolução CONAMA nº. 307 estabelece especificamente as diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil (BRASIL, 2002).

Apesar da tentativa de regulamentação do processo de geração de resíduos nas diversas fases de obra, o desperdício e geração de entulho são intrínsecos dos métodos construtivos mais populares no país. A construção civil ainda utiliza sistemas construtivos tradicionais, como a alvenaria, e materiais rústicos que permitem a variabilidade da matéria-prima, assim, por consequência, surgem manifestações patológicas, improdutividade e desperdícios (VIVAN; PLAGLIARI; NOVAES; 2010). Em contrapartida, métodos construtivos leves, cuja confecção é feita parcialmente em ambiente fabril, com processo produtivo em fluxo, favorecem a chamada *lean production*, filosofia produtiva com foco em redução de perdas (ISATTO; FORMOSO; 1997). Esses métodos alternativos de construção total ou parcialmente *off-site* são, portanto, uma forma de contribuir para a diminuição do volume de resíduos e, assim, reduzir a necessidade de espaço para destinação final.

Outro efeito colateral dos métodos construtivos tradicionais é a necessidade de emprego de grande volume de materiais para obtenção de resultado satisfatório em termos de desempenho térmico. A fim de se tornarem adequadas para os níveis de conforto, paredes de alvenaria têm de ser espessas, pesadas, com inércia térmica. Isso significa que a carga de energia embutida na edificação deverá ser alta, gerando impacto negativo sobre o ciclo de vida da

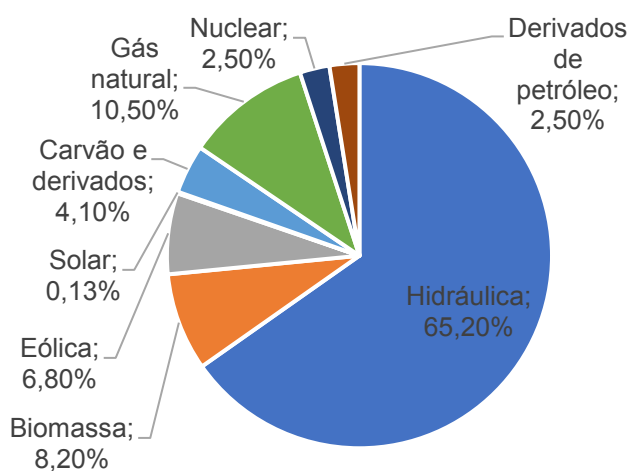
edificação, ao passo que o sistema convencional não apresenta flexibilidade e aproveitamento para ampliações e reformas. Nesse sentido, os métodos construtivos leves, *off-site*, possuem também vantagem ao propiciar ampliação e reformas mais simples. Existe, inclusive, a possibilidade de reaproveitamento parcial ou completo, quando a edificação é do tipo próprio para a desconstrução. Nas construções em madeira existe ainda a possibilidade de fixação de carbono.

Por último, a adoção de sistemas baseados em geotermia pode liberar o sistema de climatização do uso de gases nocivos à atmosfera. Este tema foi tratado em acordos mundiais como o Protocolo de Quioto e o Protocolo de Montreal. No Brasil foram criados o Plano Nacional para Eliminação Gradual do CFC - clorofluorcarboneto (BRASIL, 2002) e o Programa Brasileiro para Eliminação dos HCFCs - hidroclorofluorcarbonos (BRASIL, 2012) que, dentre outras ações, visam à implementação de novas tecnologias de baixa emissão de gases, entre as quais o uso do potencial geotérmico.

### 1.3.2 Aspectos socioeconômicos

Em relação aos aspectos socioeconômicos, esta pesquisa se relaciona diretamente ao contexto de redução do consumo de energia elétrica que, para além da questão da sustentabilidade ambiental, representa economia de valores.

FIGURA 1 - OFERTA DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTE



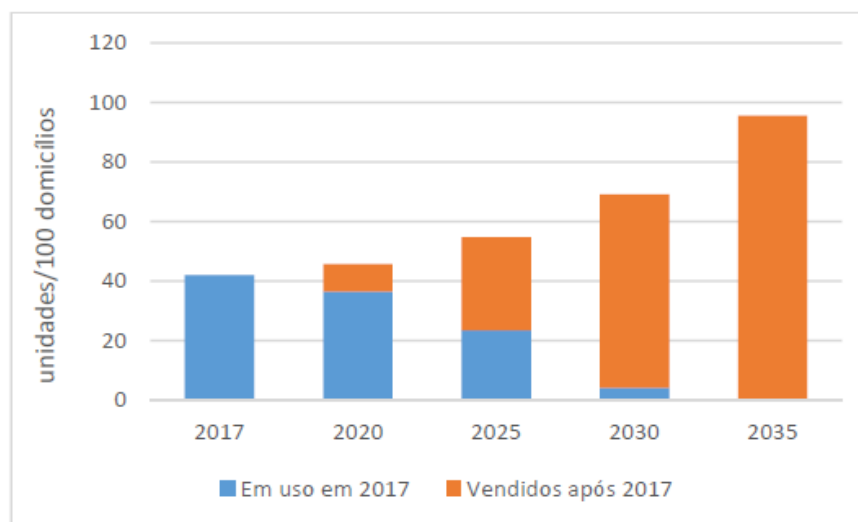
FONTE: BRASIL (2018).

No Brasil, a maior fonte produtora de energia é hídrica (FIGURA 1), através das hidrelétricas distribuídas pelo país. A energia é considerada limpa, muito embora os impactos ambientais gerados pela formação dos lagos de barramento sejam passíveis de questionamento. O consumo de energia elétrica para edificações (setores residenciais, comerciais e públicos) representa 50,2% do total brasileiro, sendo que 25,1% são consumidos apenas pelo setor residencial (BRASIL, 2018).

Em relação ao uso de climatização em ambientes residenciais, no contexto brasileiro, observa-se uma crescente demanda. O aumento do consumo de eletricidade devido ao uso de condicionadores de ar, por exemplo, é explicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) como resultado da maior estabilidade econômica e a elevação da renda média das famílias, que criaram as condições para suprir parte de uma demanda reprimida por conforto ambiental.

A projeção realizada pela EPE (2018) demonstra que até o ano de 2035 há uma estimativa de que a posse de equipamentos de ar condicionado possa evoluir de 0,4 unidade por domicílio para aproximadamente 1,0 unidade por domicílio (FIGURA 2).

FIGURA 2 - O USO DE EQUIPAMENTOS DE AR-CONDICIONADO NO SETOR RESIDENCIAL BRASILEIRO



FONTE: EPE (2018).

Frente as projeções de aumento da demanda no setor elétrico, estudos e projetos que contribuam para um menor consumo energético na climatização das edificações contribuem diretamente na reversão desse cenário. Nesse contexto, os sistemas que fazem uso do potencial geotérmico, cujo consumo energético é inferior aos de sistemas tradicionais, configuram parte de estratégias passivas, ou semipassivas, de diminuição da energia de operação das edificações.

### 1.3.3 Aspectos tecnológicos

A proposta de sistema apresentada tem o objetivo de combinar dois temas já estudados separadamente, a envoltória do edifício e o sistema de dutos enterrados como trocador de calor. A envoltória, composta pelas sucessivas camadas que separam o ambiente interno e externo, é tema amplamente discutido na área de desempenho de edificações. Neste trabalho, alguns materiais construtivos serão avaliados como soluções construtivas, sistema de alvenaria de blocos tradicional, uma parede leve em madeira e uma outra parede leve em concreto celular. Com isso, objetiva-se abranger as tecnologias de envoltória já difundidas no mercado e elucidar aspectos daquelas menos conhecidas, bem como discutir a importância das propriedades dos materiais componentes da envoltória quando há associação de tecnologias.

O sistema trocador-parede trabalha com a injeção de ar em cavidades nas paredes, para isso são utilizados ventiladores. Em razão do uso de ventiladores o sistema não é considerado passivo. Na literatura, o funcionamento dos sistemas de dutos subterrâneos vem sendo discutido em variados trabalhos há aproximadamente 40 anos. Vários pesquisadores, inclusive brasileiros, promovem ainda a experimentação por novos materiais, aplicações, condicionantes, além de otimizações (MENBERG et al., 2013; LEE et al., 2012; DENG et al., 2012; AMPOFO et al., 2011; OZGENER, 2011; SCHMID; REIS, 2011; ALVES; SCHMID, 2015), como é o caso do sistema avaliado nesta pesquisa desenvolvido pelo professor Dr. Aloísio Leoni Schmid.

## 1.4 CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA

As questões de conforto térmico foram abordadas em algumas pesquisas do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil. Machado (2008) estudou o conforto térmico em residências modernistas em Curitiba; Winck (2010) desenvolveu um atenuador de ruídos que permitisse a ventilação forçada em edificações residenciais; Mazzarotto (2011) estudou o desempenho térmico de fachadas ventiladas em edifícios curitibanos e Pertschi (2005) realizou medições das condições térmicas urbanas em São José dos Pinhais comparando-as com morfologias de ocupação do solo. Esses são alguns trabalhos sem vínculo direto com o presente trabalho.

O trabalho de Alves (2014) sobre o potencial do uso de dutos subterrâneos para climatização, considerando zonas bioclimáticas, profundidade e tratamento da superfície do

so é, mais diretamente, o antecessor do presente trabalho. A partir das constatações feitas por Alves (2014) é possível um certo direcionamento para a presente pesquisa. Outro trabalho realizado no programa mais diretamente ligado à problemática é o desenvolvido por Fischer (2017) onde são feitas avaliações acerca da adaptabilidade na construção e seu papel na discussão sobre habitações de interesse social.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados a introdução e discussão dos elementos teóricos relacionados ao problema de pesquisa. O problema proposto envolve essencialmente duas temáticas. A primeira trata da envoltória da edificação e as propriedades dos materiais componentes dessa envoltória. O segundo diz respeito ao trocador de calor, tipo solo-ar, teoricamente instalado no subsolo. A proposta desta pesquisa é a determinar o desempenho térmico de um sistema trocador de calor tipo duto subterrâneo (SCDS) acoplado às paredes de uma edificação, considerando, para isso, a influência de diferentes materiais aplicados na envoltória na forma de seis soluções construtivas.

Tratando-se, portanto, de um problema que envolve a transferência de calor e as propriedades térmicas dos materiais, a fundamentação teórica da pesquisa tem início na fundamentação básica dos fenômenos envolvidos e como estes se comportam na edificação e no solo. Para isso, são definidos os mecanismos de transferência de calor. Na sequência, são exploradas as características térmicas dos materiais construtivos.

Também são introduzidos os sistemas de envoltória de edificações, soluções e implicações, considerando aquilo que estabelecem as normativas brasileiras. Por último, explora-se a literatura a respeito dos sistemas geotérmicos e suas variáveis no acoplamento ao solo.

### 2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM EDIFICAÇÕES

Calor é, por definição, a energia térmica em processo de transferência, em trânsito. Conforme a Segunda Lei da termodinâmica, sempre que houver diferença de temperatura em um meio, ou entre meios, haverá transferência de calor. No estudo térmico das edificações é utilizado o conceito de fluxo de calor, que é definido pela NBR 15220:1 (ABNT, 2005) como quociente da quantidade de calor que atravessa uma superfície durante um intervalo de tempo pela duração desse intervalo. Quando se divide o fluxo de calor pela área da superfície onde ocorre a transferência, tem-se a taxa de transferência de calor. O equacionamento do fluxo de calor é definido conforme o mecanismo de transferência: condução, convecção e radiação, apresentados a seguir:



**Condução** – este processo é originado por colisões ou vibrações entre moléculas de uma dada substância. A condução é a forma de transferência de calor que geralmente ocorre nos sólidos, pois, para que ocorra, é necessário que as partículas estejam próximas. Conforme a definição de Çengel e Ghajar (2011), condução é a transferência de energia resultante da interação de partículas de maior energia de uma substância com partículas adjacentes de menor energia. A transmissão de energia ocorre das partículas com maior temperatura para aquelas de temperatura inferior e pode ocorrer em um mesmo corpo, ou entre corpos diferentes. A Lei de Fourier rege o fenômeno de condução térmica. Esta lei estabelece que o fluxo de calor entre dois pontos é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura entre eles.

A capacidade de condução de calor varia de acordo com a propriedade de condutividade térmica de cada material. Os metais são alguns dos materiais com maior capacidade de condução de calor. Outros materiais, como a cortiça, têm menor capacidade de transmissão. Os materiais aplicados na envoltória influenciam, portanto, na capacidade de transferência de calor da edificação e serão discutidos mais adiante neste capítulo. No caso do solo como material, a quantidade de vazios é relevante, quanto mais densa a porção seca e maior o grau de saturação de água no solo, maior será a quantidade de calor transferida por condução (BECKER; MISRA; FRICKE, 1992; ALVES, 2014).

Na análise do processo de transmissão de calor por condução, na envoltória do edifício, é usual que se considere o fluxo de calor como unidirecional devido à altura ser muito superior à espessura (AFONSO, 2009). Contudo, nos elementos cuja composição material é diferente daquela da envoltória, como pilares e vigas, o fluxo também deve ser considerado em outras direções. Em geral, são feitas simplificações da geometria da edificação a fim de contornar a questão do fluxo multidirecional. Nesta pesquisa considera-se o fluxo unidirecional para o problema da condução de calor.

**Convecção** – Convecção é, segundo Çengel e Ghajar (2011), o modo de transferência de calor entre uma superfície sólida e um líquido ou gás adjacente que está em movimento, e esse processo envolve os efeitos combinados de condução e movimento do fluido. É o principal processo de troca de calor entre uma superfície sólida e um fluido em movimento (sólido - ar) ou entre fluidos (ar - ar). Também pode ser definida como o fluxo de calor macroscópico, no qual são carregadas partes da substância de uma região quente para uma região fria (ALVES, 2014). O fluido de temperatura mais elevada, por ser menos denso, tende a subir, o fluido de

menor temperatura tende ao sentido contrário e, assim se estabelece um movimento de transferência de calor.

O movimento pode acontecer de forma natural, se resultar das forças de impulsão, existentes devido às diferenças de densidade. Também pode acontecer movimento de forma forçada, onde este é induzido por força externa proveniente da ação de equipamentos. A convecção ocorre com líquidos e gases, entretanto, em solos, é normalmente desprezada, dada a pequena porção de vazios (JOHANSEN, 1975; DUARTE, 2004).

No caso de um edifício, a superfície sólida pode ser entendida como um componente (parede, telhado e piso) ou o conjunto da envoltória. O fluido é o ar que se encontra em contato com a superfície, externa ou internamente.

**Radiação** – Na definição de Çengel e Ghajar (2011), radiação é a energia emitida pela matéria em forma de ondas eletromagnéticas (ou fótons), como resultado das mudanças nas configurações eletrônicas de átomos e ou moléculas. Este processo ocorre pela propagação de ondas eletromagnéticas, e é capaz de transferir calor sem a necessidade de contato entre corpos, ou de meio material, ocorrendo mesmo no vácuo.

A emissividade é a capacidade da superfície de emitir radiação. Cada superfície possui um valor determinado de emissividade, estes valores variam entre 0 e 1. A um corpo que apresenta uma emissividade igual a 1 dá-se o nome de corpo negro. Em um corpo negro, toda a energia incidente é absorvida e posteriormente emitida. Contrariamente, num corpo com emissividade 0, toda a energia incidente é refletida (AFONSO, 2009).

A transferência de calor nas edificações ocorre principalmente através das superfícies da envoltória. No entanto, a existência de compartimentos com diferentes temperaturas, origina igualmente trocas de calor dentro da habitação (AFONSO, 2009). Os três mecanismos de transferência de calor ocorrem de forma simultânea nas edificações, em uma complexa dinâmica de interação.

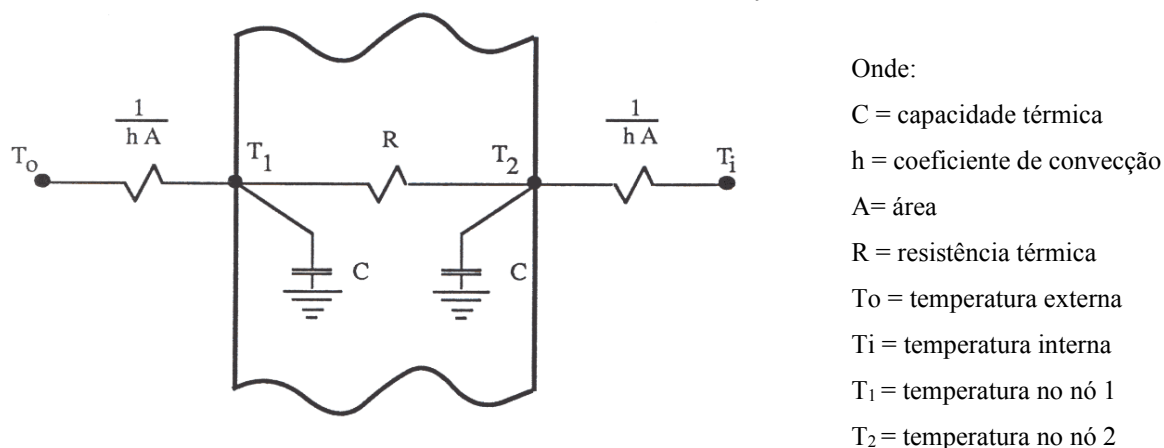
Internamente, existem no edifício a condução térmica entre os seus diferentes ambientes, a convecção térmica causada pela renovação do ar e também a radiação, pois parte da energia da radiação solar consegue penetrar no ambiente interno via aberturas e, ainda, a carga interna de radiação emitida pelos ocupantes e equipamentos diversos.

Externamente, o edifício interage com o ambiente a partir da convecção causada pelo contato das superfícies externas da envoltória com a massa de ar que envolve a edificação. A radiação emitida pelo sol também toca as paredes que, a depender das propriedades do material de acabamento externo, podem absorver mais ou menos radiação.

Uma parte da radiação solar que incide sobre o edifício é refletida, outra absorvida e a restante transmitida. Alguma parte da energia transmitida flui para o interior da habitação através de fenômeno de condução que, posteriormente, dá origem ao mecanismo de convecção superficial (sólido-fluido) (AFONSO, 2009).

Um modelo simples de parede plana com diferentes temperaturas nas faces, com dois nós em diferenças finitas, é apresentado na FIGURA 3. Nesse modelo, a partir da analogia com um sistema elétrico, a parede é considerada homogênea e as propriedades térmicas constantes (SEEM, 1987).

FIGURA 3 - PAREDE PLANA EM MODELO DE DIFERENÇAS FINITAS DE DOIS NÓS



FONTE: Traduzido de Seem, (1987).

Como demonstrado por Seem (1987), o fluxo de calor multidimensional é problema de grande complexidade e, por isso, a hipótese simplificada é normalmente utilizada, em que se considera o fluxo unidirecional. Além disso, ao invés do regime transiente, com variação da temperatura no tempo, os problemas podem ser simplificados assumindo regime estacionário com valores representativos.

Tais simplificações, no entanto, podem causar erros significativos quando a envoltória possuir características anisotrópicas relevantes. Por exemplo, em uma fachada composta por tijolos de concreto é instalada uma janela de material metálico, nesse caso, a alta condutividade

térmica oferecida pelo material metálico da janela causará distúrbio no sentido do fluxo do calor, levando ao surgimento do efeito conhecido como ponte térmica (AFONSO, 2009). Esse efeito é válido em pontos de mudanças de geometria ou nas propriedades dos materiais, por essa razão, tais fatores devem ser considerados quando da hipótese de fluxo unidirecional.

A modelagem da transferência de calor em edifícios, ainda amplamente discutida na atualidade, foi tratada matematicamente por vários autores<sup>3</sup>. Os trabalhos destes autores foram fundamentais para o desenvolvimento dos algoritmos utilizados em programas de cálculo de térmica em edificações. Contribuições à simplificação dos modelos de equações, como as feitas por Seem (1986), aumentaram a velocidade do processo de cálculo computacional. No contexto de pesquisa da época, o método *Comprehensive Room Transfer Function* era aplicado em simulações nos programas computacionais como BLAST, TARP, TRNSYS e DOE-2. A evolução contínua desses programas, bem como o desenvolvimento de novos programas, transformou e agilizou a análise energética das edificações.

O programa *EnergyPlus* é resultado da associação e evolução do DOE-2 e BLAST, e é atualmente um dos softwares mais difundidos entre projetistas e pesquisadores (USDOE, 2019). Desenvolvido na Universidade Federal do Paraná, o programa Mestre (SCHMID, 2001) simula o comportamento térmico de edificações em múltiplas zonas, desenvolvido em linguagem Java para aplicação didática dos alunos do curso de Arquitetura e Urbanismo.

No Brasil existem duas normas de desempenho térmico para edificações, ambas dizem respeito a edifícios até cinco pavimentos. São elas a Norma de Desempenho Térmico - NBR 15220 (ABNT, 2005), e a Norma de Desempenho para Edifícios Habitacionais até Cinco Pavimentos - NBR 15575 (ABNT, 2013). Existem também processos nacionais de certificação do desempenho energético sendo eles o Selo Casa Azul da Caixa Econômica Federal e o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações do PROCEL. De origem internacional, destacam-se os modelos norte-americano LEED - *Leadership in Energy and Environmental Design* e o francês HQE, no Brasil adaptada para o processo AQUA.

---

<sup>3</sup> Stephenson e Mitalas (1967), Kusuda (1969), Mitalas e Arsenault (1971), Peavy (1978) e Hittle (1981).

### 2.1.1 Características térmicas dos materiais

Os materiais construtivos possuem características térmicas que determinam seu comportamento quando na presença de fluxos de calor. As características térmicas também podem ser verificadas em sistemas compostos, como resultado do conjunto de materiais empregados. No Brasil, a norma NBR 15220:1 (ABNT, 2005) define tais características, o QUADRO 1 apresenta uma síntese de algumas das propriedades consideradas nesta pesquisa.

QUADRO 1- CARATERÍSTICAS TÉRMICAS DOS MATERIAIS.

Grandeza	Definição	Símbolo	Unidade
Condutividade térmica	Propriedade física de um material homogêneo e isótropo, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de $1 \text{ W/m}^2$ , quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de $1 \text{ Kelvin}$ por metro.	$\lambda$	$\text{W}/(\text{m.K})$
Resistência térmica	Quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário.	R	$(\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$
Transmitância térmica	Inverso da resistência térmica total.	U	$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$
Capacidade térmica	Quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema.	C	J/K
Calor específico	Quociente da capacidade térmica pela massa.	c	$\text{J}/(\text{kg.K})$
Densidade de massa aparente	Quociente da massa pelo volume aparente de um corpo.	$\rho$	$\text{kg}/\text{m}^3$
Difusividade térmica	Quociente da condutividade térmica de um material ( $\lambda$ ) pela sua capacidade de armazenar energia térmica ( $\rho c$ ).	$\alpha$	$\text{m}^2/\text{s}$
Absortância solar	Quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície.	$\alpha$	

FONTE: Adaptado de ABNT (2005).

As propriedades térmicas dos materiais são influenciadas por fatores microscópicos como a força intramolecular das substâncias que os compõem, bem como a presença de impurezas nessas substâncias.

Em materiais não homogêneos, tais como concreto e argamassa, as propriedades térmicas dependem também dos subcomponentes da mistura. Exemplo disso é o tipo de agregado graúdo aplicado na formulação do concreto, pedra brita basáltica e argila expandida são materiais usados para essa finalidade e que possuem comportamento térmico significativamente diferente, afetando o peso e o desempenho térmico do concreto (SACHT; ROSSIGNOLO; SANTOS, 2010).

Além dos subcomponentes, é necessário observar a presença de vazios, que desencadeiam processos de convecção internamente, e também o teor de umidade no material, que altera a transmissão de calor devido à alta condutividade térmica da água (DUARTE, 2004). No caso do uso do solo como material construtivo, a observação dos fatores mencionados é feita através de equações da ciência chamada mecânica dos solos, visto a grande variedade de solos a caracterizar.

Na construção civil, investigações a respeito das propriedades térmicas dos materiais são necessárias para melhor compreender questões como as patologias construtivas (KASSIR, BANDYOPADHYAY; REICH, 1996; DUARTE, 2004) e a resistência da edificação à situação de incêndio (KODUR; SULTAN, 2003; CALDAS, 2008; FERNANDES et al., 2017). São também essenciais para a quantificação da energia incorporada à edificação, do consumo energético operacional e de manutenção do conforto térmico do usuário, sendo estes últimos temas relacionados a esta pesquisa.

No que tange o desempenho térmico da envoltória da edificação, destacam-se as propriedades térmicas dos materiais empregados em paredes externas e na cobertura da edificação, regiões de troca térmica intensa. Sobre este tema, Ferreira, Souza e Assis (2016) apontam que, no contexto das zonas bioclimáticas brasileiras, as propriedades de maior influência sobre o desempenho térmico são, de modo geral, capacidade térmica, absorvância solar e ventilação natural, quando se trata de parede, e transmitância térmica e absorvância solar, quando se trata de cobertura.

Os materiais mais comumente utilizados na envoltória dos edifícios brasileiros podem ser inferidos a partir dos dados da NBR 12721 (ABNT, 2005). A norma aponta a composição do lote básico do mercado para projetos-padrão residenciais. Entre os materiais listados estão o concreto, o tijolo cerâmico, a argamassa (cimento, areia e cal) e o gesso para acabamentos.

O lote básico, definido pela NBR 12721 (ABNT, 2005), expressa o padrão construtivo em alvenaria de blocos, característico do Brasil. Apesar disso, o mercado nacional passa por um momento de inclusão de novos modelos construtivos que resgatam o uso da madeira e utilizam de sistemas estruturais mais leves que o concreto armado convencional (NAVROSKI, 2010; MURARI et al. 2018). Sistemas, em geral, compostos por materiais de baixa massa específica como a madeira *soft* ou o aço, *wood frame* e *steel frame*, respectivamente.

## 2.2 SOLUÇÕES DE ENVOLTÓRIA

A envoltória pode ser comparada à pele da edificação. Trata-se do conjunto de elementos construtivos que está em contato com o meio exterior, ou seja, que compõe os fechamentos dos ambientes internos em relação ao ambiente externo (PROCEL, 2014)<sup>4</sup>.

Partindo desse conceito, a envoltória pode ser interpretada como a barreira entre o microclima externo e interno e, por isso, tem relação direta com o desempenho térmico da edificação. Suas superfícies de fechamento (paredes externas, cobertura e aberturas) são as de maior exposição à variação climática e mais suscetíveis às trocas térmicas. Nesse contexto, Pirró (2015) aponta que é relevante o papel da concepção da envoltória na busca por um maior grau de eficiência energética e maior grau de conforto térmico para os usuários. Nesta pesquisa, a envoltória é entendida sob o enfoque dos fechamentos opacos.

A envoltória pode ser constituída por combinações dos mais diversos materiais. Como visto no item 2.1.3, os materiais possuem propriedades térmicas que determinam o comportamento térmico dos elementos construtivos por eles formados. Às diversas combinações de materiais, em diferentes camadas e espessuras, chama-se de solução de envoltória. Cada solução possui suas próprias características, como a transmitância, resistência e capacidade térmica específicas da combinação.

A escolha da combinação mais adequada ao projeto pode levar em conta fatores como o microclima da região, função e uso da edificação, disponibilidade de materiais, custo e também o tipo de estratégia e desempenho energético almejado. Pela ótica bioclimática, as diferentes configurações construtivas se adaptam a diferentes tipos de clima, respeitando as particularidades de cada um deles, como estabelece a NBR 15220:3 (ABNT, 2005).

Dessa forma, pode-se distinguir duas combinações principais de elementos utilizados em envoltórias: materiais leves e materiais pesados. Entende-se por materiais leves aqueles que têm baixo calor específico, baixa densidade e que, por consequência, possuem baixa capacidade térmica. Materiais pesados, por outro lado, são aqueles cujo calor específico e densidade são elevados, resultando em alta capacidade térmica.

---

<sup>4</sup> Na definição dada em PROCEL (2014), o meio interno exclui a parcela construída no subsolo, referindo-se exclusivamente aos elementos construídos acima do solo.

Em geral, quando constituídas por materiais leves, as envoltórias tendem a perder maior quantidade de calor para o ambiente externo, sendo estes mais sensíveis a variações de temperatura do microclima local. Segundo Alves (2014) quando se tem grande diferença de temperatura entre o meio externo e interno e pretende-se climatizar um ambiente artificialmente, este dispositivo tende a ser menos econômico, pois gasta-se mais energia ao tentar manter a temperatura interna constante. Por essa razão, em climas com grande amplitude térmica anual, os edifícios leves possuem camada de isolamento no interior dos elementos da envoltória. Dessa forma, aumenta-se consideravelmente a resistência térmica de paredes e cobertura em oposição à baixa capacidade térmica.

Em contrapartida, as envoltórias de maior massa são capazes de armazenar maior quantidade de energia térmica, pois possuem capacidade térmica superior. Assim, é possível manter a temperatura interna mais estável em relação à variação da temperatura externa. Por consequência dessa maior estabilidade, a climatização de edifícios de alta massa, em condições de grande amplitude térmica, tende a ser mais eficiente energeticamente. Entretanto, esta avaliação do que é considerado eficiente energeticamente pode se mostrar superficial quando é levada em conta a energia embutida no processo de fabricação e de demolição dos elementos construtivos.

A envoltória típica brasileira reflete majoritariamente aquilo que a norma NBR 12721 (ABNT, 2005) traz em seu lote básico: alvenaria de blocos cerâmicos. Pirró (2015) também comenta a concepção das envoltórias mais utilizadas em edificações comerciais brasileiras, a autora discute a frequente opção por sistemas que não refletem o microclima local, geralmente adaptados do modelo de arquitetura comercial, resultando na necessidade de climatização ativa por aparelhos como o ar-condicionado.

Estudos realizados no contexto construtivo brasileiro trazem entre as suas principais conclusões críticas às recomendações generalizadas apresentadas pelas normativas NBR 15220 (ABNT, 2005) e NBR 15575 (ABNT, 2013). Vários autores questionam as recomendações normativas quanto as soluções propostas e os valores-limite de transmitância e capacidade térmica de paredes e cobertura (PEREIRA; ASSIS, 2005; OLIVEIRA, 2012; CHVATAL, 2014; FERREIRA; SOUZA; ASSIS, 2016).

Uma das críticas está relacionada aos valores de capacidade térmica recomendados nas normativas, considerados inferiores às reais necessidades das zonas bioclimáticas brasileiras.



O QUADRO 2 mostra uma síntese das recomendações resultado do trabalho de Ferreira, Souza e Assis (2016), que demonstra a preponderância da capacidade térmica ( $CT_{par}$ ) como característica mais relevante para as paredes e a transmitância térmica ( $U_{cob}$ ) como mais relevante característica térmica das coberturas.

QUADRO 2 - RECOMENDAÇÕES DE PROPRIEDADES TÉRMICAS EM FUNÇÃO DA ZONA BIOCLIMÁTICA

ZB	Cidade	Paredes			Aberturas		Coberturas				%
		$U_{par}$	$CT_{par}$	$\alpha_{par}$	Somb	$F_{vent}$	$U_{cob}$	$CT_{cob}$	$\alpha_{cob}$	$F_{cob}$	
	Campos do Jordão										80,9
	Maringá										87,8
ZB1	São Joaquim										54,9
ZB2	Florestal										84,9
	Santa Maria										87,1
	Teresópolis										78,5
ZB3	Belo Horizonte										98,0
	Florianópolis										96,6
	Ponta Porã										87,5
ZB4	Brasília										100
	Pirapora										90,8
	São Carlos										80,7
ZB5	Garanhuns										98,2
	Vitória da Conq.										91,4
	Campos										83,6
ZB6	Jataí										99,5
	Bom Jesus da Lapa										72,0
	João Pinheiro										91,1
ZB7	Bom Jesus do Piauí										95,8
	Cabrobó										96,5
	Cuiabá										93,8
ZB8	Manaus										89,9
	Pão de Açúcar										79,1
	Rio de Janeiro										87,3

FONTE: Ferreira, Souza e Assis (2016).

Nota: Legenda

	recomendações mandatórias
	recomendações opcionais
	recomendações sazonais

### 2.2.1 Envoltória como meio de armazenamento de calor

Ao adicionar materiais pesados às paredes e cobertura, aumenta-se a capacidade desses elementos de armazenar calor durante o período diurno, liberando-o posteriormente no período noturno, no chamado efeito de inércia térmica. De modo geral, o aumento da capacidade térmica das paredes propicia elevação na inércia térmica da edificação como um todo, o que não ocorre com o simples aumento da resistência térmica das paredes (AKUTSU; BRITO; CHIEPPE, 2013). A partir disso, entende-se a relevância das propriedades dos materiais (espessura, densidade e calor específico) na estratégia (ativa ou passiva) utilizada para atingir o conforto térmico na edificação.

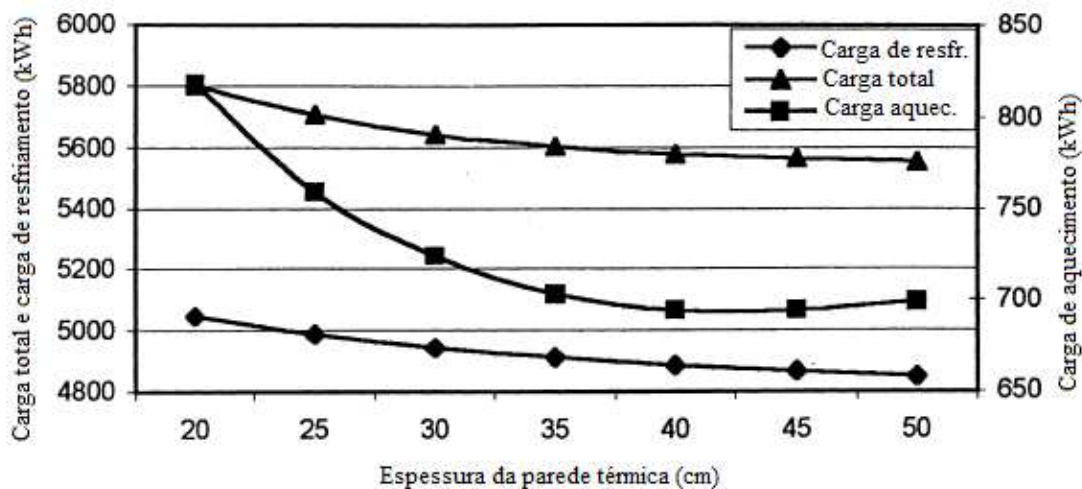
Além da capacidade térmica, outros fatores podem influenciar no armazenamento de calor através da envoltória como a absorvância solar e a emissividade. Estas propriedades se relacionam com o processamento da radiação que incide sobre as superfícies da envoltória. O fator de forma de paredes e cobertura também afeta a quantidade de energia armazenada nesses elementos (MEIR; ROAF, 2006).

Combinações dessas estratégias (materiais e formas) podem ser verificadas em registros de arquitetura vernacular com diversas soluções construtivas desenvolvidas a partir de materiais naturalmente densos ou de alto poder calorífico, como pedras e o próprio solo (LEWCOCK, 2006).

O uso do solo como material construtivo data por volta do sétimo milênio a.C, desde os primeiros assentamentos habitacionais escavados. Segundo Meir e Roaf (2006), eram difundidas técnicas como tijolos de adobe ou taipa de pilão fundida em moldes. Ainda segundo os autores, esses sistemas e técnicas de construção em solo e pedra passaram por longos períodos de detalhamento e adaptação, considerando as características das propriedades dos materiais de cada região.

Entre os potenciais benefícios do aumento de massa térmica nas paredes da envoltória estão, por exemplo, a redução na carga de aquecimento e de resfriamento da edificação. Um estudo realizado em Chipre, ilha localizada na região do mediterrâneo, apontou para a redução da carga de aquecimento da ordem de até 40%, a partir da instalação de paredes de concreto com pelo menos 20 centímetros de espessura (KALOGIROU; FLORIDES; TASSOU, 2002). A variação de cargas para diferentes espessuras de parede é apresentada na FIGURA 4.

FIGURA 4 - O EFEITO DA ESPESSURA DA PAREDE NO VALOR DA TAXA DE PRODUÇÃO DE CALOR



FONTE: Traduzido de Kalogirou, Florides e Tassou (2002).

Esses resultados, é claro, são influenciados pelo clima local. No Brasil, a norma 15220 (ABNT, 2005) recomenda o uso de paredes pesadas para as regiões de grande amplitude térmica. No entanto, pesquisas apontam que o uso de paredes de alta capacidade térmica não deve se restringir às regiões citadas na norma, sendo recomendadas para grande parte das zonas bioclimáticas brasileiras, em função da necessidade de agregar capacidade térmica ao invólucro (PEREIRA; ASSIS, 2005; OLIVEIRA, 2012; CHVATAL, 2014; FERREIRA; SOUZA; ASSIS, 2016), como visto no QUADRO 2

Edifícios com alta inércia térmica geralmente fazem uso de componentes construtivos com alta capacidade térmica, como materiais com valores elevados de calor específico e massa específica, bem como grandes espessuras em seus elementos (AKUTSU; BRITO; CHIEPPE, 2013). Muito embora seja recomendada a alta inércia térmica, esses fatores implicam em maior volume de materiais pesados empregados na edificação e, conseqüentemente, maior energia incorporada no processo pré-operacional (fabricação de materiais) e pós-operacional (demolição). Com a substituição dos materiais naturais (solo e pedras) por materiais industrializados (concreto e blocos cerâmicos), a questão é agravada, pois os materiais industrializados são obtidos a partir de processos de queima, tendo gases poluentes e resíduos como subprodutos, impactando ainda mais negativamente o ciclo de vida das edificações. Além disso, com grande percentual de perdas, estes materiais somam a maior parte dos descartes de Resíduos de Construção Civil, conforme demonstrado na TABELA 1.

TABELA 1 – RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Componentes	Porcentagem
Argamassa	63
Concreto e blocos	29
Outros	7
Orgânicos	1
Total	100

FONTE: IPEA (2012).

Apesar dos inconvenientes impactos ambientais, modelos construtivos pesados são ainda formas tradicionais de construção. Para além do desempenho térmico característico desse modelo, credita-se a alguns fatores a resistência no processo de aceitação de inovações. Para Oliver (2006), a consciência da necessidade, utilidade evidente e melhorada, a viabilidade econômica e a compatibilidade cultural, além do desejo de status que está associado à inovação, influenciam nesse processo de aceitação. Dessa maneira, é possível compreender de forma genérica a resistência do mercado brasileiro à introdução de diferentes sistemas construtivos. Como herdeiro da cultura colonial portuguesa, o país reflete, de certa forma, o padrão construtivo de alvenaria adquirido da coroa. Há que se considerar também a viabilidade econômica das novas tecnologias e a visão cultural do que é construção de “alto padrão”.

### 2.2.2 Envoltórias leves e adaptabilidade

O uso de materiais leves na execução de elementos construtivos também pode ser verificado na arquitetura vernacular. Registros de edificações construídas a partir de toras e galhos de madeira, bambu e palha foram encontrados em diversas regiões e climas, bem como as tendas elaboradas em corda, tecido e peles, características das culturas nômades (LEWCOCK, 2006; OLIVER, 2006). No caso desses povos nômades, o desenvolvimento de estruturas leves, de fácil montagem e desmontagem, reflete o próprio sistema econômico e de manutenção da vida em sociedade (OLIVER, 2006). Versões deste sistema ainda podem ser verificadas na cultura dos povos Nenets, nômades das regiões de frio extremo na Rússia.

Em contexto mais atual, os sistemas construtivos leves são elaborados a partir de paredes, lajes e painéis constituídos de materiais de baixo peso específico associados a sistemas estruturais de grande resistência (tração e compressão). Os sistemas estruturais podem ser metálicos, como os feitos de aço (*steel frame*), de madeira laminada colada (*wood frame*), de concreto (painel monolítico), entre outros.

As paredes e cobertura são geralmente constituídas de várias camadas, entre as quais camadas dedicadas ao isolamento térmico, necessárias para aumentar a resistência térmica da edificação, e de proteção contra efeitos da umidade (CSSBI, 2002). Podem ser constituídas de painéis de fechamento opaco ou translúcido, como o vidro. Os fechamentos translúcidos, de baixa resistência térmica, quando aplicados na envoltória aumentam significativamente a transmitância térmica, o que pode levar à ineficiência energética do edifício devido ao aumento da área de perda de calor.

Para além dos modelos citados, com descrições típicas do mercado construtivo norte-americano e do estilo de arquitetura internacional (VELJKOVIC; JOHANSSON, 2006), as construções leves podem ser verificadas também em projetos elaborados à luz da arquitetura vernacular e da arquitetura bioclimática. Com projetos leves adaptados ao clima local, bem como na reutilização de contêineres, cuja envoltória é formada essencialmente por casca metálica. Também pode ser verificado em projetos adaptáveis, cuja produção é majoritariamente industrial e de baixo peso específico.

Vários estudos apontam as vantagens de sistemas construtivos leves, como o *Light Steel Frame - LSF*, em relação à construção pesada (GORGOLEWSKI, 2007; MARTINS; SANTOS; DA SILVA, 2014; SOARES et al., 2017). De acordo com estes autores, o sistema leve apresenta baixo peso com alta resistência mecânica; maior velocidade de construção; grande potencial para reciclagem e reutilização; flexibilidade arquitetônica para propósitos de adaptação; pré-fabricação facilitada, permitindo construção modular, adequado para a economia de produção em massa. Alguns modelos construtivos adaptáveis podem ser verificados no levantamento de Fischer (2017), em que o autor explora a aplicação dessa técnica construtiva em Habitações de Interesse Social - HSI no contexto brasileiro e formula uma proposta de HSI baseada em fechamentos opacos leves e adaptabilidade para ampliação.

Para que se compreenda o potencial de adaptação no contexto das edificações, são necessárias as definições de durabilidade técnica e durabilidade funcional. A ISO 13823 (2008) define como durabilidade técnica a capacidade que materiais e componentes têm de respeitar os requisitos mínimos de desempenho deles esperados. Para isso, são consideradas a manutenção, a influência das ações ambientais e o envelhecimento natural. Por outro lado, a durabilidade funcional está relacionada com a capacidade de um determinado produto em ser útil para seus usuários (BULOW, 1986 *apud* FISCHER, 2017). Muitas vezes, o produto pode

chegar ao final de sua durabilidade funcional sem que sua durabilidade técnica tenha sido exaurida, ou o inverso.

No caso particular das envoltórias de edificações, a utilização de placas industrializadas no fechamento da envoltória pode ser um exemplo de diferentes valores de durabilidade. As placas pré-fabricadas de material resistente podem ser reaproveitadas em outras edificações de forma integral, pois sua durabilidade técnica pode ser superior à sua durabilidade funcional. Tal grau de reaproveitamento é inviabilizado quando do uso de métodos construtivos em alvenaria. Fischer (2017) chama de energia de sobra, ou energia residual, a diferença entre os valores de durabilidade funcional e técnica, sendo possível avaliar quantitativamente a energia ganha no ciclo de vida da edificação, a partir da adoção do projeto adaptável. A possibilidade de reincorporação do elemento construtivo em uma outra edificação amplia o ciclo de vida da edificação na medida que é evitada o consumo de energia na produção de novos elementos.

Além de proporcionarem adaptabilidade, os sistemas construtivos leves podem ser pré-fabricados total ou parcialmente. Os processos automatizados reduzem as perdas por geração de resíduos de construção e aceleram o tempo de execução da obra (SOARES et al., 2017). As perdas podem ser correlacionadas ao nível de qualidade do processo construtivo, processos com alto índice de perdas são considerados de baixa qualidade (DEMING, 1986 *apud* SOIBELMAN, 1993). Nesse sentido, o sistema construtivo leve se apresenta como processo de maior qualidade e controle, pois se relaciona com os princípios da construção enxuta e racionalização.

A construção enxuta ou *lean construction*, como originalmente é chamada na pesquisa de Koskela (1992), é uma filosofia que caracteriza a construção civil como sendo uma indústria provida de um sistema de produção temporário, cujos objetivos são entregar o produto (edificação) de forma que o valor seja maximizado e os desperdícios reduzidos (BALLARD; HOWELL, 2004). A racionalização construtiva, proposta que visa reduzir o tempo de execução de obras, discutida na pesquisa de Franco (1992), pode ser viabilizada pelos princípios da construção enxuta (VIVAN; PALIARI; NOVAES, 2010). No QUADRO 3 são apresentados os princípios das filosofias mencionadas (objetivos e meios), é possível notar que a industrialização do processo construtivo e a utilização de sistemas leves vão ao encontro destes objetivos.

QUADRO 3 - RACIONALIZAÇÃO CONSTRUTIVA VIABILIZADA POR PRINCÍPIOS DA CONSTRUÇÃO ENXUTA

Racionalização Construtiva (FRANCO, 1992)	Construção Enxuta (Koskela, 1992)	MEIOS
OBJETIVOS		
Diminuição do consumo de materiais	Reduzir atividades que não agregam valor (benchmarking)	
Diminuição de mão-de-obra	Reduzir atividades que não agregam valor (benchmarking). Redução do tempo de ciclo.	
Uniformização do produto	Reduzir a variabilidade.	
Preparação para aplicação de técnicas racionalizadas em etapas posteriores	Introduzir melhoria contínua no processo.	
Aumento do nível organizacional do trabalho	Focar o controle no processo completo.	
Aumento da segurança (perdas materiais e humanas)	Aumentar a transparência no processo.	
Aumento do desempenho e qualidade	Aumentar o valor do produto através da consideração das necessidades do cliente	
Diminuição de manifestações patológicas	Reduzir a variabilidade	

FONTE: Vivan, Paliari e Novaes (2010).

Em relação ao desempenho térmico da envoltória, um dos desafios técnicos em sistemas leves está na baixa capacidade térmica de seus elementos. Devido à deficiência de massa térmica, normalmente são utilizados materiais isolantes como forma de ampliar a resistência térmica. Assim, diminui-se o fluxo de calor e a transmitância das superfícies da envoltória. Contudo, a simples adição de camadas isolantes não resolve por si a questão térmica da edificação (AKUTSU, 1998). A respeito disso, Akutsu, Brito e Chieppe (2013), avaliam o comportamento térmico de paredes de concreto (pesadas) e poliestireno expandido (leves) e sua relação com a inércia térmica. O estudo confirma que, muito embora a resistência térmica desse material seja elevada, a amplitude térmica diária é significativamente superior para as configurações de paredes de poliestireno expandido, comparando-se com as configurações com paredes de concreto com mesma espessura. A falta de capacidade térmica apresentada pela parede de poliestireno expandido resulta em maior flutuação na temperatura interna da edificação durante o dia (AKUTSU; BRITO; CHIEPPE, 2013).

Nesse sentido, a adição de materiais com mudança de fase, os chamados *Phase Change Materials* – PCMs, pode ser uma técnica aplicada para obter aumento da capacidade térmica e atenuação do efeito da amplitude térmica. Como apontado em Soares et al. (2017), esses materiais podem ser usados para melhorar o conforto térmico interno e reduzir a demanda por

climatização artificial, além de fazerem uso do potencial térmico solar. Os PCMs também podem ser adicionados em outros materiais como concreto, argamassas e painéis. Sua aplicação é mais comum no hemisfério norte, ao ser avaliado para o contexto climático brasileiro, De Brito et al. (2017) concluem que devido às condições climáticas, o ponto de fusão necessário para o funcionamento dos PCMs nos climas brasileiros varia de 30 a 34°C. No mercado atual são encontrados PCMs com ponto de fusão em torno de 22°C, valor muito abaixo do considerado adequado, podendo inclusive conduzir ao pior desempenho nas zonas bioclimáticas 6 a 8 (clima quente). Limitações na aplicação de PCMs para as zonas bioclimáticas também são verificadas em Pons (2017). A proposta desenvolvida nesta pesquisa explora outro meio de agregar capacidade térmica às envoltórias leves: o potencial geotérmico através de trocadores de calor.

### 2.2.3 Câmaras de ar

Uma das soluções utilizadas para potencializar o desempenho térmico de envoltórias é o projeto de câmaras de ar entre camadas de paredes, piso e coberturas. A baixa condutividade térmica do ar se torna um elemento isolante quando o ambiente da câmara está limitado ao processo de condução de calor, ou seja, antes que se desenvolvam ali processos de convecção por movimento da massa de ar. O estado de transmissão é considerado de pura condução para câmaras de espessura até cinco centímetros (5 cm) segundo a NBR 15220:2 (ABNT, 2005). Nesse caso, apesar de ocorrerem processos de convecção e radiação, eles não são considerados significativos. Em câmaras de espessura superior aos cinco centímetros devem ser considerados os efeitos das trocas convectivas, muitas vezes associada a trocas por radiação, em processos de ventilação natural ou mecânica na cavidade de ar.

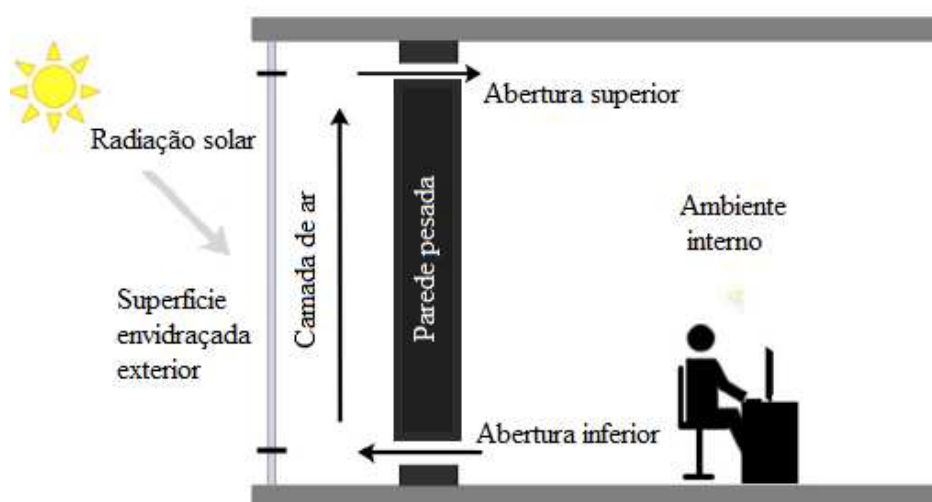
Em ampla revisão sobre a aplicação de camadas de ar nas envoltórias de edifícios, Zhang et al. (2016) descrevem as principais técnicas utilizadas quando da associação às paredes externas, janelas e telhado da edificação. As aplicações relacionadas às paredes externas, de particular interesse nesta pesquisa, são apresentadas na sequência:

**Parede Trombe** (ZHANG et al., 2016): A parede Trombe (FIGURA 5 FIGURA 5) consiste essencialmente em uma parede pesada, massiva, e uma camada externa de material translúcido que, em geral, é feita de vidro. Um canal de ar é estabelecido entre esses dois elementos. A energia solar de radiação atravessa a camada translúcida e fica “presa” no canal



de ar. A parede pesada é usada para absorver e armazenar o calor e, por isso, deve ser construída a partir de materiais de alta capacidade térmica, como tijolos, concreto, pedras e adobe. A face externa dessa parede massiva também recebe pintura em tons escuros a fim de aumentar a absorvência solar. A espessura do canal de ar nesse caso varia de 3 cm até 6 cm.

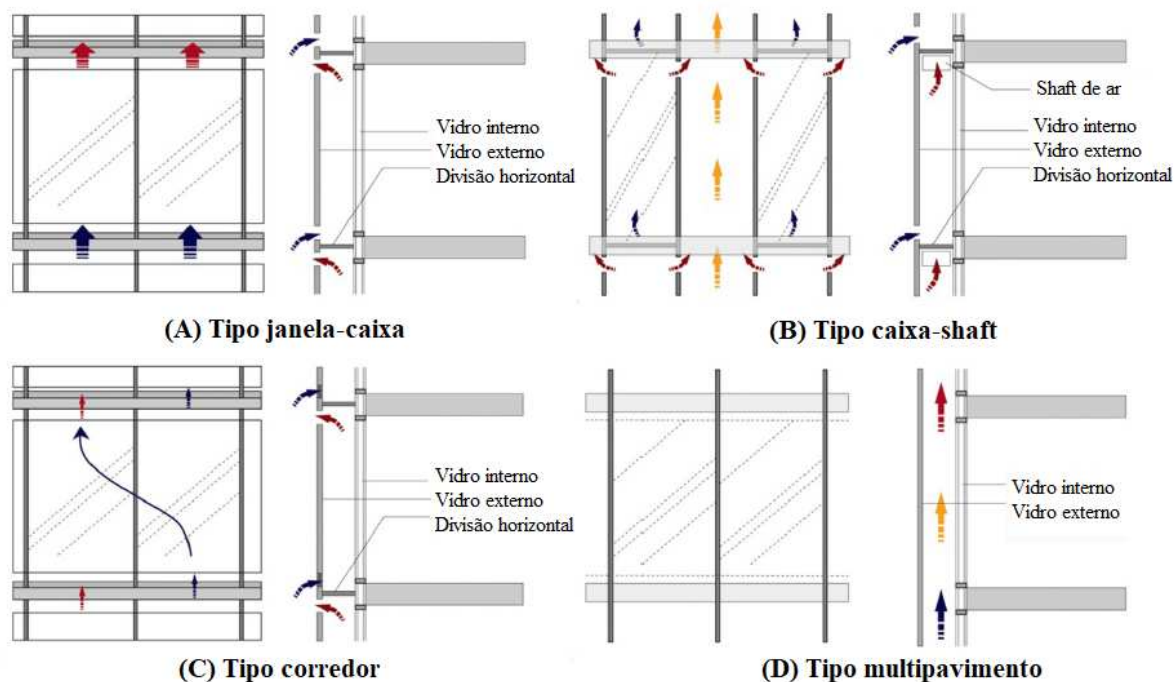
FIGURA 5 - ILUSTRAÇÃO DE PAREDE TROMBE CLÁSSICA



FONTE: Tradução livre de Zhang et al. (2016).

**Fachada dupla ventilada** (ZHANG et al., 2016): Esse tipo de fechamento externo é composto por camada externa, estrutura de fixação, camada interior e entre elas uma camada de ar. A camada externa é, geralmente, construída a partir de materiais rígidos como painéis de vidro. No entanto, também podem ser constituídas de outros materiais como revestimento cerâmico ou metálico. Esta camada mais externa cumpre a função de proteger o ambiente interno das intempéries e proporciona isolamento acústico extra ao edifício. Enquanto isso, a camada interior pode ser constituída de vidro duplo, proporcionando o efeito de fechamento translúcido a toda a envoltória, ou mesmo de alvenaria. É sobre a camada interior que se instalam as estruturas para fixação da camada mais externa. A espessura da camada de ar entre as duas “peles” pode variar muito de 20 cm até 200 cm. Algumas configurações são apresentadas na FIGURA 6.

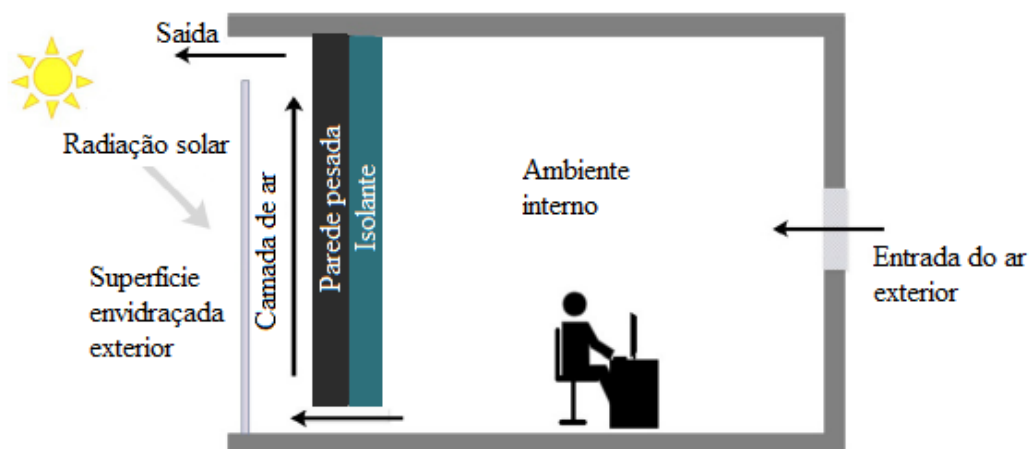
FIGURA 6 - TIPOS DE FACHADA DUPLA VENTILADA



FONTE: Tradução livre de Zhang et al. (2016).

**Chaminé solar** (ZHANG et al., 2016): A chamada chaminé-solar usa a radiação solar para induzir o efeito de flutuação térmica, aumentando a ventilação natural na edificação. Quando a energia solar é absorvida, a temperatura do ar aumenta, diminuindo a densidade do ar no canal. Dessa forma, o ar aquecido tende a se mover para a parte superior, onde é expulso na parte superior da chaminé. Existem duas configurações diferentes desse sistema, a chaminé-solar vertical (FIGURA 7) e a chaminé-solar inclinada.

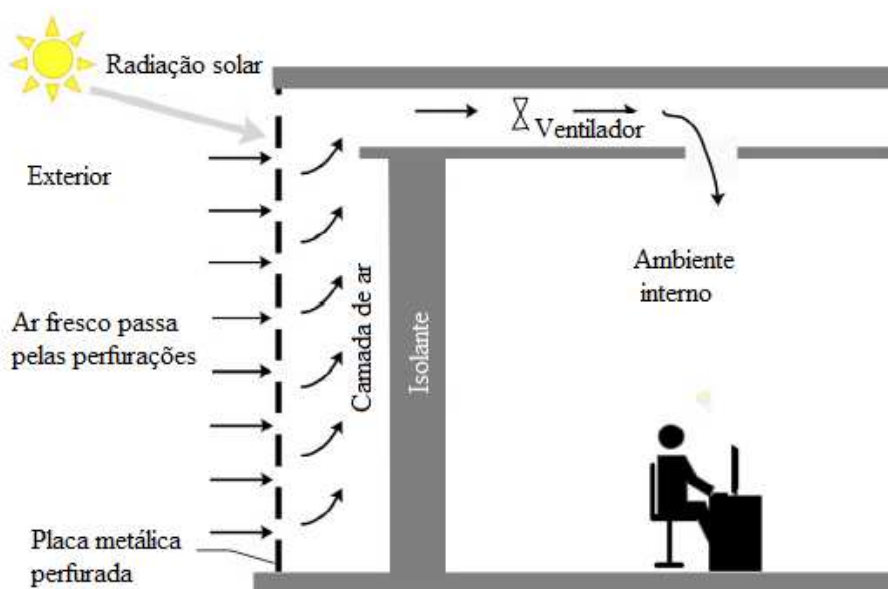
FIGURA 7 - ILUSTRAÇÃO DE ESQUEMA CHAMINÉ SOLAR VERTICAL



FONTE: Tradução livre de Zhang et al. (2016).

**Parede solar** (ZHANG et al., 2016): São sistemas de aquecimento formados a partir da associação de uma parede a uma placa metálica perfurada (FIGURA 8). A placa, de alta condutividade térmica, age absorvendo o calor e aquecendo o ar fresco. A face com função de absorção do calor é normalmente construída a partir de placa metálica perfurada (aço ou alumínio) coberta por revestimento adequado. Esta placa de absorção é fixada nas paredes externas da edificação. Com a ajuda de ventiladores, o ar exterior é forçado pelas perfurações para dentro da cavidade interna, onde o ar da camada é aquecido e liberado para o ambiente interno.

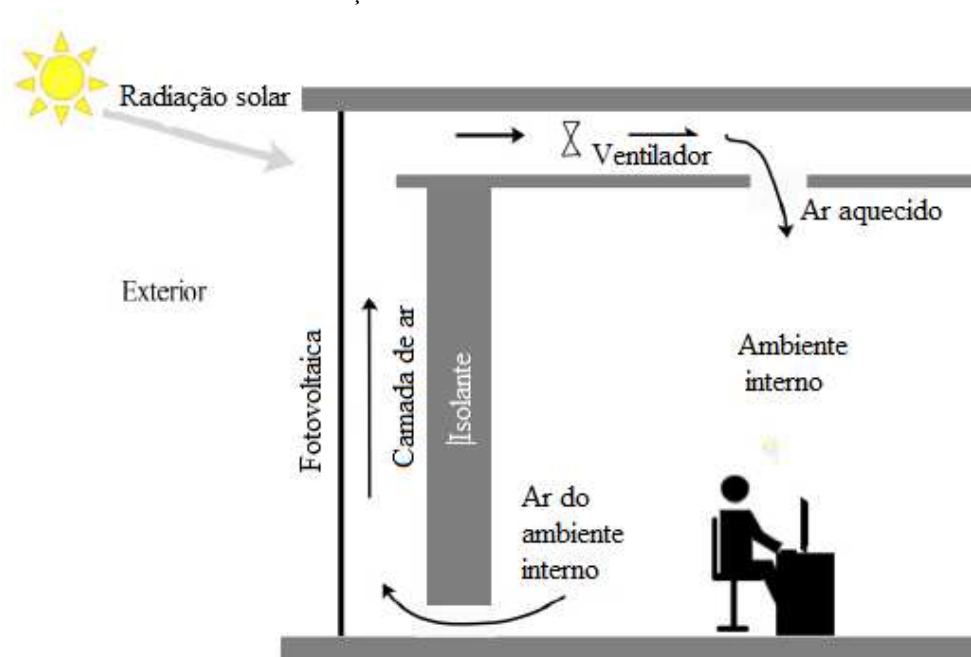
FIGURA 8 - ILUSTRAÇÃO DE ESQUEMA DE PAREDE SOLAR



FONTE: Tradução livre de Zhang et al. (2016).

**Fachada fotovoltaica ventilada** (ZHANG et al., 2016): O sistema chamado *Building Integrated Photovoltaic/Thermal* – BIPVT combina elementos da envoltória e módulos fotovoltaicos. Esse sistema pode não apenas produzir eletricidade como também reduzir a demanda por aquecimento e resfriamento. A tecnologia BIPVT pode incorporar elementos da envoltória como telhados, paredes externas (FIGURA 9) e *skylights*. As placas são podem ser integradas em esquema similar aos de fachada dupla ventiladas.

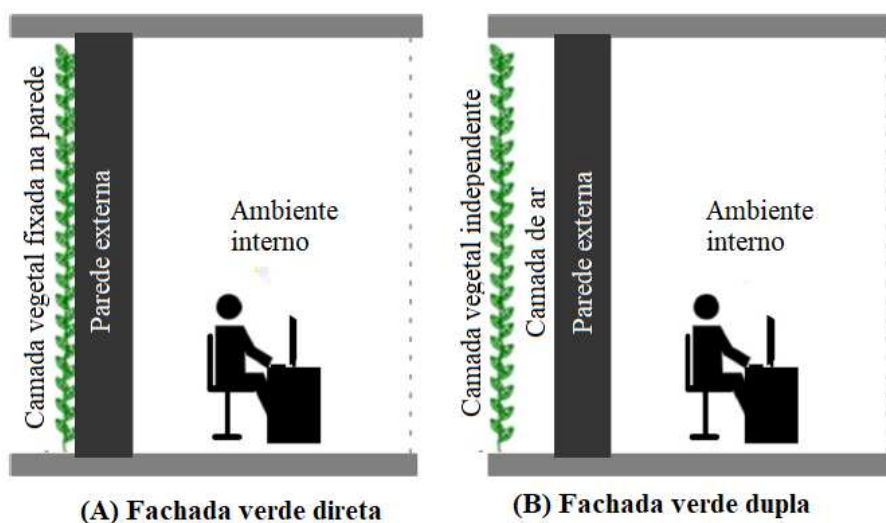
FIGURA 9 - ILUSTRAÇÃO DE FACHADA FOTOVOLTAICA VENTILADA



FONTE: Tradução livre de Zhang et al. (2016).

**Fachada dupla verde** (ZHANG et al., 2016): As fachadas verdes podem ser divididas em dois grupos: fachada verde direta (tradicional) e fachada verde indireta (aplicada em fachadas duplas). No sistema direto, as plantas se desenvolvem na parede externa, fixadas a ela. Já no sistema de fachada dupla, indireta, a face vegetal é independente, e fixada em estrutura específica à planta e câmara de ar entre as faces (FIGURA 10).

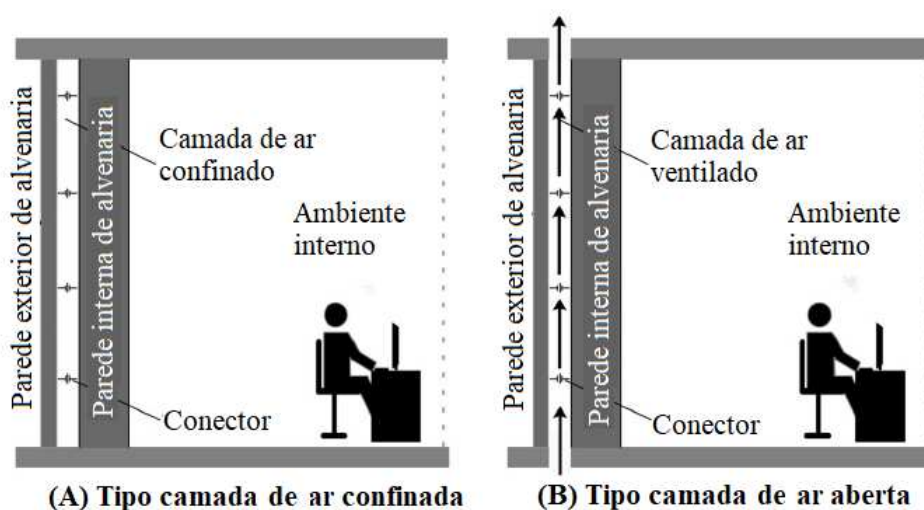
FIGURA 10 - ILUSTRAÇÃO DE ESQUEMA DE FACHADA VERDE DIRETA E FACHADA VERDE DUPLA



FONTE: Tradução livre de Zhang et al. (2016).

**Paredes de alvenaria dupla com câmara** (ZHANG et al., 2016): Também chamada de parede de cavidade, esse sistema consiste em duas faces de parede construídas em alvenaria com uma câmara de ar entre elas. A camada de ar pode ser fechada ou aberta. Principalmente quando fechada (FIGURA 11 A), a camada de ar atua como camada extra de isolamento térmico. O material utilizado na fachada mais externa deve ser próprio para evitar o efeito da radiação nesse caso. Quando aberta (**Erro! Fonte de referência não encontrada.** B), a cavidade de ar pode ser ventilada de forma natural ou mecânica.

FIGURA 11 - ILUSTRAÇÃO DE ESQUEMA PAREDE DE ALVENARIA DUPLA COM CÂMARA DE AR



FONTE: Tradução livre de Zhang et al. (2016).

### 2.3 SISTEMAS GEOTÉRMICOS

A capacidade térmica, quando existente em elementos das edificações, pode proporcionar benefícios energéticos. No entanto, para obter tais benefícios, os elementos devem ser construídos a partir de materiais de alta energia embutida, como pedras, tijolos cerâmicos maciços e concreto, já discutidos nas seções anteriores. A grande quantidade de energia requerida nessa técnica leva à reflexão por novas formas de garantir capacidade térmica na envoltória. É nesse contexto, que os sistemas geotérmicos se inserem. As soluções envolvendo o potencial geotérmico derivam da arquitetura vernacular, na qual havia o emprego de materiais naturais de massa específica elevada, como solo e rocha. O solo dispõe de alta capacidade térmica, e para acessá-la a edificação pode ser instalada no próprio subsolo ou se comunicar com ele através de algum sistema trocador de calor.

Nessa seção são apresentadas de forma resumida o comportamento térmico do solo, majoritariamente expressado pela condução de calor entre partículas, alguns sistemas geotérmicos e as principais variáveis a serem consideradas no acoplamento da edificação ao solo.

### **2.3.1 Transferência de calor no solo**

O fluxo de calor através do solo pode envolver os vários mecanismos de transporte. Devido à sua composição heterogênea e extensão, nos solos podem se desenvolver transmissões por condução, convecção e radiação. A condução é responsável pelo fluxo de calor através de materiais cujas partículas estão próximas umas das outras, pois depende do contato entre elas. Já o processo de convecção depende de meios porosos, pois acontecem com o movimento das massas de partículas. Assim, sendo o solo material composto por partículas, mas também por pequenos vazios e água intersticial, a condução é responsável pelo fluxo de calor através das partículas sólidas do solo, enquanto que através dos poros podem ocorrer os três mecanismos em simultâneo: condução, convecção e radiação. Além disso, processos de transmissão de calor latente, evaporação ou condensação, podem ocorrer entre a superfície do solo e o meio externo, assim como a convecção superficial (troca seca) na hipótese de fortes ventos.

A profundidade de penetração da onda de calor dentro de uma massa de solo e a amplitude de variação diária de temperatura são influenciadas pelas propriedades térmicas do solo. A penetração de uma onda de calor durante um dia é da ordem de 0,3 a 0,8 m (DUARTE, 2004).

De acordo com Duarte (2004), em vários casos, consideradas algumas condições, mecanismos de transferência de calor que não sejam por condução podem ser negligenciados. Estudos teóricos da transferência de calor em solos geralmente consideram o solo com um meio homogêneo e assumem que todos os processos de transferência de calor acontecem uniformemente no meio poroso (DE VRIES, 1958 *apud* DUARTE, 2004). Dessa forma, a modelagem matemática da condução de calor em solos homogêneos e isotrópicos podem ser aplicadas para descrever o fluxo de calor em solos.

Para Becker, Misra e Fricke (1992), a condutividade térmica dos solos é influenciada principalmente pela sua composição mineral, densidade, temperatura e grau de umidade. Sobre a influência da composição mineral, Duarte (2004) aponta que os diferentes minerais exercem

influência no comportamento térmico do solo na medida que são compostos por diferentes elementos, com diferentes propriedades físicas, mesmo que dentro de uma determinada faixa. As areias, em especial aquelas com maior quantidade de quartzo, geralmente têm maior condutividade térmica que areias com alta presença de plagioclásio e piroxênios, relacionados aos subgrupos de minerais feldspatos e inossilicatos, respectivamente (BECKER; MISRA; FRICKE, 1992).

A condutividade térmica da parte mineral do solo é em média aproximadamente 1,7 W/(m.K) e as condutividades térmicas da fase de água e ar são 0,6 e 0,026 W/(m.K) respectivamente (DUARTE, 2004). Como consequência, o calor é transferido principalmente através das partículas sólidas. Sobre a presença de água, de acordo com Jacson e Taylor (1986), como a condutividade térmica da água é maior do que a do ar, o solo úmido tem condutividade térmica maior do que o solo seco.

Segundo Mitchell (1993), a faixa de valores de condutividade térmica para solos finos, tais como: siltes, argilas siltosas, siltes argilosos e argilas é de 0,25 a 2,5 W/(m.K). Esses valores são considerados para solos saturados, já para solos insaturados os valores podem ser muito inferiores, devido ao efeito de resistência térmica dos vazios de ar. Ainda assim, todos os solos conhecidos estão entre os valores de 0,1 W/(m.K) e 6,0 W/(m.K) (HUKSEFLUX, 2019). A TABELA 2 apresenta os valores de condutividade térmica de alguns tipos de solos cuja classificação segue padrão internacional.

TABELA 2 -VALORES DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA E RESISTÊNCIA PARA DIVERSOS TIPOS DE SOLO

Tipo de solo	Condutividade térmica $\lambda_{\text{eff}}$ (W/m K)	Resistência $R_b$ (K/(W/m))
Silt and clay (Quarternary/Tertiary)	1.6	–
Mesozoic sediments	2.7–2.8	0.10–0.18
Marl (“Emschermergel”, Cretaceous)	1.5–2.0	0.11–0.12
Sand/silt, marl (Cretaceous)	2.3	0.08
Sand and clay (Quarternary/Tertiary)	2.8	0.11
Sand and clay (Quarternary/Tertiary)	2.2–2.3	0.07–0.08
Marl, clayey	2.5	0.12
Marl, sandstone, limestone (Mesozoic)	4.0	0.08
Silt, sandy (Quarternary/Tertiary)	3.4	0.06

FONTE: Florides e Kalogirou, 2007.

A densidade do material tem influência sobre a distribuição das partículas sólidas, quanto mais denso, mais concentrado o solo e maior a proximidade entre as partículas. Em geral, experimentos tem mostrado um aumento da condutividade térmica devido ao aumento

da densidade da porção seca do solo. Valores superiores de peso específico seco implicam em maior quantidade de material sólido por volume de solo, e melhor contato térmico entre grãos (DUARTE, 2004). A melhora do contato térmico facilita o mecanismo de transferência de calor por condução. Jonhansen (1975) propôs, a partir de observações empíricas, a equação de predição (Equação 1) da condutividade térmica a partir do peso específico seco do solo.

$$\lambda = \frac{0.135\gamma_d + 64.7}{2700 - 0.947\gamma_d} \pm 20\% \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$\gamma_d$  – peso específico do solo seco (kg/m<sup>3</sup>);

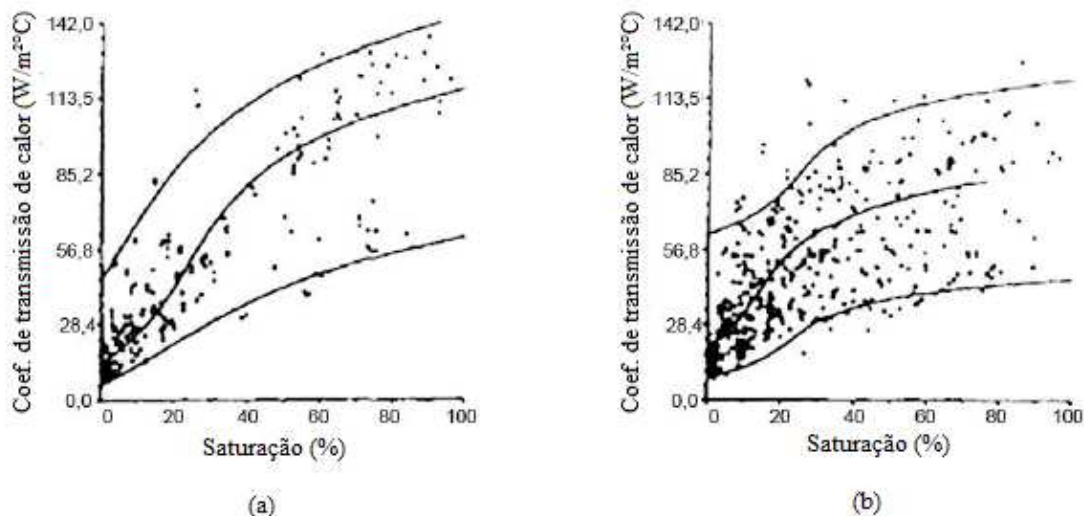
$\lambda$  – condutividade térmica (W/m.K).

Em relação à temperatura, a influência exercida só se torna relevante quando considerado o ponto de congelamento, uma vez que o gelo (1,6 W/m.K) tem condutividade térmica muito superior à da água (0,6 W/m.K) (BECKER; MISRA; FRICKE, 1992). O grau de saturação do solo é apontado por Labs (1989) e Jackson e Taylor (1986), como fundamental na condutividade térmica dos solos. A concentração de umidade no solo é capaz de alterar as propriedades físicas, pois quando a água está presente o calor latente de destilação é um fator adicional envolvido na transferência de calor (JACKSON; TAYLOR, 1986). A presença de água nos interstícios do solo afeta a condutividade térmica, pois preenche os espaços existentes entre os grânulos do solo e, assim, reduz a resistência térmica oferecida pelo vazio do ar. Porém, existe um limite no qual este valor de condutividade começa a se apresentar mais estável, determinado pela saturação do solo, o qual dependerá de cada tipo de solo (ALVES, 2014).

Jonhansen (1975) propõe equações para estimar a condutividade térmica do solo em caso saturado, no entanto neste estudo serão consideradas as formulações feitas por Becker, Misra e Fricke (1992). O autor avaliou de forma experimental a condutividade térmica de cinco tipos de solo: areia grossa (cascalho), areia, silte, argila e turfa. A seguir são apresentados os gráficos de correlação obtidos por Becker, Misra e Fricke (1992), para solos arenosos (FIGURA 12) e também para solos argilosos (FIGURA 13).

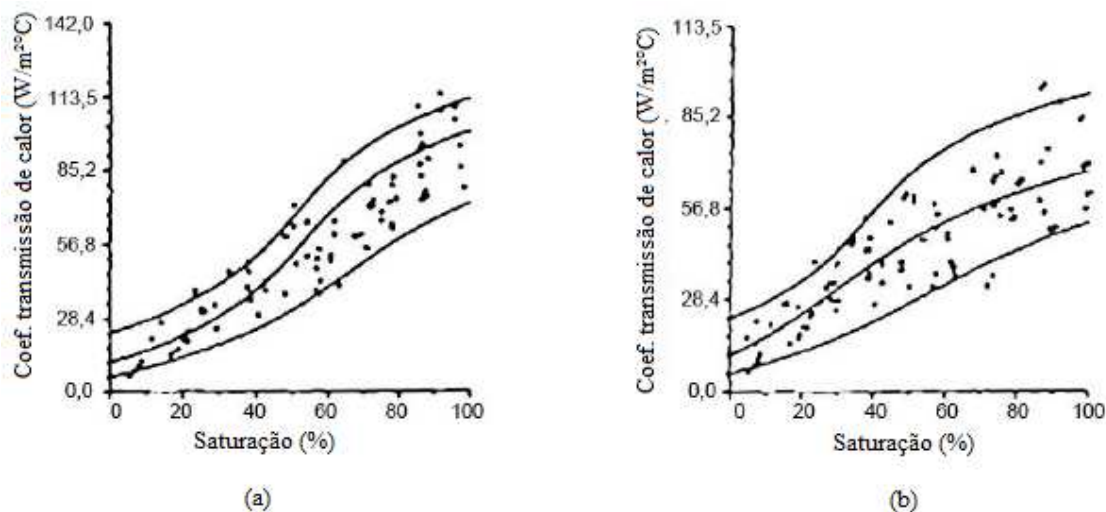


FIGURA 12 - TRANSMISSÃO DE CALOR EM FUNÇÃO DO GRAU DE SATURAÇÃO PARA SOLOS ARENOSOS



FONTE: Traduzido de Becker, Misra e Fricke (1992).

FIGURA 13 - TRANSMISSÃO DE CALOR EM FUNÇÃO DO GRAU DE SATURAÇÃO PARA SOLOS ARGILOSOS



FONTE: Traduzido de Becker, Misra e Fricke (1992).

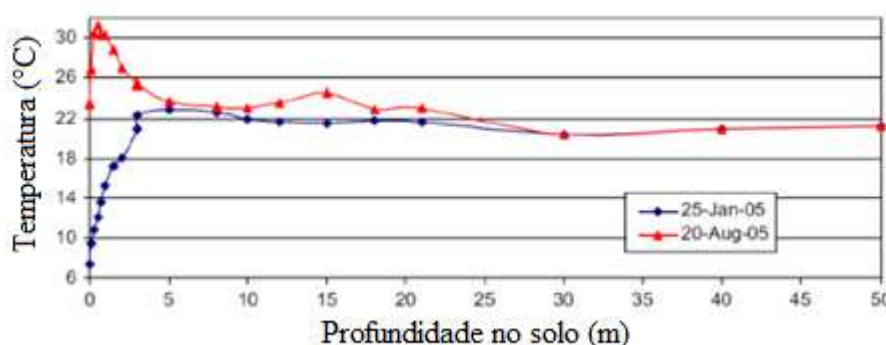
Conforme discutido em Alves (2014), o estudo conduzido por Becker, Misra e Fricke (1992) permite determinar os índices de condutividade térmica para os principais tipos de solo encontrados em Curitiba. Os solos mencionados são argilas e areias siltosas, com grande quantidade de matéria orgânica e água, com formação principal residual e de aluviões (TALAMINI, 2001). Em Curitiba, tal análise pode ser feita a partir dos dados apresentados em Kormann (2002) e Talamini Neto (2001), como classificação dos solos, densidade, saturação e presença de umidade para a formação geológica da região.

### 2.3.2 Trocador de calor e variáveis relacionadas

Os processos de transferência e armazenamento de calor nos solos acontecem de forma similar aos de outros materiais, já discutidos na seção 2.3.1. No caso dos solos, existem as chamadas trocas de calor secas: condução, convecção e radiação, e também as chamadas trocas úmidas: evaporação e condensação. Como discutido na seção 2.1, a condução é o principal processo interno de transferência de calor nas massas de solo, uma vez que existe proximidade entre as partículas. No entanto, é por radiação que o solo recebe o calor oriundo da incidência solar. A radiação recebida é armazenada na massa de solo e distribuída em sua profundidade.

Conforme demonstrado em Florides e Kalogirou (2007), o solo, por possuir alta capacidade térmica, passa a ter valores de temperatura mais constantes na medida em que aumenta a profundidade, como pode ser verificado na FIGURA 14.

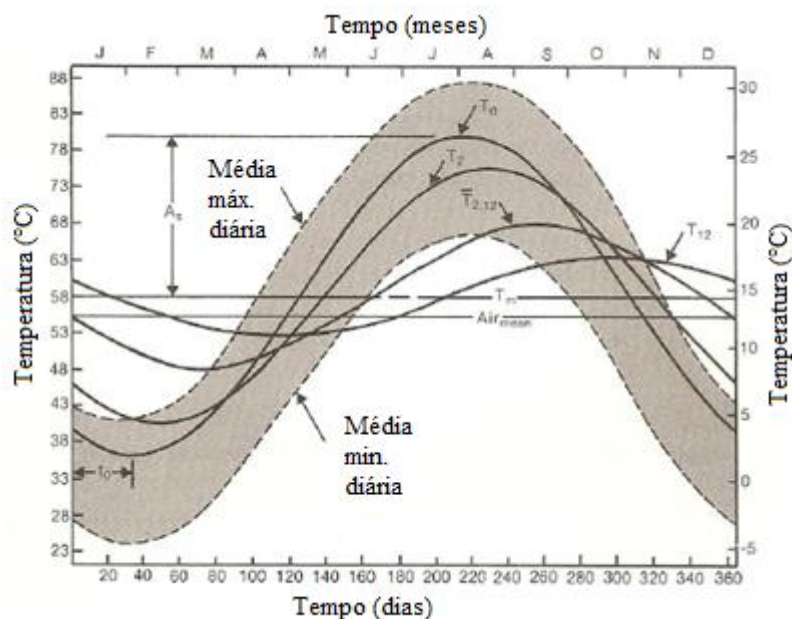
FIGURA 14 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DO SOLO (*IN LOCO*)



FONTE: Florides e Kalogirou (2007).

É em virtude da estabilidade térmica apresentada pela massa de solo no subterrâneo que surge o potencial da utilização do subsolo como trocador de calor. Enquanto a temperatura externa varia significativamente, seja na escala diária ou no decorrer do ano, a temperatura do subsolo está próxima à temperatura média anual registrada (LABS, 1989). Isso ocorre devido à alta capacidade térmica do solo, que atinge temperatura relativamente constante a partir de aproximadamente 3 a 4 m de profundidade, a FIGURA 15 demonstra a aproximação entre temperatura média anual e a temperatura do solo.

FIGURA 15 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DO SOLO (*IN LOCO*)



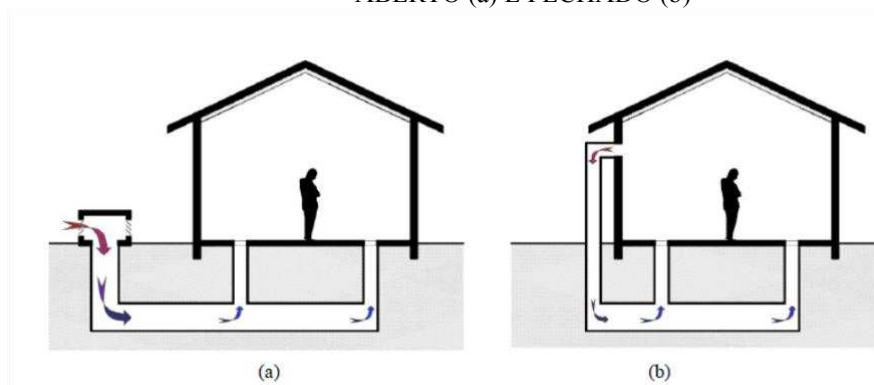
FONTE: Labs (1989).

Voltando à FIGURA 14, em estudo conduzido por Florides e Kalogirou (2007), é possível observar como o efeito sazonal se desfaz a partir da profundidade de cinco metros, onde existe a convergência clara dos valores de temperatura do solo.

Vários dispositivos podem ser usados para criar um sistema trocador de calor de aproveitamento da condição térmica estável do solo. Neste trabalho são discutidos, especificamente, os trocadores de calor por dutos subterrâneos ou Sistema de Climatização por Dutos Subterrâneos – SCDS.

Os SCDS são compostos por tubulação enterrada que realiza troca de calor com o solo, fazendo uso de ventiladores ou bombas d'água a fim de movimentar o fluido armazenado, e assim climatizar ambientes (ALVES, 2014). O fluido, que normalmente é água ou ar, é condicionado termicamente e utilizado para aquecer ou resfriar o ambiente construído. Em geral, esses sistemas realizam a troca de calor indireta com o solo, através do fluido, e depois realizam a descarga no ambiente interno. Na FIGURA 16 são apresentadas as duas versões do sistema *loop* aberto (a) e *loop* fechado (b).

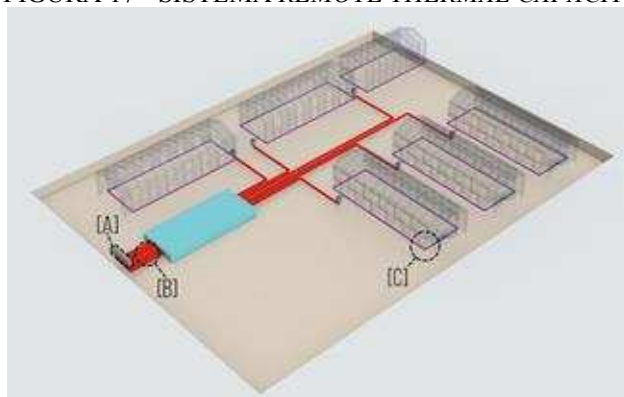
FIGURA 16 - SISTEMA DE DUTOS SUBTERRÂNEOS SCDS, CICLO ABERTO (a) E FECHADO (b)



FONTE: Alves (2014).

A proposta do sistema desenvolvido pelo professor Dr. Aloísio Leoni Schmid, apresentada em competição internacional de design (*Solar Decathlon Design Challenge*) visa também utilizar os dutos subterrâneos como trocadores de calor, estendendo o fluxo até o interior das paredes, adicionando uma segunda troca com a envoltória. Ou seja, o sistema não realizará a descarga do fluxo exclusivamente dentro do ambiente interno, mas também, e principalmente, na cavidade da envoltória, envolvendo a edificação com ar climatizado e diminuindo o possível desconforto do fluxo percebido no ambiente interno. Na FIGURA 17 é apresentado um esquema sintético da proposta do trocador de calor – parede, onde a tubulação é imersa em um tanque de água para melhor desempenho. O ar coletado em [A] é submetido ao trocador de calor em [B], atravessando um trecho submerso, para ser lançado no interior das paredes em [C].

FIGURA 17 - SISTEMA *REMOTE THERMAL CAPACITY*



FONTE: Equipe SDDC Paraná Team<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Composição da equipe Paraná Team: Aloísio Leoni Schmid, Maria Regina Leoni Schmid Sarro, Fabíolla Xavier Rocha Ferreira Lima, Márcio Henrique de Sousa Carboni; e alunos: Alexandre Ruiz da Rosa, Flávia Aparecida Oliveira, Julia Fernanda dos Santos Blasius, Luiz Gustavo Grochoski Singeski, Rafael Santos Fischer e Sofia Hinkel Dias.

Interessante notar que a estabilidade térmica que cada tipo de solo apresenta varia em função do seu comportamento térmico, que está associado a diversas variáveis, discutidas na seção 2.3.1. Nesse sentido, é importante conhecer o fenômeno de distribuição do calor pelo solo e qual a profundidade necessária para que seja possível explorar o potencial geotérmico para fins de climatização, como trocador de calor. A esse respeito, Popiel et al. (2001) apresentam uma proposta de divisão do solo em três zonas térmicas: zona superficial, com profundidade de até 1 metro, sofre influência direta das variações climáticas atmosféricas de curto prazo; zona rasa, que compreende profundidades entre 1 a 8 m para solos secos e leves, até 20 m para solos pesados, arenosos e úmidos. É onde a temperatura permanece constante e próxima à média anual, variando conforme as estações climáticas; zona profunda, com profundidades maiores que 8 a 20 m, onde a temperatura é constante, aumentando levemente em função do gradiente térmico da crosta terrestre. A previsão da temperatura do solo é problema tratado por vários autores<sup>6</sup>, a Equação 2, assume solo homogêneo e de difusividade térmica constante, para estimar a temperatura a qualquer profundidade  $z$  e tempo  $t$ :

$$T_{z,t} = T_m - A_s \exp \left[ -z \left( \frac{\pi}{365\rho} \right)^{1/2} \right] \times \cos \left\{ \frac{2\pi}{365 \left[ t - t_0 - \frac{z}{2 \left( \frac{365}{\pi\rho} \right)^{1/2}} \right]} \right\} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$T_{z,t}$  = temperatura do solo no tempo  $t$  e profundidade  $z$  (°C)

$T_m$  = temperatura média anual do solo (°C)

$A_s$  = amplitude de variação da temperatura da superfície

$z$  = profundidade em relação à superfície (m)

$\rho$  = difusividade térmica do solo (m<sup>2</sup>/h)

$t$  = tempo a partir do início do calendário anual (dias)

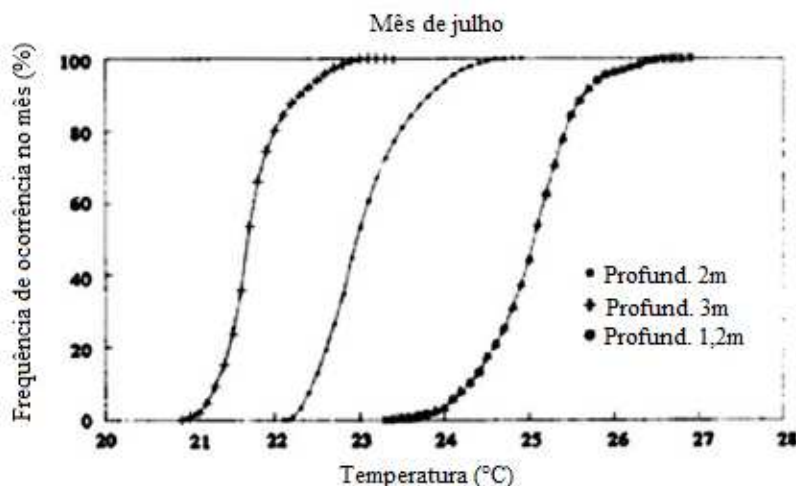
$t_0$  = fase constante

---

<sup>6</sup> Esta fórmula é utilizada por Labs (1989), e reinterpretada em Mihalakakou et al. (1992), Badescu (2007) e Alves (2014).

Mihalakakou et al. (1994) analisa, através de modelagem numérica transitória de sistema solo-ar do tipo horizontal, a influência da temperatura no desempenho final do sistema, apresentado na FIGURA 18. Avaliado a 1,2 m, 2 m e 3 m, o aumento da temperatura demonstra que o sistema é mais eficiente quando em maior profundidade.

FIGURA 18 - DESEMPENHO TÉRMICO DE RESFRIAMENTO DE UM SCDS NO MÊS DE JULHO PARA A REGIÃO DE ATENAS, GRÉCIA.



FONTE: Mihalakakou et al. (1994).

Para avaliar o efeito da profundidade no potencial de climatização por um SCDS, Alves (2014) testou as profundidades de 0,5 m e 4,0 m nas condições climáticas das oito zonas bioclimáticas brasileiras. O autor conclui que, a depender do clima da zona e o do objetivo (aquecimento ou arrefecimento), as profundidades exercem maior ou menor influência.

As zonas mais frias, Z01 e Z02 apresentam um melhor potencial de aquecimento comparando a temperatura do ar externo com o subsolo, enquanto que as zonas mais quentes, Z08, Z07 e Z06 apresentam melhor potencial de arrefecimento. Diferenças significativas foram encontradas para o perfil de temperatura do subsolo a 0,5 m e a 4,0 m de profundidade, sendo que em maior profundidade consegue-se o melhor desempenho térmico ao instalarmos um SCDS, quando se pretende aquecer ou resfriar um edifício. A estabilidade térmica do subsolo a 4,0 m é o principal fator que contribui para isso (ALVES, 2014).

Outro fator que exerce influência sobre a transferência de calor no solo é o recobrimento da superfície, pois tem relação com as trocas térmicas na camada superficial, como as trocas por radiação, convecção, evaporação e condensação. Alguns estudos avaliaram a condição de recobrimento para o SCDS, chegando as seguintes conclusões:

- A superfície recoberta com grama curta é mais eficiente, quando se quer resfriar um ambiente (e indiferente quando se quer aquecer), do que uma superfície em terra nua,

obtendo-se à 1,5 m de profundidade variação de 4°C entre as duas situações (POPIEL et al., 2001).

- A superfície recoberta por asfalto, recebendo radiação solar direta, a 3 m de profundidade, resulta em até 4°C de diferença de uma superfície instalada em jardim sombreado (SCHMID; REIS, 2011).
- O potencial de climatização para aquecimento diminui se grama rasteira é considerada na superfície, pois está associado as perdas por evapotranspiração. Já para o resfriamento, percebe-se que enterrar dutos sob um solo gramado aumenta o potencial, tanto a 0,5 m de profundidade como a 4,0 m, profundidades estudadas, nesse caso a perda de calor por evapotranspiração ou resfriamento evaporativo da superfície colabora com a diminuição da temperatura (ALVES, 2014).

Algumas pesquisas realizadas na temática dos trocadores de calor por duto subterrâneo são relacionadas abaixo:

- Labs (1989) apresenta o estado da arte sobre a questão de aplicação dos SCDS para os Estados Unidos, bem como uma discussão sobre a iteração edifício-sistema. Vale ressaltar que nos Estados Unidos existem dados disponíveis do mapeamento do comportamento térmico do subsolo e o entendimento científico de fatores que influenciam neste comportamento;
- Tzaféris *et al.* (1992) fazem uma análise comparativa, testando a precisão de oito modelos matemáticos para prever o desempenho térmico de SCDS;
- Kwork e Grondzik (2007), que determinam pré-requisitos para dimensionamento e instalação de SCDS, com comentários práticos baseados em diversas experiências, principalmente nos Estados Unidos. Os autores estabelecem como pré-requisito, para que o sistema seja viável, a temperatura do subsolo ter média anual registrada entre 13°C e 18°C;
- Florides e Kalogirou (2007) que também apresentam diretrizes de projeto, consideram para um sistema na horizontal, capacidade de resfriamento de 35 - 60 kWh por metro linear de tubulação com dutos enterrados a 1,5 - 2 m. Para um sistema na vertical, de dois poços, que utiliza água de lençol freático como fluido de climatização, eles devem ter de 20 - 300 m de profundidade com diâmetro de 10 - 15 cm. Para sistemas de um poço somente, estima-se um desempenho de 50 W para cada m de profundidade do poço;
- Ozgener (2011) apresenta levantamento atualizado sobre o uso de SCDS, com foco para o contexto da Turquia;

- Schmid e Reis (2011) apresentaram um ábaco e dimensionamento para ventilação por dutos subterrâneos a partir de modelagem computacional;
- Alves (2014) desenvolveu em sua dissertação uma análise do potencial de climatização por dutos subterrâneos para as oito zonas bioclimáticas brasileiras. O estudo parte de algumas simplificações e aplica parte da metodologia mencionada em autores como Labs (1989) e Kwork e Grondzik (2007). Considerou o tratamento da superfície e a profundidade de instalação do sistema na avaliação do desempenho.



### 3 MÉTODO

Neste capítulo são apresentadas a estratégia de pesquisa adotada e as etapas propostas para a obtenção dos resultados.

#### 3.1 DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE PESQUISA

A estratégia de pesquisa se baseou primeiramente na exploração da revisão da literatura dos três elementos vinculados ao problema: transferência de calor, soluções de envoltória e sistemas geotérmicos. Verificou-se a teoria a respeito dos principais mecanismos de transferência de calor e como estes se desenvolvem no ambiente construído, de forma a compreender os fenômenos físicos atuantes no sistema simulado. A respeito das envoltórias, foram estudadas as propriedades dos materiais e as implicações das soluções de envoltória no desempenho térmico do ambiente construído, apresentando vantagens e desvantagens no uso de envoltórias leves e pesadas. Sobre sistemas geotérmicos, foram verificados o comportamento térmico do solo e as variáveis relacionadas ao trocador de calor tipo subterrâneo SCDS.

A partir desse apanhado teórico se tornou mais clara a complementaridade existente em um sistema híbrido – que aqui significa um sistema formado pelo acoplamento do trocador de calor subterrâneo (SCDS) às paredes de envoltórias leves. As paredes leves, de baixa capacidade térmica, podem ter seu desempenho como barreira térmica aumentado quando acopladas ao trocador de calor, que passa a fornecer capacidade térmica através do fluido climatizado, que é o ar. Tomando este sistema híbrido, a pesquisa é então conduzida no sentido de compreender como o uso de diferentes materiais na envoltória pode influenciar a resposta térmica do sistema, dado um intervalo de temperaturas base e duas situações de ocupação para o ambiente. Para isso, são consideradas seis diferentes configurações construtivas leves para a envoltória, com três diferentes materiais. Busca-se responder a seguinte questão: *“Considerando a resposta térmica fornecida por um sistema trocador – parede para o ambiente interno, como o uso de diferentes materiais na solução de envoltória interfere nessa resposta?”*

São definidas seis soluções construtivas de envoltória para avaliação. Cada solução é baseada em um material principal, sendo eles cerâmica, madeira e concreto celular. As soluções são ainda avaliadas quanto à presença de uma camada de isolante térmico, o material neste caso é a lã de rocha. A resposta térmica do sistema consiste na determinação da temperatura interna do ambiente virtual onde o sistema híbrido está sendo avaliado. Para isso, é necessário

determinar três temperaturas: temperatura do ambiente externo; temperatura média do subsolo; e temperatura interna do ambiente. A temperatura externa é obtida através dos dados climáticos das cidades de Curitiba e Cuiabá. Para determinação da temperatura do subsolo é utilizada a estimativa da temperatura média anual que, conforme apresentado na revisão de literatura, é suficientemente próxima da temperatura média do subsolo. Por último, para determinação da temperatura interna do ambiente é utilizada como motor de cálculo a planilha Excel com o modelo matemático desenvolvido pelo professor Dr. Aloísio Schmid, apresentado sinteticamente adiante no item 3.2.3.

O conjunto de dados é então simulado em planilhas Excel para cada hora do ano climático de referência de cada cidade, em duas situações: densidade ocupacional mínima e máxima, variando ao extremo a taxa de produção de calor interno. A partir da temperatura interna, calcula-se a diferença entre a temperatura interna e as temperaturas de base, apresentadas em 3.2.2. Tem-se, assim, a demanda restante em graus-hora de aquecimento e resfriamento do ambiente. Os resultados são, portanto, a demanda restante em graus-hora de aquecimento e resfriamento não solucionados pelo sistema trocador-parede em cada configuração de envoltória testada. Com isso, busca-se demonstrar o potencial de manutenção de conforto térmico atingido pelo uso do sistema em cada uma das configurações construtivas.

### **3.1.1 Unidade de análise**

A unidade de análise desta pesquisa é a resposta térmica provida pelo sistema (envoltória acoplada a trocador de calor) diante de seis diferentes configurações de envoltória e suas variantes, para tal são realizadas simulações numéricas em planilhas Excel em um ambiente virtual.

### **3.1.2 Delimitação do trabalho**

Este estudo tem por objetivo a avaliação do desempenho térmico de um sistema formado por envoltória acoplado a um trocador de calor subterrâneo (SCDS), sendo a envoltória testada para seis diferentes configurações construtivas. O trocador de calor é do tipo solo-ar. Considera-se o solo em estado 100% saturado, cujo comportamento se assimila ao da água, com melhor potencial de condução de calor. Considera-se também a densidade ocupacional mínima e máxima. Para a determinação da temperatura no interior do ambiente é utilizada uma

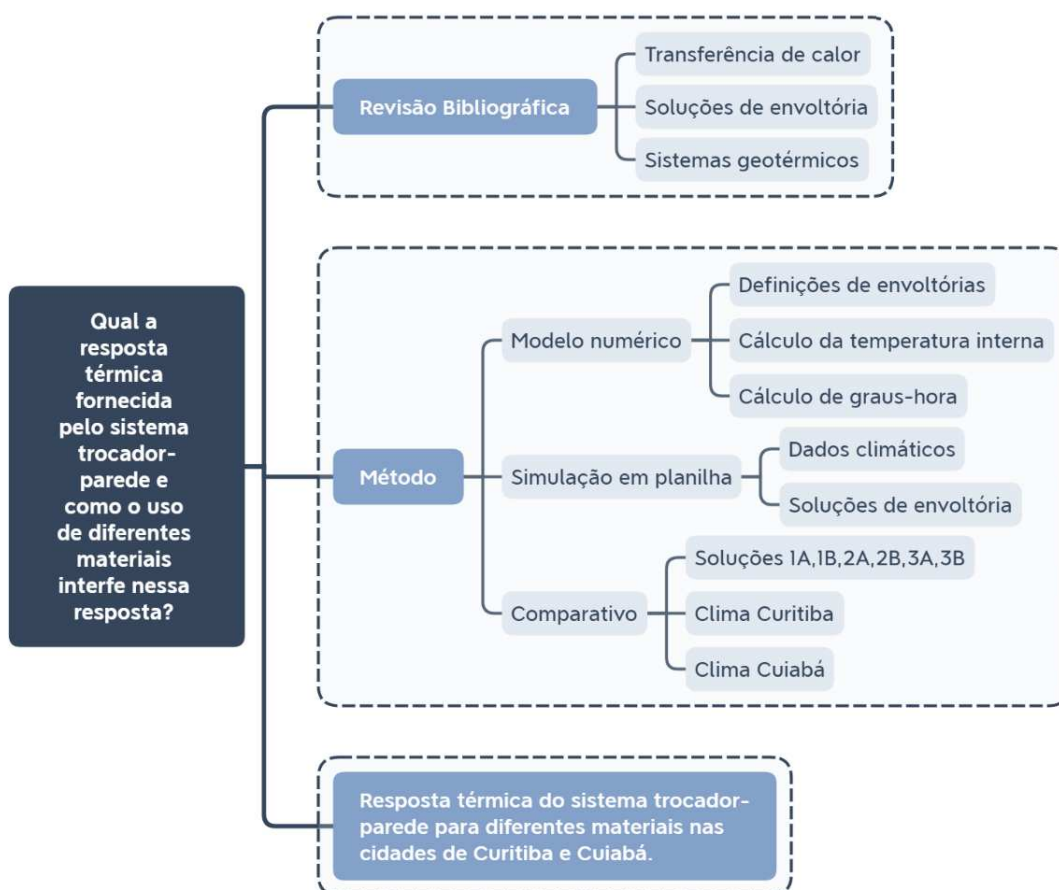
planilha desenvolvida em Excel com o modelo matemático desenvolvido pelo professor Dr. Aloísio Schmid, onde são assumidas hipóteses de paredes adiabáticas e fluxo unidirecional. O sistema estudado nesta pesquisa foi modelado pelo professor e ainda não testado e balizado por modelo físico-experimental, assim o modelo teórico não se encontra calibrado por experimento real, sendo essa uma das limitações do trabalho. A análise considera dados climáticos corrigidos estatisticamente para uso do método *TMY (Typical Meteorological Year)*, obtidos no trabalho de Roriz (2012), para as cidades de Curitiba e Cuiabá.

O estudo se relaciona apenas ao desempenho do trocador de calor tipo duto subterrâneo solo-ar e as configurações de envoltórias testadas. Seis soluções de envoltória são avaliadas em associação ao trocador de calor, com presença ou não de isolante térmico e densidade ocupacional mínima e máxima. Para as superfícies são consideradas: faces de tijolos cerâmicos maciços; faces de tábuas de madeira *Pinus*; faces de placa de concreto celular autoclavado. A seção de parede (envoltória) é composta por duas superfícies de igual espessura, sendo a espessura variável em função do material. Entre as superfícies há espaço reservado para a câmara vazia, destinada ao fluxo de ar do sistema, com espessura fixa de três centímetros (3 cm). A aplicação de camada isolante de manta de lã de rocha também é avaliada.

### 3.1.3 Mapa mental de pesquisa

A FIGURA 19 apresenta o mapa mental da pesquisa, com as etapas de desenvolvimento.

FIGURA 19 - MAPA MENTAL DE PESQUISA



FONTE: A autora (2020).

### 3.1.4 Justificativa da escolha a partir do objetivo

Neste trabalho a investigação se dá através de modelo numérico em simulação de um ambiente artificialmente construído (modelo virtual), configurando um “experimento virtual”, ou ainda conforme definição de YIN (2001), a estratégia trata-se de um experimento, já que se verifica o controle das informações fixas e variáveis a serem administradas. O mesmo autor afirma que se pode utilizar cada estratégia por três propósitos - exploratório, descritivo ou explanatório. No que diz respeito ao objetivo ou propósito, esta pesquisa é de cunho exploratório, pois busca compreender e relacionar o comportamento do sistema em análise. Portanto, a estratégia a ser utilizada é de experimento exploratório.

### 3.1.5 Testes de validade

No sentido de validar o método utilizado e a reprodução de uma pesquisa, Yin (2001) apresenta quatro testes, adotados nesta pesquisa, chamados testes de validade, que têm como objetivo diminuir os possíveis erros de metodologia.

**Validade do constructo** – Uma maneira de estabelecer a validade do constructo é desenvolver um encadeamento de evidências. Partindo da premissa da inviabilidade de um experimento físico, recorre-se à construção desse encadeamento através do modelo matemático e resultados obtidos. Como o estudo está embasado em modelo numérico de equações de transferência de calor, dados climáticos tratados estatisticamente e configurações de envoltória baseadas em propriedades disponíveis na literatura, os elementos que formam o método numérico se fundamentam em princípios físicos determinísticos, de forma que é possível estabelecer relações diretas dos resultados de saída através da leitura das variáveis na entrada, é possível, portanto, testar o modelo matemático apresentado. Considerando os dados de saída, se a temperatura de entrada muda de hora em hora, será verificada a alteração da temperatura interna no duto e no ambiente estudado, em uma relação matemática. A obtenção destes dados pode criar um embasamento de relação direta e testável. A disponibilização da fonte de dados de entrada, do modelo matemático (sob consulta do autor) e parâmetros utilizados para simulação, também converge neste sentido, tornando o estudo reproduzível por completo.

**Validade interna** – Uma vez que o sistema em análise é formulado com base na associação de outros dois sistemas já amplamente discutidos na literatura e simulado em análise, cujos dados quantitativos estão disponíveis a partir de estações meteorológicas e já tratados estatisticamente por meio de método normalizado, verifica-se a possibilidade de reprodução do experimento. O modelo numérico utilizado, formado por equações bem definidas, garante a relação causal.

**Validade externa** - Segundo Yin (2001), a validade externa estabelece o grau de generalização para além da pesquisa específica. Partindo da consideração de que todos os dados de entrada e os modelos de processamento serão disponibilizados, este estudo está apto para reprodução em outros ambientes. Considerando, para isso, os limites estabelecidos pela geometria, orientação do edifício e parâmetros utilizados no dimensionamento do sistema de climatização. Como experimento exploratório, este estudo busca oferecer uma contribuição no entendimento do funcionamento do sistema em análise. Preocupa-se, portanto, com a questão:

qual o desempenho térmico desse sistema? E especialmente: qual o efeito do uso de diferentes materiais em associação a este sistema? É de tal forma que o método poderá ser replicado para diferentes climas, respondendo as questões levantadas localmente, contribuindo para a busca da solução mais adequada a cada região.

**Confiabilidade** - A utilização de modelo numérico, parâmetros e fonte de dados abertos conduz este trabalho na direção de estudos passíveis de reprodução e verificação. No que se refere à coleta de dados, o protocolo de coleta de dados apresenta os passos do levantamento de todos os dados de entrada na pesquisa. Quanto ao processamento dos dados, modelo virtual, modelo numérico (sob consulta do autor) e parâmetros utilizados, são apresentados no decorrer deste trabalho e encontram-se disponíveis em anexo reforçando a clareza e a possibilidade de replicação do estudo.

### 3.2 PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS

A coleta de dados é dada pelas seguintes etapas:

- Dados climáticos;
- Definição das temperaturas de base;
- Definição do sistema e cálculo da temperatura interna;
- Definição das configurações de envoltória;
- Cálculo da demanda por aquecimento e resfriamento;

#### 3.2.1 Dados climáticos

O dado inicialmente coletado é a temperatura de bulbo seco, hora a hora. Para isso são utilizados os arquivos do estudo de Roriz (2012). Esse estudo foi elaborado a partir de dados registrados em 411 estações climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, no período de 2000 a 2010. O pesquisador determinou o TMY (*Typical Meteorological Year*) de cada uma das cidades, bem como uma série de variáveis climáticas, aplicando correções estatísticas nas lacunas de dados. Nesta pesquisa são utilizados os dados das cidades de Curitiba e Cuiabá, cujas compilações resultaram nos anos climáticos de referência 2008 e 2009, respectivamente.

A escolha destas duas cidades se dá em função dos resultados previamente encontrados na pesquisa de Alves (2014) sobre o potencial de climatização através do uso de SCDS para os climas brasileiros. O autor destacou o potencial da localidade de Curitiba para o aquecimento, com até 19.403,20 graus-hora (gh) ano para aquecimento, e também o potencial da localidade de Cuiabá para o resfriamento, com até 14.060,50 gh.ano.

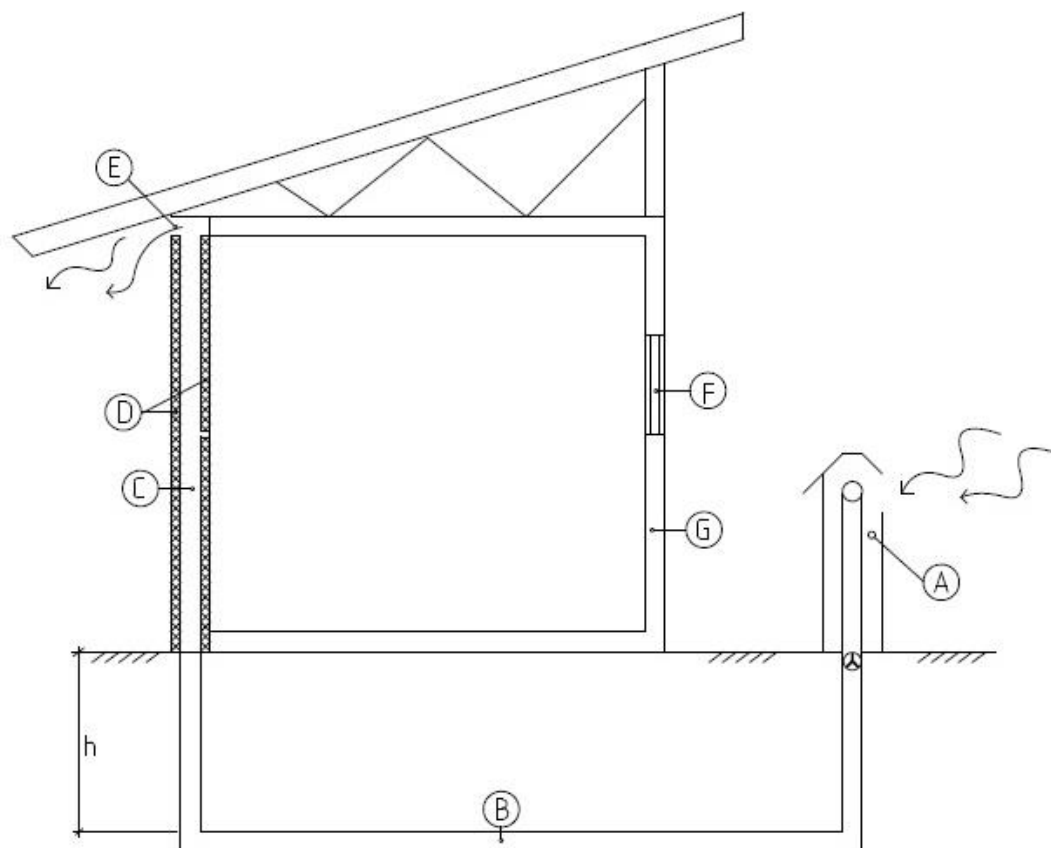
### **3.2.2 Definição das temperaturas de base**

Nesta pesquisa optou-se pela definição simplificada de temperaturas de base a serem utilizadas como referência para o cálculo dos graus-hora de aquecimento e resfriamento. Goulart (1993) adota 14 °C, 15 °C, 16 °C, 17 °C e 18 °C para temperatura base de aquecimento e 27 °C, 28 °C e 29 °C para temperatura base de resfriamento. Alves (2014) trabalha 18 °C como temperatura base para aquecimento e 27 °C como temperatura base para resfriamento. Neste estudo foi adotado esse mesmo intervalo, 18 °C como temperatura base para aquecimento e 27 °C como temperatura base para resfriamento, na medida que o intervalo se encontra dentro da faixa estudada por Goulart (1993) e também se mostra coerente com as expectativas de valores em ASHRAE (2009). Portanto, foram considerados os valores de  $T_{ba} = 18\text{ °C}$  como temperatura base de aquecimento e  $T_{br} = 27\text{ °C}$  como temperatura base de resfriamento.

### **3.2.3 Definição do sistema e cálculo da temperatura interna**

O experimento virtual proposto neste estudo consiste na avaliação da temperatura interna de um ambiente cujas paredes são equipadas com um sistema trocador de calor ar-água-terra no subterrâneo, e ar-edifício na envoltória, tomando como limitantes as temperaturas de base de aquecimento e resfriamento estabelecidas em 3.2.2. O sistema é formado por um trocador de calor subterrâneo que é conectado às paredes da edificação. Nesse sistema (FIGURA 20) o ar externo (A) é forçado a circular pela tubulação do trocador de calor (B) em solo 100% saturado. A tubulação se liga à parede. A parede é constituída pelas camadas da solução de envoltória (D) e pela cavidade do sistema (C), é por ela que transita o ar proveniente do trocador SCDS, instalado no subsolo. O ar circula pela parede, sendo liberado por uma abertura na parte superior (E). As demais superfícies consideradas são: translúcida, com abertura regulada, na forma de uma janela (F) e paredes adiabáticas (G), que não realizam trocas térmicas.

FIGURA 20 - SISTEMA TROCADOR DE CALOR SUBTERRÂNEO - PAREDE



FONTE: A autora (2020).

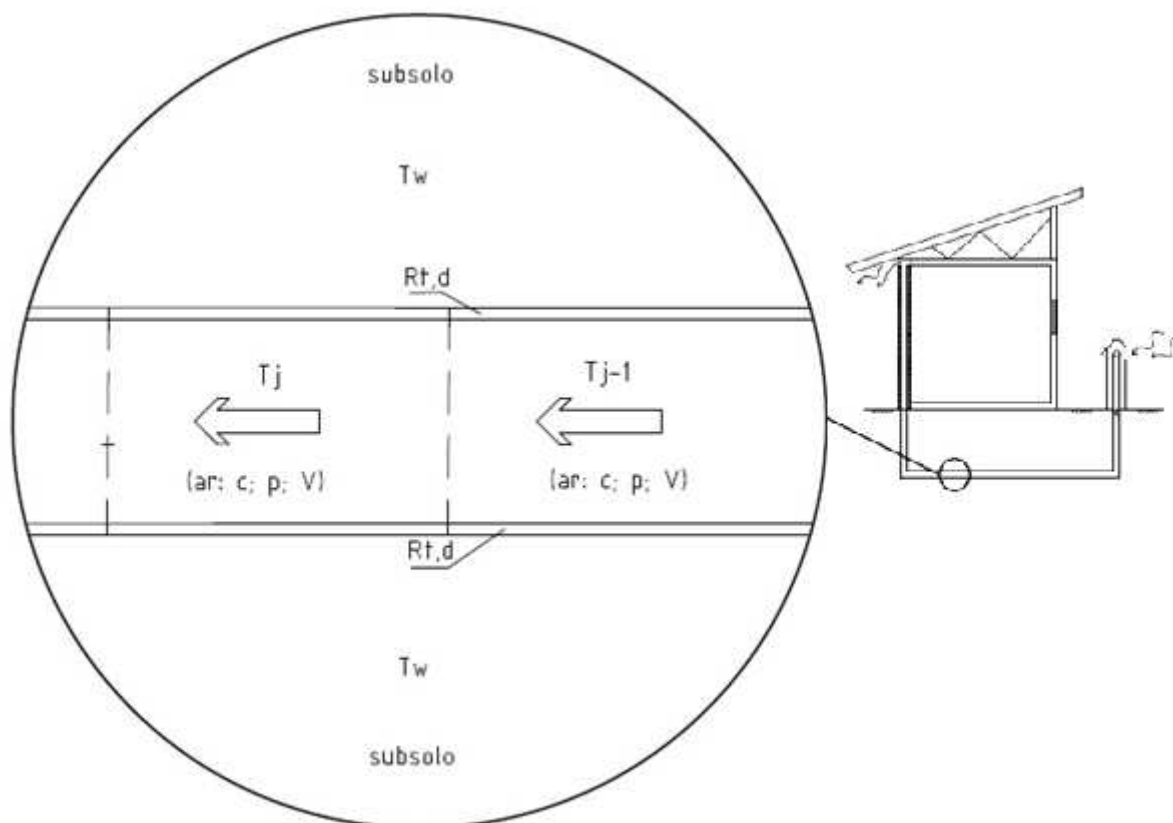
Com relação à profundidade de instalação do trocador de calor no solo ( $h$ ), considera-se que essa deve ser igual ou superior a quatro metros (4 m). Assim, busca-se tornar válidas para este estudo as considerações de Labs (1989) a respeito do comportamento da temperatura do solo ao longo do ano, de forma que a temperatura média anual possa ser entendida como suficientemente próxima à temperatura média do subsolo.

Para determinação da temperatura interna do ambiente utiliza-se como motor de cálculo o modelo matemático teórico desenvolvido pelo professor Dr. Aloísio Schmid, com entrada na forma de uma planilha programada em Excel. As equações de balanço térmico utilizadas no modelo são apresentadas a seguir, bem como esquemas ilustrativos do ambiente simulado. Através do modelo teórico do sistema é possível obter a temperatura interna do ambiente, variável que será utilizada como dado para estimar a demanda restante de climatização, considerando as temperaturas de base definidas em 3.2.2.

Uma síntese do modelo é apresentada a seguir, com ilustrações e as equações de balanço térmico utilizadas na determinação da temperatura interna.



FIGURA 21 - MODELO DO DUTO TROCADOR DE CALOR



FONTE: A autora (2020).

Na FIGURA 21 observa-se o detalhe do tubo trocador de calor. Nele o fluxo de ar ( $V$ ), coletado no ambiente exterior, atravessa a tubulação do trocador de calor com uma temperatura de entrada ( $T_{j-1}$ ). O modelo utilizado considera o fracionamento deste duto, de forma que a cada trecho seja calculada uma nova temperatura interna do duto ( $T_j$ ), através do balanço energético com a fração anterior, o que consiste em aplicar o método de diferenças finitas para uma melhor aproximação da troca realizada entre ar-solo no duto trocador de calor.

A Equação 3 expressa a transferência de calor água-ar em um único elemento de duto. Após passar pelo trocador de calor no subsolo, o fluxo de ar flui para o interior das paredes da envoltória. Neste ponto  $T_j = T_{c,i}$ , significando que a temperatura de saída do duto é a temperatura de entrada na cavidade da envoltória (FIGURA 21). Parte do volume de ar, adentra o ambiente ( $V_1$ ), realizando troca térmica com o ar do ambiente interno e sendo disperso pelo elemento de janela, cuja abertura é regulada e possui resistência térmica  $R_{t,3}$ .

$$\rho c V (T_j - T_{j-1}) = \frac{(T_j - T_w)}{R_{t,d}} \quad \text{Equação 3}$$

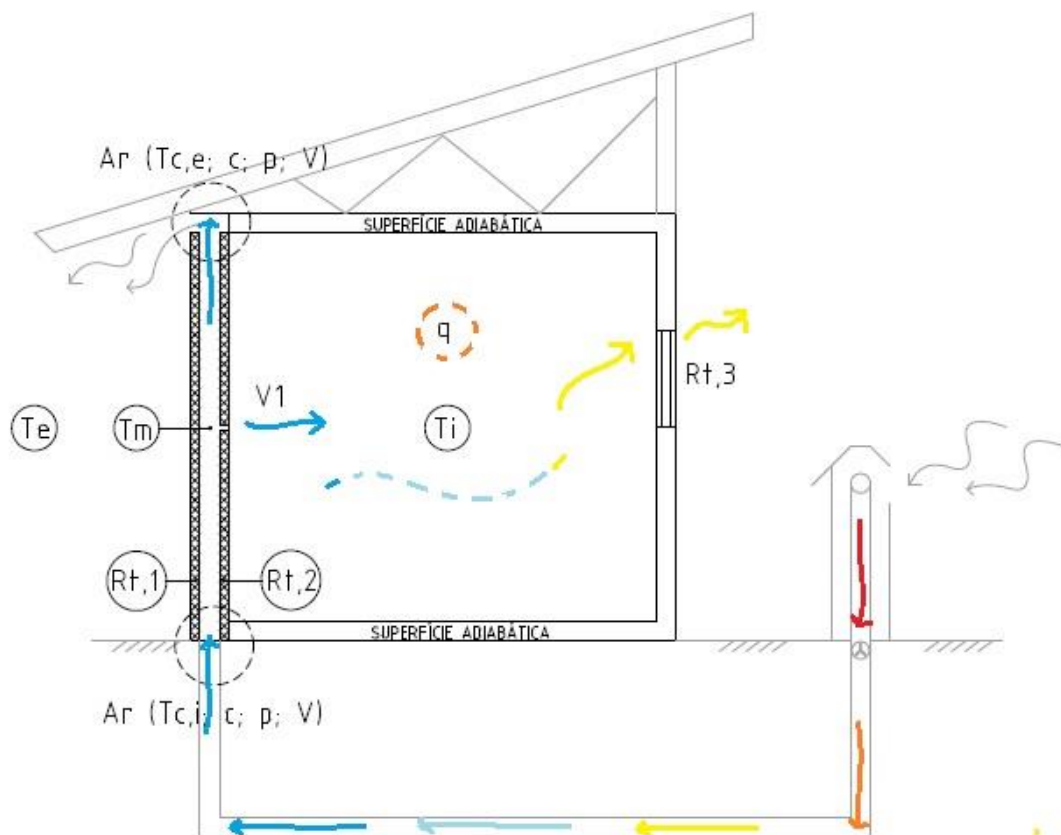
Onde:

- $P$  peso específico do ar ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $c$  calor específico do ar ( $\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ )
- $V$  fluxo volumétrico dos dutos de ar ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $T_j$  temperatura do ar no elemento “j” ( $^\circ\text{C}$ )
- $T_w$  temperatura do solo saturado ( $^\circ\text{C}$ )
- $R_{t,d}$  resistência térmica do duto ( $^\circ\text{C}/\text{W}$ )

Como citado anteriormente, as superfícies são apenas de três tipos: opacas com cavidade dedicada ao sistema, translúcidas com área envidraçada e paredes adiabáticas – que não realizam trocas térmicas. As faces da envoltória possuem resistências térmicas características, face externa ( $R_{t1}$ ) e face interna ( $R_{t2}$ ). A janela, representada pela superfície translúcida possui resistência térmica reduzida ( $R_{t3}$ ).

Em relação a produção interna de calor ( $q$ ), é considerado no interior do ambiente um conjunto de ocupação e equipamentos mínimo, aproximadamente zero, e máximo de 22.000 W. Esse valor leva em conta a ocupação de um espaço comercial de 900  $\text{m}^2$ , cuja taxa de ocupação máxima é de cinco (05) pessoas/ $\text{m}^2$  e uso da iluminação elétrica no período. O funcionamento se dá apenas entre as 8h da manhã e as 18h da tarde. Com isso busca-se refletir principalmente a variação da densidade ocupacional da edificação e sugerir ajustes projetuais. Entende-se que, com o comportamento do sistema em situações extremas de ocupação, é possível determinar de forma mais assertiva a que tipo de projeto ele se destina. No caso de melhores resultados para ocupação muito baixa, cuja produção interna de calor seja próxima de zero, como espaços para práticas individuais de esportes, danças, artes ou residências amplas. Caso contrário, o uso do sistema pode se mostrar mais adequado para espaços cuja ocupação seja intensa e a produção de calor muito elevada, como salas de aula e auditórios.

FIGURA 22 - MODELO E VARIÁVEIS



FONTE: A autora (2020).

A superfície opaca com cavidade recebe o fluxo a temperatura inicial ( $T_{c,i}$ ), este flui pelo interior da parede, e a partir da interação com as propriedades térmicas dos materiais ( $R_{t1}$ ,  $R_{t2}$ ) e com a temperatura externa  $T_e$ , se transforma em  $T_m$  em um processo de balanço térmico. Este processo é descrito pela Equação 4 e Equação 5. O ambiente foi dividido em duas partes para o equacionamento. Para a parte inferior, correspondente à metade inferior em relação à altura da janela, a troca térmica se dá entre meio interno e externo (FIGURA 22), onde a resistência térmica é tão somente a apresentada pela parede (face interna e externa).

- Equação do balanço térmico parte inferior da cavidade:

$$\rho c V (T_{c,i} - T_m) = \frac{0.5(T_m + T_{c,i}) - T_e}{R_{t1}} + \frac{0.5(T_m + T_{c,i}) - T_i}{\left(\frac{1}{P_f}\right) R_{t2}} \quad \text{Equação 4}$$

Na parte superior da cavidade da parede (Equação 5), considera-se inicialmente o fluxo com temperatura já alterada ( $T_m$ ), bem como a presença da janela com baixa resistência térmica

(Rt3), que colabora com a perda térmica, como apresenta a FIGURA 22. Por último, o fluxo de ar é eliminado na parte superior da cavidade da parede, onde a temperatura de saída é  $T_{c,e}$ . Um pequeno volume de ar ( $V_1$ ) escoo para dentro do ambiente referente à parcela de renovação de ar.

- Equação do balanço térmico parte superior da cavidade:

$$\rho c(V - V_1)[T_m - T_{c,e}] = \frac{0.5(T_{c,e} + T_m) - T_e}{2R_{t3}} + \frac{0.5(T_{c,e} + T_m) - T_i}{\left(\frac{1}{W_f}\right)R_{t2}} \quad \text{Equação 5}$$

Por último, o modelo conta com uma equação de balanço térmico total do ambiente (Equação 6). Esta equação considera a produção de calor interna e as diferentes temperaturas e propriedades térmicas das fachadas. A temperatura interna da edificação ( $T_i$ ), é, portanto, determinada pelo balanço térmico entre fluxos, taxa de produção de calor e as trocas de calor entre as superfícies opacadas e translúcidas.

- Equação do balanço térmico do ambiente construído:

$$q + q_s + \rho c V_1 (T_m - T_i) = \frac{T_i - 0.5[P_f(T_m + T_{c,i}) + W_f(T_m + T_{c,e})]}{R_{t2}} + \frac{T_i}{2R_{t3}} - \frac{T_e}{2R_{t3}} + \frac{C}{\Delta t} (T_i - T_{i,old})$$

Equação 6

Onde:

$\rho$	Peso específico do ar (kg/m <sup>3</sup> )
$c$	Calor específico do ar (J/kg °C)
$V$	fluxo volumétrico de ar dos dutos (m <sup>3</sup> /s)
$T_{c,i}$	temperatura do ar na tomada da cavidade envoltória (°C)
$T_m$	temperatura do ar em ponto médio da cavidade (°C)
$T_e$	temperatura exterior (°C)
$T_i$	temperatura interior (°C)
$T_{i,old}$	temperatura interior imediatamente anterior (°C)
$R_{t1}$	resistência térmica da face opaca externa (°C/W)
$R_{t2}$	resistência térmica da face opaca interna (°C/W)
$R_{t3}$	resistência térmica das janelas (°C/W)
$P_f$	área de envoltória (m <sup>2</sup> )
$W_f$	área envidraçada (m <sup>2</sup> )
$q$	produção de calor interna (taxa) (W)
$q_s$	ganho solar da fachada norte (W)
$V_1$	fluxo de ar extraído da cavidade (m <sup>3</sup> /s)
$C$	capacidade térmica da envoltória (J/°C)
$\Delta t$	intervalo de tempo de cálculo (s)

### 3.2.4 Configurações de envoltória

Combinações de materiais resultam em diversas possibilidades construtivas para as envoltórias das edificações. Conforme verificado na literatura, as propriedades térmicas dos materiais são determinantes no resultado da envoltória enquanto barreira térmica. Dessa forma, a proposta desta pesquisa, que é voltada a construções leves, é de avaliação de seis diferentes configurações de envoltória simples e leves, com materiais que integram comumente a cena construtiva brasileira. São seis soluções formadas a partir de cerâmica, madeira e concreto. São utilizados o tijolo cerâmico maciço, elaborado a partir de barro, tábuas de madeira macia, tipo *Pinus*, e também placas de concreto celular autoclavado, um tipo de concreto mais leve e com melhores propriedades térmicas. As propriedades dos materiais utilizadas são apresentadas de forma resumida no QUADRO 4. São elas a densidade, a condutividade térmica e o calor específico.

QUADRO 4 - DENSIDADE ( $\rho$ ), CONDUTIVIDADE TÉRMICA ( $\lambda$ ) E CALOR ESPECÍFICO ( $c$ ) DOS MATERIAIS CONSTRUTIVOS

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/[m.K])	$c$ (J/[kg.K])
Tijolos e telhas de barro	1300-1600	0,90	0,92
Concreto celular autoclavado	400-500	0,17	1,00
Madeira e derivados ( <i>Pinus Taeda</i> )	450-600	0,15	1,34
Lã de rocha	20-200	0,045	0,75

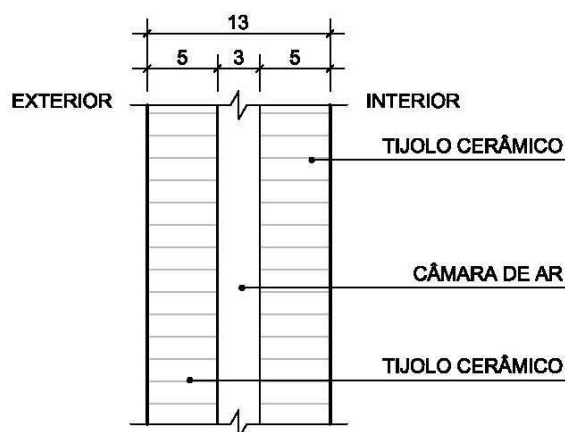
FONTE: Adaptado ABNT 15220 (2005).

São considerados 3 cm para a câmara destinada ao sistema, conforme recomendações da NBR 15220:2 (ABNT, 2005), a fim de manter a condução de calor como mecanismo principal de transferência de calor e a teoria de Fourier válida. A camada de isolamento térmico considerada é também de 3 centímetros, com o material manta de lã de rocha no interior da face externa. A opção pela posição do isolante térmico junto à face exterior da parede vem em função da orientação definida pelo estudo de Sonderegger (1977) a respeito da posição ótima para isolamento. O autor aponta que, para climas de grande amplitude térmica, a posição ótima do isolante é mais ao exterior. Já para climas de menor amplitude, menos dependentes de massa térmica, a posição ótima do isolante seria na face interna. Considerando as amplitudes das cidades estudadas, optou-se pela posição mais externa.

Representações das soluções de envoltória estudadas são apresentadas na forma de seções das paredes nas FIGURA 23 a FIGURA 28. As medidas estão indicadas em centímetros.

- Solução 1A: formada por tijolos maciços cerâmico (FIGURA 23);

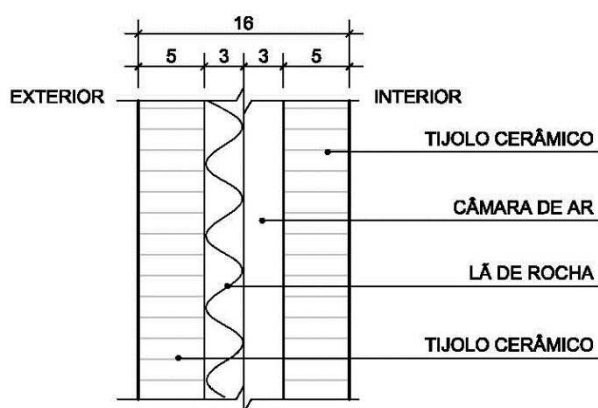
FIGURA 23 -SOLUÇÃO 1A



FONTE: A autora (2020).

- Solução 1B: formada por tijolos maciços cerâmico e isolante térmico na parede externa (FIGURA 24);

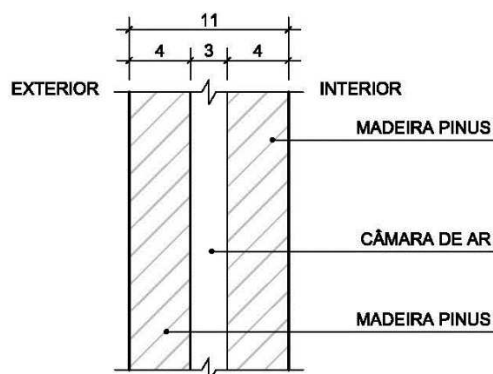
FIGURA 24 -SOLUÇÃO 1B



FONTE: A autora (2020).

- Solução 2A: formada por tábuas de madeira tipo *Pinus* (FIGURA 25);

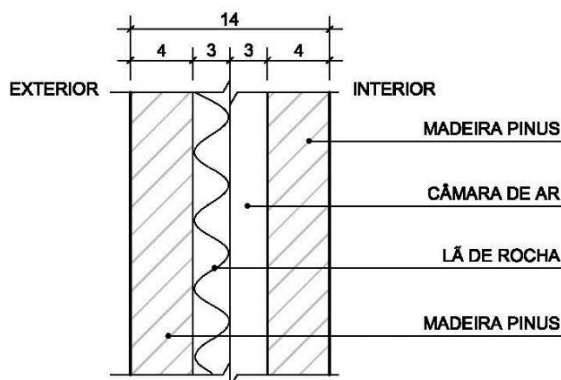
FIGURA 25 -SOLUÇÃO 2A



FONTE: A autora (2020).

- Solução 2B: formada por tábuas de madeira tipo *Pinus* e isolante térmico na parede externa (FIGURA 26);

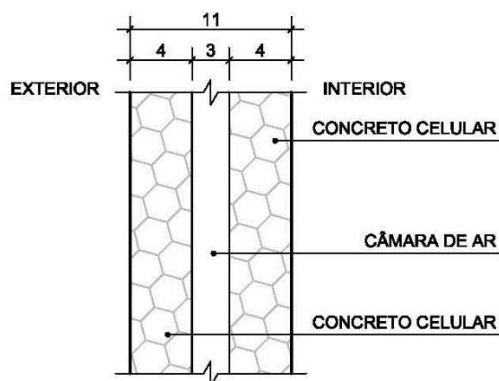
FIGURA 26 -SOLUÇÃO 2B



FONTE: A autora (2020).

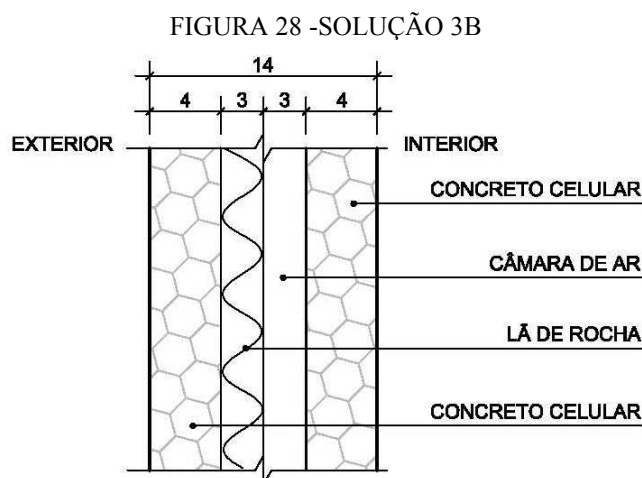
- Solução 3A: formada por placas de concreto celular (FIGURA 27);

FIGURA 27 -SOLUÇÃO 3A



FONTE: A autora (2020).

- Solução 3B: formada por placas de concreto celular e isolante térmico na parede externa (FIGURA 28);



FONTE: A autora (2020).

No QUADRO 5 são apresentadas as propriedades das soluções de envoltória pesquisadas. Cabe ainda destacar que o efeito da ponte térmica não é considerado na envoltória. Efeitos da umidade também não são considerados.

QUADRO 5 - PROPRIEDADES DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS ESTUDADAS

Material	Cerâmica		Madeira		Concreto	
	1A	1B	2A	2B	3A	3B
Solução construtiva						
Espessura face interna (m)	0,05	0,08	0,04	0,07	0,04	0,07
Espessura face externa (m)	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
Resistência face externa - Rt1 (m <sup>2</sup> .K/W)	0,06	0,72	0,27	0,94	0,24	0,90
Resistência face interna - Rt2 (m <sup>2</sup> .K/W)	0,06	0,06	0,27	0,27	0,24	0,24
Capacidade térmica total - C (J/m <sup>2</sup> .K)	133,40	135,65	36,00	38,25	53,60	55,85

FONTE: A autora (2020).

### 3.2.5 Cálculo da demanda de aquecimento e resfriamento

Conforme definido pela ASHRAE (2009), o cálculo de graus-hora é realizado pela diferença entre a temperatura externa e a temperatura interna do ambiente. Para estimar a demanda de climatização, utiliza-se uma referência como temperatura interna, como as temperaturas de base de climatização. Para demanda por aquecimento utiliza-se a temperatura de base de aquecimento e, da mesma forma, utiliza-se uma temperatura de base para resfriamento.



Nesta pesquisa, no entanto, a temperatura interna do ambiente é um dado calculado e, portanto, conhecido. Assim, o propósito do cálculo da demanda de climatização é o de captar a lacuna entre a temperatura interna, atingida com o uso do sistema trocador-parede, e as temperaturas de base. Tomando-se a temperatura interna, calculada hora a hora, efetuou-se a diferença direta entre essa temperatura interna e as temperaturas de base de aquecimento e resfriamento. As temperaturas de base, definidas em 3.2.2, são de 18 °C para aquecimento e 27 °C para resfriamento. As Equação 7 e Equação 8 foram utilizadas no cálculo dos graus-hora de demanda por climatização.

$$GH_a(t) = T_{ba}(t) - T_i(t) \quad \text{Equação 7}$$

$$GH_r(t) = T_i(t) - T_{br}(t) \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$GH_a$  = os graus-hora de aquecimento (gh)

$GH_r$  = os graus-hora resfriamento (gh)

$T_{ba}$  = temperatura base de aquecimento (°C)

$T_{br}$  = temperatura base de resfriamento (°C)

$T_i$  = temperatura interna do ambiente (°C)

Calculada dessa maneira, em graus-hora, a demanda por climatização consiste no somatório, ao longo do ano, da diferença entre a real temperatura no interior do ambiente semiclimatizado pelo sistema trocador-parede e as temperaturas de base. O objetivo não está em avaliar a demanda geral por climatização, comparando temperatura interior e exterior, aplicação tradicional do método graus-hora, mas sim em avaliar a diferença entre a temperatura do ambiente semiclimatizado e as temperaturas ideais. Com isso busca-se avaliar o desempenho térmico do sistema e das várias soluções testadas e compreender quantos graus-hora restariam ainda para serem climatizados por um sistema de climatização complementar.

## **4 DESEMPENHO TÉRMICO DE SISTEMAS DE ENVOLTÓRIAS ACOPLADOS A TROCADOR DE CALOR SUBTERRÂNEO**

Partindo da definição de seis soluções construtivas (1A, 1B, 2A, 2B, 3A, 3B), foram realizadas simulações numéricas anuais para determinação do desempenho térmico desses sistemas de envoltória associadas ao trocador de calor subterrâneo SCDS. Foram considerados os dados climáticos das cidades de Curitiba e Cuiabá, a variação na densidade ocupacional do edifício e o horário de funcionamento comercial entre 8h – 18h.

Em um primeiro momento, são apresentados os resultados da simulação anual de temperatura interna para cada solução de envoltória estudada. Na sequência são apresentados os resultados de demanda aquecimento e resfriamento de cada solução. Para isso foram consideradas como limites as temperaturas de base de aquecimento ( $T_{ba} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e resfriamento ( $T_{br} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ ). A análise, no caso da demanda de climatização, considera apenas os dados referentes ao intervalo horário de ocupação do edifício, determinado como o período das 8h – 18h.

### **4.1 SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA INTERNA**

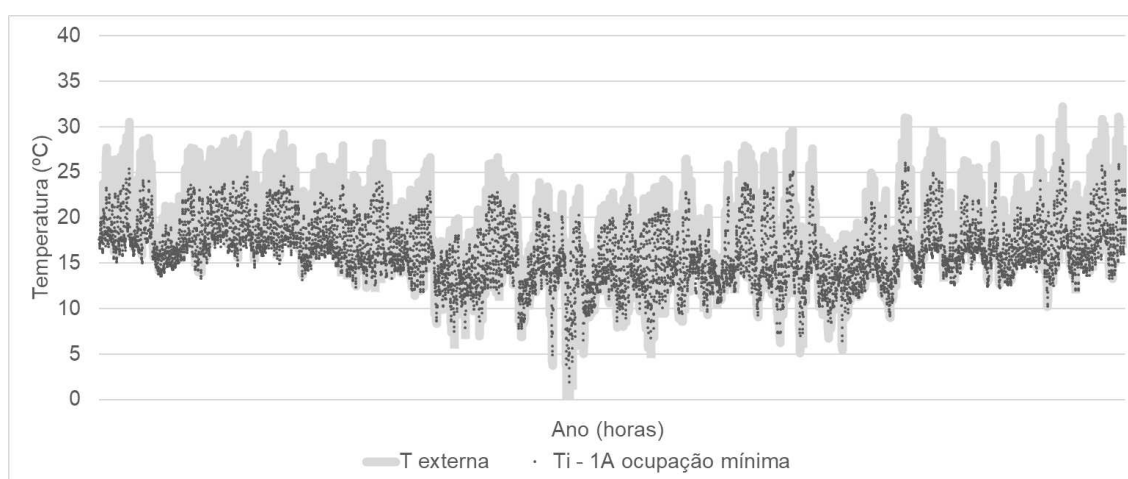
Para o cálculo da temperatura interna foram determinantes as propriedades térmicas das soluções estudadas. Além disso, optou-se também pela avaliação da densidade ocupacional, variando entre ocupação mínima e ocupação máxima. Como pode ser visto na análise dos gráficos da seção, a dispersão dos dados de temperatura interna revela a mudança do comportamento térmico no interior do edifício nos períodos de ocupação mínima (taxa de produção de calor muito baixa) e para os períodos de ocupação máxima (taxa de produção de calor elevada). Os materiais e climas respondem de formas diferentes a essa solicitação, apontando as melhores aplicações a depender do contexto projetual e finalidade de uso da edificação. Na sequência são apresentados os resultados de temperatura interna para Curitiba e, em seguida, para Cuiabá.

#### 4.1.1 Temperatura interna por solução de envoltória - Curitiba

Curitiba é uma cidade de clima temperado, categoria Cfb pela classificação Köppen-Geiger (clima temperado de altitude), com temperatura média anual de 17,4 °C (INMET, 2020). A demanda de climatização, nesse caso, é por aquecimento, sendo a temperatura média mínima anual de 13,4 °C e a temperatura média máxima anual de 23,5 °C (INMET, 2020). Os resultados obtidos para a simulação de temperatura interna (Ti) são apresentados nesta seção. Primeiramente, a dispersão dos valores da Ti é apresentada para cada solução estudada. Dada a demanda por aquecimento, foi realizado um recorte horário de 24 h na simulação, referente ao 15° dia do mês mais frio, neste caso o mês de julho. Ao final da seção é apresentado um resumo contendo os valores médios, desvio padrão e variância encontrados para as soluções estudadas.

A solução 1A, formada por tijolos cerâmicos maciços, sem isolante, é apresentada nas FIGURA 29, FIGURA 30 e FIGURA 31. A Ti média anual obtida foi de 16,2 °C, com desvio padrão de 3,3 °C, no caso de ocupação mínima. Nota-se, pela forma de dispersão da temperatura interna, que esta oscila junto à variação da temperatura externa. Entre as soluções estudadas, a solução 1A é a de menor resistência térmica, fator esse que pode ser indício do baixo desempenho da solução. O comportamento da Ti é similar no caso de ocupação mínima (FIGURA 29) e de ocupação máxima (FIGURA 30), com grande dispersão dos dados ao longo das horas do ano.

FIGURA 29 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA - 1A - OCUPAÇÃO MÍNIMA.

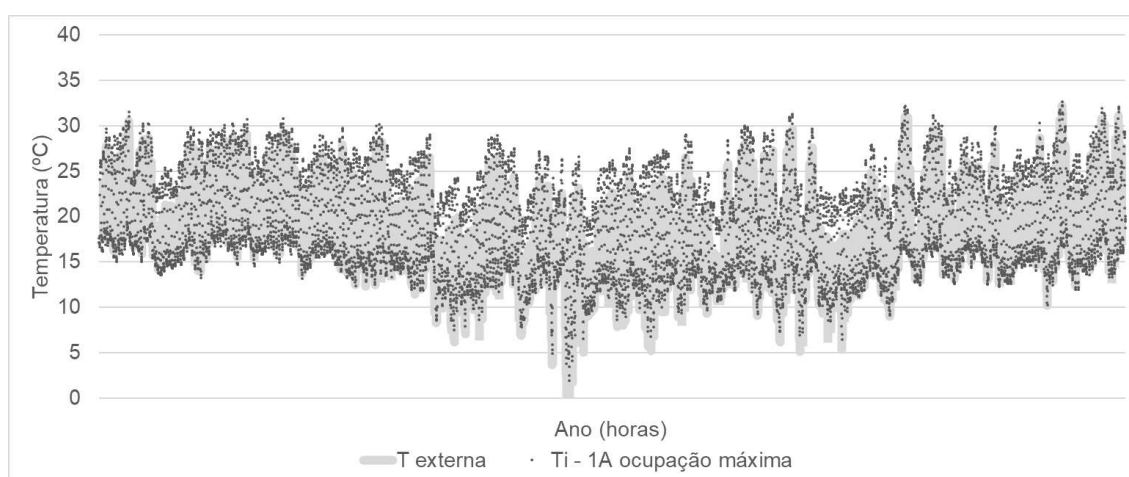


Fonte: A autora (2020).

Ainda assim, no caso da ocupação máxima (FIGURA 30), a temperatura média aumenta para 19,2 °C e desvio padrão de 5,5 °C. A variação da taxa de produção de calor pode

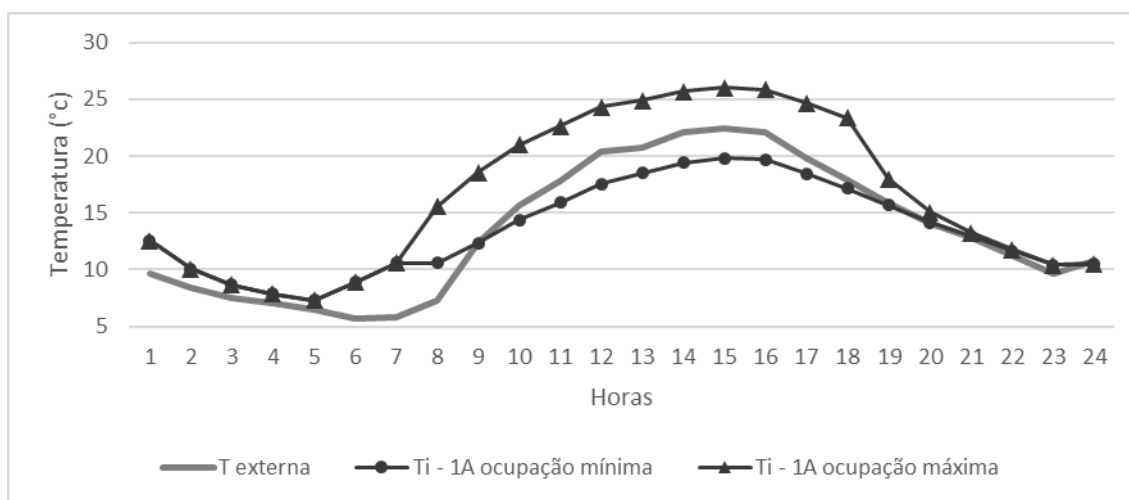
ser um fator a ser considerado tanto no aumento da temperatura média, quanto no aumento do desvio padrão. As temperaturas tendem a se elevar de forma dispersa, gerando uma nuvem de dados que parece imitar a temperatura externa, o que pode ser confirmado no gráfico em recorte (FIGURA 31).

FIGURA 30 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA - 1A - OCUPAÇÃO MÁXIMA



FONTE: A autora (2020).

FIGURA 31 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE INVERNO – 1A

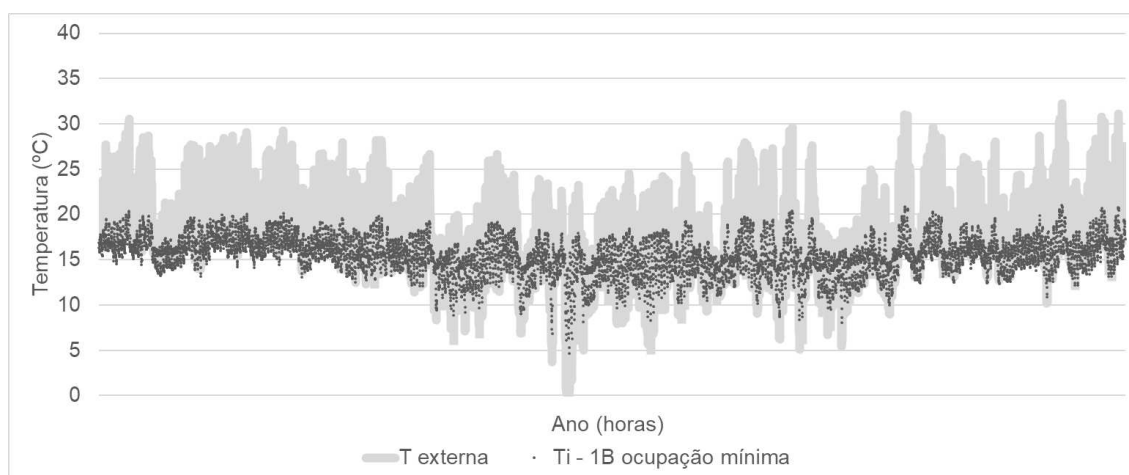


FONTE: A autora (2020).

Com a adição da camada de isolante térmico, a solução 1B, formada também por tijolos maciços, demonstra diminuir a dispersão dos dados da  $T_i$ . A temperatura média no caso de ocupação mínima (FIGURA 32) foi de  $15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  e desvio padrão de  $2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . O aumento da resistência térmica, pela adição da camada de lã, é, provavelmente, o causador do efeito observado. É possível notar, no entanto, que com ocupação mínima (FIGURA 32)  $T_i$  atingiu valores em torno de  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ , isso pode ser melhor visualizado no gráfico em recorte (FIGURA

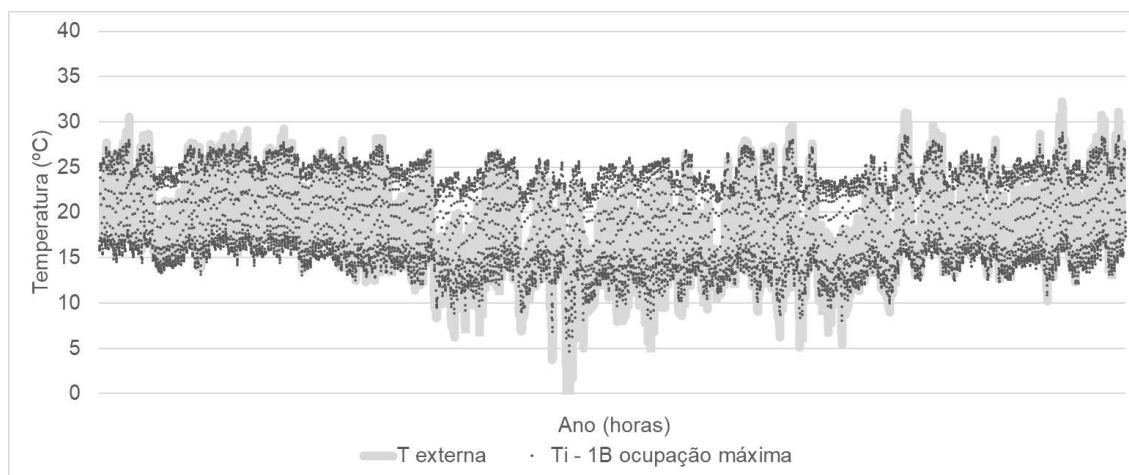
34). Já quando considerada densidade ocupacional máxima para o horário comercial (FIGURA 33), a  $T_i$  média é de  $19,2\text{ }^\circ\text{C}$  e o desvio padrão é de  $5,0\text{ }^\circ\text{C}$ . Há formação de duas linhas de tendências mais distintas onde a primeira se mantém em torno de  $25\text{ }^\circ\text{C}$ . Este fato indica que a solução construtiva pode ser eficaz desde que em um contexto de densidade ocupacional elevado, cuja produção de calor interno possa ser retida pela envoltória, como no projeto de salas de aula, espaços de trabalho colaborativo e escritórios.

FIGURA 32 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 1B - OCUPAÇÃO MÍNIMA



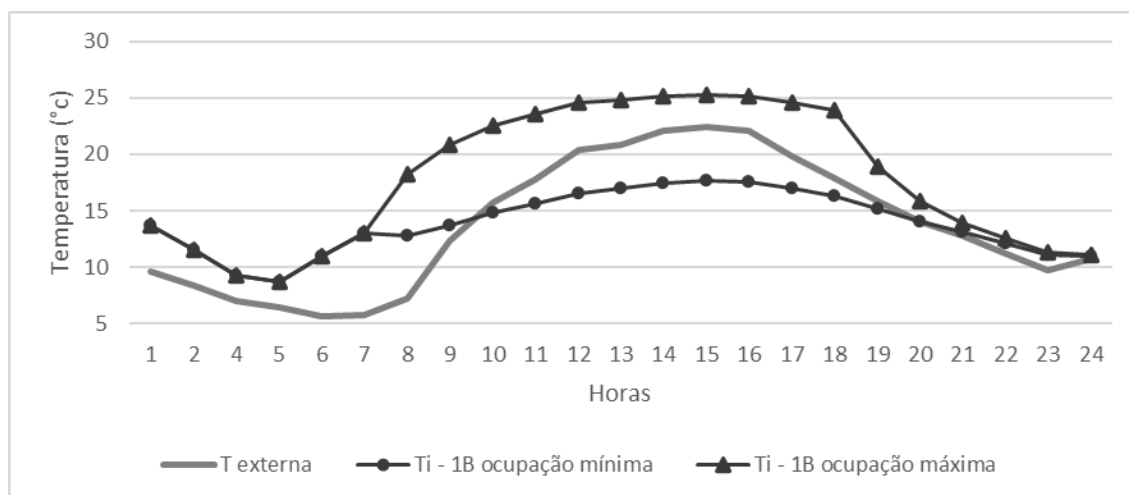
FONTE: A autora (2020).

FIGURA 33 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 1B - OCUPAÇÃO MÁXIMA



FONTE: A autora (2020).

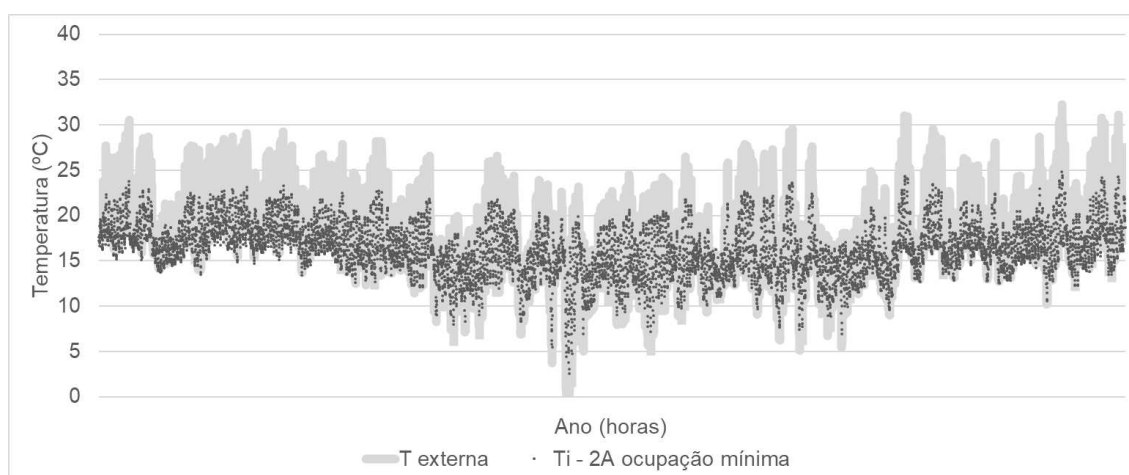
FIGURA 34 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE INVERNO – 1B



FONTE: A autora (2020).

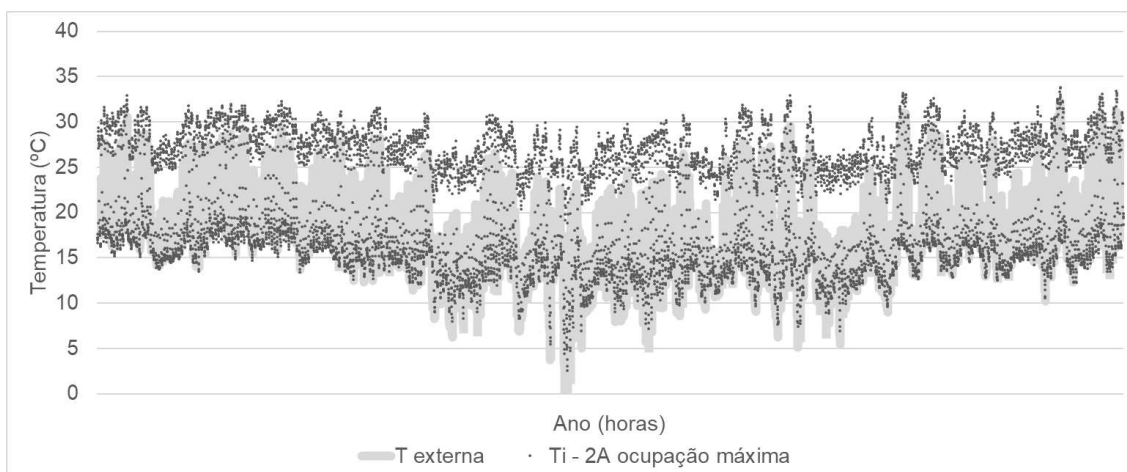
A solução 2A, composta por madeira macia tipo *Pinus*, sem a adição de camada isolante (FIGURA 35), apresentou temperatura média anual de 16,3 °C para ocupação mínima, com desvio de 2,9 °C. O cenário muda com a ocupação máxima (FIGURA 36), e é possível perceber a formação de duas tendências onde a  $T_i$  é muito baixa (horário não-comercial com poucas pessoas no ambiente) e onde a  $T_i$  é mais alta (horário comercial com muitas pessoas no ambiente). Nesse caso a temperatura média anual de 20,7 °C e o desvio padrão de 6,5 °C. O aumento da taxa de produção de calor, portanto, contribui para o aumento da  $T_i$ . Fato esse que, no caso de Curitiba, é desejável, dada a demanda por aquecimento (FIGURA 37).

FIGURA 35 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 2A - OCUPAÇÃO MÍNIMA



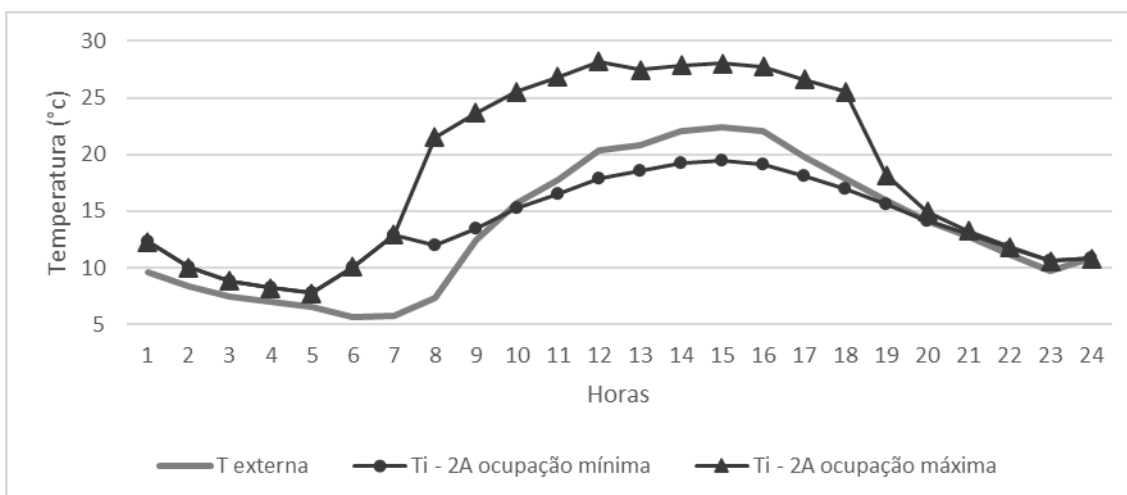
FONTE: A autora (2020).

FIGURA 36 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 2A - OCUPAÇÃO MÁXIMA



FONTE: A autora (2020).

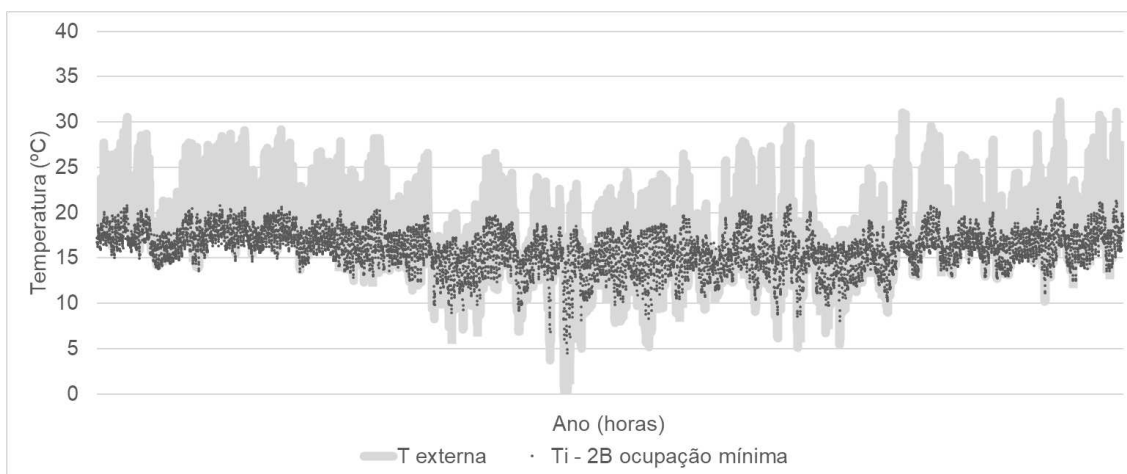
FIGURA 37 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE INVERNO – 2A



FONTE: A autora (2020).

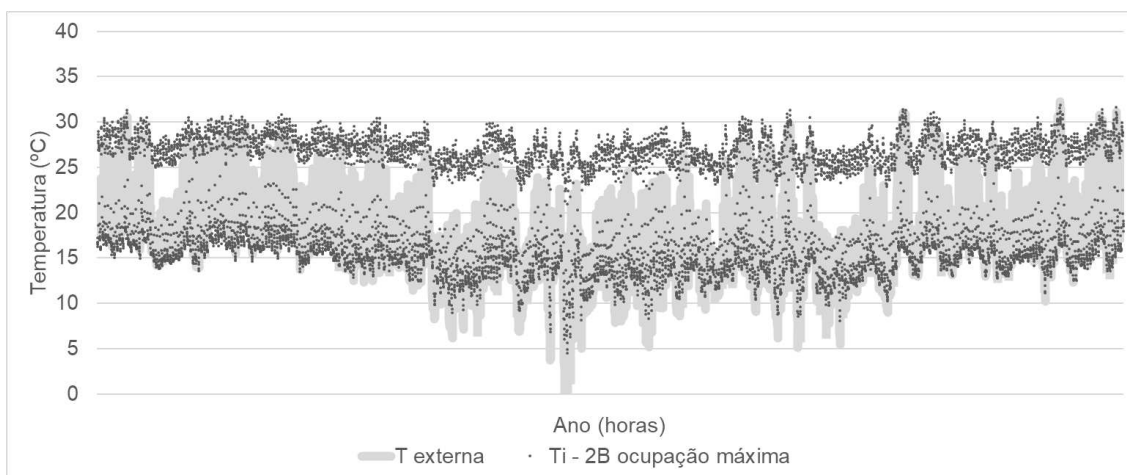
Quando adicionada a camada isolante, a solução em madeira 2B forma também uma nuvem menos dispersa em valores da  $T_i$  (FIGURA 38). Neste caso de ocupação mínima, a temperatura média anual é de  $15,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  e o desvio padrão de  $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Quando considerada a ocupação máxima (FIGURA 39), duas linhas bem distintas se formam, apontando para capacidade da envoltória associada ao sistema SCDS em manter a temperatura interna. A temperatura média anual é de  $20,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  e o desvio padrão é de  $6,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A linha formada na parte superior diz respeito ao horário de ocupação máxima, com aumento da taxa de produção de calor. A temperatura em torno dessa linha formada pela 2B em ocupação máxima é limitada pelos intervalos de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$  (FIGURA 40), demonstrando a capacidade do sistema em manter o calor adquirido.

FIGURA 38 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 2B - OCUPAÇÃO MÍNIMA



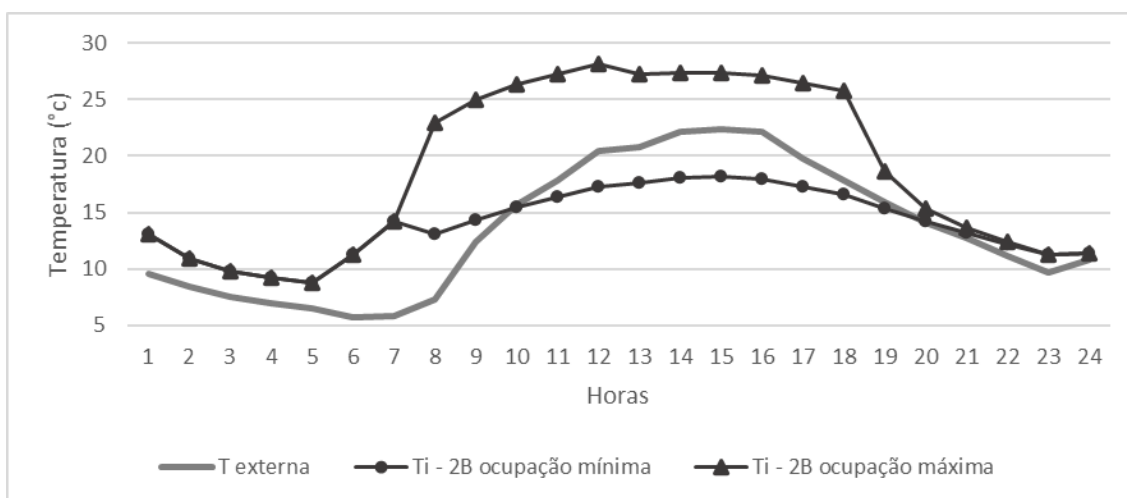
FONTE: A autora (2020).

FIGURA 39 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 2B - OCUPAÇÃO MÁXIMA



FONTE: A autora (2020).

FIGURA 40 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE INVERNO – 2B

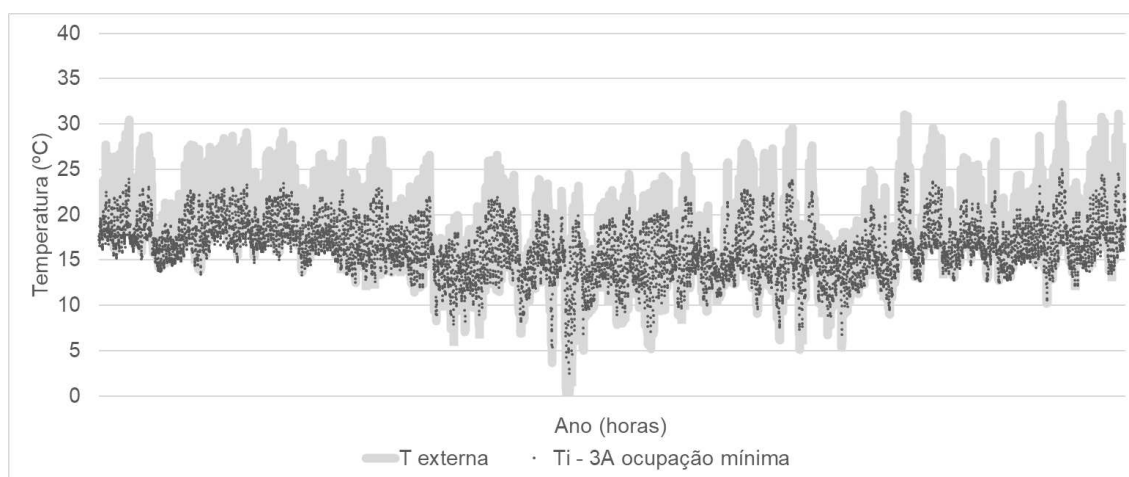


FONTE: A autora (2020).



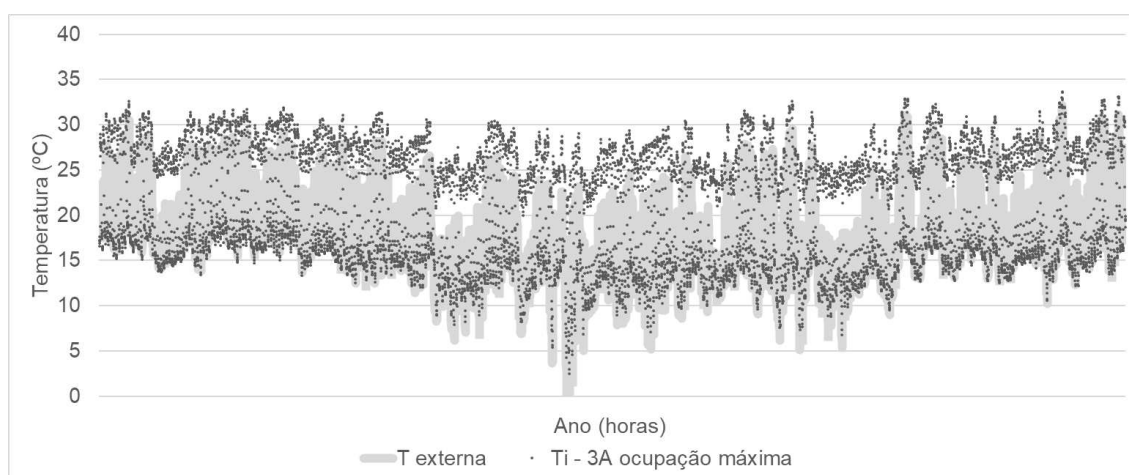
A solução 3A, elaborada em placas de concreto celular, se comporta de forma similar à solução 2A, em madeira. Estas soluções possuem resistência térmica próximas, sendo a resistência térmica em 2A de  $0,27 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  e em 3A de  $0,24 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ . A madeira, geralmente preterida no processo de escolha de materiais construtivos, rende, conforme as simulações, desempenho similar ao concreto celular autoclavado, material popularmente empregado em construções modulares. O comportamento de 3A (FIGURA 41) confirma o padrão das análises anteriores, onde a  $T_i$ , em caso de ocupação mínima, apresenta média anual de  $16,3 \text{ }^\circ\text{C}$  e desvio padrão de  $2,9 \text{ }^\circ\text{C}$ . Com o aumento da ocupação formam-se também duas linhas de tendência (FIGURA 43), reafirmando que o aumento da taxa de produção e calor eleva a  $T_i$  até a média anual de  $20,5 \text{ }^\circ\text{C}$  e desvio padrão de  $6,4 \text{ }^\circ\text{C}$  (FIGURA 42).

FIGURA 41 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 3A - OCUPAÇÃO MÍNIMA



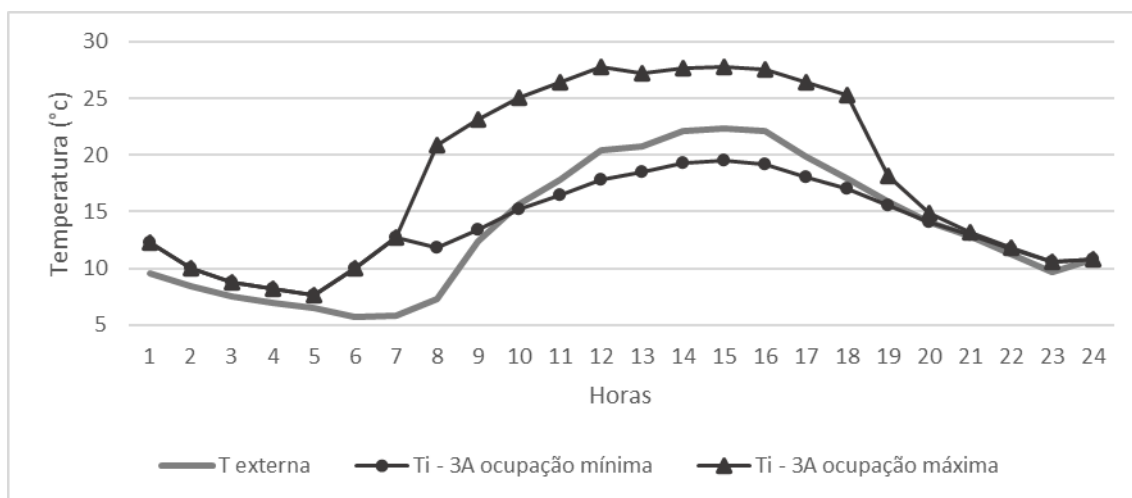
FONTE: A autora (2020).

FIGURA 42 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 3A - OCUPAÇÃO MÍNIMA



FONTE: A autora (2020).

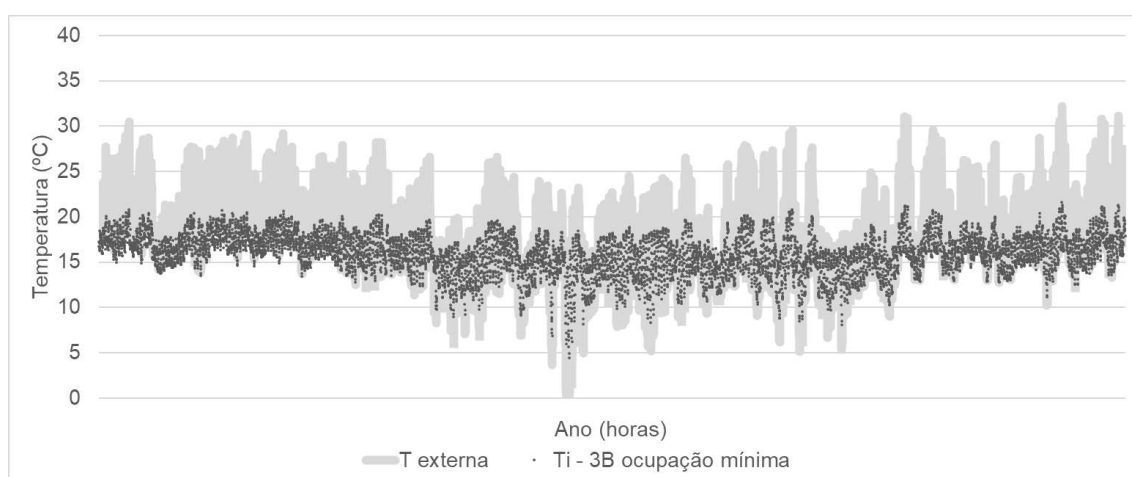
FIGURA 43 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE INVERNO – 3A



FONTE: A autora (2020).

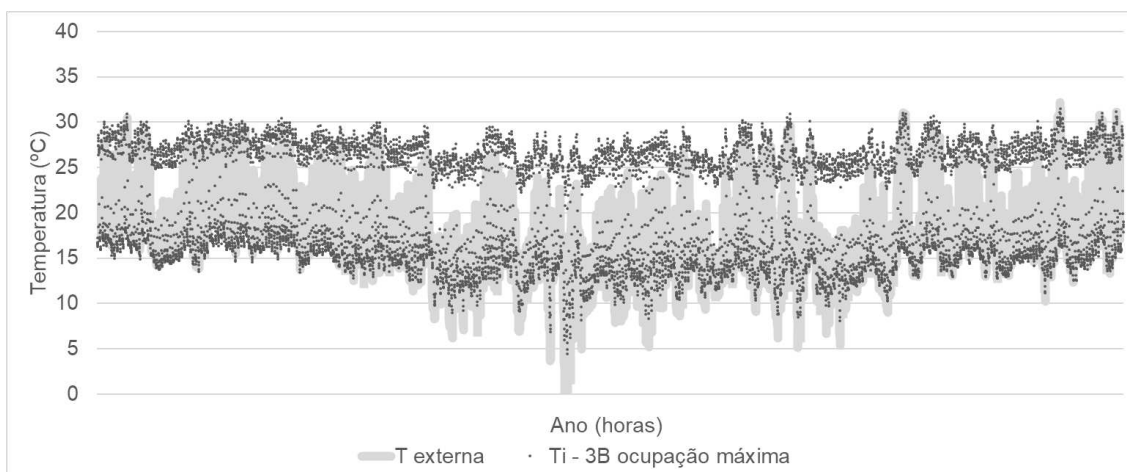
Ao adicionar o isolante térmico, solução 3B, a parede de concreto celular oferece resultados da  $T_i$  mais estáveis (FIGURA 44), confirmando novamente a tendência das simulações anteriores, onde o isolante tem contribuído para a uniformização desejável da resposta térmica. Quando considerada a ocupação mínima, a média anual da  $T_i$  é de  $15,9\text{ }^\circ\text{C}$  e o desvio padrão de  $2,2\text{ }^\circ\text{C}$  (FIGURA 44), enquanto a simulação com ocupação máxima mostra uma média anual da  $T_i$  em  $20,5\text{ }^\circ\text{C}$  e desvio padrão de  $6,1\text{ }^\circ\text{C}$  (FIGURA 45). No recorte apresentado na FIGURA 46 percebe-se que, quando em ocupação máxima, o sistema opera acima da temperatura de base para aquecimento  $T_{ba} = 18\text{ }^\circ\text{C}$  durante o período das 8h – 18h.

FIGURA 44 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 3B - OCUPAÇÃO MÍNIMA



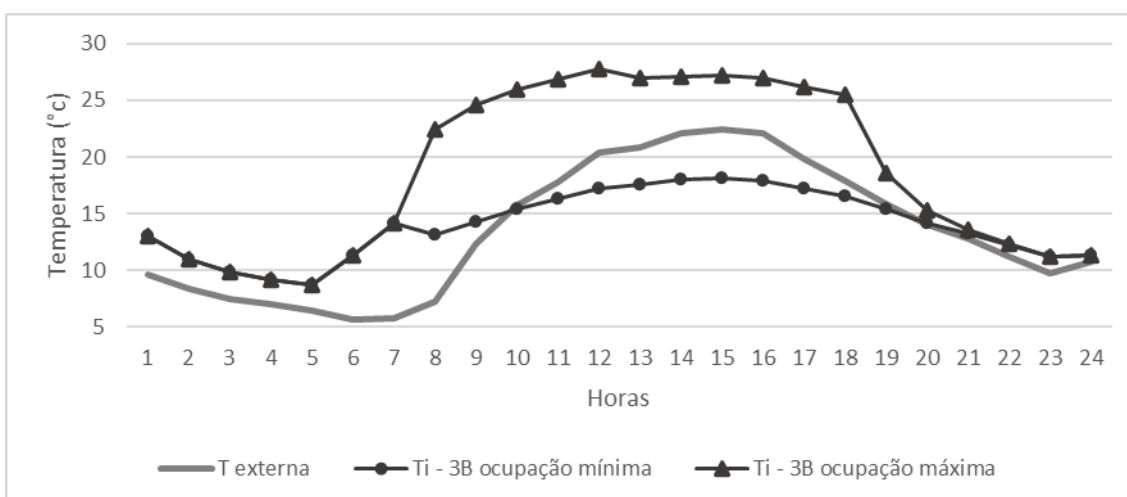
FONTE: A autora (2020).

FIGURA 45 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 3B - OCUPAÇÃO MÁXIMA



FONTE: A autora (2020).

FIGURA 46 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE INVERNO – 3B



FONTE: A autora (2020).

O comportamento térmico da envoltória utilizando as soluções tipo 2B e 3B se mostrou semelhante. É válido ressaltar que a semelhança entre as soluções também existe em relação à resistência térmica. No entanto, no que diz respeito à capacidade térmica, a madeira em 2A possui capacidade térmica ( $36,0 \text{ J/m}^2 \cdot \text{K}$ ) inferior em 36% à do concreto em 3A ( $53,6 \text{ J/m}^2 \cdot \text{K}$ ). Assim, os resultados indicam que, quando em associação com um sistema SCDS, a característica térmica mais relevante da envoltória é a resistência térmica apresentada pelo conjunto, sendo menos relevante a capacidade térmica.

Em resumo, se torna mais claro o efeito do uso do isolante térmico na uniformização das temperaturas internas (Ti) em todas as soluções, independentemente do tipo de material associado. A formação de duas linhas de tendência de temperatura nas simulações com

ocupação máxima demonstra que o aumento da taxa de produção de calor dá condições de funcionamento do sistema entre as temperaturas de base (18 °C a 27 °C) para todas as soluções construtivas, no caso de Curitiba, exceto pela solução 1A. Este fato demonstra que diferentes materiais e propriedades térmicas oferecem diferentes respostas, influenciando no desempenho térmico do sistema. No caso de demanda por aquecimento, considerando a máxima ocupação (22.000W), em todas as soluções testadas esse efeito é positivo, pois verificou-se a elevação da temperatura interior acima de  $T_{ba} = 18^\circ \text{C}$ .

O QUADRO 6 apresenta o resumo dos valores médios obtidos para a  $T_i$  em cada solução testada. Destacam-se para Curitiba como soluções com boa perspectiva para associação ao SCDS, as soluções em madeira (2A e 2B) e em concreto celular (3A e 3B). As soluções menos favoráveis são aquelas em tijolos cerâmicos (1A).

QUADRO 6 - RESUMO DAS MÉDIAS ANUAIS DE TEMPERATURA INTERNA - CURITIBA

Material	1 - Tijolo Maciço Cerâmico				2 - Tábua Madeira Pinus				3 - Placa Concreto Celular			
	Não		Sim		Não		Sim		Não		Sim	
Ocupação	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Solução	1A	1A	1B	1B	2A	2A	2B	2B	3 <sup>a</sup>	3A	3B	3B
Média (°C)	16,2	19,2	15,5	19,2	16,3	20,7	15,9	20,7	16,3	20,5	15,9	20,5
DP (°C)	3,3	5,5	2,1	5,0	2,9	6,5	2,2	6,2	2,9	6,4	2,2	6,1
Variância (°C)	10,7	29,8	4,4	25,4	8,5	42,2	4,9	38,8	8,7	40,7	4,9	37,3

FONTE: A autora (2020).

#### 4.1.2 Temperatura interna por solução de envoltória – Cuiabá

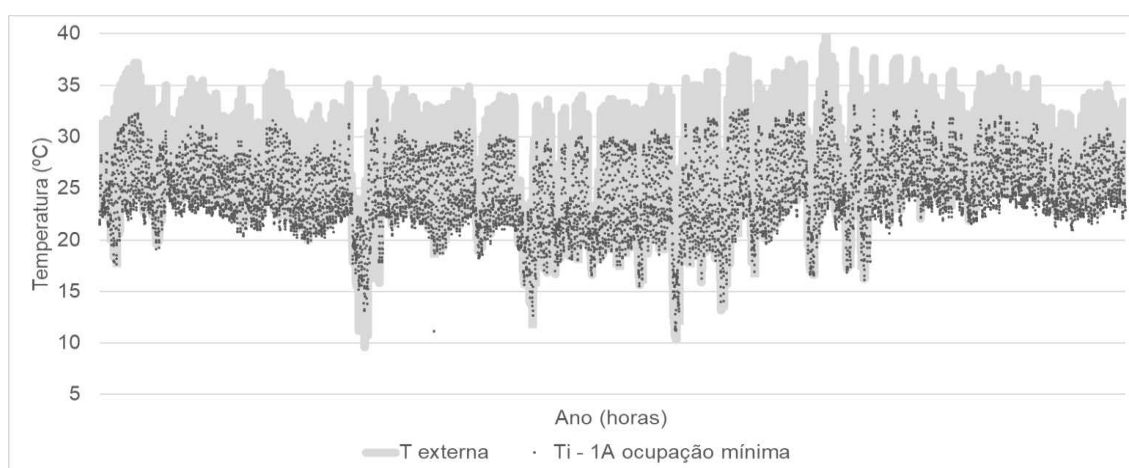
Em contraste ao clima de Curitiba, a cidade de Cuiabá apresenta clima tropical, classificado como Aw pela classificação Koppën-Geiger, chamado de clima tropical savânico, com estação mais seca no inverno. A temperatura média anual é de 26,1 °C (INMET, 2020). A demanda de climatização, nesse caso, é por resfriamento, sendo a temperatura média mínima de 21,5 °C (INMET, 2020) e a temperatura média máxima de 33,0 °C (INMET, 2020).

No contexto de ocupação mínima (FIGURA 47), a solução de menor resistência térmica testada, 1A, obteve resultados de diminuição da temperatura interna ( $T_i$ ) em relação às temperaturas máximas do ambiente externo. Isso demonstra um bom desempenho desta solução no controle da temperatura máxima. A média anual da  $T_i$  foi de 24,5 °C, com desvio padrão de 3,4 °C.

Já no caso de densidade ocupacional máxima (FIGURA 48), se observa uma maior dispersão da  $T_i$ , demonstrando a dificuldade do sistema em se manter entre as temperaturas de base  $T_{ba} = 18\text{ °C}$  e  $T_{br} = 27\text{ °C}$ .

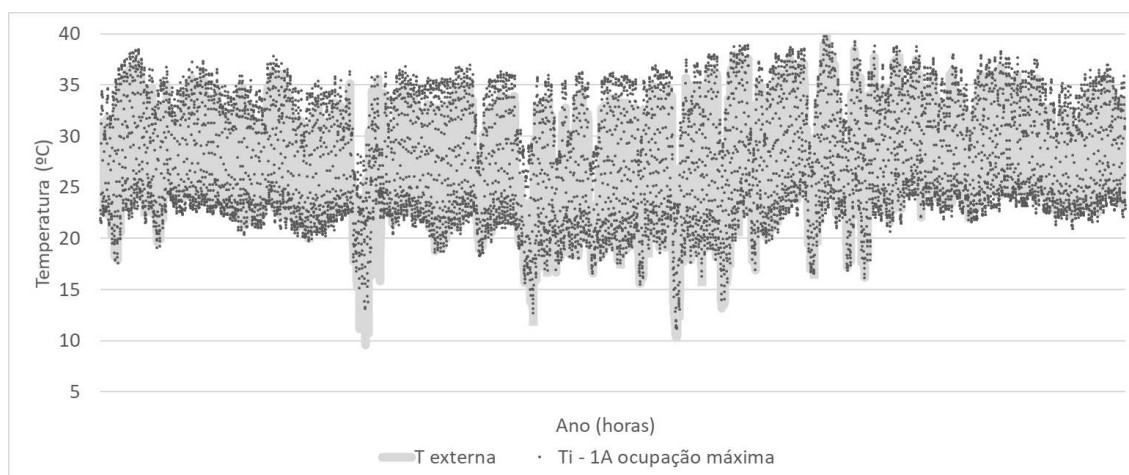
Assim como nas simulações de Curitiba, o aumento da taxa de produção de calor causa efeito sobre a  $T_i$ . No caso do clima tropical de Cuiabá, esse feito se torna indesejado, já que aumenta a temperatura, gerando valores da  $T_i$  acima da  $T_{br}$  estabelecida ( $27\text{ °C}$ ).

FIGURA 47 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 1A - OCUPAÇÃO MÍNIMA



FONTE: A autora (2020).

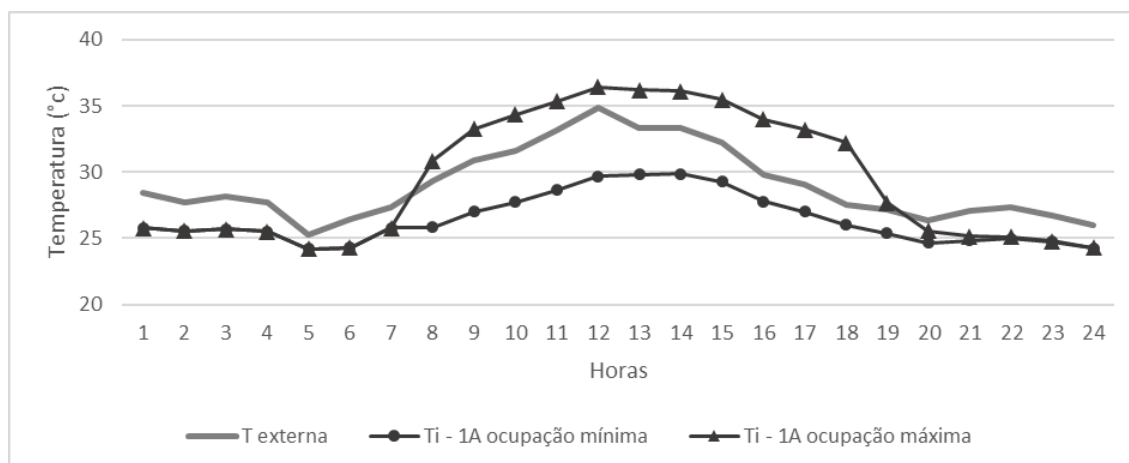
FIGURA 48 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 1A - OCUPAÇÃO MÁXIMA



FONTE: A autora (2020).

Na FIGURA 49, que traz um recorte de um dia típico de verão, é possível verificar como a solução 1A se comporta quando está em sua ocupação mínima e máxima. Nesse caso, o efeito da ocupação é inverso ao de Curitiba, com o edifício em ocupação mínima a resposta do sistema faz reduzir até  $5\text{ °C}$  ao meio-dia.

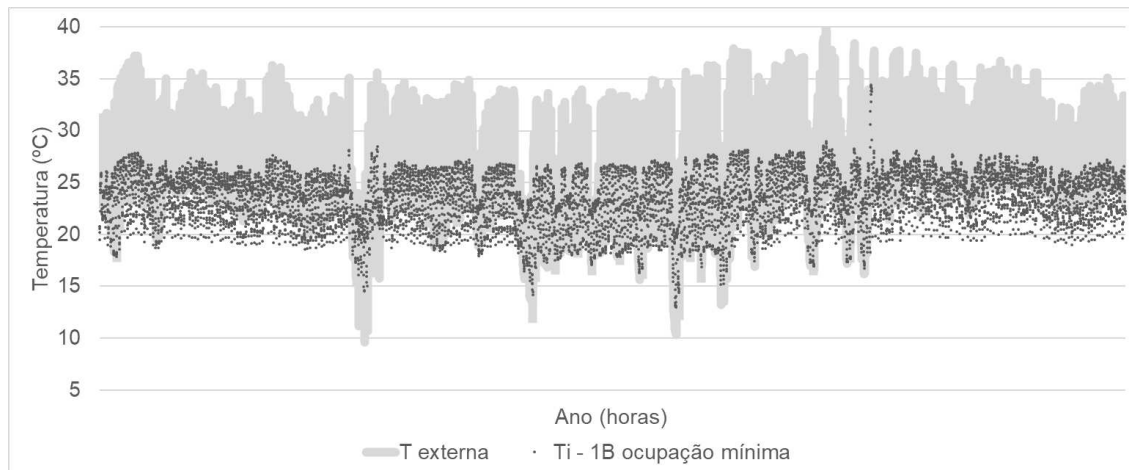
FIGURA 49 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE VERÃO – 1A



FONTE: A autora (2020).

A utilização de isolante térmico na solução de envoltória foi também benéfica no caso testado em 1B. Nesse caso, considerando a ocupação mínima (FIGURA 50), existe maior uniformidade dos dados em relação à solução 1A. A média anual da  $T_i$  de 23,3 °C e desvio padrão de 2,6 °C.

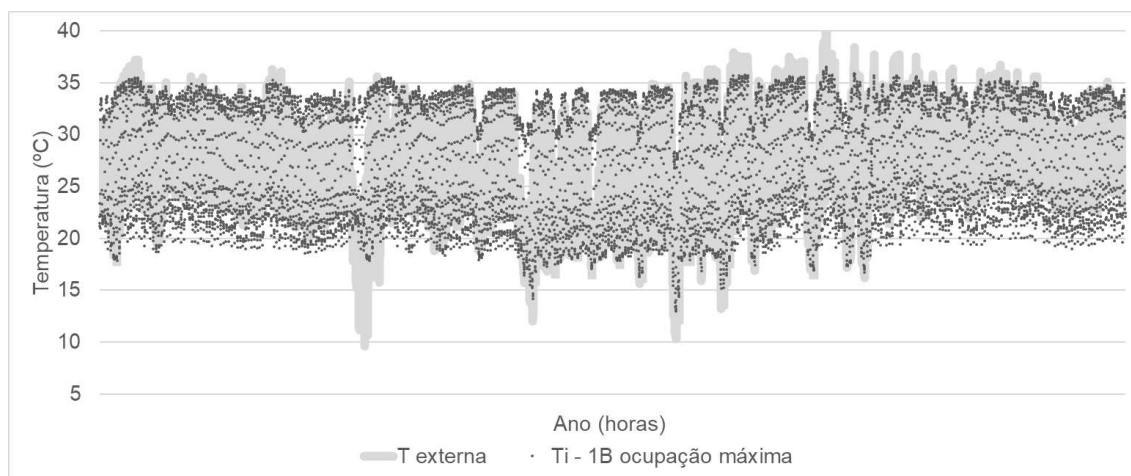
FIGURA 50 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 1B - OCUPAÇÃO MÍNIMA



FONTE: A autora (2020).

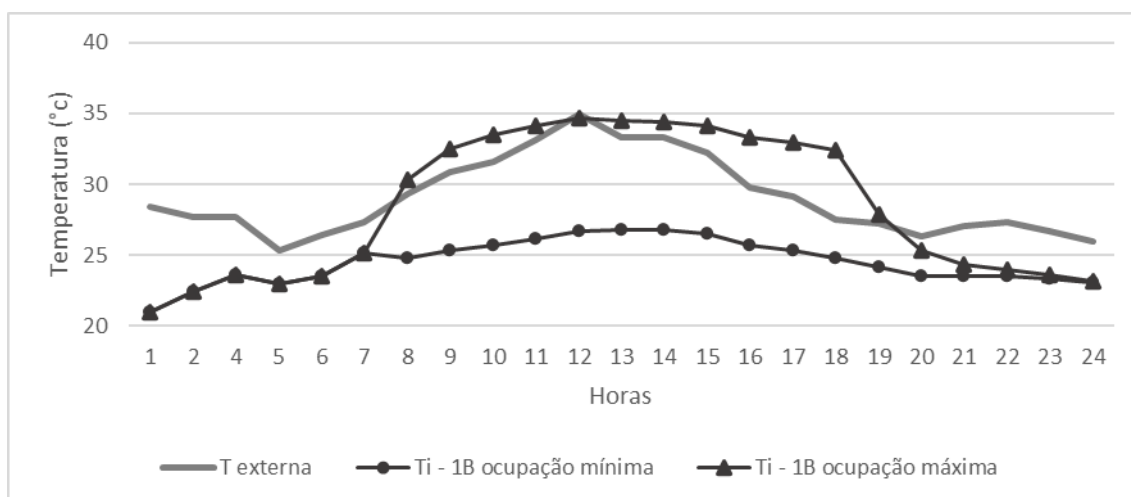
No caso de ocupação máxima em 1B (FIGURA 51), a média anual é de 27,1 °C e o desvio padrão de 5,7 °C. Se verifica também a formação de uma tendência mais uniforme para a  $T_i$ . Nesse caso, o resultado da  $T_i$  se concentra na porção superior, próxima aos 33 °C, demonstrando que, com o aumento da taxa de produção de calor, a solução adicionada de isolante tende a manter a  $T_i$  elevada, acima dos 30 °C e acima de  $T_{br} = 18$  °C. Na FIGURA 52 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE VERÃO – 1B é apresentado o recorte de um dia típico de verão.

FIGURA 51 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA –1B - OCUPAÇÃO MÁXIMA



FONTE: A autora (2020).

FIGURA 52 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE VERÃO – 1B

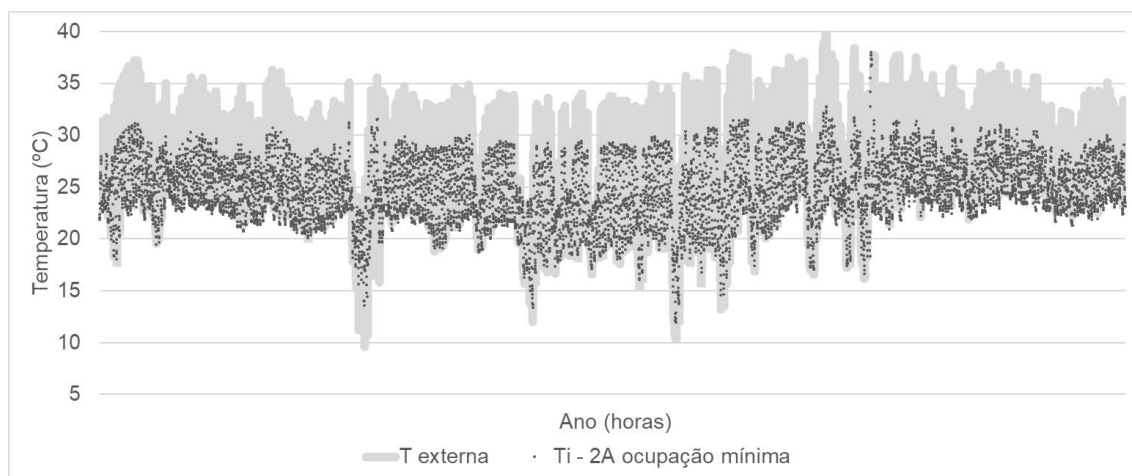


FONTE: A autora (2020).

Na aplicação da solução 2A, em madeira, também é possível verificar a redução das máximas em  $T_i$ . No caso de ocupação mínima (FIGURA 53), 2A é suficiente para estabelecer, ao longo do ano, temperaturas máximas abaixo de  $T_{br} = 27\text{ °C}$ , comportamento desejado no caso de Cuiabá. A média anual é de  $24,7\text{ °C}$  e desvio padrão de  $3,1\text{ °C}$  em ocupação mínima.

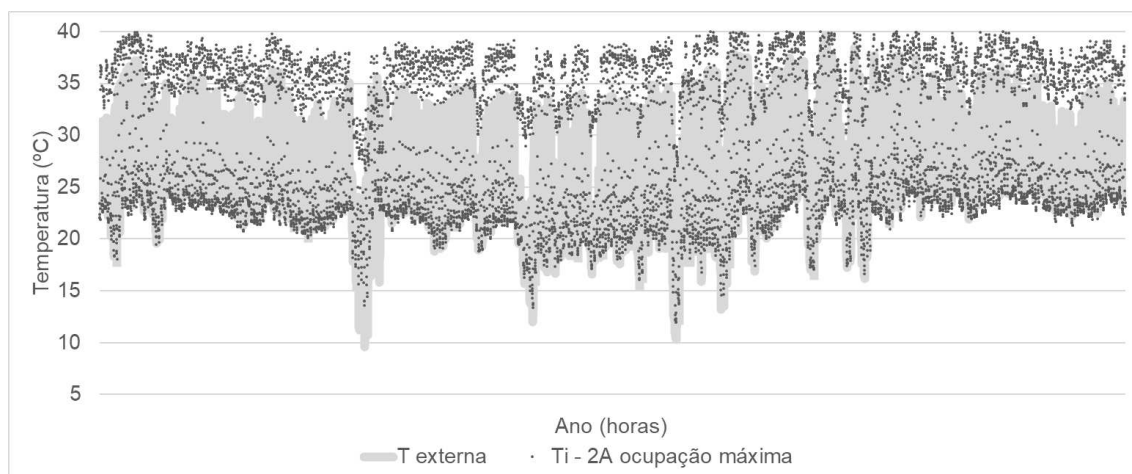
No caso de ocupação máxima (FIGURA 54), 2A demonstra capacidade de retenção do calor e, como consequência, a temperatura interna ( $T_i$ ) se eleva acima de  $T_{br} = 17\text{ °C}$ . A média anual da  $T_i$ , nesse caso, é de  $29,1\text{ °C}$  e desvio padrão de  $6,9\text{ °C}$ . O recorte para o dia típico de verão é apresentado na FIGURA 55.

FIGURA 53 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 2A - OCUPAÇÃO MÍNIMA



FONTE: A autora (2020).

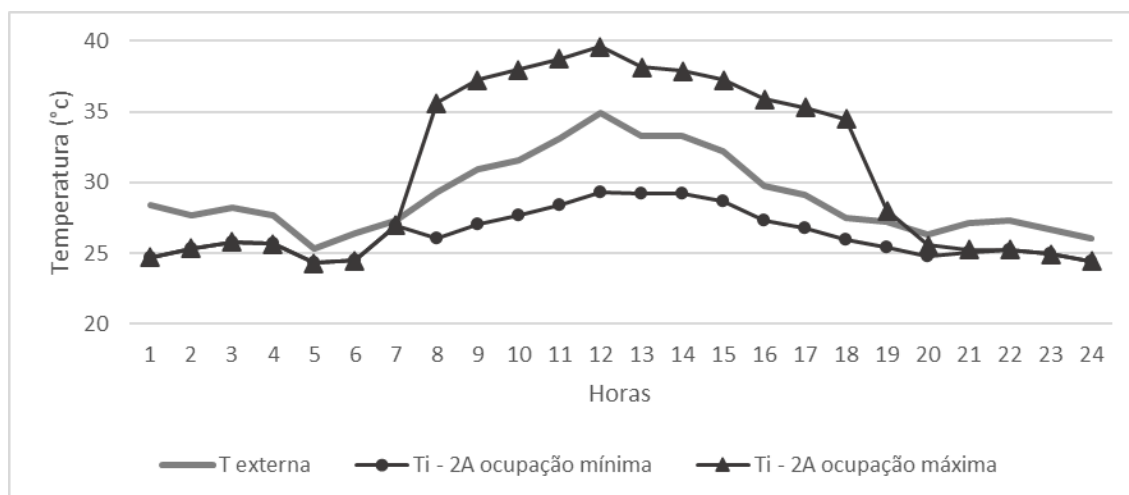
FIGURA 54 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 2A - OCUPAÇÃO MÁXIMA



FONTE: A autora (2020).



FIGURA 55 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE VERÃO – 2A

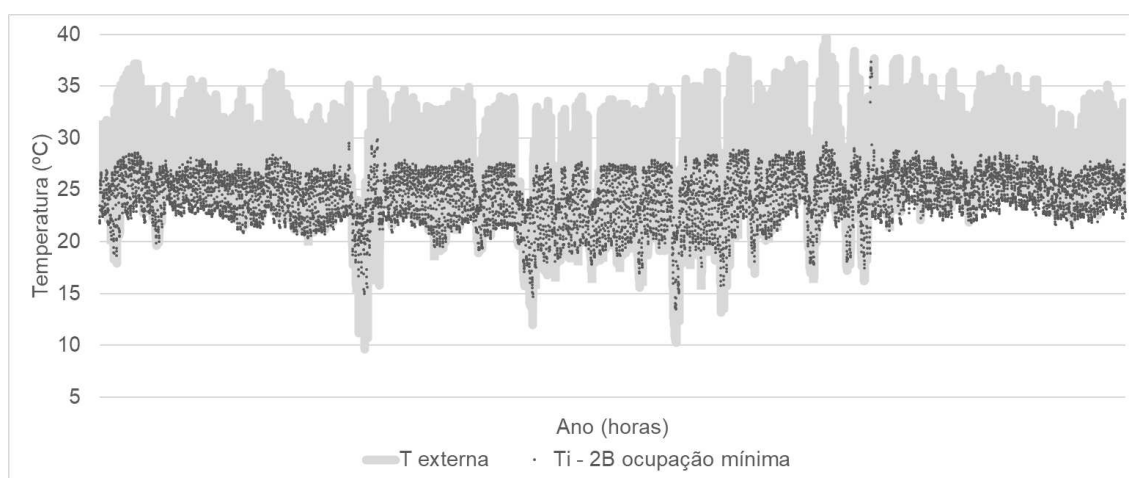


FONTE: A autora (2020).

Na solução 2B, madeira combinada com isolante, a tendência é de uniformização da temperatura. Esse efeito se observa tanto para o caso de ocupação mínima (FIGURA 56) quanto para o caso de ocupação máxima (FIGURA 57). Com ocupação reduzida, a solução estudada oferece temperatura anual média de 24,2 °C e desvio padrão de 2,5 °C. Já na ocupação máxima, no entanto, a temperatura anual média é de 28,9 °C e o desvio de 6,6 °C.

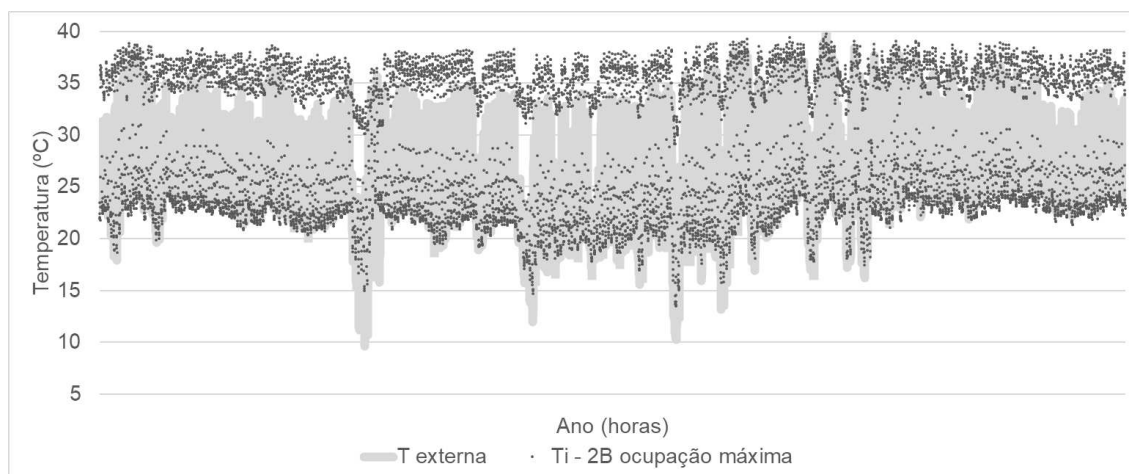
Se consolida a tendência das simulações anteriores para a solução 2B (FIGURA 58), onde o efeito da taxa de produção de calor é o inverso do verificado em Curitiba e, assim, prejudica o desempenho das soluções estudadas no contexto climático de Cuiabá.

FIGURA 56 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 2B - OCUPAÇÃO MÍNIMA



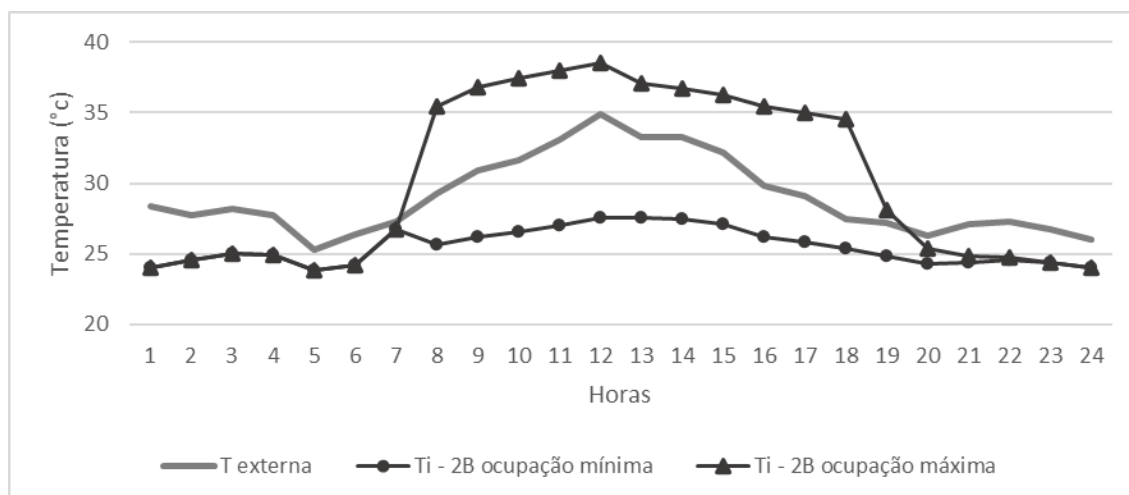
FONTE: A autora (2020).

FIGURA 57 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 2B - OCUPAÇÃO MÁXIMA



FONTE: A autora (2020).

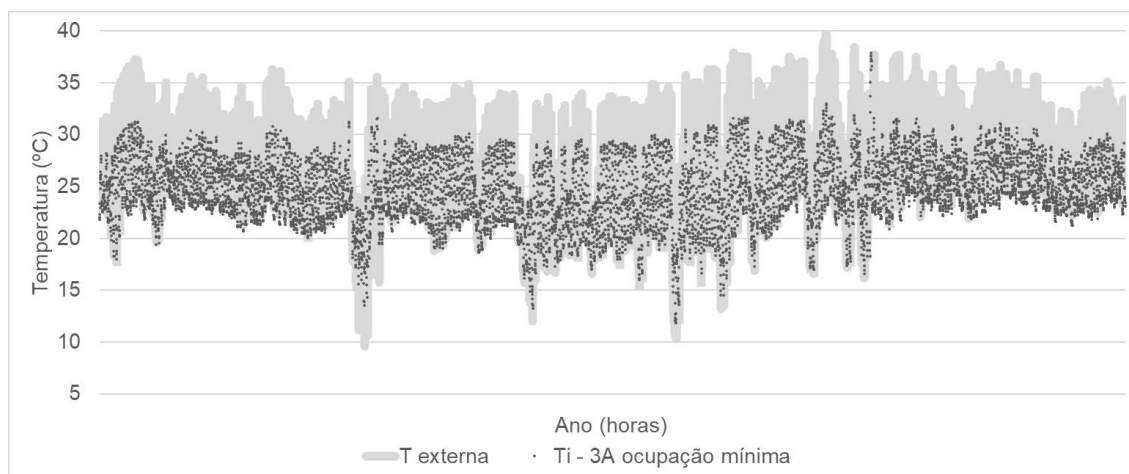
FIGURA 58 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE VERÃO – 2B



FONTE: A autora (2020).

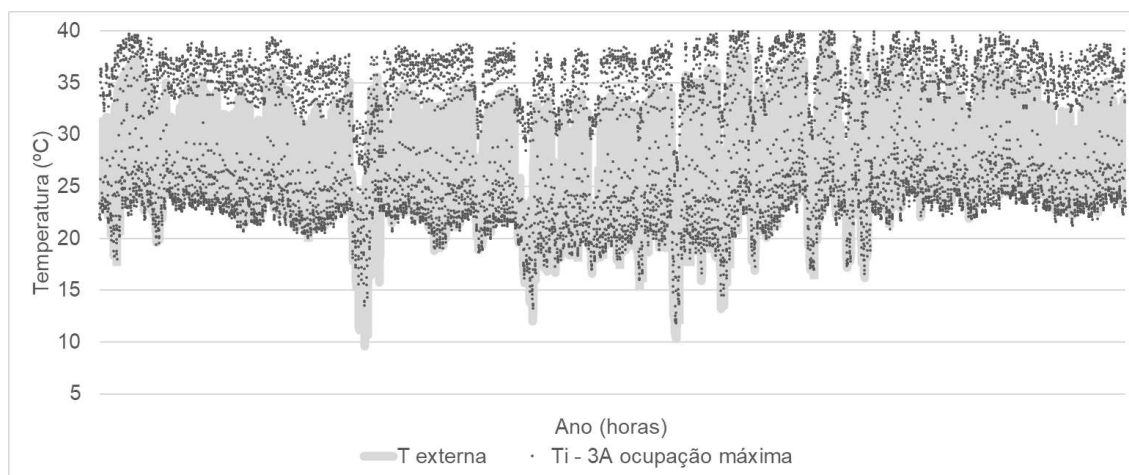
A solução em concreto celular, testado em 3A, também demonstra potencial para redução das temperaturas máximas ao longo do ano quando a densidade ocupacional está reduzida (FIGURA 59), a temperatura média anual é de 24,6 °C e 3,2 °C o desvio padrão. Com o aumento da ocupação e da taxa de produção de calor associada (FIGURA 60), as temperaturas se elevam acima de  $T_{br} = 18$  °C, de maneira dispersa, à exemplo do comportamento na solução 2A. A temperatura média anual é 28,9 °C e o desvio padrão de 6,8 °C. A solução 3A demonstra também capacidade de reter o calor produzido no interior, sendo assim, a menor ocupação do edifício obtém melhor desempenho térmico no cenário de Cuiabá (FIGURA 61).

FIGURA 59 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 3A - OCUPAÇÃO MÍNIMA



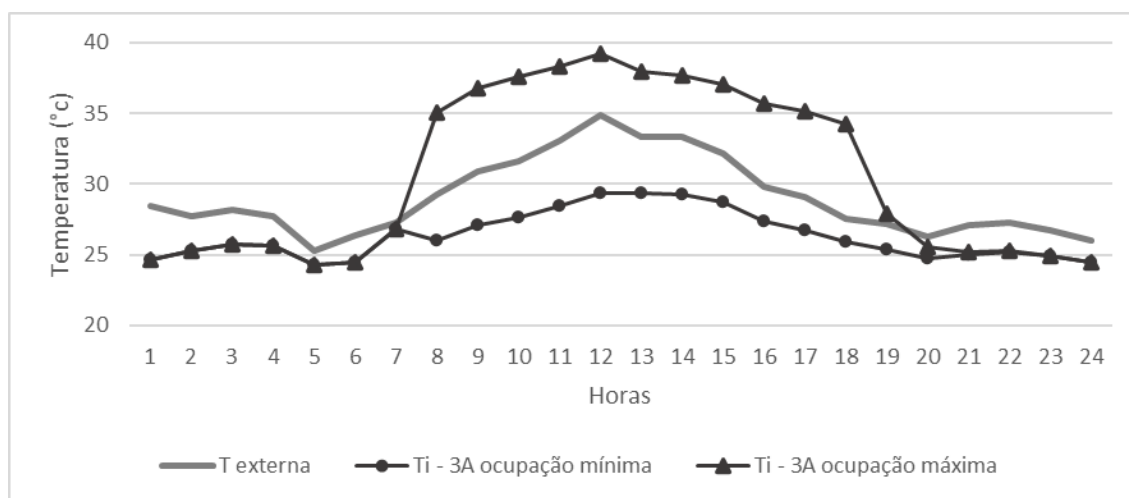
FONTE: A autora (2020).

FIGURA 60 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 3A - OCUPAÇÃO MÁXIMA



FONTE: A autora (2020).

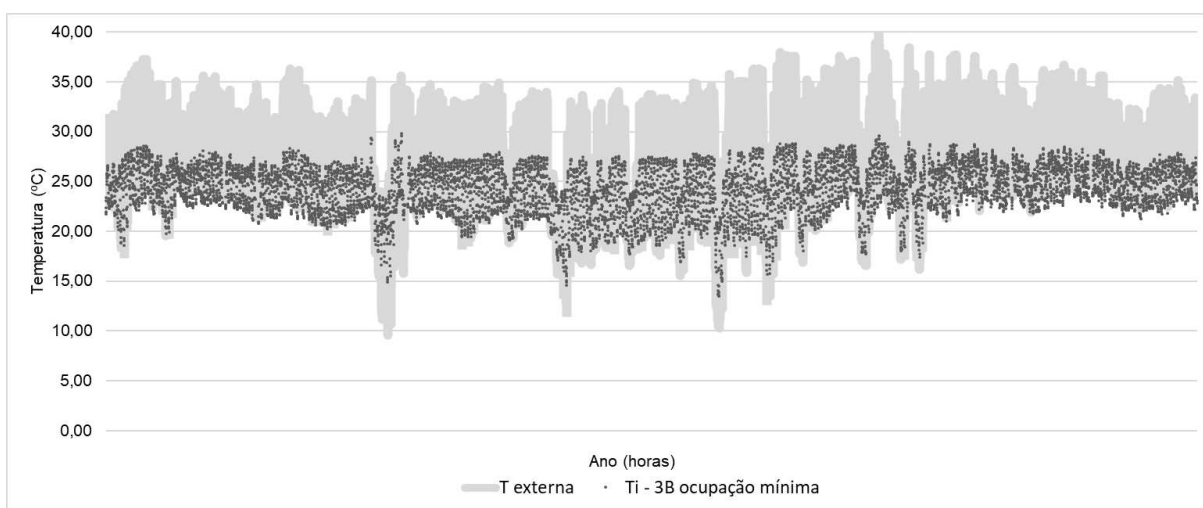
FIGURA 61 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE VERÃO – 3A



FONTE: A autora (2020).

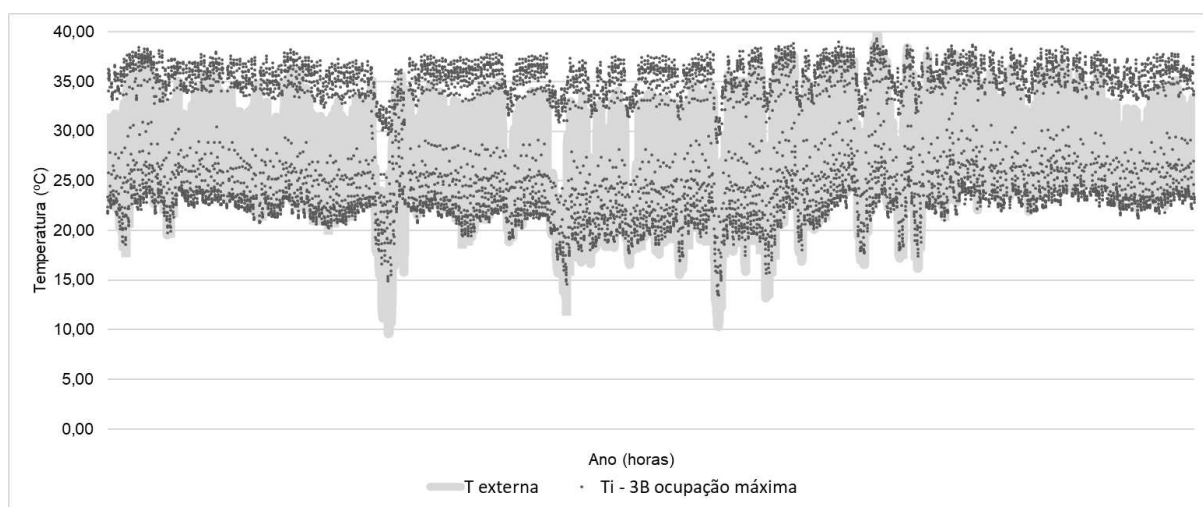
Por último, a solução 3B, desenvolvida em concreto celular e isolante, reafirma a tendência das análises anteriores. Na situação de ocupação reduzida (FIGURA 62), o sistema SCDS em associação à solução 3B é capaz de manter a temperatura interna abaixo dos 27 °C. A temperatura média anual é de 24,2 °C e o desvio padrão é de 2,5 °C. O recorte apresentado na FIGURA 64 demonstrando que, com baixa taxa de produção de calor, o sistema combinado à solução 3B consegue reduzir em até 7 °C a temperatura interna em relação ao pico da temperatura externa (às 12 horas). Ao contrário do verificado em Curitiba, no caso de Cuiabá o aumento da taxa de produção de calor (FIGURA 63) inviabiliza o sistema trocador-parede em todas as soluções testadas. Em ocupação máxima, a temperatura média anual é de 28,8 °C e o desvio padrão é de 6,5 °C.

FIGURA 62 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 3B - OCUPAÇÃO MÍNIMA



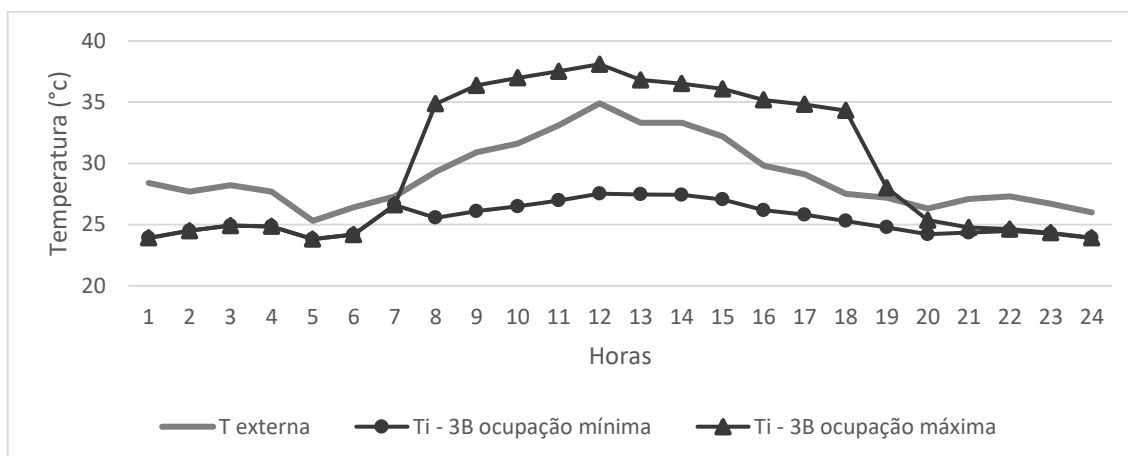
FONTE: O Autor

FIGURA 63 - SIMULAÇÃO ANUAL DE TEMPERATURA – 3B - OCUPAÇÃO MÁXIMA



FONTE: O Autor

FIGURA 64 - TEMPERATURA INTERNA EM DIA TÍPICO DE VERÃO – 3B



FONTE: A autora (2020).

Este resultado demonstra o potencial dessas soluções de envoltória para determinadas finalidades de uso e ocupação da edificação. O desempenho se mostra adequado para projetos de espaços amplos, de pouca aglomeração, com pouco contato entre indivíduos e, assim, manutenção de uma baixa taxa de produção de calor. A divergência que existe nos resultados da Ti em relação à taxa de produção de calor é esperada para as duas cidades, uma vez que com a demanda por aquecimento em Curitiba, se torna favorável o aumento da produção interna de calor. Em Cuiabá, inversamente, a produção de calor é indesejada dada a temperatura média anual de 26,1 °C, já próxima da  $T_{br} = 27$  °C.

O QUADRO 7 apresenta o resumo dos valores médios obtidos para a Ti em cada solução testada. Destacam-se para Cuiabá como soluções com boa perspectiva para associação ao SCDS, as soluções em cerâmica (1B) e em concreto celular (3B). As soluções menos favoráveis são aquelas em madeira (2A).

QUADRO 7 - RESUMO DAS MÉDIAS ANUAIS DE TEMPERATURA INTERNA - CURITIBA

Material	1 - Tijolo Maciço Cerâmico				2 - Tábua Madeira Pinus				3 - Placa Concreto Celular			
	Não		Sim		Não		Sim		Não		Sim	
Ocupação	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Solução	1A	1A	1B	1B	2A	2A	2B	2B	3A	3A	3B	3B
Média (°C)	24,5	27,5	23,3	27,1	24,7	29,1	24,2	28,9	24,6	28,9	24,2	28,8
DP (°C)	3,4	5,8	2,6	5,7	3,1	6,9	2,5	6,6	3,2	6,8	2,5	6,5
Variância (°C)	11,7	33,2	6,6	32,3	9,8	47,3	6,0	43,7	10,1	45,7	6,0	42,1

FONTE: A autora (2020).

## 4.2 DESEMPENHO TÉRMICO EM GRAUS-HORA

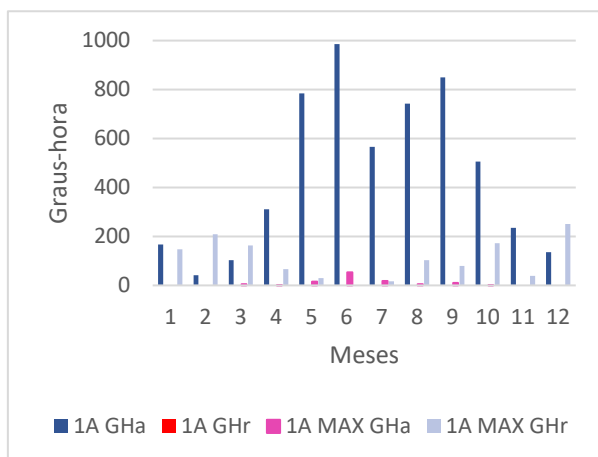
As cidades de Curitiba e Cuiabá possuem climas contrastantes e, por isso, demandas muito diferentes para a climatização. Segundo estimado no estudo de Alves (2014), Curitiba teria demanda de 19.403,2gh de aquecimento ao longo do ano. Em Cuiabá, segundo o mesmo estudo, a demanda por resfriamento seria de 14.060,5gh anuais. Estes valores foram apresentados por Alves (2014) como potenciais para utilização do sistema de climatização SCDS de eficiência 100%, considerando as 24 horas do dia, através da diferença entre temperatura externa e temperatura do subsolo.

Nas simulações conduzidas neste estudo, a eficiência do SCDS foi considerada de 60% e as horas do dia, tomadas para análise de graus-hora, correspondem somente ao período das 8h - 18h. Essas considerações visam obter resultados mais aproximados da realidade, com avaliação apenas dos dados referentes ao real período de funcionamento do sistema e de ocupação do ambiente.

Nos gráficos apresentados nesta seção, o termo “MAX” na legenda indica as duas séries de dados simuladas com densidade ocupacional máxima, sendo as outras duas séries simuladas com densidade mínima. Para as soluções formadas por tijolos cerâmicos maciços, sem isolante (1A) e com isolante (1B), são apresentados os gráficos de demanda por graus-hora, mês a mês, na FIGURA 65 e FIGURA 66. A demanda por aquecimento atinge o maior valor nos meses de inverno, como se espera para a cidade de Curitiba. Apesar de uma maior uniformização dos dados da  $T_i$ , demonstrados na seção anterior, o uso do isolante térmico não refletiu, dentro do intervalo das temperaturas de base (18 °C a 27 °C), diferença significativa de desempenho.

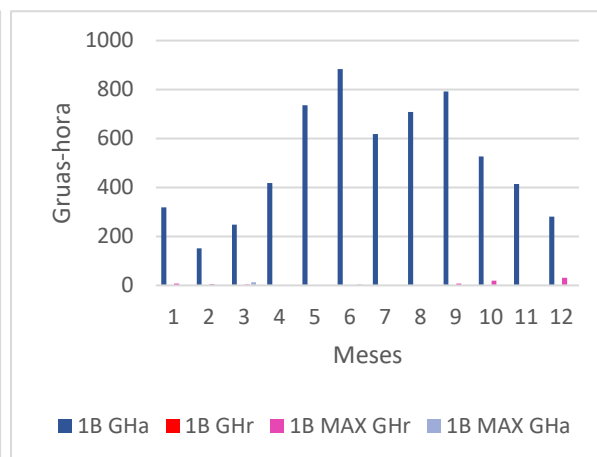
A alteração da taxa de produção de calor é o fator que mais afetou a demanda por graus-hora de aquecimento, corroborando com análise da seção anterior. O aumento da taxa de produção de calor, pelo fato da máxima densidade ocupacional, diminuiu a demanda por aquecimento, tanto na solução sem isolante (FIGURA 65), quanto na solução com isolante (FIGURA 66). Já a demanda por resfriamento é praticamente nula.

FIGURA 65 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 1A



FONTE: A autora (2020).

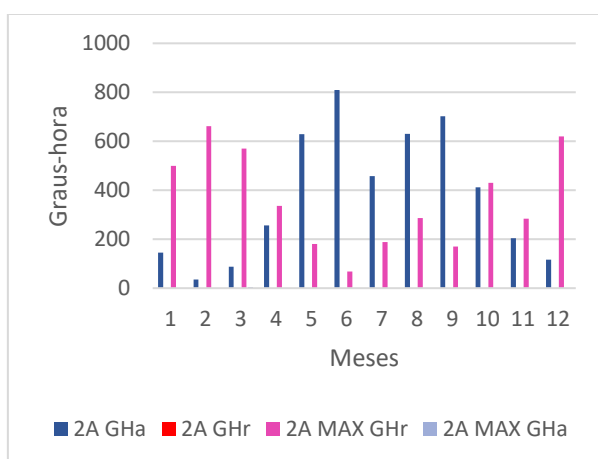
FIGURA 66 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 1B



FONTE: A autora (2020).

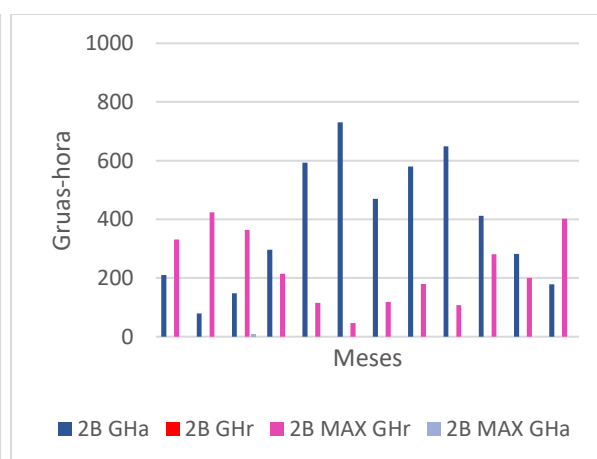
Para as soluções elaboradas em madeira, os resultados foram mais otimistas, com diminuição da demanda por aquecimento em todos os meses (FIGURA 67). O efeito do isolante térmico foi ligeiramente superior, reduzindo o pico de demanda no mês mais frio de 809,74gh para 763,27gh (FIGURA 68). As barras cor de rosa, indicam a necessidade de resfriamento quando da ocupação máxima do ambiente.

FIGURA 67 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 2ª



FONTE: A autora (2020).

FIGURA 68 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 2B

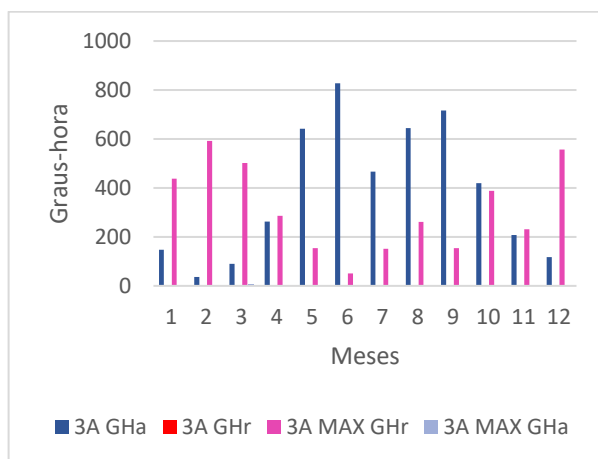


FONTE: A autora (2020).

As soluções tipo 3A (FIGURA 69) e 3B (FIGURA 70), elaboradas a partir de placas de concreto celular, demonstram também resultados mais otimistas, com diminuição da demanda por aquecimento em todos os meses. O efeito do isolante térmico também é sentido para os

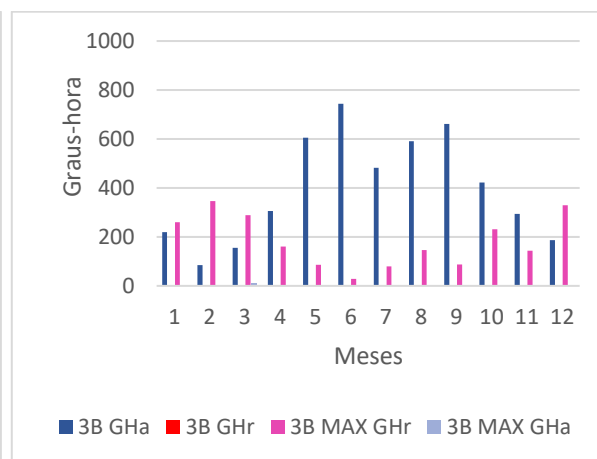
meses de maior frio, reduzindo o pico de demanda no mês mais frio de 827,55gh para 743,50gh e reduzindo também o pico por resfriamento.

FIGURA 69 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 3ª



FONTE: A autora (2020).

FIGURA 70 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 3B



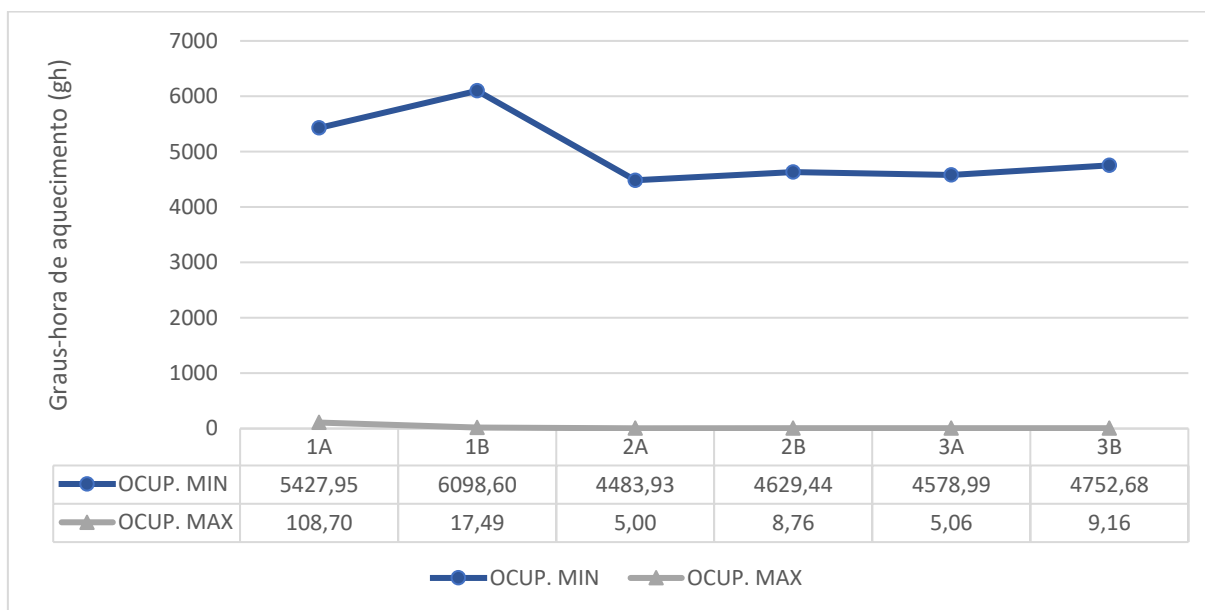
FONTE: A autora (2020).

Com alta demanda por aquecimento, o desempenho térmico em graus-hora para a cidade de Curitiba teve seu melhor resultado nas soluções de envoltória tipo 2A, 2B, 3A e 3B. Para estas soluções, os valores graus-hora de demanda para aquecimento foram de 4.752,68gh (3B), variando até 4.483,93gh (2A), considerando taxa de produção de calor baixa e ocupação mínima. O pior desempenho nesse cenário foi a da solução 1B, com 6.098,60gh de demanda para aquecimento.

No cenário de taxa de produção de calor alta, com ocupação máxima, todas as soluções propostas se mostraram suficientes para que o ambiente se mantenha acima da  $T_{ba} = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . De modo geral, os graus-hora de demanda por aquecimento são valores baixos, entre 5,00gh e 17,49gh, apontando a eficiência do sistema trocador-parede em reter o calor no interior do ambiente, a solução 1A apresenta a maior demanda, 108,70gh, sendo a solução menos favorável no contexto curitibano (FIGURA 71).



FIGURA 71 - SIMULAÇÃO ANUAL DEMANDA EM GRAUS-HORA - CURITIBA

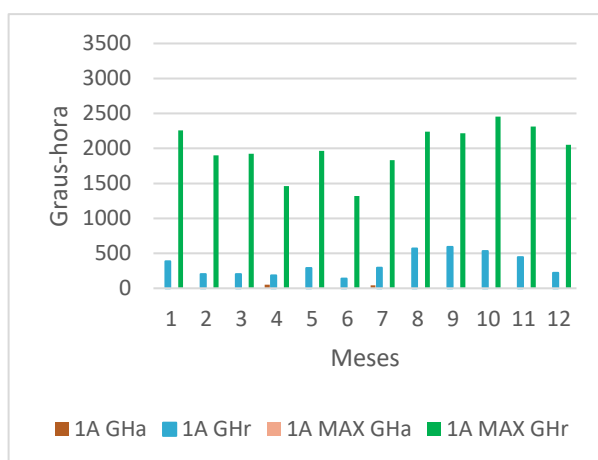


FONTE: A autora (2020).

No contexto climático de Cuiabá, com alta demanda por resfriamento, foi a solução 1B que apresentou a menor demanda por resfriamento. Em ocupação mínima (FIGURA 72) o pico de demanda por resfriamento acontece no mês de setembro, com 589,98gh. Valor significativamente inferior ao pico de 2.455,70gh de demanda em ocupação máxima.

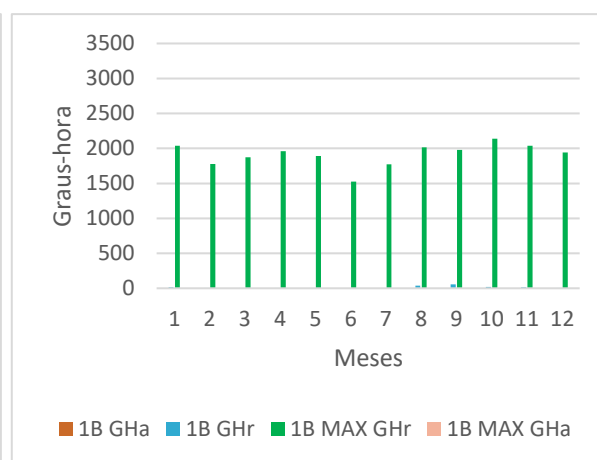
Na solução com isolante térmico (FIGURA 73), a demanda por resfriamento em baixa ocupação tem pico bastante inferior, são 54,06gh em comparação aos 589,98gh da solução sem isolante térmico.

FIGURA 72 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 1ª



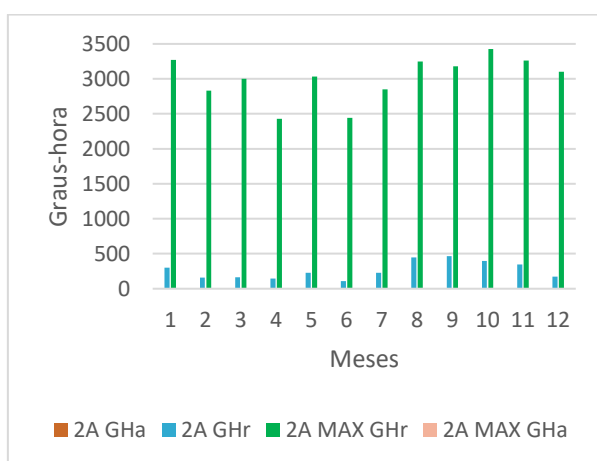
FONTE: A autora (2020).

FIGURA 73 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 1B



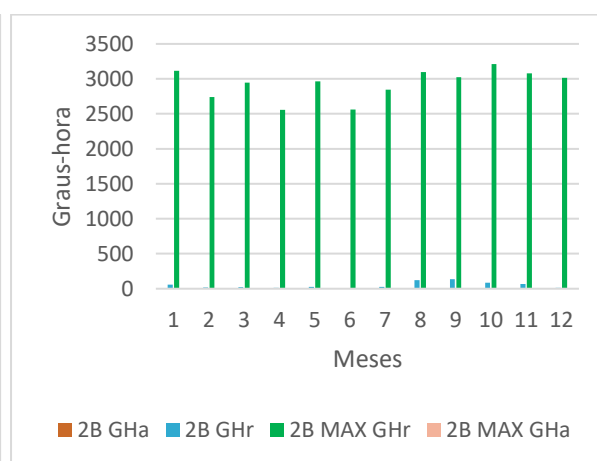
FONTE: A autora (2020).

A demanda por resfriamento foi maior nas simulações com soluções em madeira, atingindo até 3426,81gh em 2A (FIGURA 74) e 3121,81gh em 2B (FIGURA 75) em situações de ocupação máxima do ambiente. No entanto, quando o ambiente tem ocupação mínima e taxa de produção de calor baixa, a demanda por resfriamento é inferior, sendo de até 464,03gh em 2A e de até 135,53gh em 2B. O efeito do isolante térmico em diminuir as máximas temperaturas só é sentido para cargas térmicas mais baixas.

FIGURA 74 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 2<sup>a</sup>

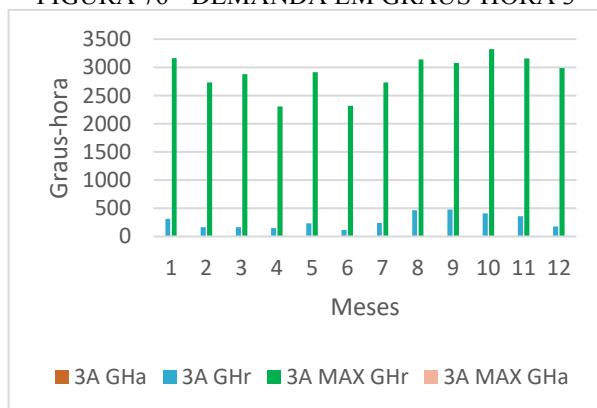
FONTE: A autora (2020).

FIGURA 75 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 2B



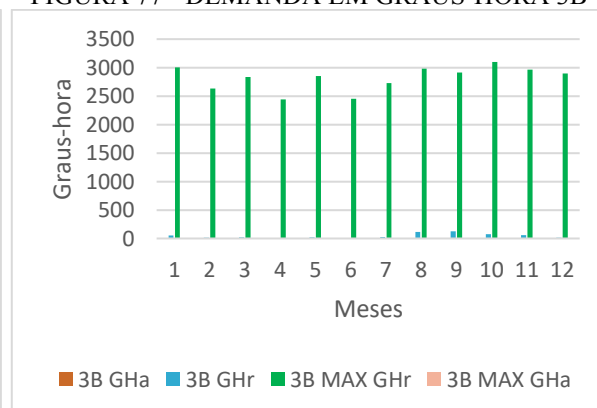
FONTE: A autora (2020).

De forma similar às soluções 2A e 2B, os resultados para as soluções em concreto celular, 3A e 3B, são de alta demanda por resfriamento quando da ocupação máxima. Para 3A (FIGURA 76), o pico de demanda por resfriamento é de 3.321,60gh, enquanto que para 3B (FIGURA 77) o pico é de 3097,64gh. Para ocupação mínima, 3A tem pico de demanda em 479,46gh e 3B tem seu pico em 127,76gh. Novamente, o uso do isolante térmico tem efeito reduzido quando da ocupação máxima.

FIGURA 76 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 3<sup>a</sup>

FONTE: A autora (2020).

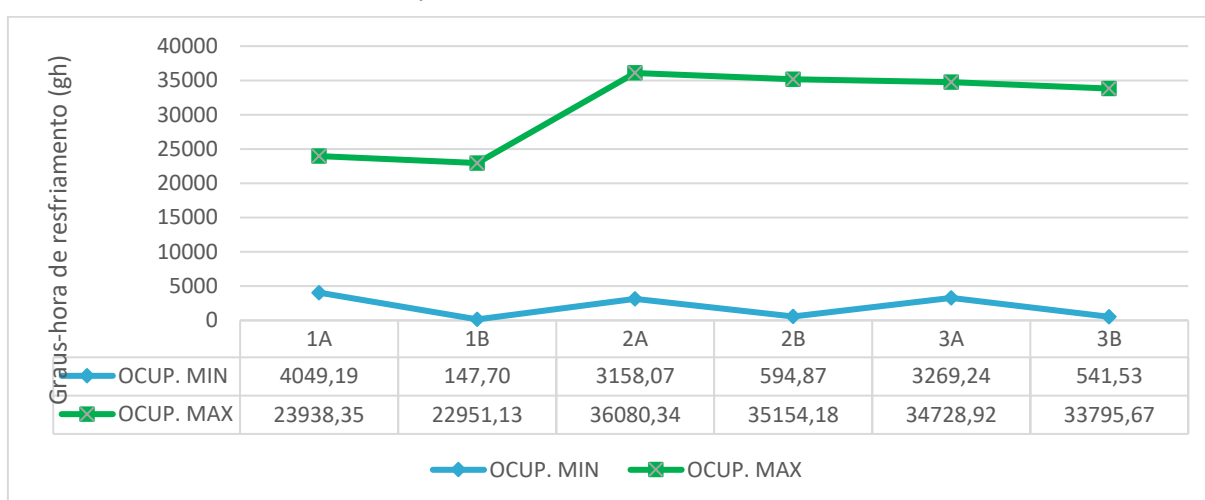
FIGURA 77 - DEMANDA EM GRAUS-HORA 3B



FONTE: A autora (2020).

Em conclusão, quando o ambiente possui taxa de produção de calor reduzida as soluções em madeira e em concreto apresentam melhor desempenho térmico (FIGURA 78), o resultado é beneficiado pela adição de isolante térmico (tipos B), e é possível notar a oscilação de queda na demanda para todas as soluções construtivas. Quando o ambiente está sujeito a ocupação máxima, no entanto, a menor demanda é apresentada pelas soluções 1A e 1B, de materiais cerâmicos. A demanda, nesse caso, é significativamente inferior às apresentadas nas demais soluções.

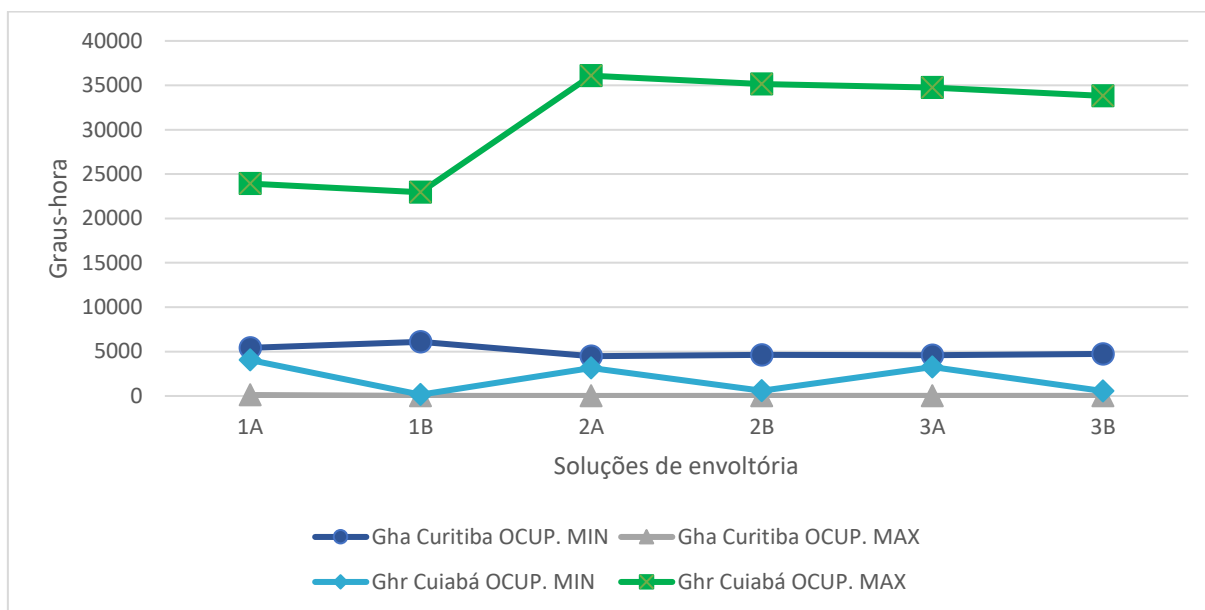
FIGURA 78 - SIMULAÇÃO ANUAL DEMANDA EM GRAUS-HORA – CUIABÁ



FONTE: A autora (2020).

As soluções estudadas apresentaram maior ou menor demanda em graus-hora a depender do contexto climático em que foram inseridas (FIGURA 79). Em suma, as soluções desenvolvidas em madeira e concreto celular (2A, 2B, 3A e 3B) apresentaram demandas menores, com melhor desempenho térmico, no clima de Curitiba, pois em situação de ocupação mínima existe demanda por aquecimento. Já em situação de ocupação máxima, todas as soluções construtivas apresentam baixa demanda, sendo a maior apresentada pela solução 1A de 108,70gh anuais. O sistema trocador-parede, associado às soluções 2A, 2B, 3A e 3B, seria, dessa forma adequado para projetos de ambientes com previsão de alta densidade ocupacional na região de Curitiba.

FIGURA 79 - DEMANDA EM GRAUS-HORA ANUAIS – CURITIBA E CUIABÁ



FONTE: A autora (2020).

Em Cuiabá, a presença do isolante térmico conduziu à diminuição da demanda por resfriamento nas simulações para ocupação mínima. Esse efeito foi observado para todas as soluções testadas, sendo as soluções em madeira e concreto celular (2A, 2B, 3A e 3B) aquelas com menor demanda, conseqüentemente com melhor desempenho térmico. Porém, no caso de ocupação máxima, a menor demanda por resfriamento é apresentada pelas soluções baseadas em cerâmica (1A e 1B). O efeito do isolante térmico, nesse caso, é menos relevante. As soluções 1B e 1A, são respectivamente, as de maior capacidade térmica entre as soluções testadas. Uma hipótese para o comportamento da curva de demanda por resfriamento em Cuiabá, na situação de ocupação máxima, é a de que a maior capacidade térmica do material utilizado na envoltória potencializa o atraso térmico na comunicação entre temperatura interior e exterior. As soluções de maior resistência térmica, nesse caso, podem ter conduzido à retenção do calor no interior do ambiente.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo se insere em um universo de pesquisas que buscam soluções para a redução do consumo energético para climatização de edifícios. Motivado inicialmente pelo estudo realizado por Alves (2014) sobre potencial do uso de sistemas geotérmicos SCDS para climatização no território brasileiro, este estudo propõe o passo seguinte, a análise do desempenho térmico de um ambiente utilizando um sistema SCDS acoplado à envoltória. Para isso são consideradas as localidades cujos climas apresentaram resultados mais promissores para aquecimento e resfriamento no trabalho de Alves (2014), Curitiba e Cuiabá, respectivamente.

O sistema aqui considerado, parte da ideia original do professor Dr. Aloísio Schmid, responsável pela ideia e modelagem numérica de um sistema SCDS acoplado à envoltória da edificação. Tomando este sistema, este estudo segue com a proposta de avaliação de soluções de envoltória para associação ao SCDS e busca compreender o efeito das propriedades dos materiais dessas soluções sobre a resposta térmica do sistema. Com o intuito de questionar os sistemas de construção pesados, com alta energia incorporada, propõe-se a avaliação de seis soluções de envoltória elaboradas a partir de materiais comumente utilizados no cenário construtivo nacional: cerâmica, madeira e concreto.

Definidas três soluções de envoltória (1A, 2A, 3A) e outras três, a partir da adição de uma camada isolante (1B, 2B, 3B), o método consiste na determinação, por simulação numérica, da temperatura interna de um ambiente onde este sistema acoplado de trocador-parede está em funcionamento durante o horário comercial (8h às 18h). Para isso, é utilizado como motor de cálculo uma planilha Excel automatizada com o modelo numérico. Os resultados de temperatura foram calculados hora a hora, em simulações anuais. Considerando dois cenários de taxa de produção de calor: ocupação mínima e ocupação máxima. Provocando intencionalmente o estresse térmico no ambiente, para verificação do desempenho térmico das soluções de envoltória.

Os resultados obtidos para as simulações anuais de temperatura interna revelam a tendência que a adição da camada isolante (soluções tipo B) apresenta em uniformizar a resposta térmica, levando a temperatura a formar linhas de tendência mais claras. Foi verificado ainda que a alteração da taxa de produção de calor, nesse caso, pode inviabilizar o uso do sistema. Para Curitiba, onde o clima é temperado de altitude, as temperaturas elevadas pela taxa

de produção de calor máxima foram desejáveis, consideradas as temperaturas de base ( $T_{ba} = 18\text{ °C}$  e  $T_{br} = 27\text{ °C}$ ), com baixa demanda para aquecimento.

Na hipótese de um ambiente com pouca densidade ocupacional, no entanto, as temperaturas se concentram no limite inferior, em torno de  $16\text{ °C}$ , segundo as médias calculadas. A envoltória demonstra, em associação ao sistema SCDS, grande capacidade de reter calor, especialmente nas configurações elaboradas em madeira e concreto (2A, 2B, 3A e 3B). A análise do desempenho térmico por graus-hora no período de funcionamento confirma essa tendência.

Para Cuiabá, onde o clima é tropical com demanda por resfriamento, as soluções de maior resistência térmica, de madeira (2A e 2B) e concreto (3A e 3B), apresentaram baixa demanda por resfriamento quando a ocupação foi mínima e grande demanda por resfriamento quando a ocupação foi máxima. No caso de máxima ocupação, as menores demandas em graus-hora para resfriamento foram das soluções em cerâmica (1A e 1B). Essas últimas são as soluções de menor resistência térmica e maior capacidade térmica entre as soluções testadas neste estudo.

Em resumo, as propriedades térmicas das soluções demonstraram influenciar significativamente o desempenho térmico do sistema. Cabendo como opção de maior desempenho térmico uma solução ou outra, a depender do clima e do tipo de uso e ocupação do edifício. A esse respeito, soluções construtivas leves, com certa resistência térmica, em associação ao SCDS, parecem responder melhor no clima frio de Curitiba. Enquanto para o clima de Cuiabá, essa mesma solução apresenta desempenho adequado apenas na situação de densidade ocupacional mínima. Ao clima quente tropical de Cuiabá, a solução mais pesada, se mostra mais adequada para situações de maior estresse térmico, com ocupação máxima. Ainda assim, no caso de Cuiabá, o sistema trocador-parede, por si só, não é capaz de manter a temperatura no intervalo estabelecido por  $T_{ba}$  e  $T_{br}$ , necessitando de soluções de climatização complementares.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12721**: Avaliação de custos de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios. 2005.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220:2**: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. 2005.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220:3**: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. 2005.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575**: Edificações habitacionais – desempenho. 2013.
- AFONSO, J. F. S. Estudo do comportamento térmico de edifícios antigos: um caso de estudo. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Nova de Lisboa. Monte de Caparica, 2009.
- AKUTSU, M. Método Para Avaliação do Desempenho Térmico de Edificações no Brasil. **Tese de Doutorado**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- AKUTSU, M.; BRITO, A. C.; CHIEPPE, C. O efeito da capacidade térmica e da resistência térmica de paredes no desempenho térmico de habitação na cidade de São Paulo. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...**Juiz de Fora: ENTAC, 2012.
- ALVES, A. B. M. Potencial de climatização por dutos subterrâneos segundo zona bioclimática, profundidade e tratamento da superfície do solo. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.
- ALVES, A. B. M.; SCHMID, A. L. Cooling and heating potential of underground soil according to depth and soil surface treatment in the Brazilian climatic regions. **Energy and Buildings**, v. 90, pg. 41–50. 2015.
- AMPOFO, F; MAIDMENT, G. G.; MISSENDEN, J. F. Application of groundwater cooling scheme for London Underground network. **International Journal of Refrigeration**, v. 34, pg. 2042-2049. 2011.
- ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *Ashrae handbook fundamentals*. Ashrae Standards. EUA, 2009.
- BADESCU, V. Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house. **Renewable Energy**, v. 32, pg. 845-855. 2007.
- BALLARD, G.; HOWELL, G. Shielding production: an essential step in production control. **Lean Construction Journal**, v. 1, pg. 38-45. 2004.
- BECKER, B. R.; MISRA, A.; FRICKE, B. A. Development of correlations for soil thermal conductivity. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 19, pg. 59-68. 1992.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. (2002). Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília: Diário Oficial da União.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). Balanço Energético Nacional 2018: Ano base 2017 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Plano nacional para eliminação gradual do CFC. Brasília, 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Programa brasileiro de eliminação dos HCFCs - PBH. Brasília, 2012.

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Lei nº12.305, de 2 de agosto de 2010. Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 2010.

BRITO, A. C. de; AKUTSU, M.; SALLES, E. M.; CASTRO, G. M. Características térmicas de Materiais de Mudança de Fase adequados para edificações brasileiras. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 125-145. Porto Alegre, 2017.

BULOW, J. An economic theory of planned obsolescence. *The Quarterly Journal of Economics*, v. 101, n. 4, p. 729–749. 1986.

CALDAS, R. B. Análise numérica de estruturas de aço, concreto e mistas em situação de incêndio. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. Heat and mass transfer: Fundamentals and applications 4<sup>th</sup> Edition. The McGraw-Hill Companies, Inc. New York, 2011.

CHVATAL, K. M. S. Avaliação do procedimento simplificado da NBR 15575 para determinação do nível de desempenho térmico de habitações. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 119-134. Porto Alegre, 2014.

CSSBI - Canadian Sheet Steel Building Institute. Lightweight steel framing – architectural design guide. 2002.

DE VRIES, D. A. Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, v. 39, n. 5, p. 909-916. 1958.

DEMING, W. E. Out of the crisis. Cambridge: MITCAES. 1986.

DENG, N.; YU, X.; ZHANG, Y.; MA, H.; WANG, H. Numerical analysis of three direct cooling systems using underground energy storage: A case study of Jinghai County, Tianjin, China. **Energy and Buildings**, v. 47, pg. 612-618. 2012.

DUARTE, A., P., L. Avaliação de propriedades termo hidráulicas de solos requeridas na aplicação da técnica de dessorção térmica. **Tese de Doutorado**. Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro, 2004.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. NOTA TÉCNICA EPE 030/2018 Uso de ar condicionado no setor residencial brasileiro: perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. **Nota técnica**. Rio de Janeiro, RJ. 2018.



FERNANDES, B.; GIL, A. M.; BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F. Microestrutura do concreto submetido a altas temperaturas: alterações físico-químicas e técnicas de análise. **Revista IBRACON**, v. 10, n. 4, p. 838 – 863. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952017000400004>.

FERREIRA, C. C.; SOUZA, H. A. de; ASSIS, E. S. de. Discussão dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos segundo as normas de desempenho térmico brasileiras. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 183-200. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100131>.

FISCHER, R.S. A adaptabilidade e desempenho energético na habitação de interesse social: implicações no desempenho energético causadas pela adoção de estratégias de adaptabilidade no projeto de uma nova HIS. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

FLORIDES, G.; KALOGIROU, S. Ground heat exchangers - A review of systems, models and applications. **Renewable Energy**, v. 32, pg. 2461-2478. 2007.

FRANCO, L. S. Aplicação de diretrizes de racionalização construtiva para a evolução tecnológica dos processos construtivos em alvenaria estrutural não armada. **Tese de Doutorado**. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1992.

FREITAS, L. S. Vida útil ótima de projeto de edificações considerando consumo energético de construção e operação, sob a ótica do ecodesign. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

GORGOLEWSKI, M. Developing a simplified method of calculating U-values in light steel framing. **Building and Environment**, v. 42, pg. 230-236. 2007.

GOULART, S. Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações em Florianópolis. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1993.

HITTLE, D.C. Calculating building heating and cooling loads using the frequency response of multilayered slabs. **Tese (Ph.D.)**. Army Construction Engineering Research Laboratory. Champaign Illinois, 1981.

HUKSEFLUX - Thermal Sensors. FTN01: Field thermal needle system for thermal resistivity / conductivity measurement. Disponível em: < <http://www.hukseflux.com/product/ftn01>> Acesso em 17/05/2019.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Diagnóstico dos resíduos sólidos da construção civil. Relatório de pesquisa. Brasília, 2012.

ISATTO, E. L.; FORMOSO, C. T. A nova filosofia de produção e a redução de perdas na construção civil. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** Florianópolis: ENTAC, 1997.

ISO - International Organization for Standardization. **ISO 13823**: General principles on the design of structures for durability. 2008.

ISO - International Organization for Standardization. **ISO 15927**: Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling. 2005.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL – INMET. Normais Climatológicas (1961/1990). Brasília - DF, 2020.

JACKSON, R.D.; TAYLOR, S.A. **Thermal conductivity and diffusivity – in methods of soil analysis, part 1. Physical and mineralogical methods**. American Society of Agronomy, 1986.

JOHANSEN, O. Thermal conductivity of soils. Noruega. **Tese (Ph.D)** Universidade de Trondheim. 1975.

KALOGIROU, S. A.; FLORIDES, G.; TASSOU, S. Energy analysis of buildings employing thermal mass in Cyprus. **Renewable Energy**, v.27, pg. 353-368. 2002.

KASSIR, M.K.; BANDYOPADHYAY, K.K.; REICH, M. Thermal degradation of concrete in the temperature range from ambient to 315-degree C. **Technical Report**. Brookhaven National Laboratory. Upton, NY, 1996.

KODUR, V.K.R.; SULTAN, M.A. Effect of temperature on thermal properties of high-strength concrete. **Journal of Materials in Civil Eng.**, v.15, pg. 101-107. 2003.

KORMANN, A. C. M. Comportamento geomecânico da formação Guarituba: Estudos de campo e laboratório. **Tese de Doutorado**. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

KOSKELA, L. *Application of the new production philosophy to construction*. **Technical Report No 72**. Stanford, EUA, 1992.

KUSUDA, T. Thermal response factors for multi-layer structures of various heat conduction systems. *ASHRAE Transactions*, v. 75, 1969.

KWORK, A. G.; GRONDZIK, W. T. **The Green Studio Handbook: Environmental Strategies for Schematic Design**. Elsevier, 2007.

LABS, K. Earth Coupling, in COOK, J. (org.), *Passive Cooling*. Cambridge: the MIT Press, 1989.

LEE, C.; PARK, M.; NGUYEN, T.; SOHN, B.; CHOI, J. M.; CHOI, H. Performance evaluation of closed-loop vertical ground heat exchangers by conducting in-situ thermal response tests. **Renewable Energy**, v. 42, pg. 77-83. 2012.

LEWCOCK, R. ‘Generative concepts’ in vernacular architecture. *In: ASQUITH, L.; VELLINGA, M. Vernacular Architecture in the 21st Century: Theory, Education and Practice*. London: Taylor & Francis, 2006. p. 199-214.

MACHADO, C. B. Z.; O tratamento de aspectos de conforto térmico em residências do período modernista em Curitiba. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

MAZZAROTTO, A. C. E. K. Uso do sistema de fachadas duplas ventiladas em edifícios em Curitiba. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

MEIR, I.A.; ROAF, S. The future of the vernacular: Towards new methodologies for the understanding and optimization of the performance of vernacular buildings. *In: ASQUITH, L.; VELLINGA, M. Vernacular Architecture in the 21st Century: Theory, Education and Practice.* London: Taylor & Francis, 2006. p. 215-230.

MENBERG, K.; BAYER, P.; ZOSEDER, K.; RUMOHR, S. BLUM, P. Subsurface urban heat island in German cities. **Science of the total environment**, v. 442, pg. 123-133. 2013.

MIGUEL, J. M. C. Casa e lar: a essência da arquitetura. **Revista Vitruvius**. Ano 03, out. 2002. Disponível em: < <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/03.029/746> >. Acesso em 25/04/2019.

MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULUS, D. On the cooling potential of earth to air heat exchangers. **Energy Convers**, v. 35, pg. 395-402. 1994.

MITALAS, G. P.; ARSENAULT, J. G. Fortran IV Program to calculate z-transfer functions for the calculation on transient heat transfer through walls and roofs. *In: Proceedings of the Conference on Use of Computers for Environmental Engineering related to Buildings.* Gaithersburg, 1971.

MITCHELL, J.K. **Fundamentals of Soil Behavior**. Jonh Wiley & Sons, Inc, 1993.

MURARI, A.; BALDAN, V.; STAMATO, G.; PABLOS, J.; SICHIERI, E. Avaliação de desempenho térmico de uma habitação unifamiliar em *wood frame* na cidade de São Carlos-SP. In: Encontro Brasileiro de Estruturas de Madeira e Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira. **Anais...** Brasil, 2018.

NAVROSKI, M.C.; LIPPERT, D.B.; CAMARGO, L.; PEREIRA, M. O. DE; HASELEIN, C.R. Avaliação do isolamento térmico de três diferentes materiais usados na construção e preenchimento de paredes externas. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v.1, n.1, p. 41-51. 2010.

OLIVEIRA, L. D. S. Avaliação dos Limites das Propriedades Térmicas dos Fechamentos Opacos da NBR 15220-3 Para Habitações de Interesse Social, da Zona Bioclimática 2. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2012.

OLIVER, P. Built to meet needs: cultural issues in Vernacular Architecture. Oxford: Architectural Press, 2006.

OZGENER L. A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, pg. 4483–4490. 2011.

PEAVY, B.A. A note on response factor and conduction transfer functions. **ASHRAE Transactions**, v. 84, n.3, pg. 688-690, 1978.

PEREIRA, I.; ASSIS, E. S. Discussão das Estratégias Propostas Pelo Projeto de Norma de Desempenho Térmico de Edificações Através de Estudo de Caso. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** Maceió: ENTAC, 2005.

PERTSCHI, S. C. Aspectos do campo térmico da área urbana de São José do Pinhais/PR: situação de verão. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

PIRRÓ, L. Análise da envoltória como estratégia para a sustentabilidade dos edifícios. **Belas Artes**. São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.belasartes.br/revistabelasartes/downloads/artigos/14/analise-da-envoltoria-como-estrategia-para-a-sustentabilidade-dos-edificios.pdf>. Acesso em: 10/04/2019.

PONS, V. Estudo do potencial dos Materiais com Mudança de Fase para redução do consumo de energia na manutenção do conforto térmico no ambiente construído. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

POPIEL, C.; WOJTKOWIAK, J.; BIERNACKA, B. Measurements of temperature distribution in ground. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 25, pg. 301–309. 2001.

PROCEL. **Manual de Aplicação do RTQ-C**. Disponível em: [http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/m anualv02\\_1.pdf](http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/m anualv02_1.pdf). Acesso em 10/04/2019.

ROCHA, F.N.A.; PEREIRA, G.B.; YOKOYAMA, N.O. Análise de viabilidade técnica do sistema *wood frame* na construção de unidades unifamiliares no Brasil. In: XVI ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO. **Anais...** Universidade do Vale do Paraíba, 2016.

ROMANÍ, J.; PÉREZ, G.; DE GRACIA, A. Experimental evaluation of a heating radiant wall coupled to a ground source heat pump. **Renewable Energy**, v. 105, pg. 520-529. 2017.

RORIZ, M. Arquivos climáticos de municípios brasileiros. ANTAC - Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. São Carlos - SP. janeiro de 2012.

SACHT, H.M.; ROSSIGNOLO, J.A.; SANTOS, W.N. Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida. **Matéria** (online), v. 15, n.1, pp.31-39. Rio de Janeiro, 2010.

MARTINS, C.; SANTOS, P.; SIMÕES DA SILVA, L. Thermal performance of lightweight steelframed construction systems. **Metallurgical Research Technology**, v. 2014, pg.329–38. 2014.

SCHMID, A. L. Simulação de desempenho térmico em múltiplas zonas: Mestre, um sistema brasileiro na linguagem Java. In: VI ENCONTRO NACIONAL E III ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUIDO. **Anais...**São Pedro, 2001.

SCHMID, A. L.; REIS, L. P. C. A. Ventilação por dutos subterrâneos: da simulação computacional a um ábaco para dimensionamento. In: IV ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS. **Anais...** Vitória, 2011.

SEEM, J. E. Modeling of heat transfer in buildings. **Tese (Ph.D)**. University of Wisconsin-Madison. Madison, 1987.

SOARES, N.; SANTOS, P.; GERVÁSIO, H.; COSTA, J.J.; SIMÕES DA SILVA, L. Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed construction: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, pg. 194–209. 2017.

SOIBELMAN, L. As perdas de materiais na construção de edificações: sua incidência e seu controle. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1993.

SONDEREGGER, R. C. Harmonic analysis of building thermal response applied to the optimal location of insulation within the walls. **Energy and Buildings**, v. 1, pg. 131-140. 1977.

STEPHENSON, D. G.; MITALAS, G. P. Cooling load calculations by thermal response factor method. *ASHRAE Transactions*, v.73, 1967.

TALAMINI NETO, E. Caracterização geotécnica do subsolo de Curitiba para o planejamento de ocupação do espaço subterrâneo. **Dissertação de Mestrado**. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

TZAFERIS, A.; LIPARAKIS, D.; SANTAMOURIS, M.; ARGIRIOU, A. Analysis of the accuracy and sensitivity of eight models to predict the performance of earth-to-air heat exchangers. **Energy and Buildings**, v. 18, pg. 35-43. 1992.

USDOE - U. S. Department of Energy. **Energy Plus**. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>> Acessado em 10/06/2019.

VELJKOVIC, M.; JOHANSSON, B. Light steel framing for residential buildings. **Thin-Walled Structures**, v. 44, pg.1272–1279. 2006.

VIVAN, A.L.; PALIARI, J.C.; NOVAES, C.C. Vantagem produtiva do sistema *light steel framing*: da construção enxuta à racionalização construtiva. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...**Canela: ENTAC, 2010.

WINCK, S.S. Avaliação da atenuação de ruído em diferentes sistemas de admissão de ar externo por ventilação forçada, usada em edificações residenciais. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

YIN, R. Estudo de caso - planejamento e métodos. 2ª ed. Porto Alegre, Bookman. 2001.

ZHANG, T.; TAN, Y.; YANG, H.; ZHANG, X. The application of air layers in building envelopes: A review. **Applied Energy**, vol. 165, pg. 707–734. 2016.