

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC**

**JÉSSICA UHLMANN WEISE**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE ESTRUTURAS PRÉ-  
FABRICADAS DE CONCRETO: ESTUDO DE SUPERMERCADO EM  
JOINVILLE**

**JOINVILLE  
2024**

**JÉSSICA UHLMANN WEISE**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS DE CONCRETO: ESTUDO DE SUPERMERCADO EM  
JOINVILLE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Mirthes Hackenberg

**JOINVILLE**

**2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da  
Biblioteca Universitária Udesc,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Weise, Jéssica Uhlmann  
Avaliação do desempenho térmico de estruturas  
pré-fabricadas de concreto : Estudo de supermercado em  
Joinville / Jéssica Uhlmann Weise. -- 2024.  
89 p.

Orientador: Ana Mirthes Hackenberg  
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de  
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2024.

1. Eficiência energética. 2. Simulação computacional. 3.  
INI-C. 4. Análise cluster. 5. EnergyPlus. I. Hackenberg, Ana  
Mirthes . II. Universidade do Estado de Santa Catarina,  
Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

**JÉSSICA UHLMANN WEISE**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS DE CONCRETO: ESTUDO DE SUPERMERCADO EM JOINVILLE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Mirthes Hackenberg

**BANCA EXAMINADORA**

Profa. Ana Mirthes Hackenberg, Dra.

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC (presidente/orientadora)

Membros:

Prof. Americo Hiroyuki Hara, Dr.

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Profa. Glacir Terezinha Fricke, Dra.

Universidade São Francisco - USF

Joinville, 29 de janeiro de 2024.

Dedico este trabalho à minha família, em especial ao meu namorado, que me apoiou e incentivou em todos os momentos. Obrigada!

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus, por seus planos serem sempre maiores do que os meus sonhos.

À minha família, por me apoiar em minhas decisões e, principalmente, ao meu namorado, por ser meu maior incentivador para que esta conquista se tornasse real.

Aos meus colegas do mestrado que compartilharam seu conhecimento durante o período do curso, em especial à Karina Lunelli, que sempre me motivou e ajudou nas minhas dúvidas quanto à formatação.

Agradeço à minha orientadora, Profa. Dra. Ana Mirthes Hackenberg, pela paciência e pelo apoio no desenvolvimento desta pesquisa. Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UDESC (PPGEC), por todas as disciplinas ministradas e conhecimento transmitido.

Aos professores membros da banca examinadora, Prof. Dr. Americo Hiroyuki Hara e Profa. Dra. Glacir Terezinha Fricke por aceitarem esse convite e pelas contribuições tão importantes a este trabalho.

Gostaria de expressar minha gratidão à empresa Pré-vale pela oportunidade de realizar o mestrado e aprimorar meus conhecimentos.

Agradeço ao programa UNIEDU/FUMDES pós-graduação pela concessão da bolsa de estudos.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram para este trabalho, direta ou indiretamente, meus sinceros agradecimentos!

“Ninguém é tão grande que não possa aprender, nem tão pequeno que não possa ensinar.”

(Esopo)

## RESUMO

A utilização de edificações com estruturas pré-fabricadas é recorrente em unidades com grandes vãos, principalmente em ambientes comerciais. Tratando-se de supermercados, essa tecnologia está presente em várias unidades em todo o Brasil, incluindo a cidade de Joinville/SC. Dado que a construção civil é um dos setores que mais consome energia elétrica, especialmente para a refrigeração de espaços, a adoção de materiais em estruturas pré-fabricadas em supermercados visa promover a sustentabilidade e reduzir a demanda por energia elétrica. A avaliação de eficiência energética e desempenho térmico tem como objetivo classificar a envoltória da edificação por meio do método de simulação, utilizando a Instrução Normativa do Inmetro para Edificações Comerciais (INI-C). Com base nos resultados dessa classificação, foram realizadas doze simulações paramétricas, utilizando o arquivo climático da cidade de Joinville/SC, para explorar estratégias alternativas na envoltória, como a aplicação de diferentes materiais de cobertura e fechamento das paredes. Após as classificações, uma análise foi elaborada para identificar a estratégia mais eficaz na economia de energia para essas edificações. Concluiu-se que o modelo denominado *Alpha*, resultante da combinação dos melhores desempenhos de cada grupo de modelos, apresentou um consumo energético total inferior à metade do melhor modelo anteriormente considerado. Ao analisar a etiquetagem final, o Modelo *Alpha* recebeu a classificação A, com a utilização da cor Branco para a fachada; parede de concreto com 20 cm de espessura; brises de 1 m em toda a largura dos elementos transparentes e; telha metálica em aço com 10 cm de isolamento em Poliestireno Expandido (EPS). Isso sugere que, ao implementar mais de uma modificação na edificação, o desempenho melhora significativamente, indicando a possibilidade de alcançar avanços adicionais ao aprimorar o Modelo *Alpha*.

**Palavras-chave:** Eficiência energética; Simulação computacional; INI-C; Análise *cluster*; *EnergyPlus*.

## ABSTRACT

The use of buildings with prefabricated structures is common in units with large spans, especially in commercial environments. When it comes to supermarkets, this technology is present in several units throughout Brazil, including the city of Joinville/SC. Given that the construction industry is one of the sectors that consumes the most electricity, especially for space cooling, the adoption of materials in prefabricated structures in supermarkets aims to promote sustainability and reduce the demand for electricity. The evaluation of energy efficiency and thermal performance aims to classify the building envelope through simulation methods, using the Inmetro Instruction for Commercial Buildings (INI-C). Based on the results of this classification, twelve parametric simulations were performed using the climatic data of Joinville/SC, to explore alternative strategies in the envelope, such as the application of different roofing materials and wall closures. After the classifications, an analysis was conducted to identify the most effective energy-saving strategy for these buildings. It was concluded that the model called Alpha, resulting from the combination of the best performances of each group of models, presented a total energy consumption of less than half of the best model previously considered. When analyzing the final labeling, Model Alpha received an A rating, using the color White for the facade; 20 cm thick concrete wall; 1 m brise-soleil across the width of transparent elements; and steel metal roofing with 10 cm of Expanded Polystyrene (EPS) insulation. This suggests that by implementing more than one modification in the building, performance improves significantly, indicating the possibility of achieving additional advancements by enhancing Model Alpha.

**Keywords:** Energy efficiency; Computer simulation; INI-C; Cluster analysis; EnergyPlus.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Trocas de calor através de paredes opacas .....	22
Figura 2 - Processos de transferência de energia em edifício com ar- condicionado.....	24
Figura 3 - Estrutura geral do <i>EnergyPlus</i> .....	37
Figura 4 - Processo de construção do dendograma.....	40
Figura 5 - Formação dos agrupamentos pelo processo não hierárquico .....	41
Figura 6 - Esquema das etapas do trabalho.....	42
Figura 7 - Localização projetos de supermercados.....	44
Figura 8 - Croqui do objeto de estudo .....	46
Figura 9 - Gráfico das temperaturas mínima, média e máxima diária .....	49
Figura 10 - Catálogo com coeficiente de absorção térmica de luz solar utilizado para o Modelo A, Modelo B e Modelo C .....	52
Figura 11 – Área superficial dos supermercados analisados .....	57
Figura 12 - Localização supermercados em Joinville .....	58
Figura 13 - Construção de <i>boxplots</i> dos dados de entrada .....	59
Figura 14 - Dendrograma com os resultados da análise <i>cluster</i> .....	60
Figura 15 - Geometria de referência .....	62
Figura 16 - Gráfico comparativo entre as variações de temperatura para as diferentes cores das paredes externas .....	63
Figura 17 - Gráfico comparativo entre as variações de temperatura para os diferentes materiais das paredes .....	65
Figura 18 - Gráfico comparativo entre as variações de temperatura para os diferentes elementos de sombreamento .....	67
Figura 19 - Gráfico comparativo entre as variações de temperatura para os diferentes tipos de telhados .....	69
Figura 20 - Gráfico comparativo entre as variações de temperatura média para todos os modelos.....	72
Figura 21 - Gráfico de temperaturas máximas e mínimas para todos os modelos ao longo do ano.....	73
Figura 22 - Gráfico comparativo entre as variações de temperatura média para os melhores modelos.....	74
Figura 23 - Comparativo das amplitudes de temperaturas.....	77

Figura 24 - Comparativo de carga térmica total anual da edificação..... 78

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Grupos climáticos para os principais municípios do Brasil.....	33
Quadro 2 - Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética geral.....	34
Quadro 3 - Variáveis utilizadas para análise <i>cluster</i> e construção da geometria de estudo .....	45
Quadro 4 - Principais variáveis utilizadas para construção da simulação .....	50
Quadro 5 - Resumo dos modelos utilizados no projeto conforme o parâmetro analisado .....	72
Quadro 6 - Descrição dos melhores modelos para composição do Modelo <i>Alpha</i> .....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de redução do consumo de energia primária da classificação D para A ( <i>CRCEPD – A</i> ), para os principais grupos climáticos de Santa Catarina e edificações de varejo.....	33
Tabela 2 - Dados dos projetos utilizados para estudo.....	44
Tabela 3 - Dados para análise de agrupamento .....	45
Tabela 4 - Valores de referência para edificações de varejo (mercados) .....	47
Tabela 5 - Elementos construtivos e suas respectivas características.....	51
Tabela 6 - Propriedades térmicas dos materiais construtivos utilizados para as paredes.....	53
Tabela 7 - Propriedades térmicas dos materiais construtivos utilizados para as coberturas.....	54
Tabela 8 - Processamento do agrupamento com cinco elementos .....	61
Tabela 9 - Comparativo das temperaturas (máxima e mínima), carga térmica (de aquecimento, resfriamento e total) e classificação da envoltória aos modelos A, B e C e o Modelo de Referência quanto às cores da parede externa.....	64
Tabela 10 - Comparativo das temperaturas (máxima e mínima), carga térmica (de aquecimento, resfriamento e total) e classificação da envoltória aos modelos D, E e F e o Modelo de Referência quanto aos materiais construtivos das paredes .....	66
Tabela 11 – Comparativo das temperaturas (máxima e mínima), carga térmica (de aquecimento, resfriamento e total) e classificação da envoltória aos modelos G, H e I e o Modelo de Referência quanto aos elementos de sombreamento .....	68
Tabela 12 – Comparativo das temperaturas (máxima e mínima), carga térmica (de aquecimento, resfriamento e total) e classificação da envoltória aos modelos J, K e L e o Modelo de Referência quanto aos tipos de telhado .....	70
Tabela 13 - Resultados médios comparativos de temperaturas (máxima e mínima), carga térmica (de aquecimento, resfriamento e total) e classificação da envoltória dos melhores modelos, Modelo de Referência e Modelo <i>Alpha</i> .....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BLAST	Building Loads Analysis and System Thermodynamics
BU	Biblioteca Universitária
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPS	Poliestireno Expandido
EUA	Estados Unidos da América
INI-C	Instrução Normativa Inmetro – Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
MME	Ministério de Minas e Energias
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PHFT	Percentual de Horas dentro da Faixa de Temperatura Optativa
Procel	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PUR	Poliuretano
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
TMY	Test Meteorological Year
TRY	Test Reference Year
Udesc	Universidade do Estado de Santa Catarina

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\%$	Por cento
$\text{Pa}$	Pressão atmosférica
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
$S$	Área de contato entre as superfícies
$e$	Espessura
$T$	Temperatura
$h$	Coeficiente de transferência de calor por convecção
$A$	Coeficiente de absorção monocromático
$\Sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann
$F_{A \rightarrow B}$	Fator de vista entre as superfícies
$\theta_i$	Temperatura da superfície interna da envolvente
$\theta_e$	Temperatura da superfície externa da envolvente
$I_g$	Intensidade de radiação solar incidente global
$k$	Condutividade térmica
$c$	Calor específico
$\lambda$	Condutividade térmica
$\rho$	Massa específica
$R_t$	Resistência térmica total
$U_t$	Transmitância térmica total
$CT_t$	Capacidade térmica total
$\varepsilon$	Emissividade
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann
$\text{fc}$	Fator de conversão

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1	OBJETIVOS .....	20
1.1.1	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>20</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
2.1	DESEMPENHO ENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES.....	21
2.2	PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS.....	23
2.3	FORMAS DE TROCAS DE CALOR NA EDIFICAÇÃO .....	23
2.3.1	<b>Condução térmica .....</b>	<b>25</b>
2.3.2	<b>Convecção térmica.....</b>	<b>25</b>
2.3.3	<b>Radiação térmica.....</b>	<b>26</b>
2.4	NORMAS BRASILEIRAS SOBRE DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES .....	26
2.4.1	<b>NBR 15.220.....</b>	<b>27</b>
2.4.2	<b>NBR 15.575.....</b>	<b>27</b>
2.5	SISTEMA DE ETIQUETAGEM DAS EDIFICAÇÕES .....	27
2.5.1	<b>Selo Procel Edificações .....</b>	<b>28</b>
2.5.2	<b>RTQ-C .....</b>	<b>29</b>
2.5.3	<b>INI-C .....</b>	<b>30</b>
2.5.4	<b>Procedimentos de avaliação da eficiência energética pela INI-C.....</b>	<b>30</b>
2.6	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES .....	34
2.6.1	Aplicação do EnergyPlus na simulação energética de edificação .....	36
2.6.2	<b>Dados climáticos .....</b>	<b>37</b>
2.7	ANÁLISE DE AGRUPAMENTO .....	38
2.7.1	<b>Agrupamento hierárquico.....</b>	<b>39</b>
2.7.2	<b>Agrupamento não-hierárquico .....</b>	<b>40</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>42</b>
3.1	COLETA DE DADOS .....	42
3.1.1	<b>Supermercados em Joinville .....</b>	<b>43</b>

<b>3.1.2</b>	<b>Levantamento de projetos .....</b>	<b>43</b>
3.2	ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	44
3.3	SIMULAÇÃO TERMO ENERGÉTICA DO MODELO .....	46
<b>3.3.1</b>	<b>Determinação do nível de eficiência energética da envoltória..</b>	<b>48</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Arquivo Climático.....</b>	<b>48</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Aplicação do método de simulação para envoltória .....</b>	<b>49</b>
3.3.3.1	<i>EnergyPlus .....</i>	50
3.3.3.2	<i>Uso e ocupação.....</i>	50
3.3.3.3	<i>Definição dos modelos estudados.....</i>	51
3.4	PÓS-PROCESSAMENTO .....	55
<b>3.4.1</b>	<b>Consumo de energia .....</b>	<b>55</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Fluxo de calor entre superfícies.....</b>	<b>55</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Temperatura interna.....</b>	<b>55</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>56</b>
4.1	DETERMINAÇÃO DA GEOMETRIA DE ESTUDO .....	56
<b>4.1.1</b>	<b>Levantamento de supermercados de Joinville .....</b>	<b>56</b>
4.2	GEOMETRIA REPRESENTATIVA DE ESTUDO .....	58
<b>4.2.1</b>	<b>Método de agrupamento hierárquico .....</b>	<b>58</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Definição da geometria de estudo .....</b>	<b>60</b>
4.3	SIMULAÇÕES PARAMÉTRICAS.....	61
<b>4.3.1</b>	<b>Cor da fachada.....</b>	<b>62</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Materiais construtivos das paredes.....</b>	<b>65</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Elementos de sombreamento.....</b>	<b>67</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Tipos de telhado .....</b>	<b>69</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Análise geral dos modelos .....</b>	<b>71</b>
<b>4.3.6</b>	<b>Modelo Alpha .....</b>	<b>74</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>80</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>83</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>84</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil, ao longo dos anos, vem passado por muitos desafios quanto ao uso de energia elétrica, sendo um dos maiores desafios dos projetistas. Os materiais disponíveis são, geralmente, de baixa qualidade com relação às propriedades térmicas, resultando em baixos índices de isolamento térmico (Oliveira; Lunardi, 2018).

O comportamento térmico de um edifício é resultado dos ganhos de temperatura originados pelas suas superfícies externas, pelos ocupantes e equipamentos, além das trocas de ar devido a ventilação. Os valores da absorção das superfícies da envoltória possuem influência elevada no desempenho da estrutura, principalmente em climas tropicais. A utilização de cores claras e refletivas (baixa absorção), além de elementos de sombreamento, como marquises, tendem a reduzir a quantidade de energia absorvida pela edificação (Oliveira; Lunardi, 2018).

A envoltória de uma edificação é definida por suas aberturas, coberturas e paredes (Tondelo; Barth, 2017). Este elemento, por fazer fronteira com a temperatura interna e externa de uma edificação, está relacionado diretamente com o desempenho, devendo então ser o início do estudo térmico de uma construção. Uma edificação é considerada sustentável quando atende a critérios de conforto, otimização e possua baixo impacto ambiental, ou seja, que não danifique o meio ambiente. Deve também atender alguns princípios, entre eles, aproveitamento do sol e do vento, uso de energias renováveis e possuir desempenho térmico (Lucas, 2011).

A simulação computacional é um método utilizado para o entendimento do comportamento das edificações ao longo dos anos e de condições de clima diversos. Esta metodologia é principalmente recomendada quando os meios prescritivos não representam a condição e as características da construção (Carlo; Lamberts, 2010).

Os sistemas de condicionamento de ar possuem grande contribuição no consumo energético da edificação, principalmente em locais com temperaturas elevadas (Sousa; Figueiredo, 2019). Nos estudos de Oliveira, Rupp e Ghisi (2021), nota-se como as variáveis ambientais (como velocidade do ar e umidade)

afetam a percepção dos usuários em edifícios de escritórios. Para isso, a resposta subjetiva de cada usuário foi combinada com as condições ambientais correspondentes. Os resultados dos autores mostraram que, o aumento da razão de temperatura e umidade do ar tende a elevar a sensação e a preferência térmica. Entretanto, para edifícios que operam com ar-condicionado, a velocidade do ar não influenciou na sensação e preferência térmica.

A crescente preocupação com a sustentabilidade na construção civil, aliada com a busca por novas tecnologias, tem evidenciado a necessidade de reduzir custos, assim como elevar o bem-estar dos usuários. Essas edificações são caracterizadas por um elevado consumo energético, por conta dos sistemas de iluminação e climatização ambiental. Essa demanda é potencializada em ambientes comerciais que, na sua grande maioria, possuem câmaras frias, como é o caso dos supermercados.

O Brasil não dispõe de norma específica para a adequação e comparação de edificações quanto aos critérios de desempenho térmico e consumo energético pelos sistemas de refrigeração. Por consequência disso, o presente estudo se torna ainda mais significativo. Existem métodos computacionais capazes de simular o comportamento térmico, contudo, como não existem parâmetros claros para avaliação dos resultados, os dados de saída precisam ser estudados com cautela.

Esta pesquisa estuda a eficiência energética da envoltória dos supermercados, considerando a estrutura pré-fabricada utilizada em vasta escala neste tipo de edificação e classificando-a conforme a Instrução Normativa do Inmetro para edificações comerciais (INI-C). Após, serão aplicadas diferentes simulações paramétricas, alterando a composição dos materiais da envoltória, buscando alternativas que melhorem o desempenho térmico e a eficiência energética da unidade com materiais de melhor qualidade.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 *Objetivo geral*

Analisar a eficiência energética de envoltória em edificações comerciais do tipo supermercados, construídos com estruturas pré-fabricadas de concreto em Joinville/SC.

### 1.1.2 *Objetivos específicos*

- a) Determinar, a partir da coleta de dados e análise estatística, um modelo representativo para estudo das simulações paramétricas;
- b) Simular o modelo representativo através do método de simulação perante a metodologia da INI-C, utilizando o programa *EnergyPlus*, para obtenção dos índices de eficiência energética;
- c) Determinar, a partir do projeto de supermercado, as variáveis que mais influenciam para obtenção de eficiência energética;
- d) Propor alternativas na envoltória com o uso das simulações paramétricas, variando os materiais construtivos, para obter o melhor desempenho térmico.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo serão apresentados conceitos teóricos para o desenvolvimento desta pesquisa, abordando o desempenho energético das edificações, as propriedades térmicas dos materiais, as formas de trocas de calor que ocorrem na edificação, as normas técnicas brasileiras que discorrem sobre o desempenho térmico das edificações, o sistema de etiquetagem das edificações, a simulação computacional e, por fim, os dois tipos de análises de agrupamento.

### 2.1 DESEMPENHOS ENERGÉTICOS DAS EDIFICAÇÕES

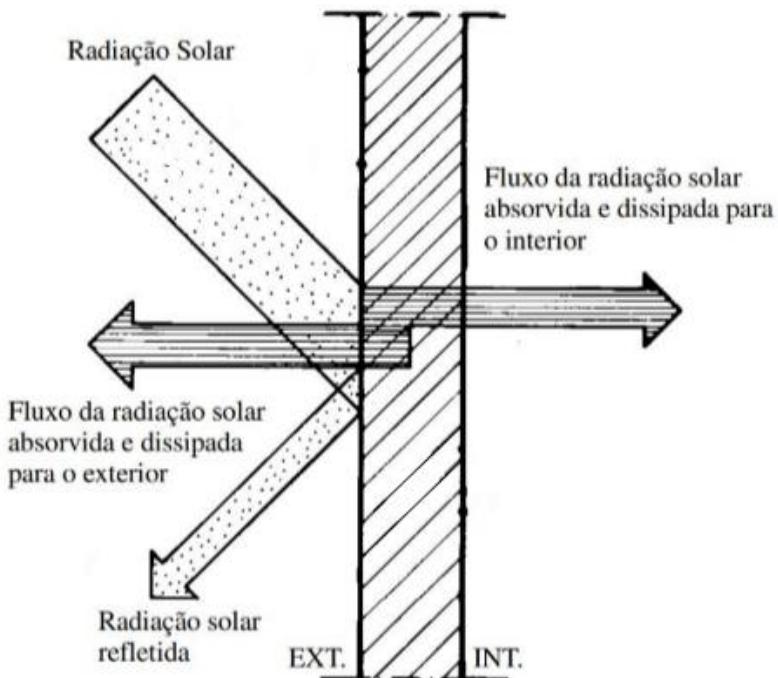
O desempenho de uma edificação tem relação direta com as propriedades dos materiais utilizados em sua construção, principalmente aqueles responsáveis pelas interações entre o meio interior e exterior. O estudo da envoltória deve ser o início para a determinação da eficiência energética de uma edificação. Na construção civil, a eficiência energética é uma propriedade intrínseca da edificação, o que caracteriza o seu potencial em proporcionar conforto térmico, acústico e visual aos usuários. Assim, quanto maior a eficiência, menor será o consumo de energia necessário para manter as condições estáveis (Comiran, 2014; Lamberts; Dutra; Pereira, 2014).

De acordo com Lopes (2016), os elementos de cobertura e o coeficiente de absorção são relevantes para o desempenho térmico das edificações, devido à influência direta no ambiente. Em edificações com múltiplos pavimentos, devido aos efeitos da radiação absorvida pela cobertura, os últimos pavimentos geralmente apresentam maior consumo energético para climatização. Por esse motivo, edificações terreas ou com poucos pavimentos sofrem com maior intensidade esses efeitos de cobertura, principalmente por possuírem, proporcionalmente, uma maior parcela da envoltória nessas condições.

Como ilustrado na Figura 1, existe um ganho térmico que eleva a temperatura da própria estrutura devido à intensidade da radiação incidente, além das propriedades térmicas da edificação, onde uma parcela é transferida

para o interior da edificação e outra parte é refletida (Frota; Schiffer, 2001; Lamberts *et al.*, 2016).

Figura 1 - Trocas de calor através de paredes opacas



Fonte: Frota e Schiffer (2001).

Nos estudos de Ozalp *et al.* (2019), foi realizada uma análise em oito cidades na Turquia, com o objetivo de determinar o desempenho energético de diferentes tipos de paredes. O estudo examinou as paredes externas de edifícios, com e sem isolamento térmico. Os autores concluíram que o material da parede é de grande importância nas aplicações de isolamento, sendo o fator determinante para manter o ambiente interior com o melhor desempenho energético.

Neste sentido, Fonseca *et al.* (2009) destacam que, no cenário de mudanças climáticas, há um aumento da atenção para o desempenho e sustentabilidade das edificações, além do interesse pela redução do consumo energético. Desse modo, busca-se edifícios mais eficientes do ponto de vista energético, uma vez que se comprehende a relevância das mudanças climáticas, visando a utilização racional de recursos e a obtenção do melhor conforto térmico e lumínico nos ambientes.

## 2.2 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS

O estudo dos materiais empregados na construção e suas propriedades térmicas possibilita planejar estratégias de projeto com objetivo de melhorar a resposta da edificação frente às variações climáticas, além de aumentar o tempo em que a construção permanece dentro da zona de temperatura confortável para os usuários. Portanto, as características térmicas dos materiais da envoltória e as configurações volumétricas desempenham um papel considerável na eficiência energética e no comportamento térmico da edificação. Além disso, as aberturas para iluminação e ventilação devem ser planejadas de acordo com a zona bioclimática em que o local está inserido (Guarda *et al.*, 2018).

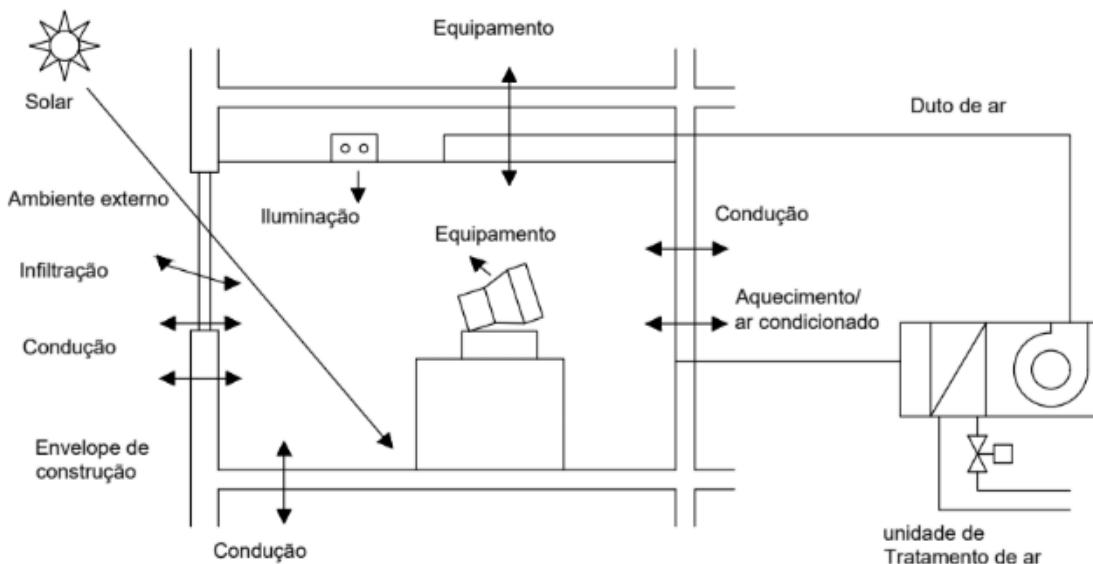
A condutividade térmica dos materiais é uma propriedade relevante que deve ser levada em consideração, pois ela define o valor do fluxo de calor que atravessa o material por unidade de tempo. Angelin (2014) complementa que, nas condições do Brasil, pode haver uma redução entre 20% e 40% da carga térmica de radiação nos ambientes, dependendo das propriedades térmicas do material aplicado nas coberturas.

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), a geometria é o principal fator que influencia o desempenho e a usabilidade de uma edificação. Uma construção bem projetada utiliza elementos arquitetônicos e a própria arquitetura para aproveitar ao máximo os recursos naturais disponíveis, como o vento e a iluminação solar, diminuindo os custos energéticos.

## 2.3 FORMAS DE TROCAS DE CALOR NA EDIFICAÇÃO

A envoltória do edifício é constituída por construções opacas, como paredes, pavimento e teto, além de sistemas envidraçados, sendo que um edifício é definido como um sistema térmico com uma série de entradas e saídas de calor. A Figura 2 mostra um espaço representativo com ganhos de calor típicos para a maioria dos edifícios residenciais e comerciais. As entradas e saídas de calor referem-se aos ganhos ou perdas de calor por condução, energia solar, geração interna, ventilação e evaporação, cuja soma dessas variáveis representa o armazenamento de calor no edifício (Peters, 2019).

Figura 2 - Processos de transferência de energia em edifício com ar-condicionado



Fonte: Adaptado de Harish e Kumar (2016).

As zonas térmicas ganham e perdem energia por meio de diversos métodos, sendo necessário um meticoloso cálculo para que o sistema de ar-condicionado funcione de maneira ideal. Caso essas cargas sejam mal calculadas, o sistema de ar-condicionado não será capaz de condicionar adequadamente a edificação, resultando em um consumo excessivo de energia e desgaste desnecessário nos equipamentos mecânicos. A quantidade de energia que precisa ser removida do espaço é a diferença entre os ganhos e perdas de energia, conforme demonstrado por Rosin (2018) na Equação 1.

$$Q_{total} = Q_{ganhos} - Q_{perdas} \quad (1)$$

onde  $Q_{total}$  é a quantidade de energia total que precisa ser removida do espaço (W),  $Q_{ganhos}$  a parcela de ganhos de energia (W) e  $Q_{perdas}$  a fração referente às perdas de energia (W).

### 2.3.1 Condução térmica

A condução é o processo de troca de calor que ocorre entre dois corpos em contato, cada um com diferentes temperaturas. A representação macroscópica da energia cinética média das moléculas de um corpo é caracterizada pela temperatura, originada durante as colisões entre as moléculas de ambos os corpos. O valor do ganho ou perda de calor entre dois corpos por condução pode ser determinado por Boudhaim (2018), Peters (2019) e Sorgato (2015) na Equação 2.

$$Q_{cond} = \frac{\lambda S}{e} (T_A - T_B) \quad (2)$$

onde  $Q_{cond}$  é a quantidade de ganho ou perda de calor por condução (W),  $\lambda$  é a condutividade térmica ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $S$  a área de contato entre as superfícies ( $\text{m}^2$ ),  $e$  a espessura da superfícies (m) e  $T_A$  e  $T_B$  a temperatura de duas superfícies de interesse (K).

### 2.3.2 Convecção térmica

A convecção denomina o processo de troca de calor que ocorre por meio de fluidos, impulsionado pelo movimento molecular de massa. Esse processo pode ser classificado em dois grupos: (i) convecção natural, originada pelo gradiente de temperatura no interior do fluido e (ii) convecção forçada, que ocorre quando o movimento é gerado por uma fonte externa.

A transferência de calor por convecção entre dois elementos construtivos pode ser calculada pela seguinte Equação 3 (Boudhaim, 2018).

$$Q_{conv} = hS (T_A - T_B) \quad (3)$$

onde  $Q_{conv}$  é a transferência de calor por convecção (W) e  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

### 2.3.3 Radiação térmica

A radiação é representada pelo processo de transferência de calor através da emissão ou transmissão de energia em ondas eletromagnéticas, acústicas, radiação de partículas ou radiação gravitacional. No contexto de edifícios, as ondas eletromagnéticas são o tipo mais representativo de transferência de calor. Uma zona térmica recebe radiação solar através de suas janelas e elementos de sua envoltória, trocando calor entre si por meio de radiação infravermelha.

A irradiação solar é transmitida através dos elementos transparentes e depende da área superficial, inclinação e orientação da edificação. A transferência de calor por radiação entre duas superfícies pode ser determinada pela seguinte Equação 4, conforme apresentada por Boudhaim (2018) e Sorgato (2015).

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma S (T_A^4 - T_B^4) \quad (4)$$

onde  $Q_{rad}$  é a transferência de calor por radiação (W),  $\varepsilon$  é a emissividade (adimensional) e  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ).

## 2.4 NORMAS BRASILEIRAS SOBRE DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

Até o momento, o Brasil não possui uma norma específica sobre a avaliação e parâmetros de desempenho térmico para edificações comerciais. Entretanto, existem duas normas que abordam o tema para construções habitacionais: (i) a NBR 15.220/22, que trata do desempenho térmico de edificações, e (ii) a NBR 15.575/22, que aborda edificações habitacionais. Ambas têm como objetivo garantir temperaturas agradáveis no interior das edificações, embora apresentem diferenças nos limites das propriedades de coberturas e paredes externas, além do percentual de ventilação das aberturas (Destro, 2019; Sorgato, 2015).

#### 2.4.1 NBR 15.220

A norma NBR 15.220/05 (ABNT, 2005) está dividida em cinco partes, tratando da avaliação de habitações unifamiliares de interesse social. Ela estabelece definições básicas, métodos de cálculo das propriedades térmicas dos materiais, diretrizes construtivas e análise da zona bioclimática em que a edificação está inserida. A norma recomenda estratégias bioclimáticas para ventilação, resfriamento, aquecimento solar passivo, inércia térmica, entre outras. As coberturas e paredes externas são descritas em relação ao fator solar, atraso térmico e transmitância térmica. Por fim, as aberturas de ventilação são definidas pelo percentual de abertura relativo à área do piso.

#### 2.4.2 NBR 15.575

A norma NBR 15.575/22 (ABNT, 2022) é dividida em seis partes e é destinada às edificações habitacionais, abrangendo uma ampla gama de aplicações, desde edificações unifamiliares até multifamiliares. Além de estabelecer critérios para avaliação do desempenho térmico, a norma também contempla outros parâmetros, como sistemas estruturais, sistemas hidrossanitários, vedações verticais e desempenho acústico.

Em sua atualização, a norma incorporou critérios para avaliação do desempenho térmico de edificações familiares utilizando softwares de simulação numérica, como o *EnergyPlus*. Por fim, a NBR 15.575/22 (ABNT, 2022) estabelece os limites das propriedades térmicas e apresenta recomendações referentes aos valores de transmitância térmica, absorção e capacidade térmica dos materiais das coberturas e paredes externas.

### 2.5 SISTEMA DE ETIQUETAGEM DAS EDIFICAÇÕES

Uma edificação eficientemente energética pode ser alcançada mediante o controle de algumas variáveis, principalmente relacionadas à envoltória, utilização, sistemas e equipamentos instalados. Os sistemas de ar-condicionado compensam os ganhos e perdas de calor da edificação, sendo, no entanto, os

equipamentos geralmente responsáveis pelo maior consumo de energia elétrica no interior de construções não comerciais (Carlo, 2008; Souza, 2019).

Entre os anos 1999 e 2002, o Brasil enfrentou uma forte crise energética devido à falta de investimentos no setor de energia, baixa ocorrência de chuvas e aumento do consumo energético. Em resposta a esse cenário, em 2001, foi aprovada a Lei de Eficiência Energética (Lei nº 10.295/01), que trata sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. A partir disso, foi determinada a necessidade do estabelecimento de níveis máximos para o consumo energético de equipamentos fabricados ou comercializados no Brasil. Além disso, a lei aborda a eficiência energética em edificações, utilizando regulamentações específicas e indicadores técnicos (Garcia, 2020; Perobelli; Oliveira, 2013).

Em 2003, iniciou oficialmente o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), estabelecido por meio da parceria da Eletrobras/Procel, contando com a atuação conjunta do Ministério das Cidades, Ministério de Minas e Energia, além de centros de pesquisas e universidades (Procelinfo, 2022a). O Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) conta com a etiqueta de eficiência energética. O “PBE Edifica” foi criado em colaboração entre o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) e a ELETROBRAS/PROCEL. Os critérios de avaliação são semelhantes aos dos eletrodomésticos, partindo da letra E para os edifícios menos eficientes até a letra A para os mais eficientes (Edifica, 2022).

### **2.5.1 Selo Procel Edificações**

Em 1985, o Ministério de Minas e Energia (MME) e a Eletrobras instituíram o Procel. Posteriormente, por decreto presidencial em 1993, foi criado o Selo Procel, passando a reconhecer os equipamentos com melhores desempenhos em relação ao consumo e eficiência energética (Mendes, 2018). O Selo Procel Edificações é um instrumento de adesão voluntária, tendo como principal objetivo identificar as edificações que apresentem as melhores classificações de eficiência energética em uma dada categoria, visando motivar a compra e utilização de imóveis mais eficientes pelos consumidores.

O selo é concedido tanto na etapa de projeto, sendo válido até a finalização da obra, quanto na etapa da edificação construída. Em edifícios de serviços, comerciais e públicos, são avaliados três sistemas: envoltória, iluminação e condicionamento de ar. Já para as unidades habitacionais, são considerados os sistemas de aquecimento de água e a envoltória (Procelinfo, 2022b).

### 2.5.2 RTQ-C

O Programa Brasileiro de Etiquetagem criou, em 2009, a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), designada para a construção civil como PBE Edifica. Além da ENCE para o edifício completo, o regulamento possibilita o uso de etiquetas parciais, sendo aplicável a edifícios nos quais apenas a envoltória e a iluminação foram avaliadas (Carlo; Lamberts, 2010; Mendes, 2018).

O regulamento tem como objetivo a etiquetagem de edificações, baseando-se em três sistemas: iluminação, envoltória e condicionamento de ar. O processo de etiquetagem pode ser realizado por meio de dois métodos: (i) o método prescritivo, no qual as análises partem de um número limitado de casos, com a classificação obtida por uma equação ponderada para cada requisito; e (ii) pelo método de simulação, utilizando um *software* de simulação com essa capacidade (Souza, 2019).

Segundo Destro (2019), o método prescritivo é menos flexível que o de simulação, mas é de fácil aplicação, contemplando as soluções arquitetônicas mais frequentes. A edificação é avaliada por requisitos de eficiência, sendo classificada de "E" (menos eficiente) a "A" (mais eficiente). São atribuídas classificações aos sistemas individuais, e a classificação final é obtida pela soma dos resultados individuais, adicionando pesos a eles.

Por fim, foram identificadas várias limitações no método de avaliação descrito pelo Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência (RTQ-C), principalmente no método prescritivo. Entre as deficiências identificadas estão as representações das volumetrias da edificação, especialmente em geometrias complexas; a ausência de distinção entre áreas com proteção solar

por orientação da fachada e áreas com vidros; a falta de avaliação do efeito da ventilação natural e da iluminação; e a inexistência da consideração das eficiências dos sistemas de condicionamento de ar (Carlo; Lamberts, 2010; Versage, 2015).

### 2.5.3 *INI-C*

O RTQ-C foi revisado, e o Programa Procel Edifica, em colaboração com a Universidade Federal de Santa Catarina, formulou um novo método para avaliar a eficiência energética de edificações comerciais, de serviços e públicas, com base na energia primária da edificação. Chamada de Instrução Normativa do Inmetro para edificações comerciais (INI-C), essa nova proposta foi criada para superar as limitações identificadas no método prescritivo do RTQ-C (Lamberts; Cleto, 2018).

A INI-C tem como base o consumo de energia primária da edificação comercial resultando nos valores calculados de energia térmica e elétrica. O método de obtenção dos dados da edificação é fundamentado na comparação das condições de funcionamento com as condições de referência (classe D de consumo). O nível de eficiência energética da edificação é determinado pelo percentual de redução de consumo em relação à referência (CB3E, 2017).

### 2.5.4 *Procedimentos de avaliação da eficiência energética pela INI-C*

A classificação de eficiência energética geral das edificações e dos sistemas individuais deve ser realizada por meio do seu percentual de redução do consumo estimado de energia primária ( $RedC_{EP}$ ), comparando a edificação real com a edificação em sua condição de referência, equivalente à classificação D. O percentual de redução deve ser calculado com base na Equação 5.

$$RedC_{EP} = \left( \frac{C_{EP,ref} - C_{EP,real}}{C_{EP,ref}} \right) \times 100 \quad (5)$$

onde  $RedC_{EP}$  representa o percentual de redução do consumo de energia primária (%),  $C_{EP,ref}$  é o consumo de energia primária da edificação em sua condição de referência ( $\text{kW.h.ano}^{-1}$ ) e  $C_{EP,real}$  o consumo de energia primária da edificação em sua condição real ( $\text{kW.h.ano}^{-1}$ ).

O consumo de energia primária da edificação real é definido pela soma de seu consumo estimado de energia elétrica e térmica, multiplicados pelos respectivos fatores de conversão ( $fc_E$  e  $fc_T$ ), descontando-se a parcela de energia primária referente a geração local de energia renovável, quando existente, calculado pela Equação 6 (Brasil, 2021).

$$C_{EP,real} = (C_{EE,real} \times fc_E) + (C_{ET,real} \times fc_T) - (G_{EE} \times fc_E) \quad (6)$$

onde  $C_{EE,real}$  representa o consumo total de energia elétrica da edificação real ( $\text{kW.h.ano}^{-1}$ ),  $C_{ET,real}$  é o consumo total de energia térmica da edificação real ( $\text{kW.h.ano}^{-1}$ ),  $G_{EE}$  a energia gerada por fontes locais de energia renovável ( $\text{kW.h.ano}^{-1}$ ),  $fc_E$  o fator de conversão de energia elétrica em energia primária (adimensional) e  $fc_T$  o fator de conversão de energia térmica em energia primária (adimensional).

O consumo de energia primária da edificação de referência é determinado pela Equação 7 (Brasil, 2021).

$$C_{EP,ref} = C_{EE,ref} \times fc_E \quad (7)$$

onde  $C_{EE,ref}$  representa o consumo total de energia elétrica da edificação na condição de referência ( $\text{kW.h.ano}^{-1}$ ).

Na sequência, o valor do consumo total de energia elétrica no empreendimento, para a condição real e de referência, é determinado pela soma dos consumos de refrigeração, iluminação, aquecimento de água com energia

elétrica e consumo dos equipamentos, conforme mostra a Equação 8 (Brasil, 2021).

$$C_{EE,real \text{ ou } ref} = C_{R,real \text{ ou } ref} + C_{IL,real \text{ ou } ref} + C_{AAE,real \text{ ou } ref} + C_{EQ} \quad (8)$$

onde  $C_{EE}$  é o consumo total de energia elétrica da edificação ( $\text{kW.h.ano}^{-1}$ ),  $C_R$  o consumo de refrigeração do sistema de condicionamento de ar ( $\text{kW.h.ano}^{-1}$ ),  $C_{IL}$  o consumo do sistema de iluminação da edificação ( $\text{kW.h.ano}^{-1}$ ),  $C_{AAE}$  representa o consumo do sistema de aquecimento de água em energia elétrica da edificação ( $\text{kW.h.ano}^{-1}$ ) e  $C_{EQ}$  o consumo de equipamentos ( $\text{kW.h.ano}^{-1}$ ).

O valor do coeficiente de redução do consumo de energia primária da classificação D para A ( $CRC_{EPD-A}$ ) é determinado de acordo com a zona térmica à qual a edificação pertence, utilizando a Tabela 1. Para isso, o grupo climático em que a edificação se enquadra deve ser identificado no Quadro 1, que expõe os grupos dos principais municípios do Brasil, e o valor do Fator de Forma (FF) deve ser determinado utilizando a Equação 9.

$$FF = \frac{A_{env}}{V_{tot}} \quad (9)$$

onde  $FF$  representa o fator de forma da edificação ( $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $A_{env}$  a área da envoltória ( $\text{m}^2$ ) e  $V_{tot}$  o volume total construído da edificação ( $\text{m}^3$ ).

**Tabela 1 - Coeficiente de redução do consumo de energia primária da classificação D para A ( $CRC_{EPD-A}$ ), para os principais grupos climáticos de Santa Catarina e edificações de varejo**

Grupo climático (GC)	Coeficiente de redução do consumo de energia primária da classificação D para a classificação A ( $CRC_{EPD-A}$ )				
	FF ≤ 0,20	0,20 ≤ FF 0,30	0,30 ≤ FF 0,40	0,40 ≤ FF 0,50	FF > 0,50
GC 1- B	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28
GC 5	0,28	0,28	0,27	0,27	0,29
GC 6	0,28	0,28	0,27	0,27	0,29
GC 7	0,28	0,27	0,27	0,27	0,28
GC 9	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28
GC 13	0,27	0,27	0,26	0,26	0,28

Fonte: Adaptado de Brasil (2021).

**Quadro 1 - Grupos climáticos para os principais municípios do Brasil**

Grupo climático	Quantidade de municípios	Principais municípios
GC 1-B	28	Florianópolis (SC), Fazenda Vilanova (RS), Imbituba (SC), Magé (RJ), Santa Leopoldina (ES)
GC 5	198	Caxias do Sul (RS), Gravataí (RS), Novo Hamburgo (RS), Pelotas (RS), São Francisco do Sul (SC), São Leopoldo (RS), Xaxim (SC)
GC 6	145	Balneário Camboriú (SC), Bento Gonçalves (RS), Chuí (RS), Criciúma (SC), Farroupilha (RS), Porto Alegre (RS)
GC 7	298	Canoas (RS), Chapecó (SC), Joaçaba (SC), Lajeado (RS), Vacaria (RS)
GC 9	296	Cabo Frio (RJ), Governador Valadares (MG), Ilhéus (BA), Joinville (SC), Linhares (ES), Niterói (RJ), Porto Seguro (BA), Vila Velha (ES)
GC 13	357	Angra dos Reis (RJ), Blumenau (SC), Campos dos Goytacazes (RJ), Duque de Caxias (RJ), Eldorado (MS), Itajaí (SC), Macaé (RJ), Nova Iguaçu (RJ), Paranaguá (PR), Rio de Janeiro (RJ), Vitória (ES)

Fonte: Adaptado de Brasil (2021).

Os intervalos de classificação do consumo de energia primária são definidos a partir da variável “i”, determinada pela Equação 10. O valor de “i” refere-se a uma classificação da escala de eficiência energética, conforme apresentado no Quadro 2.

$$i = \frac{C_{EP,ref} \times CRC_{EPD-A}}{3} \quad (10)$$

onde  $i$  representa o coeficiente dos intervalos entre as classes (adimensional) e  $CRC_{EPD-A}$  o coeficiente de redução de consumo de energia primária da classificação D para a A (adimensional).

Quadro 2 - Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética geral

Classificação de eficiência	A	B	C	D	E
Limite superior	-	$> C_{EP,ref} - 3i$	$> C_{EP,ref} - 2i$	$> C_{EP,ref} - i$	$> C_{EP,ref}$
Limite inferior	$\leq C_{EP,ref} - 3i$	$\leq C_{EP,ref} - 2i$	$\leq C_{EP,ref} - i$	$\leq C_{EP,ref}$	-

Fonte: Adaptado de Brasil (2021).

## 2.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES

As simulações computacionais termoenergéticas são modelos matemáticos complexos utilizados para prever as características de desempenho das edificações. Esses modelos são fundamentados em princípios de termodinâmica transiente, mecânica dos fluidos e transferência de calor. Além disso, é importante considerar a possibilidade de erros devido à dificuldade operacional comum nos softwares de simulação termoenergética (Maile; Fischer; Bazjanac, 2007; Porto, 2019).

Os métodos computacionais têm como objetivo avaliar o balanço energético na edificação e verificar seus elementos. Dado que as avaliações experimentais são custosas, os métodos de simulação representam uma excelente alternativa. Desta forma, arquitetos e engenheiros podem empregá-los em qualquer etapa do projeto, possibilitando a manipulação das variáveis do planejamento e a seleção das melhores soluções (Harish; Kumar, 2016; Porto, 2019).

A simulação computacional do comportamento térmico de uma edificação leva em consideração a geometria, as características de uso e ocupação, os materiais construtivos e os dados climáticos do local de estudo. Esse método é capaz de analisar cargas elétricas, sistemas de climatização e realizar diversos

estudos sobre o desempenho térmico das edificações (Lopes, 2016; Fernandes, 2012).

Apesar de representar uma simplificação da realidade, os métodos de simulações computacionais oferecem a vantagem de possibilitar uma avaliação mais completa e aprofundada dos fenômenos relacionados às trocas térmicas da edificação. No entanto, é fundamental tomar cuidado ao escolher programas com credibilidade e garantir que os dados de entrada correspondam adequadamente à realidade (Lopes, 2016; Fernandes, 2012).

Existem mais de quatrocentos programas de simulação, listados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (EUA), para avaliar a energia renovável, eficiência energética e a sustentabilidade em edifícios (Abanda; Byers, 2016). O programa computacional de simulação termoenergética deve possuir, no mínimo, as seguintes características (Brasil, 2021):

- a) Ser um programa para a análise do consumo de energia em edifícios;
- b) Ser validado pela ASHRAE Standard 140;
- c) Simular 8.760 horas por ano;
- d) Modelar variações horárias de ocupação, potência de iluminação e equipamentos, sistemas de condicionamento de ar e ventilação natural definidos, separadamente, para cada dia da semana e feriados;
- e) Modelar efeitos de inércia térmica;
- f) Modelar trocas de calor entre a edificação e o solo;
- g) Calcular cargas térmicas latente e sensível;
- h) Ser capaz de simular o sombreamento proveniente de elementos externos às zonas térmicas, como brises, sacadas e o entorno (quando considerado);
- i) Ser capaz de simular os efeitos da ventilação cruzada em um ambiente, ou entre dois ou mais ambientes;
- j) Permitir a modelagem de multi-zonas térmicas;
- k) Ter capacidade de simular os efeitos das estratégias bioclimáticas adotadas no projeto;
- l) Permitir modelar todos os sistemas de condicionamento de ar presentes na edificação, caso a proposta utilize sistema de condicionamento de ar;

- m) Determinar a capacidade solicitada pelo sistema de condicionamento de ar;
- n) Calcular as horas não atendidas pelo sistema de condicionamento de ar;
- o) Calcular as curvas de desempenho de carga parcial para o sistema de condicionamento de ar;
- p) Calcular as curvas de correção de capacidade e eficiência para o sistema de aquecimento e refrigeração;
- q) Modelar os dados de entrada referentes ao funcionamento da ventilação natural na edificação, caso a proposta utilize ventilação natural e;
- r) Produzir relatórios horários do uso final de energia.

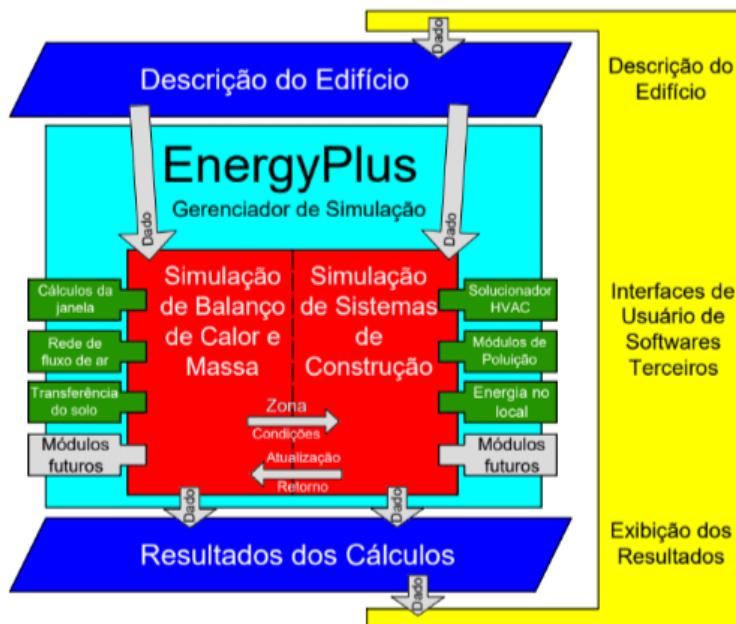
### **2.6.1 Aplicação do *EnergyPlus* na simulação energética de edificação**

Desenvolvido com base nos programas DOE-2 e BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*), o *EnergyPlus* é escrito em Fortran e projetado como uma ferramenta de simulação de energia e carga térmica. Seu mecanismo de simulação utiliza um método de equilíbrio de calor de zona e superfície para calcular a carga térmica do edifício (B'írol, 2012; Energyplus, 2022; Sorgato, 2015).

O *EnergyPlus* foi projetado pelo Departamento de Energia dos EUA e é amplamente utilizado por engenheiros e arquitetos. Este *software* realiza simulações abrangentes, incluindo o desempenho do edifício, o consumo de energia para aquecimento, resfriamento, ventilação e iluminação, além do consumo de energia dos equipamentos da planta. Ainda, o *EnergyPlus* modela, processa a carga e analisa o uso de água em edifícios (B'írol, 2012; Tzoulis, 2014).

O *software* *EnergyPlus* possui três componentes básicos: (i) gerenciador de simulação; (ii) módulo de simulação de balanço de calor e massa e; (iii) módulo de simulação de sistemas de construção. Sua estrutura é demonstrada na Figura 3. O gerenciador controla todo o processo de simulação, no qual os cálculos do balanço térmico são integrados nas simulações de cargas prediais (Crawley *et al.*, 2001).

Figura 3 - Estrutura geral do *EnergyPlus*



Fonte: Adaptado de Crawley *et al.* (2001).

Existem várias interfaces gráficas de usuário desenvolvidas para facilitar a operação do *EnergyPlus*, sendo uma das mais populares o *DesignBuilder*. Através desta interface, os usuários podem criar a geometria tridimensional, incluindo elementos como aberturas, sombreamento e sistemas de ar-condicionado (Sorgato, 2015; Tzoulis, 2014).

### 2.6.2 Dados climáticos

A execução de uma simulação computacional do desempenho térmico de uma edificação somente pode representar corretamente o comportamento se forem utilizados os dados climáticos exatos. A inadequação desses dados em representar a realidade pode ocasionar erros nos resultados das simulações, prejudicando as análises. De maneira geral, quanto mais informações estiverem contidas nos dados climáticos utilizados, maior será o nível de precisão obtido nas simulações (Scheller *et al.*, 2015).

Existem vários formatos de arquivos climáticos para diversas regiões do mundo. Por exemplo, os arquivos do tipo *Test Meteorological Year* (TMY) são baseados na média dos dados ao longo de até 30 anos, compilando valores de temperaturas sem extremos (Ferreira; Souza, 2020). Por outro lado, os arquivos

do tipo *Test Reference Year* (TRY) contém dados para um ano, incluindo temperatura de bulbo seco, velocidade e direção dos ventos, umidade relativa, radiação solar, temperatura de orvalho e pressão barométrica (Scheller *et al.*, 2015).

De acordo com Brasil (2021), o arquivo climático utilizado para a execução da simulação termoenergética deve conter informações representativas do clima da cidade onde a edificação está localizada. Esse arquivo deve fornecer valores mensais de temperatura média do solo (°C) para todos os meses do ano, além dos seguintes valores horários representativos das 8.760 horas do ano climático típico:

- a) Temperatura de bulbo seco (°C);
- b) Temperatura do ponto de orvalho (°C);
- c) Umidade relativa (%);
- d) Pressão atmosférica (Pa);
- e) Intensidade de radiação horizontal de onda longa (Wh.m<sup>-2</sup>);
- f) Radiação horizontal global (Wh.m<sup>-2</sup>);
- g) Radiação normal direta (Wh.m<sup>-2</sup>);
- h) Radiação horizontal difusa (Wh.m<sup>-2</sup>);
- i) Direção do vento (°), considerando o sentido horário a partir da direção Norte e;
- j) Velocidade do vento (m.s<sup>-1</sup>).

## 2.7 ANÁLISE DE AGRUPAMENTO

A geometria de estudo pode ser obtida por meio de uma análise de agrupamento, na qual são identificadas características que representam um grupo de objetos. A técnica estatística conhecida como análise de *cluster* é capaz de formar subgrupos significativos de objetos ou indivíduos, possibilitando a classificação e simplificação de dados multivariados (Hair *et al.*, 2009; Hudler, 2020).

*Cluster* é um conjunto de dados, chamado de "objetos", no qual as características são semelhantes, ou seja, existem correlações entre os valores dos dados agrupados, mesmo que sejam diferentes. A análise de *cluster*

é um método não supervisionado e não inferencial de análise de dados (Rosa, 2019).

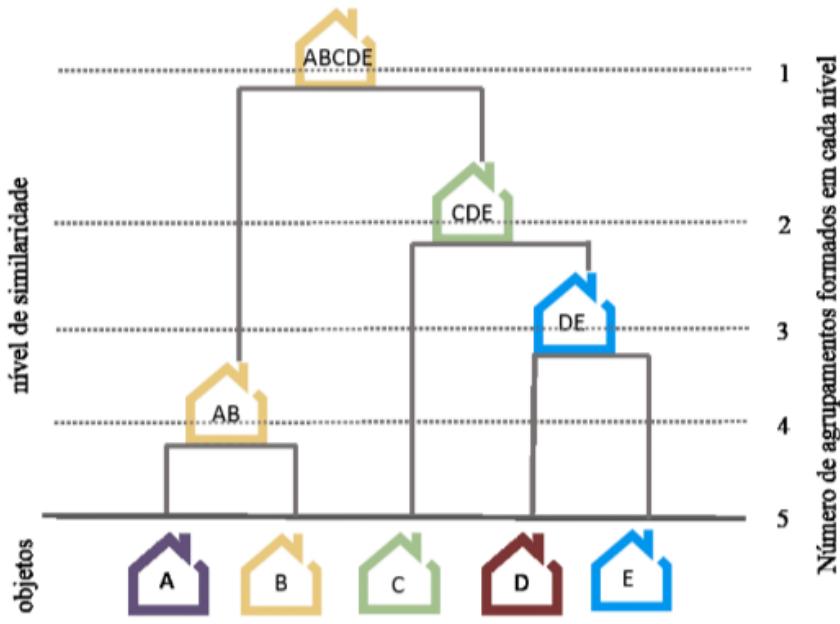
A utilização da análise *cluster* pode ocorrer em várias áreas do conhecimento, com o propósito de agregar dados com base em suas características, utilizando a proximidade entre eles. Para realizar essa análise, é necessário calcular as distâncias entre os objetos. Dentre as maneiras de determinar essas distâncias, Tondo (2017) destaca a distância euclidiana, distância euclidiana quadrada (absoluta), distância *city-block* (Manhattan), entre outras. Ao expressar esses dados por meio de gráficos, os objetos de um mesmo grupo estarão próximos, enquanto os de grupos distintos estarão distantes (Santamouris *et al.*, 2007).

A semelhança ou diferença entre dois objetos é determinado pela matriz de similaridade, no qual, com base nestes valores, o algoritmo de análise *cluster* define para qual grupo cada objeto irá pertencer. Existem vários algoritmos que realizam esta separação, sendo utilizadas regras diferentes por cada um deles. Os algoritmos de análise *cluster* são divididos em dois grandes grupos baseados em suas técnicas de separação: (i) agrupamento hierárquico e (ii) agrupamento não-hierárquico (Hair *et al.*, 2009; Mingoti, 2007).

### **2.7.1 Agrupamento hierárquico**

A técnica hierárquica da análise *cluster* caracteriza-se pela organização dos dados em uma árvore, possibilitando a construção de um gráfico denominado dendograma (Figura 4), que indica o nível de similaridade obtido com cada nova união de dois *clusters*. Uma consequência desse método é a capacidade de acompanhar a formação dos grupos. Por meio do dendograma, há uma representação visual que indica a melhor quantidade de grupos para representar o conjunto de dados (Rosa, 2019).

Figura 4 - Processo de construção do dendograma



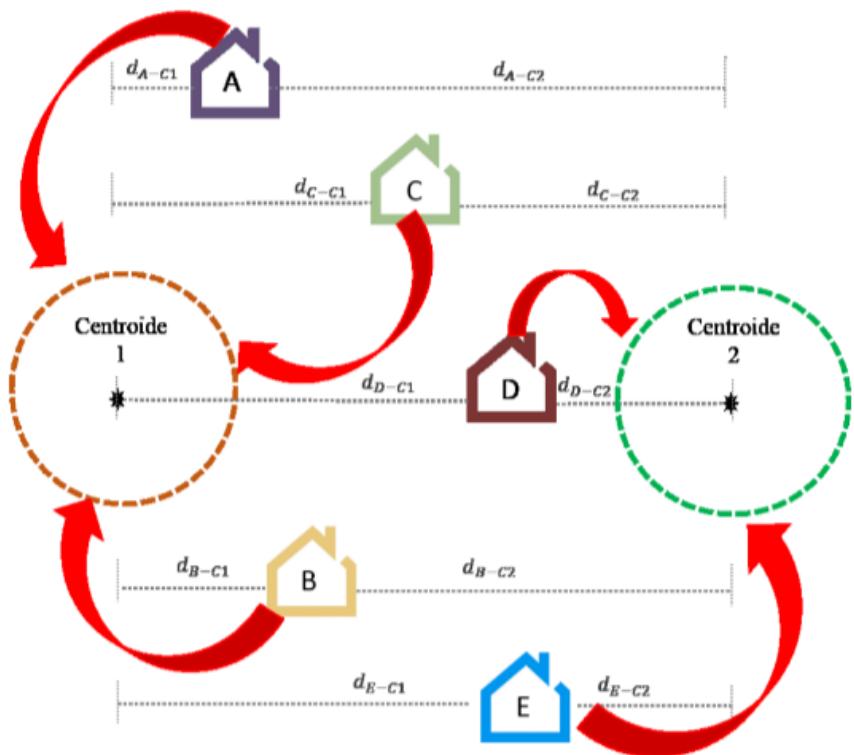
Fonte: Rosa (2014).

### 2.7.2 Agrupamento não-hierárquico

Para esse método, é necessário determinar previamente o número de grupos a serem formados. No entanto, ao contrário do método hierárquico, este oferece maior flexibilidade, uma vez que os componentes já classificados podem trocar de grupo durante o processo de análise (Gao; Malkawi, 2014).

De acordo com Gao e Malkawi (2014), a análise de *cluster* usando um método não hierárquico geralmente ocorre em duas etapas. Inicialmente, é preciso determinar a centroide "k" para cada agrupamento; em seguida, cada ponto de dados é associado a centroide mais próxima. Um exemplo do processo de formação de agrupamentos pelo método não hierárquico é demonstrado na Figura 5.

Figura 5 - Formação dos agrupamentos pelo processo não hierárquico

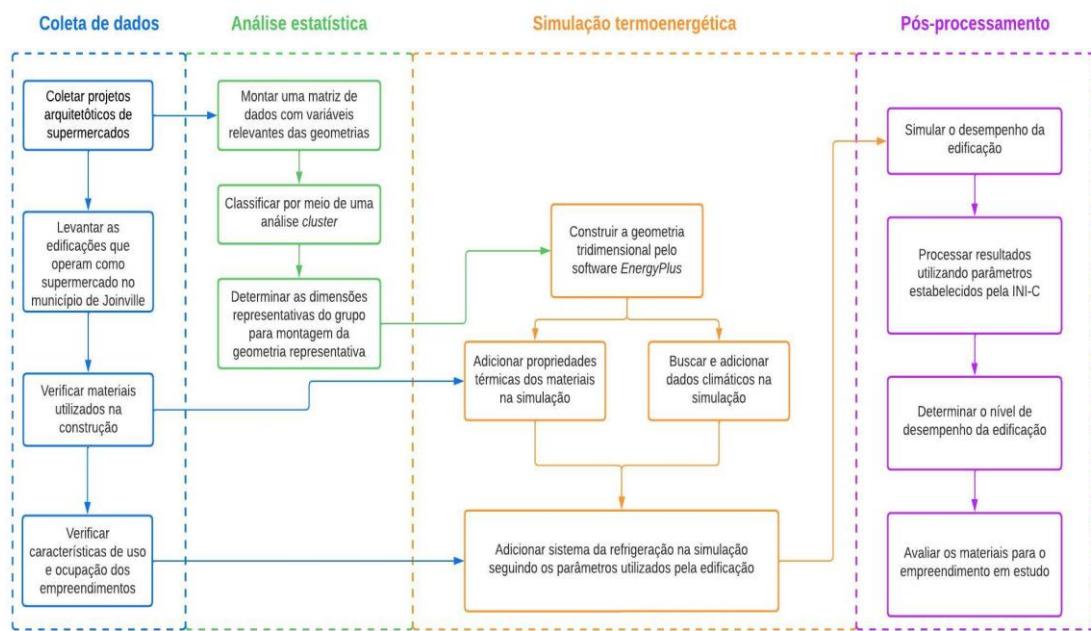


Fonte: Rosa (2014).

### 3 METODOLOGIA

Conforme ilustrado no esquema exibido na Figura 6, que visa alcançar o objetivo proposto, a simulação computacional será conduzida em uma geometria que reproduza as características das edificações típicas de supermercados localizados no município de Joinville/SC.

Figura 6 - Esquema das etapas do trabalho



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O software *EnergyPlus* permite gerar, como um dos parâmetros de saída, diversos dados de consumo energético da edificação. Deste modo, é possível realizar um processamento para determinar o atendimento da edificação aos critérios estabelecidos pela Instrução Normativa do INMETRO.

#### 3.1 COLETA DE DADOS

Inicialmente, foi realizado um levantamento de todas as edificações construídas no município de Joinville que operam como supermercado. Utilizando a ferramenta do Google *Earth*, foi feita uma medição da área da cobertura da estrutura e, posteriormente, buscou-se projetos de supermercados

construídos em Joinville e cidades próximas para, através de uma análise de agrupamento, determinar características similares entre as estruturas.

Diante da ausência de projetos específicos para as edificações em Joinville, foi decidido incorporar projetos de outros supermercados do estado de Santa Catarina como uma alternativa para verificar se as áreas dos supermercados do estado podem ser representativas para Joinville. Com isso, foram utilizados sete projetos de seis cidades do Estado, incluindo: São José, Canoinhas, Timbó, Balneário Camboriú, Presidente Getúlio e Joinville. Apesar de não pertencerem ao mesmo grupo climático, apenas o grupo climático do município de Joinville foi considerado.

O enfoque principal foi o levantamento da área superficial desses supermercados, buscando estabelecer uma média representativa para os estabelecimentos em Joinville. O objetivo final foi calcular a área média total dos supermercados na cidade, utilizando a área superficial como indicador geral. Essa abordagem visa fornecer uma compreensão abrangente das dimensões espaciais dos supermercados em Joinville, considerando as limitações inerentes à obtenção de informações detalhadas dos projetos locais.

### **3.1.1 *Supermercados em Joinville***

Foram identificados 35 edifícios comerciais que operam como supermercados e mercados atacadistas no município de Joinville-SC. Com base nos estudos de Tambosi (2022), na localização e identificação destas áreas foi utilizado o software Google *Earth* para estimar as dimensões de comprimento, largura e, disponibilizado pelo *software*, área de cobertura de cada estrutura física, aliado à análise de suas características projetuais.

### **3.1.2 *Levantamento de projetos***

A etapa de busca por projetos de supermercados construídos em cidades do estado de Santa Catarina, selecionadas com base na disponibilidade de arquivos climáticos para estudo, foi concluída com um total de 7 projetos utilizados para a análise de agrupamento. Os dados relativos aos projetos estão

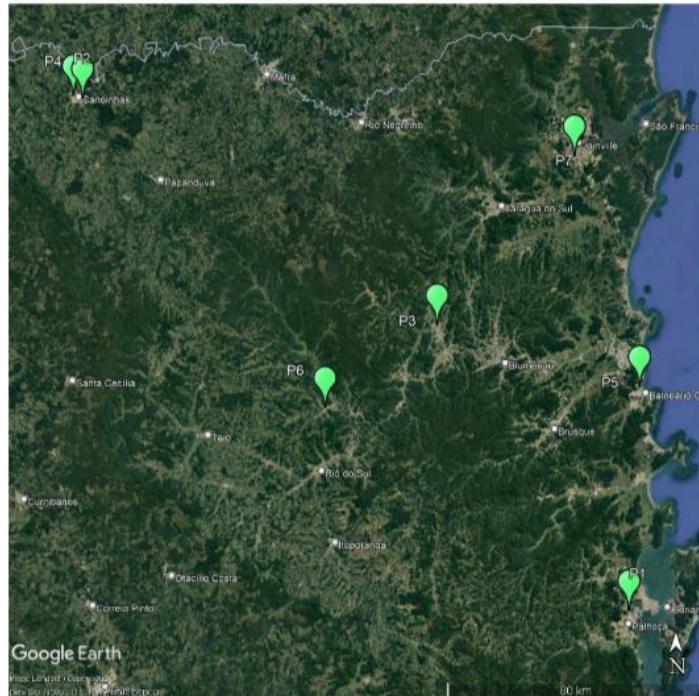
demonstrados na Tabela 2, enquanto a Figura 7 ilustra a localização geográfica das edificações analisadas.

Tabela 2 - Dados dos projetos utilizados para estudo

Identificação	Cidade	Área total (m <sup>2</sup> )
P1	São José	5.906
P2	Canoiñas	2.418
P3	Timbó	2.305
P4	Canoiñas	2.708
P5	Balneário Camboriú	6.605
P6	Presidente Getúlio	3.299
P7	Joinville	1.915,5

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 7 - Localização projetos de supermercados



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

### 3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise *cluster* tem como objetivo agrupar os projetos por similaridade, a fim de extrair características comuns que possam servir para construir a geometria de estudo. Para isso, foi montada uma matriz de dados, com base em medições dos projetos estudados (Quadro 3), sendo estas as características utilizadas para o estudo de agrupamento.

Quadro 3 - Variáveis utilizadas para análise *cluster* e construção da geometria de estudo

Variável de estudo	Descrição	Unidade de medida
A_Vendas	Área de vendas	m <sup>2</sup>
A_Depósito	Área de depósito	m <sup>2</sup>
A_Açougue	Área de açougue	m <sup>2</sup>
A_Padaria	Área de padaria	m <sup>2</sup>
A_Administrativo	Área de administrativo	m <sup>2</sup>
A_Circulação	Área de circulação	m <sup>2</sup>
A_Total	Área total da edificação	m <sup>2</sup>
Pé_Direito	Pé direito da estrutura	m
Esp_Paredes	Espessura das paredes externas	m

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Após a conclusão da coleta de dados dos projetos, uma matriz foi construída contendo todas as informações relevantes para o processo da análise *cluster*, com os valores apresentados na Tabela 3. Ao examinar os dados desta tabela, torna-se evidente que a maior porção da área, em todas as edificações, é destinada à área de vendas, seguida pelo depósito.

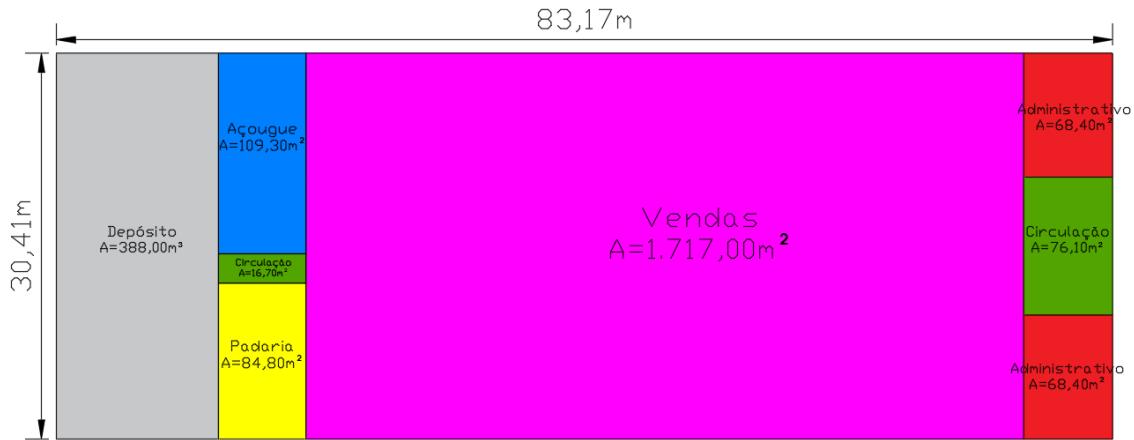
Tabela 3 - Dados para análise de agrupamento

Variável de estudo	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
A_Vendas (m <sup>2</sup> )	3.940	1.650	1.644	2.000	3.865	1.758	1.533
A_Depósito (m <sup>2</sup> )	712	510	240	177	1.850	851	164
A_Açougue (m <sup>2</sup> )	350	97	95	181	98	75	98,5
A_Padaria (m <sup>2</sup> )	92	52	56	100	120	111	105
A_Adm (m <sup>2</sup> )	277	100	100	240	250	244	0
A_Circulação (m <sup>2</sup> )	535	9	170	10	422	260	15
A_Total (m <sup>2</sup> )	5.906	2.418	2.305	2.708	6.605	3.299	1.915,5
Pé_Direito (m)	11	7	4,5	10	6,5	7	7
Esp_Paredes (m)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para a construção da geometria de estudo, foram utilizados apenas os dados pertencentes ao grupo de geometrias médias, descartando os extremos (que será abordado detalhadamente no item 4.2.2). A geometria (Figura 8) foi construída a partir dos resultados da análise *cluster*, contando com seis zonas térmicas, além de paredes, portas, janelas e elementos de sombreamento.

Figura 8 - Croqui do objeto de estudo



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Em todas as simulações conduzidas, a configuração geométrica do edifício consiste em um único pavimento, caracterizado por um pé direito de 7,1 metros, em relação ao norte foi considerado 0° como a orientação solar. Além disso, o horário de funcionamento das simulações foi considerado 8h às 20h.

### 3.3 SIMULAÇÃO TERMO ENERGÉTICA DO MODELO

Para a correta simulação do comportamento térmico de uma edificação, o software *EnergyPlus* exige uma série de dados de entrada, que devem representar com fidelidade a situação em que a construção é submetida. A modelagem da envoltória da edificação considerou cada ambiente como uma única zona térmica, totalizando seis zonas térmicas para representar toda a geometria.

Os procedimentos definidos pela INI-C para edificações de varejo foram rigorosamente seguidos, onde, para atender à instrução normativa, foram conduzidas duas simulações para cada estudo. Na primeira simulação, representa-se a estrutura real do espaço conforme construído no local, utilizando os dados resultantes da análise *cluster*. Por outro lado, a segunda simulação é elaborada com base em condições de referência, seguindo os parâmetros estabelecidos pela INI-C.

As conclusões sobre o nível de desempenho energético da estrutura são determinadas ao comparar os resultados das simulações, considerando as duas

situações. Os valores das variáveis de estudo a serem adicionados nas simulações estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de referência para edificações de varejo (mercados)

Uso típico	Edificação de varejo	
	Condição real	Condição de referência
<b>Geometria</b>		
Área (m <sup>2</sup> )		
Orientação solar		
Pé-direito (piso e teto) (m)		
<b>Aberturas</b>		
PAF – Percentual de área de abertura da fachada (%)	Condição real	60% na zona da fachada principal (0,60) e 10% nas demais (0,10)
<b>Componentes construtivos</b>		
Parede	Condição real	Argamassa interna (2,5 cm), bloco cerâmico furado (9,0 cm) e argamassa externa (2,5 cm)
Upar – Transmitância da parede externa (W/m <sup>2</sup> K)	Condição real	2,39
αPAR – Absortância da parede (adimensional)	Condição real	0,5
CTpar – Capacidade térmica da parede (kJ/m <sup>2</sup> K)	Condição real	150
Cobertura	Condição real	Telha de fibrocimento, câmara de ar (> 5 cm) e laje maciça de concreto (10 cm)
Ucob – Transmitância de cobertura (W/m <sup>2</sup> K)	Condição real	2,06
αCOB – Absortância da cobertura (adimensional)	Condição real	0,8
CTcob – Capacidade térmica da cobertura (kJ/m <sup>2</sup> K)	Condição real	233
Vidro	Condição real	Vidro simples incolor 6 mm
FS – Fator solar do vidro (adimensional)	Condição real	0,82
Uvid – Transmitância do vidro (W/m <sup>2</sup> K)	Condição real	5,7
AHS – Ângulo horizontal de sombreamento (º)	Condição real	0
AVS – Ângulo vertical de sombreamento (º)	Condição real	0
AOV – Ângulo de obstrução vizinha (º)*	Condição real	
<b>Iluminação e ganhos</b>		
DPI – Densidade de potência de iluminação (W/m <sup>2</sup> )	Condição real	16,3**
Ocupação (m <sup>2</sup> /pessoa)	5,0	
DPE – Densidade de potência de equipamentos (W/m <sup>2</sup> )***	40,0	
Horas de ocupação	12	
Dias de ocupação (N <sub>ano</sub> )	350	
Situação do piso	Condição real	
Situação da cobertura	Condição real	
Isolamento do piso	Condição real	Sem isolamento
<b>Condicionamento de ar (refrigeração)</b>		
COP – Coeficiente de performance (W/W)	Condição real	2,60
Temperatura setpoint (ºC)****	24,0	
Aquecimento de água *****		
Eficiência do sistema de aquecimento de água sem acumulação	Condição real	0,95
Eficiência do sistema de aquecimento de água com acumulação	Condição real	0,85
Temperatura de armazenamento	Mínimo 50 ºC	
Temperatura de uso de água quente	38 ºC (norte e nordeste) e 40 ºC (demais regiões)	
Temperatura de uso de água fria (ºC)	Condição real	
Perdas na tubulação – sistema de aquecimento de água sem acumulação	Condição real	0

\* A utilização do ângulo de obstrução vizinha (AOV) é opcional;

\*\* Adotar este valor para a avaliação parcial da envoltória no caso da utilização do método do edifício completo. Para o método da atividade dos edifícios e potência ajustada, devem ser adotados os valores de potência de iluminação limite (DPIL) para a classificação D;

\*\*\* Em casos em que se deseja utilizar os valores reais ou levantados por meio de projeto, a DPE para a condição real e de referência devem ser iguais. Caso sejam adotados valores não tabelados, deve ser entregue memorial de cálculo e declaração de responsabilidade técnica (ART/RRT);

\*\*\*\* Os dias de ocupação desta tipologia foram calculados com base na média de dias úteis por ano;

\*\*\*\*\* Caso exista a necessidade da edificação operar com um *setpoint* diferente, deverá ser entregue uma carta de justificativa, seguindo-se então com o método de simulação; nestes casos, deve-se utilizar o mesmo *setpoint* para a edificação real e sua condição de referência;

\*\*\*\*\* Tipologia com consumo de água quente não significativo para a avaliação do sistema.

Fonte: Adaptado de Inmetro (2022).

### 3.3.1 Determinação do nível de eficiência energética da envoltória

Neste segmento, são ressaltados os elementos pertinentes desta pesquisa para a classificação da eficiência energética da envoltória, empregando o método de simulação conforme estabelecido pela INI-C. Os ensaios foram conduzidos por meio do método de simulação, considerando diversas parametrizações da envoltória do supermercado.

O software *EnergyPlus* foi utilizado para esse fim, sendo um programa de simulação energética de edificações que possibilita a modelagem e avaliação do consumo de energia para aquecimento e resfriamento, levando em consideração aspectos como ventilação, iluminação, entre outros. Além disso, vale destacar que o programa é recomendado pela INI-C, visto que atende às suas diretrizes.

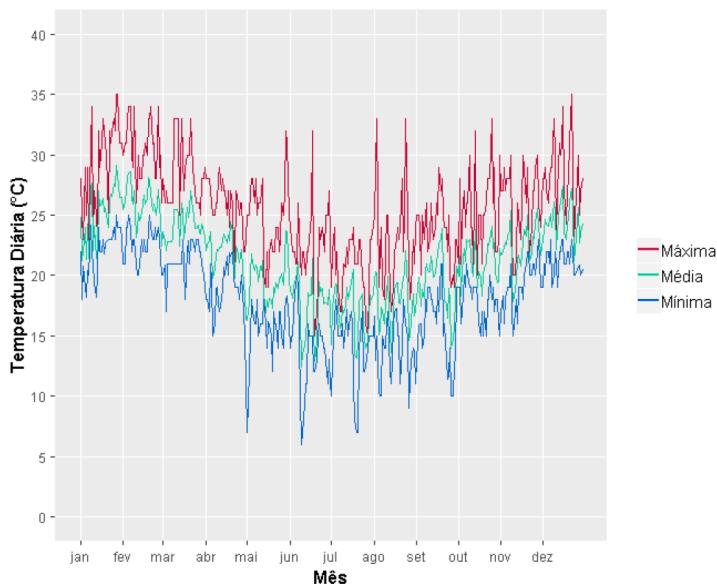
### 3.3.2 Arquivo Climático

Para as simulações computacionais, foram empregados dados climáticos específicos do município de Joinville/SC, considerando que os resultados visam atender a essa região e, para essa localização, diversas informações estão disponíveis. Para o desenvolvimento das simulações, optou-se por utilizar um arquivo do tipo TMY coletado no Aeroporto Lauro Carneiro de Loyola (Joinville/SC), abrangendo o período entre os anos de 2007 e 2021.

Segundo Garcia (2020), o clima da cidade de Joinville é caracterizado como quente e úmido, com altas temperaturas e elevada umidade durante o verão (Grunberg, 2014). Conforme ilustrado na Figura 9, observa-se que Joinville/SC registra temperaturas máximas diárias entre 30°C e 35°C durante os meses mais quentes do ano, com picos de temperatura atingindo essa faixa,

inclusive no inverno. Além disso, verifica-se que os picos de temperatura mínima nas estações mais amenas se aproximam de 5°C.

Figura 9 - Gráfico das temperaturas mínima, média e máxima diária



Fonte: Lawrie e Crawley (2019).

### 3.3.3 Aplicação do método de simulação para envoltória

Na execução das simulações de eficiência energética, o *software EnergyPlus* foi empregado, pelos parâmetros estabelecidos pela INI-C, para avaliar o desempenho da envoltória. A representação do modelo geométrico da edificação, nas versões real e referência, foi elaborada de acordo com as condições já mencionadas: parâmetros volumétricos conforme a edificação real em ambos os casos e parâmetros construtivos reais para a modelagem do edifício real, enquanto os parâmetros para o edifício referência foram pré-determinados pelo método.

A partir do desenvolvimento de cada modelo (real e referência), através do método de simulação, foram obtidos os valores de Carga Térmica de aquecimento e resfriamento para o Modelo de Referência e o Modelo Real de cada edificação. Para realizar a classificação da etiqueta, levando em consideração apenas o condicionamento artificial, utilizou-se o valor da Carga Térmica da edificação real, posicionando-o dentro dos intervalos estabelecidos.

### 3.3.3.1 EnergyPlus

As simulações computacionais de eficiência energética foram conduzidas utilizando o software *EnergyPlus*. Essa ferramenta de simulação possibilita o cálculo de vários parâmetros essenciais para atender aos requisitos da INI-C, sendo crucial configurar corretamente os parâmetros de entrada do *EnergyPlus* para esse fim. O Quadro 4 apresenta os principais objetos que devem ser configurados dentro do *EnergyPlus* para assegurar a correta simulação do desempenho térmico da estrutura.

Quadro 4 - Principais variáveis utilizadas para construção da simulação

Classificação	Variáveis	Objetos <i>EnergyPlus</i>
Configuração inicial	Localização Período de simulação Configuração variáveis de saída	<i>Site: Location</i> <i>Run Period</i> <i>Output: Variable</i>
Geometria	Dimensões Zonas térmicas (ambientes) Dimensão das aberturas Elementos de sombreamento Orientação da edificação	<i>Building</i> <i>Global Geometry Rules Zone</i> <i>Building Surface: Detailed</i> <i>Fenestration Surface: Detailed</i> <i>Shading: Building: Detailed</i>
Materiais	Composição das paredes Absortância Composição da cobertura Composição dos pisos Contato com o solo Esquadrias	<i>Material</i> <i>Material: No Mass</i> <i>Window Material: Glazing</i> <i>Fenestration Surface: Detailed Construction</i> <i>Building Surface: Detailed</i> <i>Ground Domain: Slad</i>
Potência interna	Iluminação Pessoas Máquinas e equipamentos	<i>Lights</i> <i>People</i> <i>Electric Equipment</i>
Operação	Quantidade de usuários Ocupação dos ambientes Uso da iluminação Operação de portas e janelas Uso de equipamentos	<i>People</i> <i>Schedule compact</i> <i>Lights</i> <i>Airflow Network</i>

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

### 3.3.3.2 Uso e ocupação

A maneira com que a edificação é utilizada pode alterar de forma significativa o seu comportamento térmico ao longo do dia e do ano. Desse modo, os dados referentes aos equipamentos elétricos e ocupação seguem os valores estabelecidos pela INI-C, expressos na Tabela 4.

### 3.3.3.3 Definição dos modelos estudados

O *EnergyPlus*, ao contrário da realidade, modela as estruturas como sendo compostas por camadas homogêneas. No *software*, a estrutura é criada com as mesmas especificações térmicas da estrutura real, garantindo que possua os mesmos valores de transmitância térmica e capacidade térmica. A Tabela 5 lista os elementos construtivos junto com suas respectivas características adotadas para as paredes e cobertura.

Tabela 5 - Elementos construtivos e suas respectivas características

	e (cm)	$\lambda$ (W/mK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	c (kJ/kgK)	Rt (m <sup>2</sup> K/W)	Ut (W/m <sup>2</sup> K)	CTt (kJ/m <sup>2</sup> K)
<b>Parede externa</b>							
Argamassa externa	2,50	1,15	2.000	1,00	0,022		
Bloco cerâmico	9,0	0,90	1.600	0,920	0,015	2,39	150
Câmara de ar	6,32	0,364	-	-	0,0175		
Argamassa interna	2,50	1,15	2.000	1,00	0,022		
<b>Cobertura</b>							
Telha de fibrocimento	0,800	0,950	1.900	0,840	0,0084		
Câmara de ar (> 5 cm)	25,0	1,190	-	-	0,2100	2,06	233
Laje de concreto (> 10 cm)	10,0	1,75	2.200	1,00	0,0571		

e: Espessura;  $\lambda$ : Condutividade térmica;  $\rho$ : Massa específica; c: Calor específico; Rt: Resistência térmica total; Ut: Transmitância térmica total; CTt: Capacidade térmica total.

Fonte: Adaptado de Brasil (2021).

Para as simulações paramétricas, foram selecionadas variações na estrutura da envoltória e as simulações foram conduzidas com alterações nas cores da fachada, nos materiais construtivos das paredes, nos elementos de sombreamento e nos tipos de telhado. É fundamental ressaltar que os parâmetros adotados no Modelo de Referência aderem às características delineadas na INI-C.

Para os modelos paramétricos, apenas um parâmetro foi modificado para cada modelo examinado, mantendo as outras configurações consistentes com o Modelo de Referência, com exceção das paredes, nas quais foram empregadas paredes de concreto com 10 cm de espessura nas simulações paramétricas

relacionadas à cor da fachada, sombreamento e telhado. Por fim, um modelo denominado *Alpha* foi criado ao unir os melhores resultados de desempenho térmico e classificação da envoltória de cada grupo de modelos.

Inicialmente, foi realizada a variação das cores apenas da parede vertical da estrutura, sendo configurada com o uso de concreto maciço, conforme empregado na prática. No caso do Modelo A, a cor escolhida foi o Cinza BR, conforme indicado no catálogo da Figura 10, refletindo a tonalidade real do elemento construtivo, ou seja, o concreto. Para a simulação, foi atribuído um coeficiente de absorção térmica de 61,1%.

Além disso, para as geometrias representativas do modelo real, ocorreu uma modificação na coloração. A quantidade de aberturas na fachada foi ajustada, mantendo o percentual observado nas faces laterais, aproximadamente 10% da área, para representar o valor adotado nas geometrias reais.

Figura 10 - Catálogo com coeficiente de absorção térmica de luz solar utilizado para o Modelo A, Modelo B e Modelo C

MODELO A				MODELO B				MODELO C				
	Tipo	Número	Cor		Tipo	Número	Cor		Tipo	Número	Cor	
Acrílica Semi-brilho		18	Amarelo Antigo	49,7	Látex PVA Fosca	34	Amarelo Canário	29,3	Látex PVA Fosca	62	Amarelo Canário	25,2
		19	Amarelo Terra	68,6		35	Amarelo Terra	61,4		63	Areia	35,7
		20	Azul	79,9		36	Areia	39,0		64	Azul Profundo	76,0
		21	Branco Gelo	36,2		37	Azul angra	32,3		65	Branco Neve	16,2
		22	Cinza	86,4		38	Branco Sereno	26,6		66	Branco Gelo	28,1
		23	Cinza BR	61,1		39	Branc	11,1		67	Camurça	53,2
		24	Crepúsculo	66,0						68	Cerâmica	65,3
		25	Flamingo	47,3						69	Concreto	71,6
		26	Marfim	33,9						70	Flamingo	44,4
		27	Palha	39,6						71	Marfim	24,5
		28	Pérola	33,9						72	Palha	26,4
		29	Preto	97,1						73	Pérola	22,9
		30	Telha	69,6						74	Pêssego	29,8
		31	Terracota	68,4						75	Preto	97,4
		32	Verde Quadra	75,5						76	Vanila	27,7
		33	Vermelho	64,2						77	Verde Musgo	79,8
										78	Vermelho Cardinal	63,3

Fonte: Adaptado de Inmetro (2013).

O Modelo B concentra-se na análise do impacto da utilização de uma tonalidade clara sobre o desempenho térmico global da estrutura. Nesse cenário, a escolha recaiu sobre a cor Branco, conforme indicado no catálogo da Figura 11. Como resultado, os valores dos coeficientes de absorção de luz visível na superfície externa da geometria foram ajustados para 11,1% nas paredes da

estrutura. Os demais materiais foram mantidos inalterados, proporcionando, assim, uma base consistente para a comparação dos resultados.

O Modelo C, por sua vez, tem como objetivo analisar os efeitos derivados da aplicação de uma cor escura sobre o desempenho térmico da geometria em questão. Optou-se pela tonalidade Preto (Figura 11), caracterizada por um coeficiente de absorção de 97,4%, sendo esta adotada em todas as paredes externas da geometria em estudo. Essa escolha visa explorar e compreender o impacto termofísico resultante da coloração escura em contraposição aos modelos anteriores.

Em seguida, foram analisados diversos materiais construtivos. O Modelo D foi utilizada uma parede de concreto com 20 cm sem nenhum tipo de isolamento, já os modelos E e F foram empregados uma parede de concreto com 10 cm, junto a um material isolante térmico; no Modelo E do tipo EPS (Poliestireno Expandido) e no Modelo F do tipo PUR (Poliuretano). As propriedades térmicas utilizadas estão descritas na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades térmicas dos materiais construtivos utilizados para as paredes

Material	Propriedade térmica		
	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	c (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
Argamassa de assentamento	2.000	1,15	1,00
<b>Concreto (bloco e parede)</b>	<b>2.400</b>	<b>1,75</b>	<b>1,00</b>
Reboco	2.000	1,15	1,00
Tijolo cerâmico	1.600	0,90	0,92

Fonte: Adaptado de ABNT (2005).

Na sequência, foram avaliadas diferentes estratégias de sombreamento para melhora no desempenho térmico da edificação. No modelo G foi analisado a eficácia de uma marquise frontal, gerando sombreamento frontal da geometria por meio da utilização de elementos com cinco metros de comprimento, os quais são considerados sombreados perfeitos. A avaliação se concentra exclusivamente no percentual de sombreamento que esses elementos proporcionaram à geometria ao longo de todo o ano de operação.

No modelo H investigou-se o impacto da utilização de brises de 1 m em todo o perímetro da estrutura. São elementos do tipo beiral com 1 m de largura ao longo de toda a estrutura, como sombreadores. É importante salientar que esses elementos não absorvem calor; sua principal função é fornecer uma porção de sombreamento ao longo de todo o funcionamento da estrutura. Essa abordagem visa contribuir para o controle térmico, oferecendo benefícios na gestão da temperatura interna durante todo o ano.

No Modelo I foram incorporados brises com 1 m de comprimento ao longo de toda a largura dos elementos transparentes da geometria. Esses brises foram considerados fixos, não se movendo ao longo da operação, conforme indicado nas figuras. Essa estratégia visa oferecer sombreamento adicional e controle solar aos elementos transparentes da edificação, contribuindo para o gerenciamento térmico e proporcionando benefícios ao longo do funcionamento da edificação.

Por fim, explorou-se o efeito da alteração dos materiais construtivos para as estruturas de telhado. No Modelo J, foi utilizado apenas telha metálica em aço. No Modelo K, além da telha metálica em aço, foi adicionada uma camada de EPS com 10 cm, enquanto no Modelo L, foi acrescentada uma camada de PUR com 10 cm. As propriedades térmicas desses materiais estão detalhadas na Tabela 7.

**Tabela 7 - Propriedades térmicas dos materiais construtivos utilizados para as coberturas**

Material	Propriedade térmica		
	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	c (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
Argamassa de reboco	2.000	1,15	1,00
Cerâmica	2.200	1,05	0,92
Concreto (laje)	2.200	1,75	1,00
Fibrocimento	1.900	0,95	0,84
Gesso	750	0,35	0,84
Madeira	600	0,15	1,34
PVC	1.300	0,20	0,96
<b>Telha metálica de aço</b>	<b>7.800</b>	<b>55</b>	<b>0,46</b>

Fonte: Adaptado de ABNT (2005).

## 3.4 PÓS-PROCESSAMENTO

O *EnergyPlus* tem a capacidade de gerar diversos tipos de informações como resultados. Esses valores podem ser plotados em gráficos da maneira como foram gerados, ou então, é possível exportar e processar em outros softwares, permitindo análises mais detalhadas e aprofundadas.

### 3.4.1 *Consumo de energia*

O cálculo do consumo energético da edificação engloba todos os equipamentos elétricos utilizados em seu interior, incluindo máquinas, sistemas de iluminação e climatização. Os valores são apresentados de forma segmentada, detalhando o consumo específico de cada categoria, além do consumo total.

### 3.4.2 *Fluxo de calor entre superfícies*

É relevante destacar que se pode gerar o valor do fluxo de calor para todas as superfícies incluídas na simulação, tanto internas quanto externas. Essa informação é crucial para identificar o comportamento térmico dos materiais e para detectar pontos de menor ou maior desempenho na estrutura.

### 3.4.3 *Temperatura interna*

A temperatura interna é um dado crucial para ambientes sem sistemas de climatização. Essa informação é empregada para determinar o Percentual de Horas dentro da Faixa de Temperatura Operativa (PHFT). Em ambientes climatizados, é esperado que a temperatura interna se aproxime do valor configurado para o sistema de refrigeração.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos por meio do método de simulação, seguindo as diretrizes da INI-C para edificações de supermercados. Posteriormente, são realizadas análises dos dados alcançados com a classificação da etiquetagem das edificações, visando a otimização de seu desempenho térmico e eficiência energética.

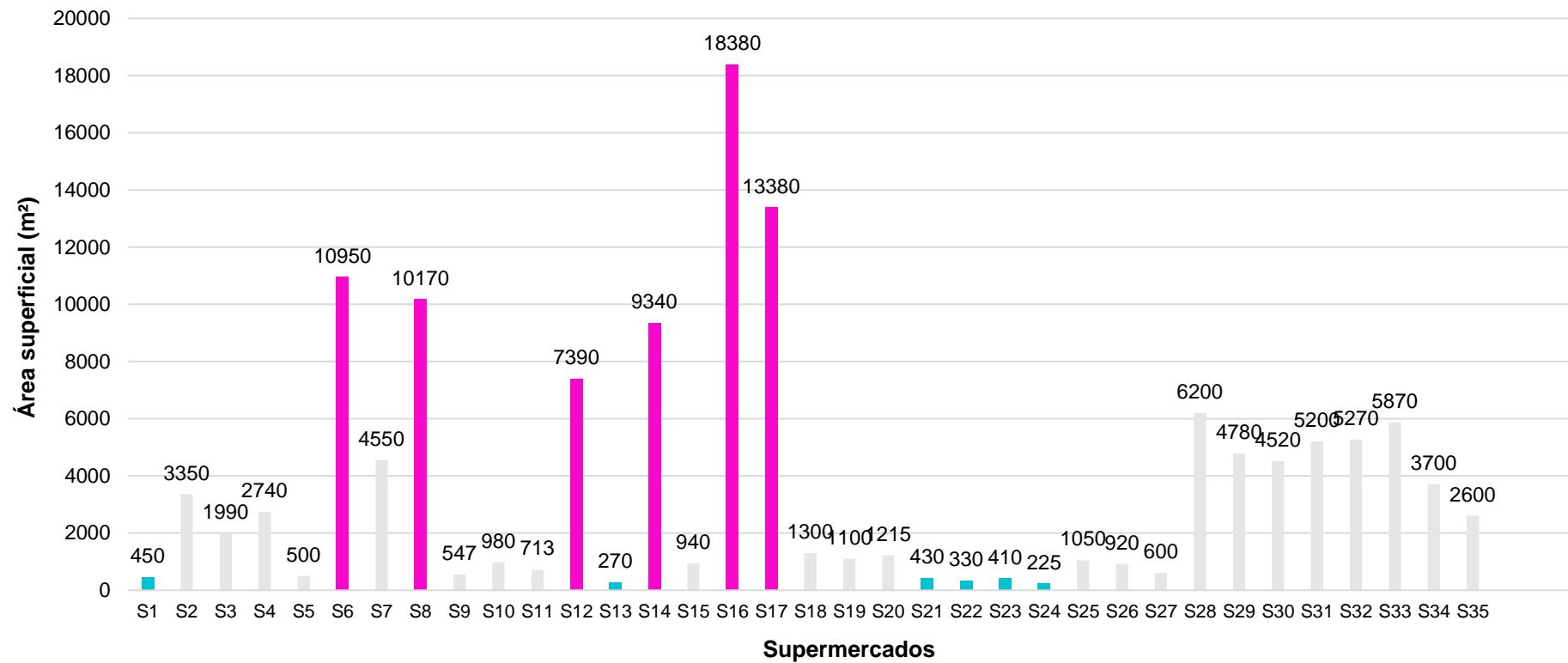
### 4.1 DETERMINAÇÃO DA GEOMETRIA DE ESTUDO

#### 4.1.1 *Levantamento de supermercados de Joinville*

A Figura 11 exibe os dados das áreas superficiais das edificações que operam como supermercados em Joinville. O valor médio foi calculado de duas maneiras: (i) através da média aritmética de todos os 35 empreendimentos levantados, resultando em uma média de 3.796 m<sup>2</sup>; e (ii) pela média aritmética após a exclusão dos seis maiores e menores empreendimentos, resultando em uma média de 2.636 m<sup>2</sup>.

A exclusão de alguns empreendimentos foi realizada devido à grande disparidade no tamanho das estruturas, que pode ser explicada pelo tipo de utilização das edificações. Algumas delas possuem outras lojas em operação dentro do mesmo espaço, funcionando como um shopping, o que aumenta significativamente a dimensão total da estrutura.

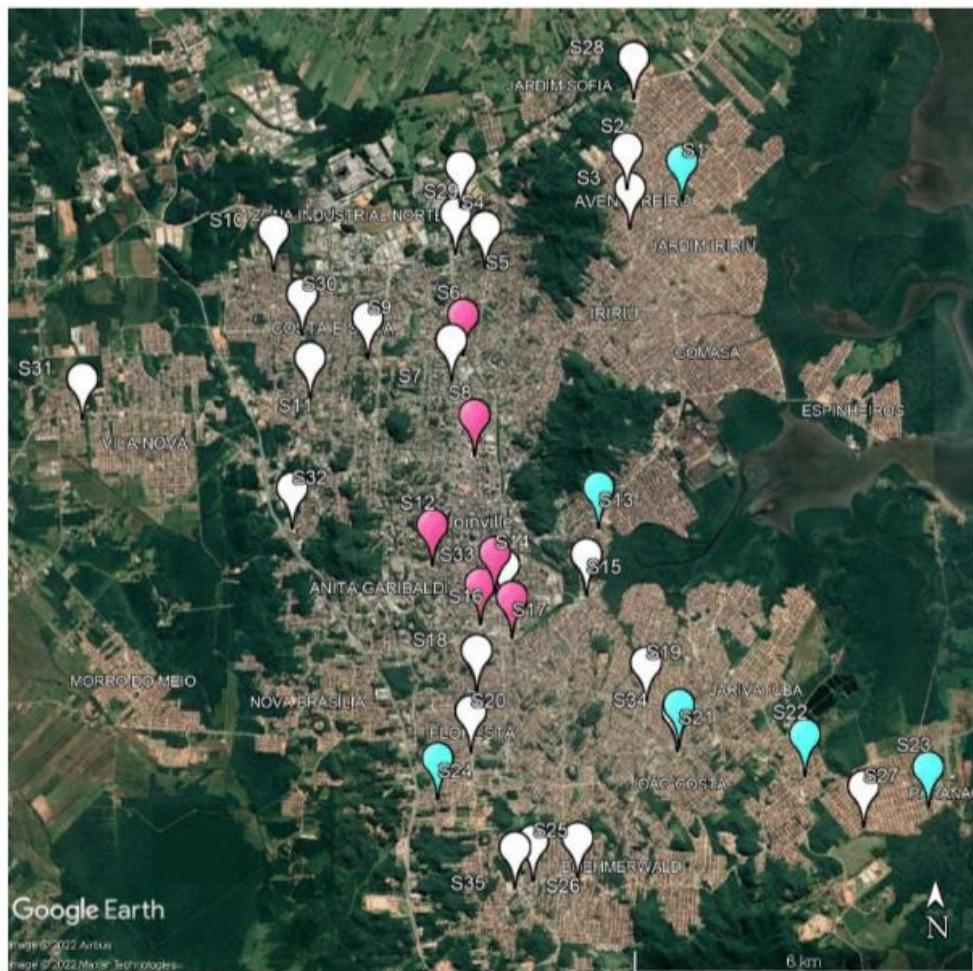
Figura 11 – Área superficial dos supermercados analisados



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Dessa forma, para minimizar o efeito de geometrias muito grandes ou muito pequenas (valores extremos), foram identificados os seis maiores e menores valores de áreas, destacados pelas cores magenta e ciano, respectivamente. As localizações das edificações utilizadas para os cálculos estão demonstradas na Figura 12.

Figura 12 - Localização supermercados em Joinville



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

## 4.2 GEOMETRIA REPRESENTATIVA DE ESTUDO

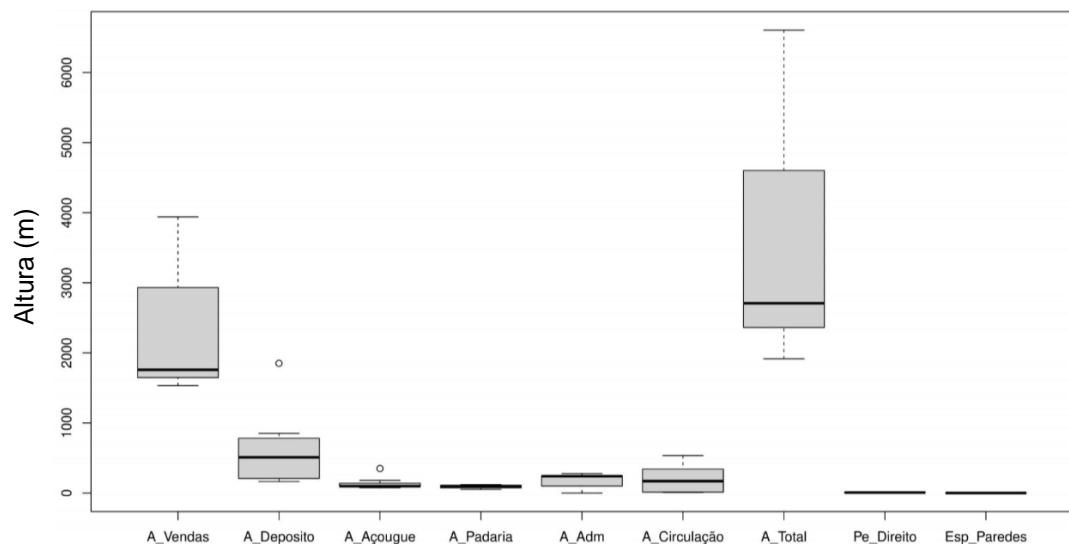
#### 4.2.1 Método de agrupamento hierárquico

O processamento dos dados contidos na matriz de entrada foi realizado utilizando o software *RStudio*, onde a matriz foi adicionada através de uma

tabela. O software *RStudio* possui diversas bibliotecas e algoritmos implementados para análise *cluster*. Inicialmente, foi realizada a construção de *boxplot* dos dados, sendo possível perceber de forma visual a existência de *outliers*, podendo influenciar os resultados das análises.

A Figura 13 exibe os *boxplots* referentes ao primeiro processamento dos dados, nos quais é possível identificar a presença de apenas dois *outliers*: (i) um relacionado à variável "A\_Açougue" e (ii) associado à variável "A\_Depósito". As demais variáveis apresentaram pouca variação, demonstrando um comportamento que facilita a execução da análise *cluster*.

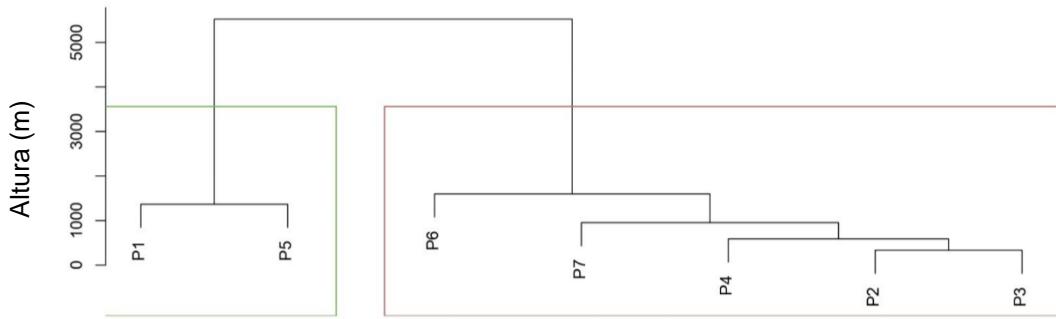
Figura 13 - Construção de *boxplots* dos dados de entrada



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na etapa seguinte, o agrupamento hierárquico foi conduzido, como mostrado na Figura 14. O processo resultou na formação de dois agrupamentos principais, representados pelas cores vermelha e verde, compreendendo respectivamente cinco e dois projetos.

Figura 14 - Dendrograma com os resultados da análise *cluster*



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O grupo composto pelas geometrias P1 e P5 (verde), conforme indicado pela Tabela 3, representou as maiores estruturas, caracterizando o agrupamento de supermercados com áreas totais mais extensas, ou seja, estabelecimentos de grande porte. Em contrapartida, o grupo formado pelas outras cinco estruturas demonstraram possuir áreas intermediárias, representando os supermercados de porte médio. O projeto do supermercado localizado no município de Joinville/SC (P7) faz parte deste último grupo.

Os dois pontos *outliers* identificados na Figura 13 pertenciam ao grupo formado pelas geometrias P1 e P5 (verde). Portanto, como esses dados não serão utilizados na formação da geometria de estudo, os pontos extremos não terão influência negativa na configuração da referida geometria.

#### 4.2.2 Definição da geometria de estudo

Para a determinação da geometria de estudo, foram selecionados apenas os dados pertencentes ao grupo de geometrias médias (vermelho), indicados pela Figura 14, visto que este é o grupo que inclui a edificação localizada no município de Joinville/SC. Além disso, foi o grupo com maior número de elementos, fato que melhora a análise estatística. O processamento dos dados ocorreu com o agrupamento vermelho, totalizando cinco projetos, como indicado na Tabela 8.

Tabela 8 - Processamento do agrupamento com cinco elementos

Variável de estudo	Maior	Menor	Mediana	Média
A_Vendas (m <sup>2</sup> )	2.000	1.533	1.650	1.717
A_Depósito (m <sup>2</sup> )	851	164	240	388
A_Açougue (m <sup>2</sup> )	181	75	97	109,3
A_Padaria (m <sup>2</sup> )	111	52	100	84,8
A_Adm (m <sup>2</sup> )	244	0	100	136,8
A_Circulação (m <sup>2</sup> )	260	9	15	92,8
A_Total (m <sup>2</sup> )	3.299	1915,5	2.418	2.529,1
Pé_Direito (m)	10	4,5	7	7,1
Esp_Paredes (m)	0,10	0,10	0,10	0,10

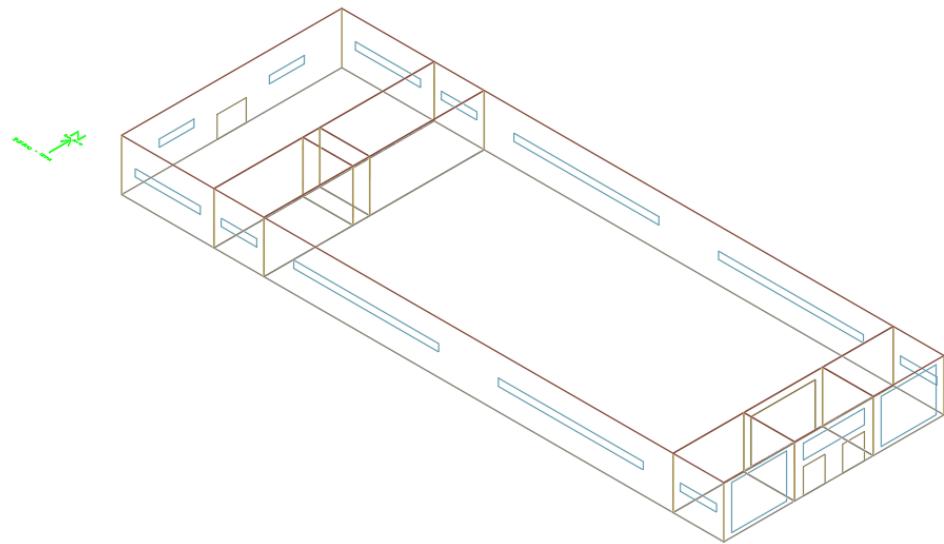
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

#### 4.3 SIMULAÇÕES PARAMÉTRICAS

Neste item, apresentam-se os resultados obtidos por meio do método de simulação, seguindo as diretrizes da INI-C para edificações de supermercados. Em seguida, são conduzidas análises dos dados alcançados, com foco na classificação da etiquetagem das edificações, com o objetivo de otimizar seu desempenho térmico e eficiência energética. Para realizar as simulações usando o *EnergyPlus*, a volumetria da edificação estudada foi criada no *software*, permitindo a posterior inclusão dos dados de entrada conforme os critérios estabelecidos pela INI-C.

Para a elaboração da geometria de referência, conforme mostrado na Figura 15, foram aplicados os parâmetros e limites estabelecidos no documento da INI-C, utilizando a tabela específica para geometrias associadas a supermercados. A conformidade da geometria foi garantida por meio da observância de critérios específicos, que incluíram áreas destinadas a aberturas tanto na face externa quanto na fachada da estrutura. Outros parâmetros considerados englobaram as horas de ocupação, os materiais e demais elementos especificados na norma vigente.

Figura 15 - Geometria de referência



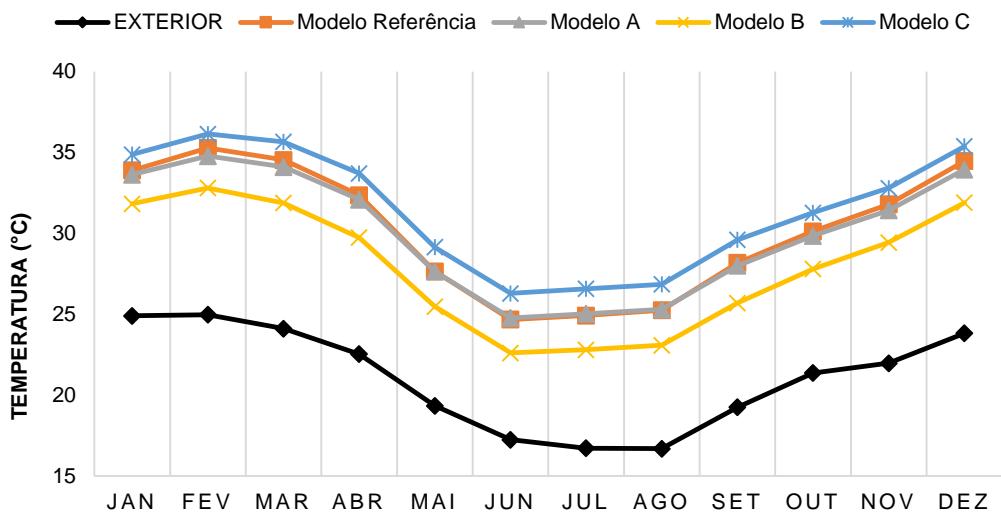
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

As áreas, a orientação solar e a altura do pé direito foram definidas conforme as especificações estabelecidas nas diretrizes da INI-C. A área total da geometria de referência é de 2.528,70 m<sup>2</sup>, com altura do pé direito de 7,10 m. O percentual da área de abertura da fachada é de 60% para a fachada principal e 10% para as demais áreas. A composição da parede inclui 2,5 cm de argamassa interna, 9 cm de bloco cerâmico e 2,5 cm de argamassa externa. Por fim, a cobertura é composta por telhas de fibrocimento, com uma câmara de ar superior a 5 cm e uma laje maciça de concreto com espessura de 10 cm.

#### 4.3.1 Cor da fachada

Os gráficos comparativos apresentam as estratégias adotadas e as diferenças no comportamento da edificação, variando as cores da parede externa, conforme a Figura 16.

Figura 16 - Gráfico comparativo entre as variações de temperatura para as diferentes cores das paredes externas



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Ao analisar o gráfico da Figura 16, nota-se que a temperatura média no exterior da geometria, representando a temperatura do município (linha preta), permaneceu variando em torno de 18 a 25 °C ao longo do ano. Por outro lado, as temperaturas no interior da geometria foram superiores a esse intervalo, mantendo-se cerca de 10 °C acima desse valor. Notavelmente, os valores mais elevados foram registrados para o Modelo C, que utiliza cores escuras em todas as paredes exteriores, evidenciando um impacto térmico mais pronunciado ao longo de todos os meses.

Em uma comparação direta, os valores do Modelo de Referência e do Modelo A, onde a cor Cinza BR foi utilizada externamente, demonstraram semelhanças entre si, mantendo valores intermediários quando comparados aos demais. O desempenho mais eficiente foi alcançado pela geometria do Modelo B, caracterizada pelo uso de cores claras.

Os principais indicadores de desempenho térmico das edificações, que comparam diferentes cores na superfície externa, estão apresentados na Tabela 9. Ao analisar os modelos, observa-se que as temperaturas máximas e mínimas mais elevadas no interior da zona térmica de área de vendas ocorreram no Modelo C, que representa a geometria com cores escuras. O Modelo B, que

utiliza a cor Branco externamente, apresentou as menores temperaturas, tanto mínimas quanto máximas.

**Tabela 9 - Comparativo das temperaturas (máxima e mínima), carga térmica (de aquecimento, resfriamento e total) e classificação da envoltória aos modelos A, B e C e o Modelo de Referência quanto às cores da parede externa**

	Modelo de Referência	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Temperatura máxima Área Vendas (°C)	41,9	41,2	38,5	43,2
Temperatura mínima Área Vendas (°C)	19,2	18,6	16,9	19,5
Carga térmica Aquecimento (kWh/ano)	2.149,8	1.845,1	2.574,6	2.201,8
Carga térmica Resfriamento (kWh/ano)	297.379,3	282.542,0	188.015,8	359.595,3
Carga térmica Total (kWh/ano)	299.529,0	284.387,1	190.590,3	361.797,1
Classificação envoltória	D	D	A	E

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

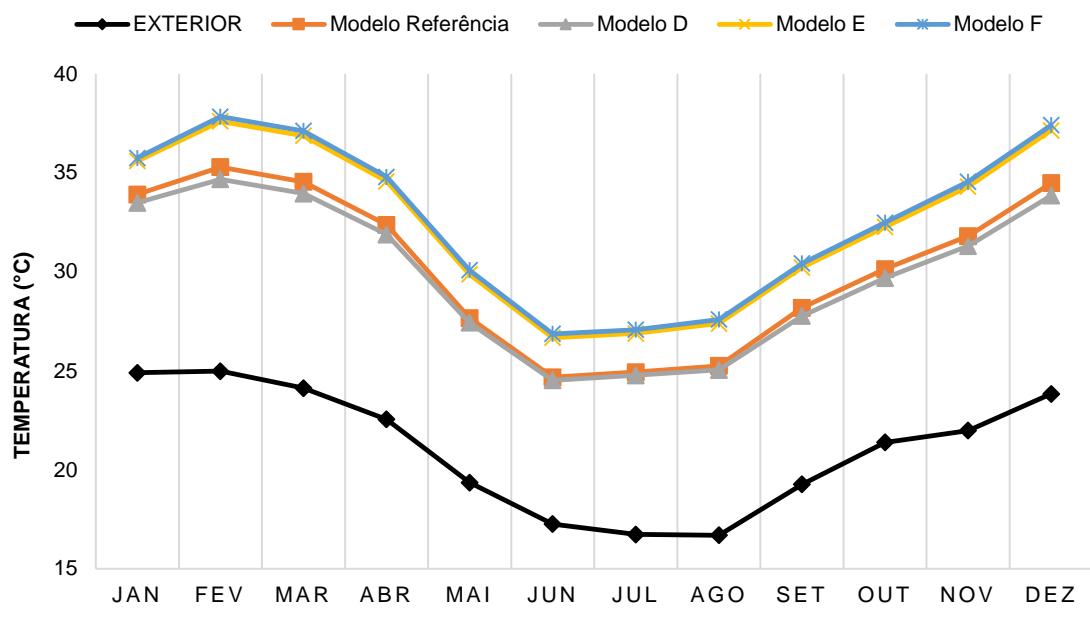
Nesse contexto, os valores das cargas térmicas para aquecimento foram mais elevados no Modelo B devido à menor temperatura mínima nos meses frios, exigindo maior consumo energético para aquecer a estrutura. No entanto, observou-se um menor consumo para resfriamento, aproximadamente 188.015 kWh/ano, para o modelo B (cor clara no exterior), em comparação com o Modelo C, que utiliza cores escuras, demandando cerca de 359.595 kWh/ano. O consumo total de energia térmica para manter a estrutura a 24 °C para o Modelo B foi de 190.590 kWh/ano.

Considerando o arquivo climático da localidade em que a geometria está sendo analisada, visto que os maiores gastos ocorrem no resfriamento, o Modelo B demonstrou ser a situação mais vantajosa. Apesar do maior consumo para aquecimento, a economia no resfriamento compensa esse gasto. Dessa forma, o consumo total de energia térmica para o Modelo B foi o menor de todos, resultando em uma classificação de desempenho A. O modelo com cor escura obteve uma classificação E, indicando um desempenho inferior ao Modelo de Referência, enquanto a classificação para o Modelo A foi D, mostrando um desempenho bastante semelhante ao do Modelo de Referência.

#### 4.3.2 Materiais construtivos das paredes

A Figura 17 exibe o gráfico comparativo das médias de temperatura para os modelos D, E e F, revelando um leve aumento no desempenho térmico da geometria ao utilizar paredes com maior espessura. No entanto, ao optar pelos modelos E ou F, que empregam, respectivamente, EPS e PUR, ambos com 10 cm de espessura, observou-se um desempenho inferior ao longo do ano. Isso é evidenciado pelo aumento da temperatura média em cerca de 2 °C, quando comparado com o Modelo de Referência.

Figura 17 - Gráfico comparativo entre as variações de temperatura para os diferentes materiais das paredes



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Uma possível explicação para esse fenômeno está relacionada ao fato de que, para esses modelos, o material isolante térmico foi aplicado apenas nas paredes exteriores, não na superfície dos telhados. Durante o dia, a temperatura da geometria interior aumenta devido ao ganho térmico da face superior (telhado), que não foi isolada termicamente. Como a temperatura externa é geralmente mais baixa do que a temperatura interna durante a operação, principalmente à noite, quando o sistema de refrigeração está desligado, não

ocorre perda térmica pelas paredes. Como resultado, a estrutura tende a reter calor, diminuindo assim o desempenho térmico.

Ao analisar os gráficos de temperatura e os valores máximos e mínimos ao longo do ano, observa-se que, em relação ao Modelo D, há uma redução tanto na temperatura máxima quanto na temperatura mínima da geometria. No entanto, quando são adicionados materiais isolantes térmicos nas paredes externas, ocorre um aumento na temperatura máxima em aproximadamente 2 °C em comparação com a geometria de referência, tanto para a temperatura máxima quanto para a temperatura mínima. Isso evidencia que a utilização exclusiva de materiais isolantes térmicos nas paredes, ao invés de melhorar, acaba por prejudicar o desempenho total da edificação.

Este material isolante térmico pode ter um desempenho mais eficaz quando adotado em conjunto com outras soluções térmicas. No que diz respeito à carga térmica total, a geometria de referência obteve valores em torno de 299.529 kWh ao longo do ano (Tabela 10), tanto para aquecimento quanto para resfriamento. O melhor desempenho de eficiência foi observado no Modelo D, que registrou uma redução desse valor para 256.674 kWh/ano. Nos modelos que utilizaram apenas o material isolante térmico, houve um aumento ou uma leve redução em relação à referência, mas ainda insuficiente para aprimorar a classificação global da envoltória, com valores em torno de 288.405 a 290.523 kWh/ano.

**Tabela 10 - Comparativo das temperaturas (máxima e mínima), carga térmica (de aquecimento, resfriamento e total) e classificação da envoltória aos modelos D, E e F e o Modelo de Referência quanto aos materiais construtivos das paredes**

	Modelo de Referência	Modelo D	Modelo E	Modelo F
Temperatura máxima Área Vendas (°C)	41,9	40,6	43,6	43,8
Temperatura mínima Área Vendas (°C)	19,2	18,8	21,7	21,9
Carga térmica Aquecimento (kWh/ano)	2.149,8	1.979,3	2.485,8	2.548,7
Carga térmica Resfriamento (kWh/ano)	297.379,3	254.695,2	285.919,7	287.974,4
Carga térmica Total (kWh/ano)	299.529,0	256.674,5	288.405,5	290.523,2
Classificação envoltória	D	C	D	D

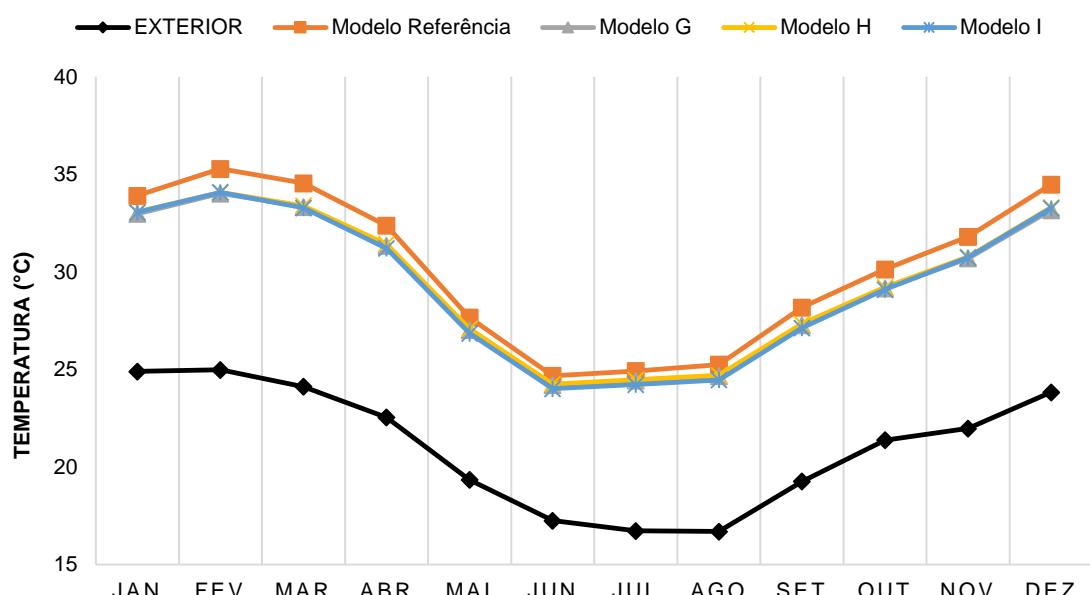
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Dessa forma, ao empregar apenas o isolante térmico nas paredes, foram alcançados valores de classificação D, e ao aumentar a espessura da parede sem alterar significativamente esses valores, obteve-se uma classificação C para a envoltória. Isso sugere que outras estratégias ou combinações de materiais podem ser mais eficazes para otimizar o desempenho térmico global da edificação.

#### 4.3.3 Elementos de sombreamento

Para os elementos de sombreamento, foram analisados o Modelo G, com marquise na fachada; o Modelo H, contendo brises em todo o perímetro e o Modelo I, com brises em toda a largura dos elementos transparentes. Na Figura 18, é interessante observar que houve uma redução na temperatura média no interior da edificação para todas as situações avaliadas. Vale ressaltar que, na geometria de referência, a quantidade de elementos transparentes na face frontal representa 60%, enquanto nas geometrias alternativas essa porcentagem é ajustada para 10%, alinhando-se à mesma proporção utilizada nas faces laterais.

Figura 18 - Gráfico comparativo entre as variações de temperatura para os diferentes elementos de sombreamento



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A modificação em si sugere uma melhoria no desempenho dos modelos em relação à geometria de referência. Contudo, ao analisar os gráficos de temperatura ao longo do ano nas três situações, observa-se uma notável semelhança, mantendo-se aproximadamente 1 °C abaixo da temperatura interna da geometria de referência. Apesar disso, a temperatura interna permanece cerca de 7 °C mais elevada em comparação com a temperatura externa ao longo do ano.

Esses resultados indicam que as estratégias de sombreamento e controle solar implementadas, incluindo a redução da quantidade de elementos transparentes na face frontal, contribuíram para uma melhoria na eficiência térmica da edificação, proporcionando uma redução na temperatura interna em relação à geometria de referência.

A Tabela 11 revela que as temperaturas máximas atingiram valores em torno de 40,2 °C, quando foram empregados os elementos de sombreamento nos três modelos analisados. Notavelmente, as temperaturas mínimas das estruturas foram inferiores em cerca de 1 °C, em comparação com o Modelo de Referência. O menor valor foi observado no Modelo I, que incorpora elementos de sombreamento posicionados precisamente nos elementos transparentes.

**Tabela 11 – Comparativo das temperaturas (máxima e mínima), carga térmica (de aquecimento, resfriamento e total) e classificação da envoltória aos modelos G, H e I e o Modelo de Referência quanto aos elementos de sombreamento**

	Modelo de Referência	Modelo G	Modelo H	Modelo I
Temperatura máxima Área Vendas (°C)	41,9	40,2	40,2	40,2
Temperatura mínima Área Vendas (°C)	19,2	18,2	18,3	18,1
Carga térmica Aquecimento (kWh/ano)	2.149,8	1.684,3	1.718,0	1.687,6
Carga térmica Resfriamento (kWh/ano)	297.379,3	247.455,2	250.684,2	245.593,6
Carga térmica Total (kWh/ano)	299.529,0	249.139,6	252.402,2	247.281,2
Classificação envoltória	D	C	C	C

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

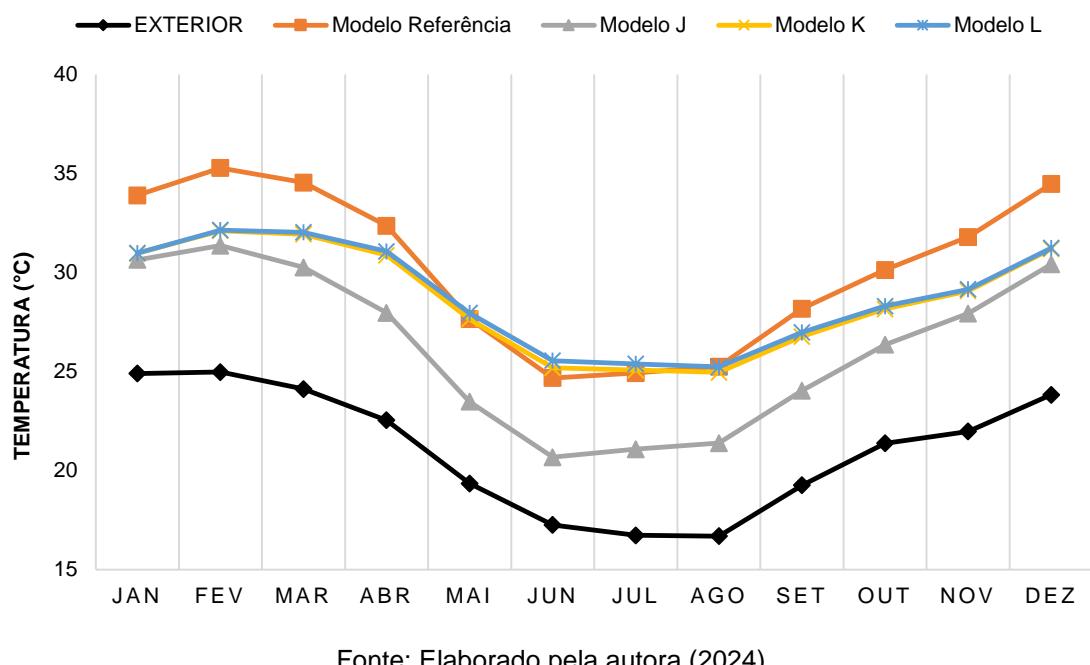
Ao considerar a carga térmica total da estrutura, observou-se um valor de 249.139 kWh/ano para o Modelo G, que utiliza elementos de sombreamento na

fachada da estrutura. O Modelo H, com elementos de sombreamento do tipo beiral ao longo do perímetro de toda a estrutura, apresentou uma carga térmica de 252.402 kWh/ano. Já o Modelo I, com elementos de sombreamento posicionados nas janelas da estrutura, registrou um valor de 247.455 kWh/ano.

#### 4.3.4 Tipos de telhado

Ao analisar o gráfico da Figura 19, que exibe as temperaturas médias ao longo de todos os meses do ano, notou-se que, nos meses de verão, as temperaturas nas estruturas com isolamento térmico foram inferiores aos valores de referência. No entanto, durante o inverno, as estruturas com isolamento térmico apresentaram valores percebidos bastante semelhantes ao Modelo de Referência.

Figura 19 - Gráfico comparativo entre as variações de temperatura para os diferentes tipos de telhados



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Ao desconsiderar o sistema de condicionamento de ar, observa-se que o Modelo J, que utiliza apenas telhas metálicas, apresenta a menor média de temperatura ao longo do ano. Essa constatação pode ser explicada pelo fato de

que, durante as noites, há uma maior condução térmica na face superior da geometria. A redução da temperatura externa facilita a perda térmica, resultando em uma temperatura média geral mais baixa quando não há um sistema de condicionamento de ar em operação. Por outro lado, o uso de isolamento térmico nas telhas torna essa troca de calor mais desafiadora, contribuindo para temperaturas mais elevadas no interior.

É crucial destacar que nos modelos em questão, o isolamento térmico é aplicado exclusivamente na cobertura, enquanto as paredes laterais são constituídas por concreto com 10 cm de espessura. Durante o dia, ocorre um ganho térmico na face lateral. Considerando que a temperatura externa é mais elevada, a temperatura interna diminui, resultando no acúmulo térmico na face exposta ao sol ao longo do dia. A escolha de aplicar isolamento apenas na face superior pode, portanto, criar um desequilíbrio na eficácia do isolamento térmico da geometria.

Comparando com a Tabela 12, é incontestável observar as temperaturas máximas e mínimas ao longo do ano para os três modelos analisados. Com a utilização de elementos de isolamento térmico, ocorre uma redução na temperatura máxima da geometria, diminuindo de cerca de 42 °C para aproximadamente 35 °C, ao empregar o material isolante térmico de alta eficiência. Quanto à temperatura mínima, ao utilizar o mesmo elemento de isolamento térmico, há um aumento de aproximadamente 1 °C.

**Tabela 12 – Comparativo das temperaturas (máxima e mínima), carga térmica (de aquecimento, resfriamento e total) e classificação da envoltória aos modelos J, K e L e o Modelo de Referência quanto aos tipos de telhado**

	Modelo de Referência	Modelo J	Modelo K	Modelo L
Temperatura máxima Área Vendas (°C)	41,9	40,3	35,8	35,6
Temperatura mínima Área Vendas (°C)	19,2	13,0	20,5	20,9
Carga térmica Aquecimento (kWh/ano)	2.149,8	11.797,8	1.299,6	1.334,5
Carga térmica Resfriamento (kWh/ano)	297.379,3	215.466,0	169.115,0	169.951,2
Carga térmica Total (kWh/ano)	299.529,0	227.263,8	170.414,6	171.285,7
Classificação envoltória	D	B	A	A

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Ao analisar a carga térmica geral da edificação, os dados indicam que a utilização de telhas metálicas resulta em uma redução significativa no consumo energético. Para o Modelo J, que adota exclusivamente telhas metálicas, a redução é de 299.529 kWh/ano para 227.263 kWh/ano. Ao considerar materiais com isolamento térmico, os resultados são de 170.414 kWh/ano para o Modelo K (isolamento EPS) e 171.285 kWh/ano para o Modelo L (isolamento PUR).

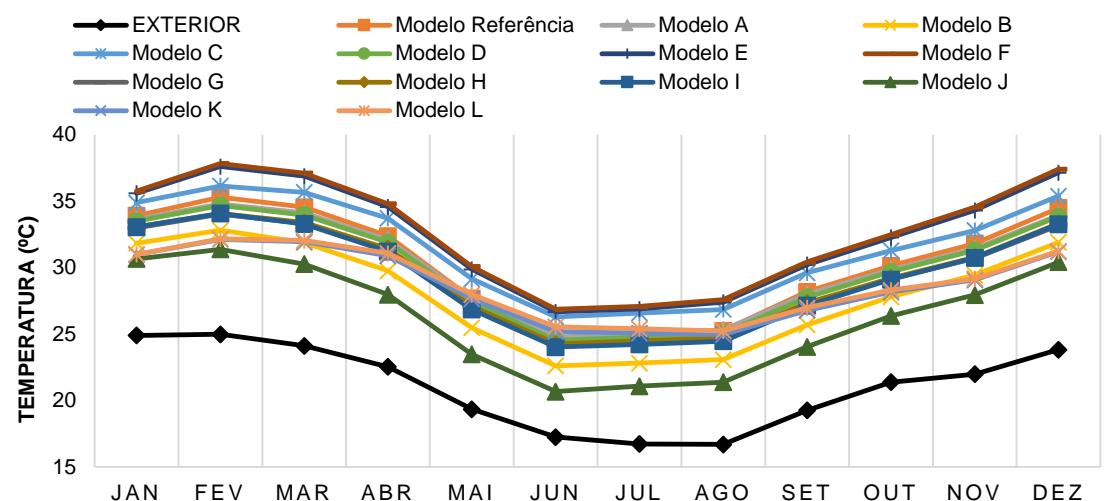
Isso destaca que a incorporação de isolamento térmico pode melhorar o desempenho térmico da edificação, mesmo quando se utiliza o condicionamento de ar. Entretanto, ao analisar edificações sem ar-condicionado, a aplicação de isolamento térmico pode resultar em uma diminuição do conforto interior ao longo do uso, por conta do aquecimento do ambiente. Por fim, a envoltória obteve classificação B para o Modelo J, que utiliza apenas telhas metálicas, enquanto para os dois modelos com isolamento térmico analisados, a classificação foi A.

De acordo com Tambosi (2022), através do estudo realizado, foi possível verificar que a cobertura de uma edificação é o elemento da envoltória que mais influencia na incidência de calor no ambiente interno, especialmente devido às suas plantas serem, predominantemente, áreas horizontais e com grandes dimensões.

#### **4.3.5 Análise geral dos modelos**

Ao utilizar o modelo de simulação sem ar-condicionado, é possível verificar a variação de temperatura ao longo de todo o ano para todos os modelos. A Figura 20 apresenta as temperaturas internas da estrutura durante o ano, abrangendo todos os modelos analisados. Além disso, inclui as temperaturas externas, destacando a temperatura do Modelo de Referência. Para facilitar a análise, o Quadro 5 traz as especificações de cada modelo utilizado neste trabalho.

Figura 20 - Gráfico comparativo entre as variações de temperatura média para todos os modelos



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Quadro 5 - Resumo dos modelos utilizados no projeto conforme o parâmetro analisado

Modelo	Parâmetro	Descrição
Modelo A	Cor da fachada	Cor Cinza BR
Modelo B		Cor Branco
Modelo C		Cor Preto
Modelo D	Material da parede	Parede de concreto 20 cm
Modelo E		Parede de concreto 10 cm + 10 cm isolamento EPS
Modelo F		Parede de concreto 10 cm + 10 cm isolamento PUR
Modelo G	Sombreamento	Marquise frontal 5 cm
Modelo H		Brises de 1 m em todo o perímetro
Modelo I		Brises de 1 m em toda largura dos elementos transparentes
Modelo J	Material da cobertura	Telha metálica em aço
Modelo K		Telha metálica em aço + 10 cm isolamento EPS
Modelo L		Telha metálica em aço + 10 cm isolamento PUR

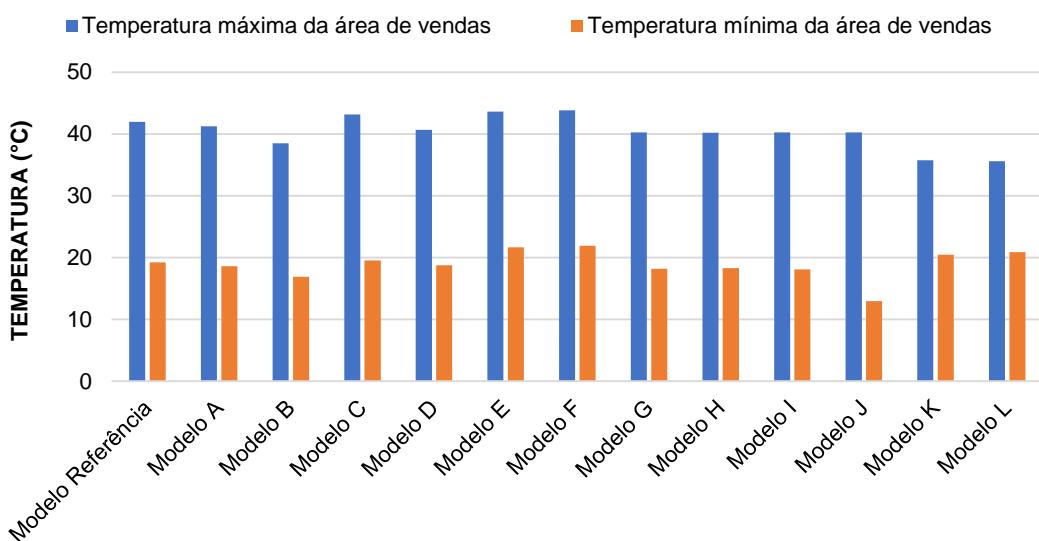
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Observa-se que as temperaturas internas das estruturas foram superiores às temperaturas externas. Notavelmente, modelos como o J e o B apresentaram os menores valores de temperatura. Além disso, no gráfico, é evidente a variação

térmica no exterior, destacando que nos meses quentes, janeiro, fevereiro, novembro e dezembro, as temperaturas externas são mais elevadas do que nos meses de inverno.

Essa tendência foi observada em todos os modelos, com temperaturas consistentemente mais elevadas nos meses mais quentes em comparação aos meses frios. Outra análise relevante pode ser feita ao observar a Figura 21, que apresenta as temperaturas máximas e mínimas para cada modelo ao longo do ano.

Figura 21 - Gráfico de temperaturas máximas e mínimas para todos os modelos ao longo do ano



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Dessa forma, torna-se possível observar as amplitudes térmicas, sendo evidente que o Modelo J apresentou a maior amplitude térmica, registrando uma temperatura máxima em torno de 40 °C e uma temperatura mínima de aproximadamente 12 °C, valores superiores aos dos demais modelos. Geralmente, busca-se uma amplitude térmica mais baixa, desde que permaneça dentro da zona de conforto.

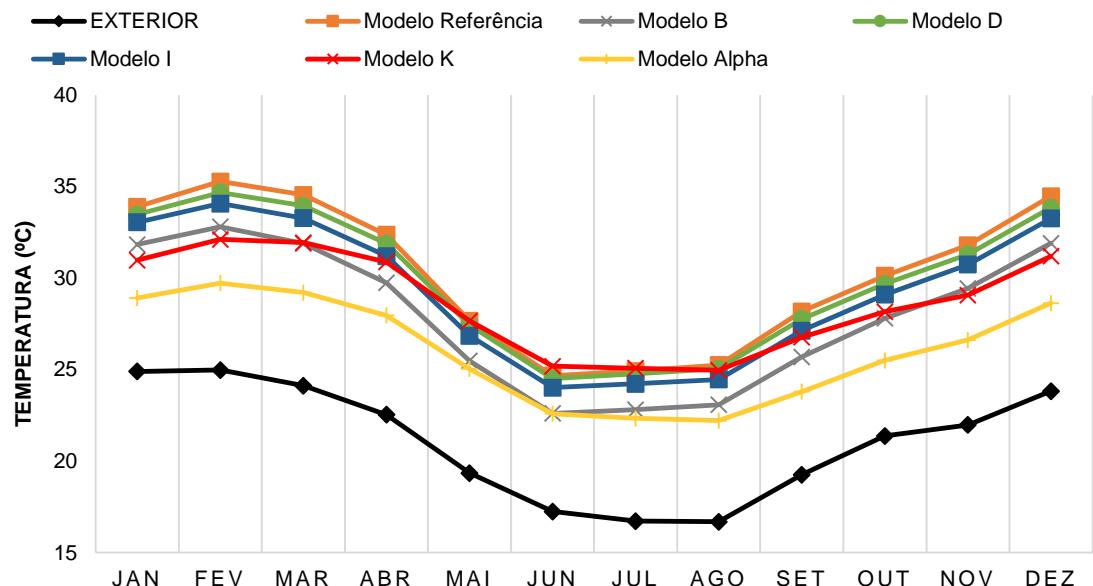
Uma baixa amplitude térmica fora da zona de conforto demanda um elevado consumo energético para ajustar o ambiente interno. Assim, é importante ressaltar que apenas esse gráfico não é suficiente para determinar o melhor modelo, mas serve como um indicativo.

#### 4.3.6 Modelo Alpha

O modelo *Alpha* foi desenvolvido ao reunir os melhores resultados de cada grupo de modelos. O objetivo foi encontrar a melhor combinação de parâmetros para minimizar o consumo energético da edificação e, consequentemente, maximizar o valor da etiqueta de eficiência energética. Os melhores modelos observados foram o Modelo B, com a cor da fachada Branco; o Modelo D, com parede de concreto de 20 cm; Modelo I, com brises de 1 m em toda largura dos elementos transparentes e; o modelo K, com telha metálica em aço + 10 cm de isolamento EPS.

Analizando a Figura 22, é possível observar a variação de temperatura no interior da geometria de estudo, onde todos os valores internos são superiores à temperatura externa, expressa em graus Celsius.

Figura 22 - Gráfico comparativo entre as variações de temperatura média para os melhores modelos



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Entretanto, é relevante notar que o modelo que mais se aproximou da temperatura exterior foi justamente o Modelo *Alpha*, permanecendo cerca de 3 °C acima da temperatura externa. Durante a análise do inverno, por exemplo, foi alcançada uma média de 24 °C, coincidindo exatamente com a temperatura

desejada pelo sistema de refrigeração, conforme especificado pela INI-C para supermercados.

Esse resultado é particularmente significativo ao considerarmos a perspectiva da eficiência energética no sistema de climatização, uma vez que atingiu a temperatura-alvo estipulada pela normativa. Isso representa uma economia energética notável. O Modelo *Alpha* apresentou uma variação térmica mais reduzida, marcada por uma temperatura máxima inferior e uma temperatura mínima superior ao longo do ano, conforme indicado na Tabela 13. Essa tendência pode ser atribuída à presença mais significativa de superfícies isolantes térmicas no modelo, contribuindo para uma regulação térmica mais eficiente.

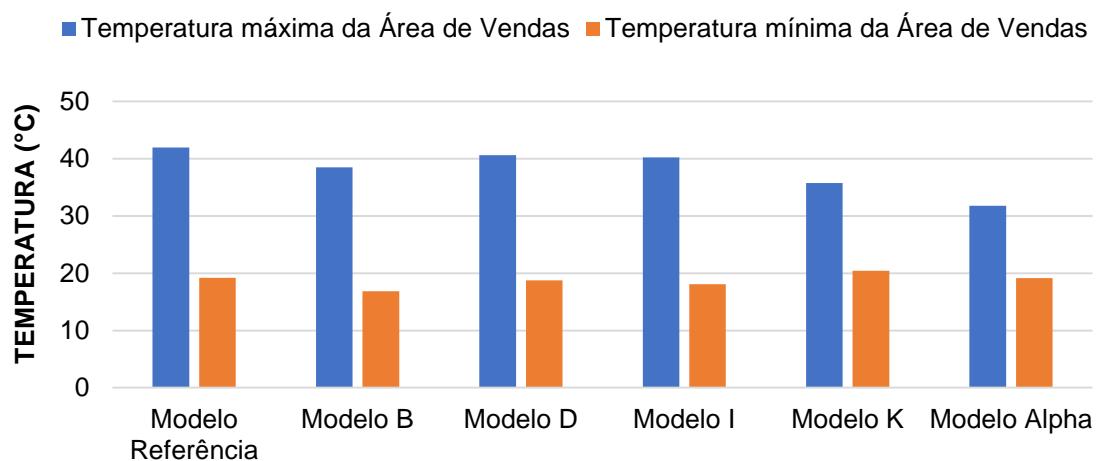
Tabela 13 - Resultados médios comparativos de temperaturas (máxima e mínima), carga térmica (de aquecimento, resfriamento e total) e classificação da envoltória dos melhores modelos, Modelo de Referência e Modelo *Alpha*

	Modelo de Referência	Modelo B	Modelo D	Modelo I	Modelo K	Modelo <i>Alpha</i>
Temperatura máxima Área Vendas (°C)	41,9	38,5	40,6	40,2	35,8	31,8
Temperatura mínima Área Vendas (°C)	19,2	16,9	18,8	18,1	20,5	19,1
Carga térmica Aquecimento (kWh/ano)	2.149,8	2.574,6	1.979,3	1.687,6	1.299,6	760,4
Carga térmica Resfriamento (kWh/ano)	297.379,3	188.015,8	254.695,2	245.593,6	169.115,0	74.767,8
Carga térmica Total (kWh/ano)	299.529,0	190.590,3	256.674,5	247.281,2	170.414,6	75.528,2
Classificação envoltória	D	A	C	C	A	A

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Assim, a estrutura sofre uma influência menor da incidência solar direta, resultando em uma temperatura máxima mais baixa. Da mesma forma, durante a noite, quando a temperatura externa é mais amena, ocorre uma redução nas trocas térmicas, resultando em um valor mais alto para a temperatura mínima no interior da construção. A Figura 23, de maneira análoga, ilustra as amplitudes térmicas ao longo de todo o ano para os modelos e o Quadro 6 reúne uma descrição para estes.

Figura 23 - Comparativo das amplitudes de temperaturas



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Quadro 6 - Descrição dos melhores modelos para composição do Modelo *Alpha*

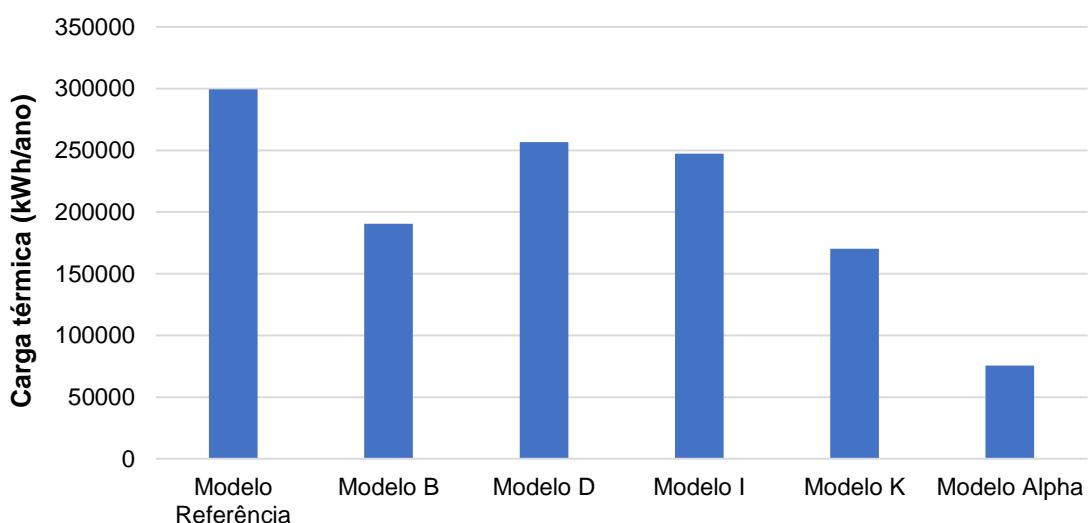
Modelo	Parâmetro	Descrição
Modelo B	Cor da fachada	Cor Branco
Modelo D	Material da parede	Parede de concreto 20 cm
Modelo I	Sombreamento	Brises de 1 m em toda largura dos elementos transparentes
Modelo K	Material da cobertura	Telha metálica em aço + 10 cm isolamento EPS

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Foi observado que o Modelo *Alpha* alcançou a menor amplitude térmica, mantendo a segunda maior temperatura mínima e a menor temperatura máxima.

Portanto, por manter-se dentro da zona de conforto, situada entre aproximadamente 19 e 32 °C, esse desempenho foi extraordinário em comparação com os demais modelos. A Figura 24 demonstra o consumo energético total, que é a soma do gasto para refrigeração e para aquecimento da estrutura ao longo do ano.

Figura 24 - Comparativo de carga térmica total anual da edificação



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

É evidente que o Modelo *Alpha*, que combina os melhores desempenhos, alcançou o menor consumo energético conforme o esperado, registrando cerca de 75.000 kWh/ano. Isso indica que ao longo do ano, será necessário um gasto significativamente menor com energia elétrica para a edificação. Em comparação com os demais modelos, destaca-se que o modelo com apenas uma modificação, anteriormente melhor classificado (Modelo K), apresentava um consumo de aproximadamente 170.414,6 kWh/ano. Em resumo, o Modelo *Alpha* gastou menos da metade do consumo do então melhor modelo.

Ao analisar a etiquetagem final, conforme o esperado, é evidente que o Modelo *Alpha* alcançou a classe A, assim como os modelos B e K. Dessa forma, observa-se que ao combinar mais de uma modificação na estrutura, o desempenho também foi aprimorado, indicando a possibilidade de melhorias adicionais no Modelo *Alpha*.

As simulações paramétricas tiveram uma grande influência nos resultados e na classificação da edificação, destacando a importância da substituição de materiais para alcançar classificações de eficiência mais elevadas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A determinação dos fechamentos exerce uma influência direta no consumo de energia elétrica de uma edificação. Em supermercados de estrutura pré-fabricada em concreto armado, caracterizados por amplos vãos em sua configuração horizontal, a eficácia térmica desempenha um papel crucial em sua utilização, especialmente devido à alta exposição solar. Assim, a adoção de soluções mais eficientes é de suma importância para garantir o conforto dos usuários.

Dessa forma, foi possível desenvolver um modelo representativo para análise, considerando o clima da cidade de Joinville/SC. Utilizando o método de simulação, conforme a Instrução Normativa do Inmetro para Edificações Comerciais (INI-C), foram realizadas simulações paramétricas com o emprego de diferentes materiais de cobertura e fechamento de paredes, intercalando os objetos utilizados.

Considerando o arquivo climático da localidade em que a geometria está sendo analisada, a variação das cores da estrutura foi realizada, os maiores gastos ocorrem no resfriamento. Nesse cenário, o Modelo B (cor Branco) demonstrou ser a situação mais vantajosa. Apesar do maior consumo para aquecimento, a economia no resfriamento compensa esse gasto, tornando-o mais eficiente dentre as três opções (cinza, branco e preto).

Como resultado, o consumo total de energia térmica para o Modelo B (cor Branco) revelou-se o mais baixo entre todos, conferindo-lhe uma classificação de desempenho A. A coloração escura do modelo resultou em uma classificação E, indicando um desempenho inferior ao Modelo de Referência, ao passo que o Modelo A (Cinza BR) recebeu uma classificação D, denotando um desempenho comparativamente próximo ao do Modelo de Referência. Essa análise ressalta a eficácia da estratégia implementada no Modelo B no que concerne à eficiência energética na operação térmica da edificação.

Ao empregar apenas o isolante térmico nas paredes, obteve-se valores de classificação D para os modelos E e F. Ao aumentar a espessura da parede sem alterar significativamente esses valores, obteve-se uma classificação C para a envoltória no Modelo D. Isso sugere que outras estratégias ou combinações

de materiais podem ser mais eficazes para otimizar o desempenho térmico geral da edificação. O resultado ressalta a necessidade de explorar diferentes abordagens para alcançar melhorias substanciais na eficiência energética e desempenho térmico.

O estudo das melhorias na envoltória foi realizado mediante a inclusão de elementos de sombreamento, os quais demonstraram ser benéficos ao reduzir a carga térmica da edificação e aumentar o nível de classificação para atingir a etiqueta. Essa análise destaca a eficácia das estratégias de sombreamento na melhoria do desempenho térmico da edificação. Mesmo que as diferenças nas classificações sejam relativamente pequenas, o Modelo I, com brises de 1 m em toda largura dos elementos transparentes, foi o que apresentou o melhor comportamento térmico.

Isso ressalta a importância das estratégias de sombreamento como uma abordagem efetiva para aprimorar a eficiência energética e o desempenho térmico da edificação. As aplicações de isolamento térmico na cobertura obtiveram resultados promissores. Para os dois modelos com isolamento térmico analisados, a classificação foi A. Já para o Modelo J, que utiliza apenas telhas metálicas, a envoltória obteve a classificação B. Esses resultados indicam que o isolamento térmico na cobertura é uma estratégia eficaz para alcançar uma classificação elevada de eficiência energética e desempenho térmico na edificação.

As estratégias mais adequadas para a melhoria da eficiência energética da envoltória de edificações de varejo, como supermercados, incluem a utilização de uma tonalidade clara. Além disso, aumentar a espessura da parede sem empregar isolante térmico, incorporar brises com 1 m de comprimento ao longo da largura dos elementos transparentes da geometria e utilizar isolamento térmico na cobertura, demonstraram melhorias significativas no desempenho térmico. Esses resultados enfatizam a importância do isolamento térmico na busca por eficiência energética e desempenho térmico geral da edificação.

Por fim, o Modelo *Alpha* atingiu o seu objetivo ao reunir os melhores resultados de cada grupo de modelos. Essa verificação foi realizada a partir das análises de eficiência energética, por meio do método de simulação, para

classificar o nível de etiquetagem. Dessa forma, foram constatadas melhorias na otimização do desempenho térmico e da eficiência energética da edificação.

## 6 RECOMENDAÇÕES

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Efetuar a análise levando em conta todos os parâmetros da edificação e não apenas a envoltória, classificando a construção com todos os sistemas avaliados de forma conjunta perante aINI-C;
- Verificar o custo de implantação das parametrizações simuladas nesta pesquisa;
- Analisar o desempenho térmico e energético de edificações em diferentes regiões climáticas de Santa Catarina e propor soluções específicas para cada localidade.

## REFERÊNCIAS

ABANDA, F.H.; BYERS, L. An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling). **Energy**, [s.l.], v. 97, p. 517-527, fev. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.135>.

ABNT. **ABNT NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT. **ABNT NBR 15575-1: Edificações habitacionais — Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ANGELIN, A. F. **Concreto leve estrutural: Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

BOUDHAIM, M. **Optical and thermal performance of complex fenestration systems in the context of building information modelling**. 2018. Tese (Doutorado) - Strasbourg, 2018.

BRASIL. **Portaria nº 42, de 24 de fevereiro de 2021**. Aprova a instrução normativa INMETRO para a classificação de eficiência energética de edificações comerciais, de serviços e públicas (INI-C) que aperfeiçoa os requisitos técnicos da qualidade para o nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos (RTQ-C), especificando os critérios e os métodos para a classificação de edificações comerciais, de serviços e públicas quanto à sua eficiência energética. Ministério da Economia. Brasília: DOU, 2021.

B'IROL, K. Ö. **Design and analysis of energy saving buildings using the software EnergyPlus**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Middle East Technical University, 2012.

CARLO, J. C. **Desenvolvimento de metodologia de avaliação de eficiência energética do envoltório de edificações não-residenciais**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios: parte 1. **Ambiente Construído**, [s.l.], v. 10, n. 2, p. 7-26, jun. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212010000200001>.

CB3E. **Proposta de método para a avaliação da eficiência energética com base em energia primária de edificações comerciais, de serviços e públicas**. 2017. Disponível em:

[https://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Nova%20proposta%20de%20m%C3%A9odo\\_texto%20completo\\_comercial\\_2.pdf](https://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Nova%20proposta%20de%20m%C3%A9odo_texto%20completo_comercial_2.pdf). Acesso em: 27 jun. 2022.

COMIRAN, S. **Conforto e desempenho térmico em hospitais**: estudo de caso na área de internação do hospital universitário de Santa Maria/RS. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

CRAWLEY, D. B. *et al.* EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 33, n. 4, p. 319-331, abr. 2001. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-7788\(00\)00114-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-7788(00)00114-6).

DESTRO, C. M. G. **Análise do desempenho térmico das Unidades Básicas de Saúde do município de São Bento do Sul**: aplicação da nova proposta brasileira de etiquetagem de edificações para a envoltória. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2019.

EDIFICA, PBE. **Conhecendo a Etiqueta PBE Edifica**. 2022. Disponível em: <http://pbeedifica.com.br/conhecendo-pbe-edifica>. Acesso em: 27 jun. 2022.

ENERGYPLUS. **Energyplus version 22.1.0 documentation**. U.S. Department of Energy, 2022.

FERNANDES, L. O. **A influência do sombreamento do entorno na etiqueta de eficiência energética de edifício comercial**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

FERREIRA, C. C.; SOUZA, H. A. de. Utilização de arquivos climáticos para a análise das condições de conforto térmico adaptativo em viçosa. *In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 18. 2020. Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1–8.

FONSECA, I. C. L. *et al.* Arquitetura moderna e conforto ambiental nos trópicos—diretrizes aplicáveis a casas de Lucio Costa na Gávea, Rio de Janeiro. *In: SEMINÁRIO DOCOMOMO*, 8. 2009. **Anais** [...]. Rio de Janeiro, 2009.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**: arquitetura e urbanismo. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GAO, X.; MALKAWI, A. A new methodology for building energy performance benchmarking: an approach based on intelligent clustering algorithm. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 84, p. 607-616, dez. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.030>.

GARCIA, J. **Análise do desempenho termoenergético da envoltória em habitações de interesse social de Joinville/SC**. 2020. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Civil) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2020.

**GRUNBERG, P. R. M. Avaliação das estratégias bioclimáticas de projeto para clima quente e úmido através de simulação: estudo de caso de edificação unifamiliar em Joinville/SC.** 2014. 184f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

**GUARDA, E. L. A. da et al.** Estratégias Construtivas Para Adequação da Envoltória de uma Habitação de Interesse Social às Zonas Bioclimáticas Mato-Grossenses. **E&S Engineering And Science**, [s.l.], v. 7, n. 1, p. 45-57, abr. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.18607/es201876138>.

**HAIR, J. F. et al.** **Análise multivariada de dados.** [s.l.]: Bookman editora, 2009.

**HARISH, V. S. K. V.; KUMAR, A.** A review on modeling and simulation of building energy systems. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 56, p. 1272-1292, abr. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.040>.

**HUDLER, F.** **Elaboração de modelo de referência para edificações geminadas para fins de análise de desempenho energético.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2020.

**INMETRO.INI Comercial:** Instrução Normativa do Inmetro para Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas. Brasília, 2022. Disponível em: [https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/INI-C\\_Portaria\\_309\\_de\\_2022\\_COM%20CAPA.pdf](https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/INI-C_Portaria_309_de_2022_COM%20CAPA.pdf). Acesso em: 22 nov. 2023.

**INMETRO. Requisitos de avaliação da conformidade para eficiência energética de edificações.** Brasília, 2013. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/rtac001961.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2023.

**LAMBERTS, R.; CLETO, L. T.** Certificação de sistemas PBE EDIFICA. **Seminário Programa Brasileiro De Etiquetagem em Eficiência Energética para Refrigeração e Ar-Condicionado**, v. 1, 2018.

**LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.** **Eficiência energética na arquitetura.** 3. ed. São Paulo: PW, 2014.

**LAMBERTS, R. et al.** **Desempenho térmico de edificações.** Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

**LAWRIE, L. K.; CRAWLEY, D. B.** **Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx).** 2019. Disponível em: <http://climate.onebuilding.org>. Acesso em: 10 nov. 2023.

LOPES, F. da S. D. **Simulação de consumo energético e conforto térmico para edifício de escritórios em Teresina/PI com o uso de estratégias bioclimáticas passivas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

LUCAS, V. S. **Construção sustentável**: sistema de avaliação e certificação. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

MAILE, T.; FISCHER, M.; BAZJANAC, V. Building energy performance simulation tools-a life-cycle and interoperable perspective. **Center for Integrated Facility Engineering (CIFE) Working Paper**, Stanford, v. 107, p. 1–49, 2007.

MENDES, T. B. **Desempenho térmico nas residências modernas de Joinville**: análise dos recursos construtivos e das envoltórias pelo RTQ-R. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2018.

MINGOTI, S. A. Análise de dados através de métodos estatística multivariada: uma abordagem aplicada. *In: Análise de dados através de métodos estatística multivariada: uma abordagem aplicada*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. 295p.

OLIVEIRA, C. C. de; RUPP, R. F.; GHISI, E. Influence of environmental variables on thermal comfort and air quality perception in office buildings in the humid subtropical climate zone of Brazil. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 243, p. 110982-110994, jul. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110982>.

OLIVEIRA, P. A. de; LUNARDI, D. G. Influência da envoltória no desempenho termoenergético de edificações institucionais no semiárido. **Parc Pesquisa em Arquitetura e Construção**, [s.l.], v. 9, n. 4, p. 276-289, dez. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v9i4.8651048>.

OZALP, C. *et al.* Evaluation of a sample building with different type building elements in an energetic and environmental perspective. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 115, p. 109386-109401, nov. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2019.109386>.

PEROBELLI, F. S.; OLIVEIRA, C. C. C. de. Energy development potential: an analysis of brazil. **Energy Policy**, [s.l.], v. 59, p. 683-701, ago. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.023>.

PETERS, T. **Predictive Modeling of Automated Building Facade Elements to Attain Thermal Comfort in Passively Conditioned Buildings in Different Climates**. 2019. Tese (Doutorado) - University of Massachusetts Amherst, 2019.

PORTO, J. da S. **Desempenho termoenergético e ótico da janela inteligente por simulação computacional**. 2019. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) — Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

PROCELINFO. **PROCEL EDIFICA**: Eficiência Energética nas Edificações. 2022a. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMIDC46E0FFDBD124A0197D2587926254722LUMISADMIN1PTBRIE.htm>. Acesso em: 27 jun. 2022.

PROCELINFO. **Selo Procel Edificações**. 2022b. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={8E03DCDE-FAE6-470C-90CB-922E4DD0542C}>. Acesso em: 10 set. 2022.

ROSA, A. S. da. **Determinação de modelos de referência de habitações populares unifamiliares para Florianópolis através de análise de agrupamento**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

ROSA, A. S. da. **Análise de agrupamentos aplicada à obtenção de modelos de referência para estudos de desempenho térmico de edificações**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

ROSIN, S. **Reduced Order Modeling for Virtual Building Commissioning**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Boise State University, 2018.

SANTAMOURIS, M. et al. Using intelligent clustering techniques to classify the energy performance of school buildings. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 39, n. 1, p. 45-51, jan. 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.04.018>.

SCHELLER, C. et al. **Análise de arquivos climáticos para a simulação do desempenho energético de edificações**. Arquivos climáticos, Florianópolis, v. 5, n. 3.1, p. 1-217, 2015.

SORGATO, M. J. **A influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SOUSA, A. M.; FIGUEIREDO, K. V. Avaliações de desempenho na Era BIM e os desafios da requalificação energética de edifícios. **Boletim do Gerenciamento**, [s.l.], v. 8, n. 8, p. 10-22, ago. 2019.

SOUZA, L. S. de. **Análise da eficiência energética da envoltória das Unidades Básicas de Saúde de Joinville por meio da etiquetagem brasileira**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2019.

TAMBOSI, R. G. Desempenho térmico das coberturas das edificações industriais de Joinville. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2022.

TONDELO, P. G.; BARTH, F. Análise térmica simplificada da envoltória segundo as normas NBR15220 e NBR15575: estudo de caso. **Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**, [s.l.], v. 14, p. 828–837, 2017.

TONDO, G. H. **Influência das estratégias bioclimáticas no desempenho térmico em edifícios escolares**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2017.

TZOULIS, A. **Performance assessment of building energy modelling programs and control optimization of thermally activated building systems**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Delft University of Technology, 2014.

VERSAGE, R. de S. **Metamodelo para estimar a carga térmica de edificações condicionadas artificialmente**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.



## Assinaturas do documento



Código para verificação: **CL7W721M**

Este documento foi assinado digitalmente pelos seguintes signatários nas datas indicadas:

 **ANA MIRTHERS HACKENBERG** (CPF: 234.XXX.329-XX) em 03/04/2024 às 14:28:38  
Emitido por: "SGP-e", emitido em 30/03/2018 - 12:38:43 e válido até 30/03/2118 - 12:38:43.  
(Assinatura do sistema)

Para verificar a autenticidade desta cópia, acesse o link <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo/conferencia-documento/VURFU0NfMTIwMjJfMDAwMTE3NTlfMTE3ODdfMjAyNF9DTDdXNzIxTQ==> ou o site <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo> e informe o processo **UDESC 00011759/2024** e o código **CL7W721M** ou aponte a câmera para o QR Code presente nesta página para realizar a conferência.