



**UFMA**



**UFPI**



**UFC**



**UFERSA**



**UFRN**



**UFPB**



**UFPE**



**UFS**



**UESC**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ**

**PROGRAMA DE DOUTORADO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE**

**ASSOCIAÇÃO PLENA EM REDE**

## **IMPACTOS AMBIENTAIS DO RESFRIAMENTO RESIDENCIAL EM CLIMAS TROPICAIS**

**JÚLIA SANTIAGO DE MATOS MONTEIRO LIRA**

**TERESINA-PI  
2025**

JÚLIA SANTIAGO DE MATOS MONTEIRO LIRA

**IMPACTOS AMBIENTAIS DO RESFRIAMENTO RESIDENCIAL EM CLIMAS  
TROPICAIS**

Tese apresentada ao Programa de Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Associação Plena em Rede, da Universidade Federal do Piauí (UFPI), como requisito para obtenção do título de Doutora em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Orientadora:

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Elaine Aparecida da Silva

Coorientador:

Prof<sup>º</sup>. Dr. Calebe Paiva Gomes de Souza

TERESINA-PI  
2025

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal do Piauí. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade da autora, sendo a mesma passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e sua respectiva autora seja devidamente citada e mencionando os seus créditos bibliográficos.

## FICHA CATALOGRÁFICA

Universidade Federal do Piauí

Biblioteca Comunitária Jornalista Carlos Castello Branco

Divisão de Representação da Informação

L768i      Lira, Júlia Santiago de Matos Monteiro.  
Impactos ambientais do resfriamento residencial em climas tropicais /  
Júlia Santiago de Matos Monteiro Lira. – 2025.  
187 f. : il.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Piauí, Universidade  
Federal do Piauí, Programa de Doutorado em Desenvolvimento e Meio  
Ambiente (PRODEMA), Associação Plena em Rede, Teresina, 2026.

“Orientadora: Profª. Dra. Elaine Aparecida da Silva”

“Coorientador: Profº. Dr. Calebe Paiva Gomes de Souza”

1. Mudança climática. 2. Resfriamento de edificações. 3. Energia  
operacional. 4. Redes neurais. 5. Transição energética. I. Silva, Elaine  
Aparecida da. II. Souza, Calebe Paiva Gomes de. III. Título.

CDD 304.25

JÚLIA SANTIAGO DE MATOS MONTEIRO LIRA

**IMPACTOS AMBIENTAIS DO RESFRIAMENTO RESIDENCIAL EM CLIMAS  
TROPICAIS**

Tese apresentada ao Programa de Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Associação Plena em Rede, da Universidade Federal do Piauí (UFPI), como requisito para obtenção do título de Doutora em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Linha de pesquisa: Planejamento e gestão e políticas socioambientais

Defendida em: 28/11/ 2025.

**BANCA EXAMINADORA**

Presidente e orientadora: Profa. Dra. Elaine Aparecida da Silva  
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

Membro externo à instituição: Profa. Dra. Josiclêda Dominiciano Galvêncio  
PRODEMA - Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Membro externo à instituição: Dr. Henrique Leonardo Maranduba  
NEXTRACKER

Membro interno ao curso: Profa. Dra. Wilza Gomes Reis Lopes  
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

Membro externo ao curso: Prof. Dr. José Medeiros de Araújo Júnior  
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

*Dedico esta pesquisa ao meu marido, Thiago.*

## AGRADECIMENTOS

Esta tese é fruto de muito suor, lágrimas, café e dedicação. Foi, talvez, o período mais desafiador que já enfrentei. E, se escrevo nesta página, significa que sobrevivi e isso só foi possível graças a uma série de fatores e pessoas que me sustentaram quando eu não conseguia mais me sustentar sozinha. Agradeço à minha instituição IFPI pela licença concedida e confiança de que eu voltaria com o diploma (e aqui estou, cumprindo essa promessa). Também agradeço à UFPI e seus professores e técnicos que garantiram o necessário para que este doutorado acontecesse, em especial a figura dos meus orientadores.

No período da pesquisa, enfrentei muitos desafios, duas licenças (uma licença maternidade e outra de saúde), osso quebrado, doenças, familiares operados, perdi algumas pessoas no caminho e minha gata. Dizer que foi difícil é simples demais para sintetizar tudo que enfrentei.

Mas, como como todo ônus tem seu bônus, fui contemplada com muitas graças, que certamente me injetaram força. Sou mãe de duas crianças lindas (Álvaro e Olga) que, mesmo com os desafios diários da neurodivergência, me fizeram levantar todos os dias antes do sol (literalmente) e lutar por este diploma.

Para dar conta de tudo, tive ajuda essencial da minha família, da família do meu marido e de uma rede de apoio que me amparou todos os dias, não só com as crianças, mas me permitindo um tempinho para mim mesma. Essa conquista é de todos nós! E, em especial, dedico esta tese integralmente ao meu marido, Thiago, que segurou a barra quando eu não podia, que acreditou quando eu duvidei, e que nunca me deixou desistir.

Aos amigos que me acolheram e, entendendo ou não a dimensão do que eu estava vivendo, me deram apoio incondicional. São tantos que não preciso falar individualmente deles, porque eles sabem da importância que têm na minha vida, acadêmica ou pessoal. Destaco aqui meus companheiros de doutorado, que entenderam meu sofrimento como ninguém.

Sempre guiada por uma força muito maior que eu, agradeço a Deus, que me levou de volta para onde sempre estive meu coração: a casa do Senhor. Obrigada por me manter firme e por enviar anjos nessa trajetória, incluindo minha psicóloga Vitória e minha psiquiatra Laís, que abriram os braços e o coração para minha luta quando eu mais precisei.

Acabou o choro pessoal, eu consegui!

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1: Fases da Avaliação Dinâmica do Ciclo de Vida para edificações.....                             | 44  |
| Figura 2: Inputs e Outputs utilizados nas RNAs investigadas (ACV-edificações).....                       | 58  |
| Figura 3: Arquitetura de uma RNA com indicação do fluxo de retropropagação .....                         | 62  |
| Figura 4: Localização do contexto empírico da pesquisa .....                                             | 66  |
| Figura 5: Projeto da HIS utilizada na pesquisa .....                                                     | 67  |
| Figura 6: Componentes construtivos da HIS (obra do Conjunto Jacinta Andrade) .....                       | 67  |
| Figura 7: Orientações espaciais dos cenários considerados para a simulação .....                         | 67  |
| Figura 8: Fluxograma para acionamento do split e da ventilação natural.....                              | 73  |
| Figura 9: Fluxograma do <i>Script</i> da Simulação Paramétrica.....                                      | 76  |
| Figura 10: Infográfico da escolha da solução construtiva ótima.....                                      | 78  |
| Figura 11: Etapas de elaboração da técnica de ADCV-edf proposta .....                                    | 82  |
| Figura 12: Sistema de Inventário Dinâmico integrado.....                                                 | 84  |
| Figura 13: Arquitetura da RNA desenvolvida.....                                                          | 86  |
| Figura 14: Evolução da função de perda (MSE) durante o treinamento da RNA.....                           | 87  |
| Figura 15: Fluxograma de integração inventário-impacto .....                                             | 94  |
| Figura 16: Análise comparativa de temperatura (habitação padrão).....                                    | 101 |
| Figura 17: Histograma da base de dados de resfriamento.....                                              | 102 |
| Figura 18: Consumo mensal por perfil de uso do modelo de referência.....                                 | 102 |
| Figura 19: Consumo médio de eletricidade por tipo de cobertura .....                                     | 104 |
| Figura 20: Consumo médio de eletricidade por tipo de parede e janela .....                               | 104 |
| Figura 21: Compensação entre conforto e energia.....                                                     | 106 |
| Figura 22: Mapa de calor com ranqueamento das melhores soluções .....                                    | 108 |
| Figura 23: Distribuição de classificação da alternativa ótima de base por cenário (Monte Carlo)<br>..... | 113 |
| Figura 24: Contraste entre a melhor e a pior orientação de cada mês (por cenário).....                   | 115 |
| Figura 25: Evolução do pico sazonal (2015-2065) .....                                                    | 116 |
| Figura 26: Padrão sazonal das habitações .....                                                           | 117 |
| Figura 27: Comparação dos picos sazonais por tipo de habitação .....                                     | 118 |
| Figura 28: Valores preditos vs. Valores observados pela RNA.....                                         | 126 |
| Figura 29: Matriz de confusão da RNA .....                                                               | 127 |
| Figura 30: Matriz de correlação das variáveis de entrada da RNA.....                                     | 127 |
| Figura 31: Projeção do Aumento de Temperatura Média em Teresina (2015-2065) .....                        | 128 |

|                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 32: RMSE mensal do modelo de regressão linear para projeção de temperaturas futuras ..... | 129 |
| Figura 33: Consumo de eletricidade na vida útil das HIS reais e ideal.....                       | 130 |
| Figura 34: Correlação entre Temperatura Externa e Consumo por mês (12 h/quarto.dia) ....         | 131 |
| Figura 35: Cenários de aumento de consumo durante a vida útil do edifício .....                  | 133 |
| Figura 36: Matriz elétrica brasileira (2015 versus 2065) .....                                   | 137 |
| Figura 37: Evolução da matriz elétrica (2015-2065) em diferentes cenários políticos.....         | 138 |
| Figura 38: Evolução das fontes hidráulica, solar, eólica e gás natural (2015-2065).....          | 139 |
| Figura 39: Índice de Herfindahl–Hirschman (HHI) e VRE por cenário .....                          | 140 |
| Figura 40: Evolução dos fatores de caracterização dinâmicos.....                                 | 142 |
| Figura 41: Contribuição das fontes energéticas por categoria de impacto (2030 e 2050) .....      | 143 |
| Figura 42: Evolução temporal dos impactos ambientais por m <sup>2</sup> de área construída.....  | 145 |
| Figura 43: Contribuição relativa das categorias de impacto .....                                 | 146 |
| Figura 44: Impacto total por projeto e por cenário.....                                          | 147 |
| Figura 45: Distribuição do impacto total nos diferentes tipos de projeto (Monte Carlo) .....     | 148 |
| Figura 46: Evolução temporal dos impactos ambientais na vida útil da edificação .....            | 149 |
| Figura 47: Evolução temporal dos impactos ambientais e comparação por cenários .....             | 150 |
| Figura 48: O comportamento do impacto para diferentes cenários políticos.....                    | 151 |
| Figura 49: Encadeamento de estratégias para resfriamento artificial em edificações.....          | 154 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1: Estrutura teórica de RNA em estudos de ACV para edificações (usando BPS).....                       | 59  |
| Tabela 2: Topologias de RNA de estudos com simulação de edificações na ACV.....                               | 60  |
| Tabela 3: Limites normativos adotados no estudo .....                                                         | 68  |
| Tabela 4: Descrição simplificada da envoltória utilizada na pesquisa.....                                     | 69  |
| Tabela 5: Hiperparâmetros otimizados da RNA .....                                                             | 88  |
| Tabela 6: Tendência histórica de fontes energéticas brasileiras .....                                         | 91  |
| Tabela 7: Fatores de Caracterização (FCs) estáticos por fonte .....                                           | 95  |
| Tabela 8: Ranqueamento das melhores soluções (TOPSIS) .....                                                   | 107 |
| Tabela 9: Consumo de energia elétrica para resfriamento (simulação BPS) na situação de split 24/h.dia.....    | 109 |
| Tabela 10: Coeficientes entre a classificação de base 50/50 e as configurações 25/75; 75/25 .....             | 110 |
| Tabela 11: Estabilidade de Monte Carlo .....                                                                  | 111 |
| Tabela 12: Resultados de economia de eletricidade na solução ótima em estudos de clima semelhante.....        | 119 |
| Tabela 13: Aumento do consumo de eletricidade para cada aumento de 1°C na temperatura externa .....           | 131 |
| Tabela 14: Padrão de operação na vida útil da HIS padrão e Solução Ótima.....                                 | 135 |
| Tabela 15: Comparação de métricas de RNA com <i>output</i> de energia elétrica (kWh/m <sup>2</sup> .ano)..... | 136 |
| Tabela 16: Impactos ambientais acumulados por m <sup>2</sup> (2015-2065) .....                                | 146 |
| Tabela 17: Panorama teórico-científico de ADCV-edf e simulações termoenergéticas.....                         | 155 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1: Interdisciplinaridade da pesquisa .....                                  | 20 |
| Quadro 2: Indicadores do IDSC relevantes ao módulo B6 em Teresina .....            | 23 |
| Quadro 3: Variações metodológicas de diferentes abordagens de ACV .....            | 29 |
| Quadro 4: Diferenças metodológicas de diferentes abordagens de ADCV .....          | 33 |
| Quadro 5: ACV de produtos <i>versus</i> ACV de edificações .....                   | 41 |
| Quadro 6: Variáveis dinâmicas contempladas em estudos de ADCV em edificações ..... | 47 |
| Quadro 7: Escopo dos artigos relacionados com a TDMC em edificações .....          | 55 |
| Quadro 8: Delimitação e justificativa da fronteira do sistema .....                | 71 |
| Quadro 9: Componentes do inventário de primeiro plano .....                        | 85 |
| Quadro 10: Inventário de segundo plano .....                                       | 90 |

## SUMÁRIO

|                                                                                                     |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....</b>                                                                    | <b>7</b>  |
| <b>LISTA DE TABELAS.....</b>                                                                        | <b>9</b>  |
| <b>LISTA DE QUADROS .....</b>                                                                       | <b>10</b> |
| <b>RESUMO .....</b>                                                                                 | <b>15</b> |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                                                               | <b>16</b> |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                                           | <b>17</b> |
| 1.1 Hipóteses e objetivos.....                                                                      | 19        |
| 1.2 Interdisciplinaridade.....                                                                      | 19        |
| 1.3 Estrutura da tese .....                                                                         | 20        |
| <b>2 ANÁLISE CRÍTICA E ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO .....</b>                                         | <b>22</b> |
| 2.1 Enquadramento socioambiental e político da energia operacional em edificações .....             | 22        |
| 2.1.1 Relevância global e contexto socioambiental (ODS e Teresina) .....                            | 23        |
| 2.1.2 Instrumentos nacionais e o caráter dinâmico da matriz elétrica.....                           | 24        |
| 2.2 Contexto climático da habitação social: implicações para o consumo de energia operacional ..... | 25        |
| 2.2.1 Vulnerabilidade climática da habitação social em Teresina .....                               | 26        |
| 2.2.2 A envoltória como foco estratégico na redução do impacto .....                                | 26        |
| 2.2.3 Transição para modelos dinâmicos .....                                                        | 27        |
| 2.3 Abordagens metodológicas em Avaliação do Ciclo de Vida.....                                     | 27        |
| 2.3.1 ACV atribucional e consequencial.....                                                         | 28        |
| 2.3.2 Dimensão temporal em ACV: abordagens dinâmicas.....                                           | 30        |
| 2.3.3 ACV de produtos e ACV de edificações: especificidades normativas .....                        | 35        |
| 2.4 Evolução da aplicação da ACV e o paradigma da ADCV .....                                        | 42        |
| 2.5 Particularidades da Avaliação Dinâmica do Ciclo de Vida (ADCV) .....                            | 44        |
| 2.5.1 Variáveis dinâmicas .....                                                                     | 46        |
| 2.5.2 Inventário Dinâmico e projeção de dados futuros em edificações.....                           | 48        |
| 2.5.3 Avaliação do impacto e quantificação de incertezas.....                                       | 50        |

|                                                                                     |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.6 Modelos computacionais avançados em estudos sobre edificações.....              | 53        |
| 2.6.1 Tomada de Decisão Multicritério em edificações.....                           | 53        |
| 2.6.2 Rede Neural Artificial e a Avaliação do Ciclo de Vida de Edificações.....     | 56        |
| 2.6.2.1 Aplicação na literatura.....                                                | 57        |
| 2.6.2.2 Fundamentos e topologia de uma rede neural .....                            | 60        |
| 2.7 Considerações sobre o capítulo .....                                            | 62        |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                                   | <b>64</b> |
| 3.1 Contexto de aplicação .....                                                     | 64        |
| 3.1.1 Características climáticas e diretrizes normativas.....                       | 65        |
| 3.1.2 Decisões das alternativas construtivas .....                                  | 68        |
| 3.1.3 Objetivo e escopo da ADCV-edf .....                                           | 70        |
| 3.2 Simulação paramétrica do desempenho da edificação .....                         | 72        |
| 3.2.1 Arquivo IDF .....                                                             | 72        |
| 3.2.2 Script para simulações paramétricas .....                                     | 75        |
| 3.2.3 Construção e ajuste da base de dados.....                                     | 76        |
| 3.3 Tomada de Decisão Multicritério.....                                            | 77        |
| 3.4 Técnica de Avaliação Dinâmica do ciclo de vida (ADCV) .....                     | 81        |
| 3.5 Inventário Dinâmico do ciclo de vida .....                                      | 83        |
| 3.5.1 Fluxo de demanda da edificação (foreground).....                              | 84        |
| 3.5.1.1 Modelagem preditiva via Rede Neural Artificial .....                        | 85        |
| 3.5.1.2 Projeção de temperaturas futuras.....                                       | 88        |
| 3.5.2 Identificação dos processos unitários (background) .....                      | 89        |
| 3.5.3 Composição temporal da matriz (mix elétrico).....                             | 90        |
| 3.6 Avaliação de Impacto Dinâmica do Ciclo de Vida .....                            | 94        |
| 3.6.1 Caracterização estática por fonte energética .....                            | 95        |
| 3.6.2 Ponderação temporal e construção dos Fatores de Caracterização Dinâmicos..... | 96        |
| 3.6.3 Cálculo do impacto dinâmico anual e acumulado.....                            | 96        |

|                                                                                       |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.6.4 Exemplo de aplicação.....                                                       | 97         |
| 3.6.5 Análise de incertezas e indicadores complementares .....                        | 98         |
| 3.7 Interpretação dos resultados da ADCV .....                                        | 99         |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                                 | <b>100</b> |
| 4.1 Desempenho termoenergético dos componentes construtivos.....                      | 100        |
| 4.1.1 Caracterização térmica do modelo de referência .....                            | 100        |
| 4.1.2 Eletricidade para resfriamento: influência de perfis de uso e sazonalidade..... | 101        |
| 4.1.3 Desempenho comparativo das alternativas construtivas .....                      | 103        |
| 4.2 Solução ótima por cenário por decisão multivariada .....                          | 105        |
| 4.2.1 TOPSIS e classificação de alternativas .....                                    | 105        |
| 4.2.2 Análise de sensibilidade considerando diferentes pesos de critérios .....       | 110        |
| 4.2.3 Análise de incerteza: validação da solução ideal .....                          | 111        |
| 4.2.4 Sazonalidade e orientação espacial .....                                        | 114        |
| 4.2.5 Discussão.....                                                                  | 118        |
| 4.2.5.1 Economia de consumo de eletricidade da solução ótima .....                    | 118        |
| 4.2.5.2 Adequação bioclimática brasileira .....                                       | 120        |
| 4.2.5.3 Além da envoltória: estratégias complementares .....                          | 122        |
| 4.3 Inventário Dinâmico do consumo operacional de energia .....                       | 125        |
| 4.3.1 Desempenho da Rede Neural .....                                                 | 125        |
| 4.3.2 Projeção futura da temperatura: regressão linear .....                          | 128        |
| 4.3.3 Efeitos da mudança climática no consumo de eletricidade.....                    | 129        |
| 4.3.4 Análise de sensibilidade: projeção da temperatura .....                         | 131        |
| 4.3.5 Efeito dos padrões de operação para resfriamento no consumo de energia.....     | 134        |
| 4.3.6 Discussão.....                                                                  | 135        |
| 4.4 Avaliação Dinâmica do Impacto Ambiental .....                                     | 137        |
| 4.4.1 Matriz elétrica brasileira: projeção futura .....                               | 137        |
| 4.4.2 Impactos ambientais para geração de energia elétrica .....                      | 141        |

|          |                                                                                             |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4.3    | Impacto ambiental anual do consumo de eletricidade para resfriamento .....                  | 144        |
| 4.4.4    | Implicações para as Habitações de Interesse Social (HIS) .....                              | 151        |
| 4.4.5    | Discussão.....                                                                              | 152        |
| 4.5      | Posicionamento metodológico da ADCV-edf: transparência, escopo e modelagem de cenários..... | 154        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES .....</b>                                                                     | <b>157</b> |
| 5.1      | Contribuições e inovações.....                                                              | 159        |
| 5.2      | Limitações e sugestões para trabalhos futuros .....                                         | 159        |
| 5.3      | Validação das hipóteses .....                                                               | 160        |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                    | <b>162</b> |
|          | <b>ANEXO A: PLANTA DE COBERTURA E MADEIRAMENTO DA HIS.....</b>                              | <b>176</b> |
|          | <b>APÊNDICE A: APÊNDICE TÉCNICO .....</b>                                                   | <b>177</b> |
|          | <b>APÊNDICE B: DEFINIÇÕES METODOLÓGICAS .....</b>                                           | <b>180</b> |
|          | <b>APÊNDICE C: RESULTADOS COMPLEMENTARES .....</b>                                          | <b>185</b> |
|          | <b>APÊNDICE D: SOBRE A AUTORA .....</b>                                                     | <b>187</b> |

## RESUMO

### IMPACTOS AMBIENTAIS DO RESFRIAMENTO RESIDENCIAL EM CLIMAS TROPICAIS

Autora: Júlia Santiago de Matos Monteiro Lira

Orientadora: Profa. Dra. Elaine Aparecida da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Calebe Paiva Gomes de Souza

Programa de Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente

Esta tese desenvolve e aplica uma metodologia prospectiva de Avaliação Dinâmica do Ciclo de Vida (ADCV) para avaliar os impactos ambientais de longo prazo do consumo de eletricidade para resfriamento em edificações, considerando simultaneamente mudanças climáticas progressivas, evolução da matriz elétrica nacional sob diferentes cenários políticos e variabilidade de soluções construtivas. A metodologia integra cinco componentes principais: i) simulação paramétrica automatizada (EnergyPlus™) para geração de cenários construtivos variando envoltória e padrões operacionais; ii) projeções climáticas por regressão linear para temperatura mensal considerando aquecimento global até 2065; iii) modelo híbrido de matriz elétrica para projetar diferentes configurações de fontes energéticas baseadas em tendências históricas e cenários políticos; iv) Rede Neural Artificial (RNA) para predição de consumo energético anual alimentada por temperaturas futuras ( $R^2=0,997$ ); e v) inventário e avaliação dinâmicos para cálculo anual do impacto ambiental. A técnica TOPSIS para Tomada de Decisão Multicritério (TDMC) foi empregada para identificar soluções construtivas que equilibram desempenho térmico e energético. Os resultados demonstram que o consumo de energia para resfriamento aumenta 14% entre 2015 e 2065 devido ao aquecimento global. As habitações de interesse social brasileiras convencionais mostram-se inadequadas para climas tropicais quentes, apresentando alta variabilidade térmica. A evolução da matriz elétrica modifica os impactos ambientais: cenários de renováveis aceleradas os atenuam em até 20%, enquanto a manutenção de fontes fósseis anula ganhos de eficiência construtiva. As soluções construtivas otimizadas reduzem simultaneamente consumo energético e impactos ambientais em todas as categorias analisadas entre 18 e 20%. A contribuição original deste estudo consiste no desenvolvimento de uma metodologia inovadora de ADCV que permite quantificar como decisões de projeto tomadas no presente e políticas energéticas futuras determinam a sustentabilidade de edificações ao longo de sua vida útil. A pesquisa demonstra que a sustentabilidade edilícia depende da matriz elétrica, evidenciando que a eficiência energética predial deve ser acompanhada de transição energética nacional coerente. Para habitações sociais brasileiras, conclui-se que a escolha de soluções construtivas adequadas ao clima tropical e políticas que acelerem a renovação da matriz energética constituem estratégias complementares e interdependentes para mitigação dos impactos ambientais.

**Palavras-chave:** Resfriamento de edificações, Energia operacional, Redes Neurais, Simulação paramétrica, Mudança Climática, Transição energética.

**Objetivos de Desenvolvimento Sustentável:** #7 – Energia acessível e limpa; #9 - Indústria, inovação e infraestrutura; #11 - Cidades e comunidades sustentáveis; #13 - Ação contra a mudança global do clima.

## ABSTRACT

### ENVIRONMENTAL IMPACTS OF RESIDENTIAL COOLING IN TROPICAL CLIMATES

This thesis develops and applies a prospective Dynamic Life Cycle Assessment (DLCA) methodology to evaluate the long-term environmental impacts of electricity consumption for building cooling. It simultaneously considers progressive climate change, the evolution of the national electricity grid under different political scenarios, and the variability of construction solutions. The methodology integrates five main components: i) automated parametric simulation (EnergyPlus™) for generating construction scenarios varying building envelopes and operational patterns; ii) climate projections using linear regression for monthly temperatures, considering global warming until 2065; iii) a hybrid electricity grid model to project different energy source configurations based on historical trends and political scenarios; iv) an Artificial Neural Network (ANN) for predicting annual energy consumption fed by future temperatures ( $R^2=0.997$ ); and v) dynamic inventory and assessment for annual environmental impact calculation. The TOPSIS technique for Multi-Criteria Decision Making (MCDM) was employed to identify construction solutions that balance thermal and energy performance. Results demonstrate that cooling energy consumption increases by 14% between 2015 and 2065 due to global warming. Conventional Brazilian social housing proves inadequate for hot tropical climates, showing high thermal variability. The evolution of the electricity grid alters environmental impacts: accelerated renewable scenarios can mitigate them by up to 20%, while maintaining fossil sources nullifies construction efficiency gains. Optimized construction solutions simultaneously reduce energy consumption and environmental impacts across all analyzed categories by 18%-20%. The original contribution of this study is the development of an innovative DLCA methodology that quantifies how design decisions made in current and future energy policies determine the sustainability of buildings throughout their service life. The research demonstrates that building sustainability depends on the electricity grid, highlighting that building energy efficiency must be accompanied by a coherent national energy transition. For Brazilian social housing, it is concluded that selecting construction solutions suitable for the tropical climate and implementing policies to accelerate the renewal of the energy grid constitute complementary, interdependent strategies for mitigating environmental impacts.

**Keywords:** Cooling Buildings, Operational Energy, Artificial Neural Networks, Parametric simulation, Climate Change, Energy transition.

**Sustainable Development Goals:** #7 - Affordable and clean energy; #9 - Industry, innovation and infrastructure #11 - Sustainable cities and communities; #13 - Climate action

## 1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil configura-se como um elemento central e estratégico nas ações globais de mitigação climática, dada sua parcela expressiva no consumo de recursos naturais e nas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) (IEA, 2022; IPCC, 2023). Dentro do ciclo de vida de uma edificação, o consumo energético na fase de uso e operação, denominado módulo B6 (CSN EN15804+A2, 2019), é o maior vetor de impacto, respondendo tipicamente por 67% a 80% do valor total (Caldas; Lira; Sposto, 2017; Chau; Leung; Ng, 2015; Liang *et al.*, 2023; Ramesh; Prakash; Shukla, 2010). Isso acarreta aumento nos impactos ambientais e econômicos relacionados ao consumo de energia operacional, além de impactar diretamente o usuário (Hu, 2018).

Em contextos de clima tropical e subtropical, este desafio é agravado pelo aumento da demanda por resfriamento artificial (climatização) nas edificações. Enquanto grande parte dos estudos internacionais concentra-se na redução da demanda para aquecimento em climas frios (Paravantis *et al.*, 2025), a realidade brasileira exige foco na adaptação construtiva para lidar com o calor intenso. Este cenário é particularmente crítico em programas de larga escala, como o Minha Casa, Minha Vida (MCMV), cujas soluções padronizadas e de baixo custo resultaram em habitações com baixo desempenho e pouca adaptação às condições climáticas regionais (Cota; Silva, 2016).

O desempenho térmico de edificações individuais é influenciado pelo ambiente construído e climático ao redor (Hong; Langevin; Sun, 2018; Wang *et al.*, 2024). Nos conjuntos habitacionais, que frequentemente reúnem centenas de casas, há uma interação mútua no desempenho das suas unidades. A consequência de alterar o projeto da envoltória de uma edificação traz diversos impactos na sociedade e no meio ambiente.

A vulnerabilidade construtiva vai de encontro com as condições climáticas extremas da região Nordeste, que possui a maior radiação solar horizontal global do país (Saccardo *et al.*, 2023). Estudos no Piauí já demonstram a instabilidade climática fruto do aquecimento global, causando fenômenos extremos, como seca e enchentes mais intensas e prolongadas (Cunha Ferreira; Kemenes, 2023), além de temperaturas mais elevadas, inclusive no período noturno (Medeiros; Holanda, 2023). A cidade de Teresina, capital do estado do Piauí, apresenta projeções de aumento de temperatura significativamente maiores que a média global (Rodrigues; Parente; Fernandes, 2024), intensificando a dependência do resfriamento artificial nas habitações de interesse social (HIS).

Portanto, esta tese restringe sua análise ao segmento mais vulnerável e representativo do consumo: habitações unifamiliares e concentra-se exclusivamente no impacto do consumo de energia elétrica para resfriamento artificial (módulo B6), que é o serviço energético mais sensível às mudanças climáticas (EPE, 2018).

Diante do exposto, a seguinte questão norteadora orienta esta tese: Como as decisões técnicas (tipos de vedações) e políticas (transição energética) influenciam impactos ambientais futuros associados ao resfriamento de edificações localizadas em climas tropicais?

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é a ferramenta essencial para avaliar e comparar as alternativas construtivas. No entanto, sua abordagem convencional (estática) é limitada, pois assume que as condições do sistema (clima e matriz elétrica, por exemplo) permanecerão constantes ao longo de toda a vida útil da edificação (em média 50 anos), comprometendo a precisão da análise (Van De Moortel *et al.*, 2022).

Para superar essa limitação, a tese adota a Avaliação Dinâmica do Ciclo de Vida (ADCV). A ADCV reconhece a longa vida útil e a inevitabilidade das mudanças (Peñaloza; Erlandsson; Falk, 2016) e é indispensável para integrar as variáveis dinâmicas que afetam o desempenho futuro do edifício, como a evolução da matriz elétrica nacional e o aumento das temperaturas. A lacuna identificada na literatura de ADCV aplicada a edificações (ADCV-edf<sup>1</sup>) é a ausência de modelos preditivos robustos que combinem a complexidade do clima tropical com a incerteza da transição energética.

Esta tese, portanto, propõe e operacionaliza uma nova abordagem metodológica que integra três ferramentas avançadas:

1. **Predição Dinâmica:** Utilização de Redes Neurais Artificiais (RNA) para projetar o consumo de eletricidade futuro, escolhida por sua capacidade de capturar a não-linearidade das variáveis climáticas;
2. **Otimização de Projeto:** Uso de simulação termoenergética paramétrica (BPS) para gerar um vasto acervo de soluções de envoltória acopladas com Tomada de Decisão Multicritério (TDMC);
3. **Rigor e Robustez:** Incorporação de análise de incerteza (Monte Carlo) na TDMC para quantificar formalmente as incertezas dos cenários futuros, garantindo a robustez da solução ótima.

---

<sup>1</sup> Nomenclatura baseada em Su *et al.* (2021).

## 1.1 Hipóteses e objetivos

As hipóteses formuladas para responder à questão norteadora são:

1. A escolha de soluções construtivas mais eficientes, baseada em critérios termoenergéticos, reduz significativamente o consumo de eletricidade para resfriamento e, conseqüentemente, os impactos ambientais ao longo da vida útil da edificação.
2. A consideração da variação temporal da matriz elétrica nacional altera os resultados das categorias de impacto ambiental, evidenciando a importância de abordagens dinâmicas (como a ADCV) para análises prospectivas em debates de políticas públicas.
3. A matriz elétrica brasileira deve investir em fontes renováveis de eletricidade, porque a transição energética brasileira compensa o aumento da demanda de eletricidade para resfriamento.

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar os impactos ambientais relacionados ao consumo operacional de energia para resfriamento artificial em edificações unifamiliares localizadas em climas tropicais (Aw), considerando diferentes decisões construtivas e cenários de políticas de transição energética.

Os objetivos específicos estão listados a seguir:

1. Localizar alternativas construtivas de edificações unifamiliares existentes, considerando o desempenho termoenergético.
2. Identificar soluções construtivas eficientes para otimizar o uso de eletricidade para resfriamento.
3. Desenvolver uma nova técnica de ADCV focada no consumo de energia elétrica.
4. Avaliar a aplicabilidade e robustez da técnica desenvolvida.
5. Quantificar temporalmente os impactos ambientais do consumo de energia operacional para uma habitação.

## 1.2 Interdisciplinaridade

A ACV é, por natureza, uma ferramenta que permeia múltiplas áreas do conhecimento para quantificar e comunicar os impactos ambientais de produtos e serviços. No contexto de uma edificação (por ser um produto complexo e de longa vida útil, sujeito a impactos não-lineares), a utilizar a ferramenta de ACV exige uma sofisticação metodológica. Para operacionalizar uma ADCV prospectiva e robusta, esta pesquisa se assenta sobre uma estrutura intrinsecamente interdisciplinar.

O problema central da tese, que é avaliar os impactos do resfriamento sob cenários de mudanças climáticas e transição energética, é abordado por meio do diálogo estabelecido entre três esferas de conhecimento interligadas (Quadro 1), que reforçam o rigor e a aplicabilidade dos resultados.

Quadro 1: Interdisciplinaridade da pesquisa

| <b>Esfera</b>                     | <b>Conceituação</b>                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Áreas do conhecimento</b>                                                                                                                                          |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Objeto de estudo                  | Forneceu o pilar da ACV, a modelagem termoenergética (BPS) e a análise crítica dos materiais e soluções construtivas para Habitação de Interesse Social (HIS)                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Engenharia Civil</li> <li>• Ciência Ambiental</li> <li>• Arquitetura e urbanismo</li> </ul>                                  |
| Método proposto                   | Permitiu a construção de modelagens computacionais avançadas, a aplicação de técnicas preditivas como regressão, Rede Neural Artificial (RNA) e outras técnicas para a projeção de cenários energéticos, e o uso de métodos estatísticos robustos para a avaliação de incertezas. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ciência da Computação</li> <li>• Estatística</li> <li>• Engenharia de Produção</li> </ul>                                    |
| Contexto de aplicação da pesquisa | Permitiu a contextualização dos resultados nas temáticas de moradia digna, políticas habitacionais e o desafio da transição energética, ligando a eficiência do micro ao impacto macro das decisões governamentais.                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Administração geral</li> <li>• Administração Pública</li> <li>• Engenharia Elétrica</li> <li>• Ciências Políticas</li> </ul> |

O diálogo estabelecido entre estas áreas ultrapassa as fronteiras acadêmicas. Ao gerar resultados baseados em ADCV (uma perspectiva dinâmica), esta tese fornece indicações diretas que apoiam a tomada de decisão para projetistas (na seleção de novas soluções construtivas adaptadas ao clima) e para gestores públicos (na eficiência energética de processos licitatórios e na coerência das políticas de transição energética), beneficiando a comunidade em geral.

### 1.3 Estrutura da tese

A introdução está presente no capítulo um e contempla o contexto geral da pesquisa, o problema e a lacuna central, além de evidenciar a contribuição científica. O capítulo três contém a revisão da literatura estruturada de forma analítica e crítica sobre as informações essenciais da literatura para a compreensão do tema de pesquisa. A revisão foi dividida:

- i) no contexto socioambiental-político do uso de energia em edificações;
- ii) no contexto climático de habitações de interesse social;
- iii) no detalhamento das abordagens existentes para a ACV no geral e, em particular, para as edificações;

- iv) nas particularidades da ADCV-edf para compreender melhor suas características; e
- v) nos modelos computacionais avançados mais relacionados com a temática desta tese: RNA, simulações BPS e algoritmos de TDMC.

No capítulo três são apresentadas as etapas metodológicas que compõem um modelo completo e integrado. Para isso, o capítulo foi dividido em: contexto de aplicação da pesquisa, simulação paramétrica do desempenho da edificação, tomada de decisão multicritério, e a técnica de ADCV-edf elaborada, dividida principalmente em Inventário Dinâmico do Ciclo de Vida e Avaliação Dinâmica do Impacto.

No capítulo quatro, todos os resultados são apresentados ao leitor, seguindo a lógica de expor os parâmetros isoladamente oriundos da simulação paramétrica (consumo de eletricidade e aumento da temperatura externa) e o multicritério, além do inventário dinâmico e da avaliação dinâmica de impacto. Por fim, apresentou-se um posicionamento da metodologia desenvolvida nesta tese em relação aos outros modelos de ADCV-edf encontrados na literatura. No quinto e último capítulo estão apresentadas as principais contribuições da pesquisa, as limitações e sugestões para futuros trabalhos.

## 2 ANÁLISE CRÍTICA E ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO

Esta seção apresenta uma discussão seletiva e estratégica da literatura, essencial para fundamentar a investigação, evidenciar as lacunas metodológicas e articular a proposta inovadora desta tese.

A revisão está estruturada para fornecer uma progressão lógica ao leitor: do enquadramento macro do problema até a justificativa da ferramenta computacional utilizada. O capítulo foi dividido em seis dimensões inter-relacionadas, cada uma atuando como justificativa para uma escolha metodológica subsequente:

- A. **Contexto socioambiental-político:** situa a relevância da construção civil frente aos marcos globais (ODS) e nacionais (transição energética), estabelecendo a urgência da pesquisa.
- B. **Contexto climático:** delimita a vulnerabilidade da Habitação Social em climas tropicais, justificando o foco no consumo de energia operacional para resfriamento.
- C. **Abordagens metodológicas em ACV:** estabelece o marco teórico da ACV, diferenciando as abordagens atribucional *versus* consequential e ACV de produto *versus* ACV de edificações, fornecendo o vocabulário técnico para o restante do trabalho.
- D. **Evolução da ACV convencional:** aponta as limitações da abordagem estática tradicional diante da longa vida útil da edificação e das variáveis dinâmicas.
- E. **Particularidades da ADCV-edf:** detalha os aspectos da ADCV aplicada a edificações, estabelecendo a ferramenta metodológica central da pesquisa.
- F. **Modelos computacionais avançados:** revisita o uso de simulação de desempenho de edificações (BPS), tomada de decisão multicritério (TDMC) e redes neurais artificiais (RNA), identificando a lacuna de integração dinâmica que esta tese busca solucionar.

A análise abrangente desses temas estabelece as bases conceituais e empíricas necessárias para a construção do modelo metodológico integrado proposto no Capítulo 3.

### 2.1 Enquadramento socioambiental e político da energia operacional em edificações

Esta seção situa o leitor nos impactos diretos e indiretos das edificações e conecta a pesquisa aos marcos globais e nacionais. No plano internacional, os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7, 9, 11 e 13 orientam metas para energia limpa, infraestrutura urbana, cidades resilientes, e ação climática, respectivamente.

### 2.1.1 Relevância global e contexto socioambiental (ODS e Teresina)

O setor da construção civil possui relevância estratégica global, respondendo por parcela expressiva do consumo final de energia e das emissões associadas (IEA, 2022). Este contexto alinha a pesquisa diretamente com marcos internacionais, como os ODS, que orientam metas para energia limpa (ODS 7), inovação e infraestrutura urbana (ODS 9), cidades resilientes (ODS 11) e ação climática (ODS 13).

Em Teresina, capital representativa do clima tropical brasileiro, os desafios urbanos e sociais se intensificam, sendo agravados pela vulnerabilidade ao calor. Indicadores do Índice de Desenvolvimento Sustentável das Cidades (IDSC) revelam fragilidades (nota geral 43,15<sup>2</sup>) que reforçam a necessidade de estratégias de projeto que reduzam a demanda por resfriamento artificial. Os indicadores relacionados com esta pesquisa estão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2: Indicadores do IDSC relevantes ao módulo B6 em Teresina

| ODS                                                                                                                                                            | Indicadores                                                 | Nota qualitativa | Relação com consumo de energia operacional (B6)                                                                                                                           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7                                                                                                                                                              | Domicílios com acesso à energia elétrica                    | Muito alta       | Alto acesso viabiliza medir e mitigar impactos operacionais (B6) via eficiência; ainda assim, custos e picos podem restringir o uso.                                      |
|                                                                                                                                                                | Vulnerabilidade Energética                                  | Muito alta       | Sinaliza risco de inacessibilidade/instabilidade no uso de energia por famílias de baixa renda, diretamente ligado à demanda de resfriamento e à sensibilidade de custos. |
| 9                                                                                                                                                              | Investimento público em infraestrutura urbana por habitante | Muito baixa      | Baixa capacidade de investimento dificulta implementar melhorias e medidas de eficiência em larga escala.                                                                 |
| 11                                                                                                                                                             | População residente em aglomerados subnormais               | Muito baixa      | Indica déficits de qualidade habitacional que amplificam desconforto térmico e dependência de resfriamento artificial.                                                    |
|                                                                                                                                                                | Domicílios em favelas                                       | Muito baixa      |                                                                                                                                                                           |
| 13                                                                                                                                                             | Emissão de CO2 per capita                                   | Alta             | Reforça a urgência de reduzir emissões operacionais em edificações e alinhar com a transição energética.                                                                  |
|                                                                                                                                                                | Concentração de focos de queimadas                          | Média            | Problemática regional de pressão climática e qualidade do ar, agravando estresse térmico e picos de demanda.                                                              |
|                                                                                                                                                                | Proporção de domicílios em áreas de risco                   | Muito baixa      | Exposição a riscos climáticos (ondas de calor/inundações) aumenta vulnerabilidade e reforça prioridade a soluções passivas.                                               |
| Escala IDSC: 0-39,9 (muito baixa), 40-49,99 (baixa), 50-59,99 (média), 60-79,99 (alta), 80-100 (muito alta). Teresina: 43,15 (baixa): desafios significativos. |                                                             |                  |                                                                                                                                                                           |

<sup>2</sup> Pontuação IDCS - BR obtida no site oficial de [Cidades Sustentáveis](#).

Dado o clima quente-úmido e a alta demanda por resfriamento em habitação social, esta tese foca no consumo de energia operacional (Módulo B6, a ser detalhado em seções posteriores) e propõe uma Avaliação Dinâmica do Ciclo de Vida (ADCV) sensível a cenários de política-energética. A literatura evidencia que a matriz elétrica futura e as decisões de envoltória alteram substancialmente os impactos operacionais, exigindo abordagens dinâmicas para captar variações temporais da matriz elétrica e do comportamento do usuário (Lira; Silva, 2025; Rosse Caldas *et al.*, 2020).

### 2.1.2 Instrumentos nacionais e o caráter dinâmico da matriz elétrica

No Brasil, instrumentos teóricos estabelecem diretrizes para a expansão renovável e eficiência energética. São exemplos: a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) 2024 e instrumentos como o Plano Nacional de Energia (PNE) 2050 (EPE, 2020). Nesse contexto, destaca-se o recente Programa de Aceleração da Transição Energética (PATEN) (Lei Nº 15.103, de 22 de janeiro de 2025), que visa incentivar a descarbonização, promovendo a expansão da geração e transmissão de fontes renováveis (solar, eólica, biomassa, entre outras).

O Balanço Energético Nacional mais recente (2024) confirma que o Brasil “já vem praticando ações que visam à transição energética” por meio da inserção de novas fontes renováveis. Contudo, o aumento projetado da demanda e a própria transição energética exigem que o planejamento não exclua a implantação de usinas de fontes não renováveis, demandando uma avaliação completa do ciclo de vida das plantas renováveis (Peters *et al.*, 2025).

A transição energética vivenciada pela matriz brasileira reflete um caráter dinâmico. A identificação da sensibilidade dos resultados da ADCV diante das diferentes trajetórias da matriz elétrica é fundamental para analisar a influência de fatores externos (Peters *et al.*, 2025).

A necessidade de modelar a evolução da matriz elétrica em ACV já é reconhecida:

- **Modelagem de cenários:** Peters *et al.* (2025) utilizaram o *Open Source Energy Modeling System* (OSeMOSYS) para estimar a composição futura da matriz elétrica brasileira sob diferentes cenários de expansão (petróleo, gás), concluindo que a tendência de deterioração do desempenho ambiental sugere a necessidade de legislação e aproveitamento de potenciais renováveis (eólica *offshore*, etanol).
- **Análise de impacto de fontes limpas:** Holman *et al.* (2025) utilizaram modelagem probabilística para analisar como uma crescente proporção de energia limpa na matriz dos EUA pode reduzir significativamente as emissões operacionais de edifícios residenciais.

- **Relevância de longo prazo:** Frapin *et al.* (2022) avaliaram a matriz elétrica francesa, considerando a produção de eletricidade na ACV de edifícios. Os autores fizeram projeção futura com o modelo TIMES-FR GAZEL, combinando dimensões econômicas e tecnológicas. A pesquisa confirmou a importância de integrar cenários energéticos futuros na ACV de edifícios, dada sua longa vida útil e sua forte interação com o setor energético.

A utilização de uma abordagem dinâmica é essencial para considerar a variação temporal da matriz elétrica, especialmente na fase operacional de edificações (Holman *et al.*, 2025; Peters *et al.*, 2025).

Para os estudos de ACV em edificações, o mix elétrico (composição percentual das diferentes fontes primárias de energia utilizadas para gerar a eletricidade) é um parâmetro crítico, pois ele define o fator de emissão de GEE e o consumo de recursos associados a cada kWh consumido pelo edifício (o Módulo B6). Em países com alta dependência de carvão, o mix resulta em altos impactos ambientais. Em países como o Brasil, com predominância de fontes renováveis, o mix apresenta um impacto relativamente menor, mas sua composição varia significativamente ao longo do tempo (caráter dinâmico), devido à entrada de novas renováveis e ao uso de termelétricas para suporte (despacho térmico).

A identificação da sensibilidade dos resultados da ADCV diante das diferentes trajetórias da matriz elétrica é uma importante medida para analisar a influência de fatores externos e identificar pontos críticos (Peters *et al.*, 2025). Isto reafirma a importância de utilizar modelos prospectivos para prever a evolução da matriz elétrica e seus impactos ambientais futuros (Frapin *et al.*, 2022).

## **2.2 Contexto climático da habitação social: implicações para o consumo de energia operacional**

O desempenho energético de HIS no Brasil é profundamente influenciado pela interação entre três fatores: a padronização construtiva de programas habitacionais de larga escala, as características climáticas regionais extremas e a crescente intensificação das mudanças climáticas. Esta seção examina como essa tríade de fatores converge para criar um cenário de alta vulnerabilidade energética, particularmente em regiões de clima tropical.

Inicialmente, analisa-se o caso específico de Teresina como exemplar da vulnerabilidade climática das habitações sociais brasileiras (2.2.1). Em seguida, discute-se

como a envoltória da edificação representa o elemento construtivo de maior potencial para mitigação dos impactos (2.2.2). Por fim, estabelece-se a necessidade de transição para modelos dinâmicos de avaliação que capturem a complexidade temporal desses fenômenos (2.2.3).

### *2.2.1 Vulnerabilidade climática da habitação social em Teresina*

A sustentabilidade em edificações é, por definição, um desafio local, refletindo pré-condições climáticas, sociais e econômicas específicas (ISO 15392:2019). No Brasil, o programa Minha Casa, Minha Vida (MCMV) priorizou a rápida entrega de unidades habitacionais, resultando em soluções padronizadas de baixo custo com projetos simplificados e, muitas vezes, pouco adaptados às condições climáticas regionais (Cota; Silva, 2016; Leal Junior *et al.*, 2022).

Essas deficiências construtivas tornam-se críticas em regiões de clima extremo, agravando o desconforto térmico e impulsionando a dependência de sistemas artificiais de resfriamento. A cidade de Teresina, capital representativa do clima tropical brasileiro e com alta incidência de radiação solar global (Saccardo *et al.*, 2023), exemplifica essa vulnerabilidade, com mais de 25 mil unidades MCMV entregues (BRASIL, 2024).

As alterações climáticas locais (aumento de radiação, temperatura e umidade) promovem maior demanda por resfriamento, especialmente em habitações de interesse social que carecem de estratégias passivas de conforto. Para esta zona bioclimática, a norma ABNT NBR 15220-3 (2005b) sugere estratégias obrigatórias para aumentar o conforto térmico, tais como:

- Sombreamento nas aberturas (janelas e portas);
- Utilizar vedações pesadas, ou seja, com maior massa térmica;
- Garantia de ventilação cruzada e desumidificação dos ambientes, para renovar o ar interno e melhorar a sensação térmica;
- Resfriamento artificial como medida complementar para amenizar o desconforto.

### *2.2.2 A envoltória como foco estratégico na redução do impacto*

O consumo de energia operacional é o serviço energético do setor residencial que apresenta maior sensibilidade às mudanças climáticas (EPE, 2018). Diante dessa complexidade, a envoltória da edificação (paredes, cobertura e esquadrias), que faz a divisão entre o ambiente interno e externo, torna-se uma estratégia para mitigar a demanda por resfriamento artificial.

A literatura internacional demonstra que a otimização da forma e dos elementos da envoltória, como a inserção de elementos isolantes e o uso de algoritmos genéticos, pode reduzir significativamente as cargas térmicas e o consumo de eletricidade (Abdel-Rahman, 2021; Wong *et al.*, 2023).

As edificações brasileiras precisam se ajustar às mudanças climáticas, contrastando com a maioria dos estudos de ACV que se concentram em países desenvolvidos com foco no aquecimento em climas frios (Cao; Dai; Liu, 2016). Analisar o impacto da envoltória (Abdel-Rahman, 2021) traz uma vantagem metodológica, pois suas características afetam diretamente a operação da edificação e o conforto dos usuários (Phillips; Fannon; J. Eckelman, 2022).

### *2.2.3 Transição para modelos dinâmicos*

Apesar da evidente relevância da fase de uso, a maioria dos pesquisadores ainda analisa de maneira estática em estudos de ACV (Alotaibi *et al.*, 2022). O cálculo do consumo de energia operacional (B6) é frequentemente realizado por meio de previsões estatísticas (e estáticas) estendidas para toda a vida útil do edifício (Paulsen; Sposto, 2013), o que acumula incertezas ao longo da longevidade das habitações.

A análise global do ciclo de vida deve considerar não somente os impactos incorporados na manufatura, mas como as características da envoltória afetarão a operação da edificação sob variáveis mutáveis. Diante da necessidade de adaptar as construções brasileiras de larga escala e da complexidade da demanda por resfriamento sob o cenário de mudanças climáticas, métodos rigorosos para avaliar dinamicamente os impactos ambientais na fase de operação são essenciais. A ADCV surge como a perspectiva necessária para capturar a variação temporal e garantir a robustez das decisões de projeto.

## **2.3 Abordagens metodológicas em Avaliação do Ciclo de Vida**

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta analítica que, embora regida por normas internacionais consolidadas (ISO 14040/14044), exige a adoção de abordagens metodológicas específicas para tratar a complexidade, a durabilidade e a multifuncionalidade do objeto de estudo.

Esta seção dedica-se a detalhar as principais estruturas conceituais e as decisões metodológicas que sustentam o presente estudo. Inicialmente, será explorada a distinção entre as abordagens atribucional e consequential, fundamental para o tipo de perguntas que a pesquisa pretende responder (Seção 2.3.1). Em seguida, a discussão avança para a dimensão

temporal, examinando a relevância das abordagens dinâmicas de ACV para modelar os impactos ao longo da longa vida útil da edificação (Seção 2.3.2).

Por fim, é abordada a adaptação da metodologia do nível de ACV de produto para o nível de ACV de edificações, destacando as diferentes características entre elas e mantendo a comparabilidade e o rigor da análise (Seção 2.3.3). O entendimento dessas abordagens é essencial para justificar as escolhas específicas do presente trabalho e garantir a coerência entre o objetivo de pesquisa e a sua aplicação prática.

### *2.3.1 ACV atribucional e consequential*

A ACV pode ser conduzida segundo diferentes abordagens metodológicas, dependendo do objetivo do estudo e das questões que se pretende responder. Duas abordagens principais consolidaram-se na literatura: a ACV atribucional (ACVa) e a ACV consequential (ACVc) e são mencionadas na ISO 14040. A norma reconhece que duas abordagens diferentes foram desenvolvidas nos últimos anos: uma que **atribui** fluxos elementares e potenciais impactos ambientais a um sistema de produto específico, e uma que estuda as **consequências** ambientais de possíveis mudanças (futuras) entre sistemas de produtos alternativos. A escolha entre ACVa e ACVc orienta outras decisões metodológicas na ACV, como a escolha dos dados de entrada e a modelagem de processos com múltiplos produtos (Ekvall, 2020).

A ACV atribucional tem como objetivo descrever os fluxos físicos ambientalmente relevantes ao longo do ciclo de vida de um produto ou sistema, dentro de uma janela temporal específica (Finnveden *et al.*, 2009). Essa abordagem responde à pergunta: “Quais são os impactos ambientais atribuíveis a este produto/sistema, considerando sua cadeia de suprimentos atual?”.

A ACVa baseia-se em dados médios ou específicos de processos existentes, utilizando alocação para distribuir impactos entre coprodutos (Ekvall, 2020). É a abordagem mais comum em estudos comparativos de produtos, certificações ambientais (como EPDs) e avaliações de desempenho de sistemas existentes (Plevin; Delucchi; Creutzig, 2014).

A ACV consequential, por sua vez, tem como objetivo estimar as consequências ambientais de uma decisão, respondendo à pergunta: “Como os impactos ambientais mudarão se aumentar/diminuir a produção deste produto ou adotar esta tecnologia?” (Weidema *et al.*, 2018). Diferentemente da abordagem atribucional, que realiza uma contabilidade física dos fluxos, a ACVc busca capturar os efeitos sistêmicos de uma decisão no mercado (Buyle; Braet; Audenaert, 2013).

Em outras palavras, a ACVc utiliza dados marginais ao invés de dados médios de mercado, identificando especificamente qual fornecedor ou tecnologia será afetado por uma mudança na demanda (Hansen *et al.*, 2023). Por exemplo, ao avaliar o impacto de aumentar a demanda por eletricidade, a ACVc questiona qual usina específica (como uma termelétrica a gás de pico) aumentará sua produção em resposta, ao invés de usar a composição média da matriz elétrica. A ACVc emprega expansão de fronteiras do sistema ao invés de alocação, considerando efeitos de substituição na cadeia produtiva (Ekvall; Weidema, 2004). Isso inclui modelar como a decisão afeta a produção de produtos substituídos e a necessidade de alternativas.

As principais diferenças metodológicas entre as duas abordagens estão apresentadas no Quadro 3. As colunas foram preenchidas de acordo com os trabalhos de Buyle; Braet; Audenaert (2013), Finnveden *et al.* (2009), Frossard; Schalbart; Peuportier (2020), Hansen *et al.* (2023), Weidema *et al.* (2018).

Ambas as abordagens possuem limitações. A atribucional pode não capturar efeitos sistêmicos de mudanças em larga escala, enquanto a consequencial depende fortemente de premissas sobre comportamento de mercados e elasticidades de oferta/demanda, introduzindo incertezas adicionais relacionadas a modelagem econômica (Schaubroeck *et al.*, 2021).

Quadro 3: Variações metodológicas de diferentes abordagens de ACV

| Aspecto                  | ACV atribucional                                    | ACV consequencial                                              |
|--------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Pergunta a qual responde | “Quais são os impactos atribuíveis a este sistema?” | “Como os fluxos ambientais mudarão em resposta a uma decisão?” |
| Tipo de dados            | Médios ou específicos de processos existentes       | Marginais (fornecedores afetados pela mudança)                 |
| Tratamento de coprodutos | Alocação                                            | Expansão de fronteiras do sistema                              |
| Foco da modelagem        | Contabilidade física descritiva                     | Mecanismos de mercado e consequências indiretas                |

Estudos recentes reconhecem que as abordagens são complementares ao invés de mutuamente excludentes, sendo a escolha dependente do objetivo do estudo (Schaubroeck *et al.*, 2021; Zamagni; Pesonen; Swarr, 2013). Para avaliações descritivas de sistemas existentes e comparação de desempenho físico-ambiental, a atribucional é mais apropriada. Para avaliar consequências de decisões que possam afetar mercados e cadeias de suprimento, a consequencial é preferível (Hansen *et al.*, 2023).

O presente estudo adota abordagem atribucional, uma vez que o objetivo é avaliar e comparar o desempenho ambiental de diferentes soluções construtivas para habitações de

interesse social. Não se pretende modelar efeitos marginais de mudanças no mercado de construção (como impactos de uma compra massiva de vidro no preço global ou deslocamento de produção em outros setores), mas sim caracterizar os impactos atribuíveis a cada configuração construtiva ao longo de sua vida útil, fornecendo subsídios para decisões de projeto arquitetônico.

A escolha pela abordagem atribucional é apropriada para estudos de nível micro que visam comparar opções de projeto, conforme estabelecido por Hansen *et al.* (2023). A modelagem de diferentes cenários construtivos (variações de materiais de paredes e janelas) aplicada a 4000 unidades habitacionais configura uma análise de sensibilidade, ferramenta recomendada dentro da ACV atribucional para lidar com incertezas e testar a robustez dos resultados, e não uma modelagem consequential de mercado (Buyle; Braet; Audenaert, 2013).

### *2.3.2 Dimensão temporal em ACV: abordagens dinâmicas*

A ACV convencional, conforme estruturada nas normas ISO 14040/14044, tradicionalmente assume que todos os fluxos de inventário e fatores de caracterização são constantes ao longo do tempo (Levasseur *et al.*, 2010). Essa simplificação é adequada para produtos de ciclo de vida curto e sistemas estáveis, mas introduz limitações significativas quando aplicada a:

- Produtos de longa vida útil (como edificações, com 40-100 anos);
- Sistemas energéticos em transição;
- Contextos sujeitos a mudanças climáticas progressivas;
- Cenários prospectivos de longo prazo.

Ignorar a dimensão temporal pode levar a conclusões equivocadas, especialmente quando impactos ocorrem em momentos distintos ou quando o contexto tecnológico/ambiental evolui significativamente. Para sistemas de longa duração como edifícios, assumir condições constantes ao longo do tempo é particularmente problemático (Lira; Silva, 2025).

A Avaliação Dinâmica do Ciclo de Vida (ADCV) surgiu para incorporar explicitamente a dimensão temporal na avaliação de impactos ambientais. Embora a ADCV não possua uma norma ISO dedicada exclusivamente a ela, isso não invalida sua legitimidade metodológica. A ADCV opera dentro do framework da ISO 14040/14044, mantendo a estrutura de quatro fases (Objetivo e Escopo, Inventário, Avaliação de Impacto, Interpretação), mas incorporando a resolução temporal dos dados (Lira; Silva, 2025).

Paralelamente, a ACV consequential também não possui norma ISO dedicada, operando sob o arcabouço genérico da ISO 14040 com apoio de guias complementares como o ILCD Handbook (Guinee, 2002). A flexibilidade da ISO 14040 permite aprofundamentos metodológicos. O reconhecimento científico da ADCV é evidenciado por um crescimento bibliométrico consistente (Zheng; Yan, 2025) e um campo de pesquisa robusto (Slavkovic; Stephan, 2025). Diferentemente da ACV convencional (estática), a ADCV reconhece que os fluxos de inventário variam ao longo do tempo, os fatores de caracterização evoluem e o tempo em que os impactos ocorrem influencia diretamente os resultados. A principal característica da ADCV é, portanto, a integração de variáveis dependentes do tempo (evolução temporal), em vez de usar valores estáticos (Lira; Silva, 2025):

1. **Inventários dinâmicos:** A ADCV utiliza inventários de ciclo de vida dinâmicos para módulos que mudam inerentemente com o tempo. Isso é frequentemente aplicado à fase de uso (módulo B6 - uso de energia operacional), onde o consumo é modelado com base em projeções futuras, como o aumento da temperatura ou mudanças na matriz energética ao longo de 50 ou 100 anos. O consumo de energia muda conforme o clima, padrões de ocupação e eficiência de equipamentos.
2. **Fatores de Caracterização dinâmicos:** Embora menos comum, a ADCV pode aplicar fatores de caracterização dinâmicos na avaliação de impacto. Isso é particularmente relevante para o aquecimento global, considerando quando uma emissão ocorre e seu forçamento radiativo ao longo do tempo. No entanto, a maioria dos modelos de Avaliação de Impacto (AICV) ainda assume fatores estáticos, sendo o uso de fatores dinâmicos raro e limitado principalmente à mudança climática (Lira; Silva, 2025). O impacto ambiental de 1 kWh de eletricidade depende da matriz energética, que se modifica ao longo dos anos (maior ou menor participação de renováveis).
3. **Resolução Temporal:** A resolução temporal dos inventários é geralmente anual (passo de tempo anual), embora alguns estudos utilizem resoluções mais finas (como horária) para aumentar a precisão, especialmente em relação à produção e consumo de eletricidade (Slavkovic; Stephan, 2025). O tempo dos impactos impacta diretamente a análise, pois as emissões de CO<sub>2</sub> hoje têm efeito climático diferente de emissões em 2050, devido à dinâmica atmosférica e aos ciclos biogeoquímicos (Levasseur *et al.*, 2010).
4. **Integração com tecnologias digitais:** A ADCV está sendo cada vez mais integrada com tecnologias como *Building Information Modelling* (BIM), *Machine Learning* (ML) e

Sistemas de Informação Geográfica (GIS) para gerenciar a intensidade de dados e as variações espaciais e temporais (Lira; Silva, 2025; Zheng; Yan, 2025).

Assim como a ACV convencional, a ADCV pode ser atribucional ou consequential (Schaubroeck *et al.*, 2021; Su *et al.*, 2017). É fundamental distinguir que ADCV atribucional e ADCV consequential operam em eixos diferentes: a atribucional foca no tempo, enquanto a consequential foca na causalidade e mercado (Frossard; Schalbart; Peuportier, 2020).

Uma ADCV atribucional descreve fluxos e impactos temporalmente variáveis de um sistema existente ou projetado, sem modelar efeitos marginais. Utiliza dados atribucionais (médios de mercado), mas projetados no tempo (como por exemplo, a composição média da rede elétrica em 2050). É a abordagem adotada quando o objetivo é caracterizar o desempenho ambiental ao longo do tempo considerando mudanças previsíveis no contexto (clima, tecnologia, regulação), buscando precisão temporal para refletir a realidade de um sistema de longa vida (Saade; Silva; Gomes, 2014; Slavkovic; Stephan, 2025).

Uma ADCV consequential modela as consequências temporais de uma decisão, considerando como mercados e tecnologias marginais evoluem em resposta. Utiliza obrigatoriamente dados marginais (como a tecnologia de eletricidade que responde à demanda marginal naquele momento), requerendo modelagem de elasticidades temporais e dinâmicas de substituição. Busca entender o impacto sistêmico de uma escolha, incluindo efeitos fora das fronteiras físicas imediatas do produto (Frossard; Schalbart; Peuportier, 2020).

Um estudo pode ser simultaneamente dinâmico e consequential, modelando, por exemplo, uma mistura de eletricidade marginal horária (consequential) ao longo da vida do edifício (dinâmica), conforme demonstrado por Frossard; Schalbart; Peuportier, (2020). Segundo Schaubroeck *et al.* (2021), tanto a ACV atribucional quanto a consequential podem ser consideradas em qualquer período (passado, presente e futuro), utilizando um ambiente de referência ou diferentes cenários. Além disso, ambas podem ser específicas para produtos ou decisões de médio ou pequeno porte, e para conjuntos de dados mais amplos.

A decisão entre ADCV atribucional e ADCV consequential não é uma questão de modernidade ou avanço, mas depende do alinhamento com a pergunta de pesquisa. Para estudos que visam decisões de projeto e comparação de desempenho físico-ambiental de alternativas construtivas, a ADCV atribucional é metodologicamente mais apropriada, pois evita introduzir incertezas econômicas de mercado que são irrelevantes para o escopo da avaliação (Hansen *et al.*, 2023).

Já a ADCV consequencial é mais adequada quando o objetivo explícito é avaliar como decisões em larga escala (políticas, mudanças de mercado) propagam efeitos marginais ao longo do tempo. A diferença sintetizada entre as duas abordagens de ADCV (atribucional e consequencial) estão demonstradas no Quadro 4, elaborado com base nas pesquisas de Frossard; Schalbart; Peuportier (2020), Hansen *et al.* (2023), Saade *et al.* (2022) e Slavkovic; Stephan (2025).

A ADCV tem sido aplicada em diversos contextos:

- **Energia e biocombustíveis:** Levasseur *et al.* (2010) desenvolveram métodos para considerar o *timing* de emissões de GEE e a dinâmica atmosférica.
- **Edificações:** Collinge *et al.* (2013a) e Negishi *et al.* (2018) aplicaram ADCV a edifícios institucionais, integrando projeções de uso energético e evolução da matriz elétrica. Van de Moortel *et al.* (2022) aplicaram explicitamente parâmetros dinâmicos para cenários de matriz elétrica futura em renovações residenciais, demonstrando que considerar essas mudanças é essencial para evitar a superestimação de impactos futuros.
- **Infraestrutura:** Su *et al.* (2017) propuseram estrutura para ADCV de sistemas urbanos considerando crescimento populacional e mudanças tecnológicas.

Quadro 4: Diferenças metodológicas de diferentes abordagens de ADCV

| Característica           | ADCV atribucional                                                                                                   | ADCV consequencial                                                                                                                                     |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pergunta a qual responde | “Como o impacto ambiental evolui ao longo do tempo”                                                                 | “Como os fluxos ambientais mudarão em resposta a uma decisão ao longo do tempo?”                                                                       |
| Tipo de dados            | Prospectivos médios de mercado, dependentes do tempo                                                                | Marginais (fornecedores afetados pela mudança), projetados temporalmente                                                                               |
| Inventário               | Inventário dinâmico (varia com o tempo, como a matriz elétrica anual projetada)                                     | Inclui processos substituídos, expande fronteiras, usa matriz marginal horária                                                                         |
| Foco principal           | Resolução temporal e projeção de variáveis futuras                                                                  | Mecanismos de mercado e consequências indiretas ao longo do tempo                                                                                      |
| Exemplo prático          | Calcular o carbono de um edifício considerando que a composição média da matriz elétrica será 40% renovável em 2040 | Calcular o impacto considerando que o aumento de demanda acionará uma termelétrica a gás marginal em horários de pico e como isso evolui temporalmente |

Tecnicamente, a ADCV requer uma modelagem temporal de inventários (projeção de fluxos anuais, como o consumo energético) ao longo da vida útil, fatores de caracterização dinâmicos ou estáticos, já que os impactos por unidade de fluxo que podem variar anualmente ou permanecer constantes. A limitação a fatores estáticos é reconhecida e aceitável na literatura, especialmente quando imposta por restrições de *software* (Van de moortel *et al.*, 2022).

Também requer uma integração temporal, onde o pesquisador inclui o cálculo de impactos acumulados considerando quando cada fluxo ocorre.

A abordagem atribucional dinâmica foi escolhida para responder: **“Como o desempenho ambiental físico de habitações sociais se comportará ao longo de 50 anos sob um futuro com clima mais quente e matriz energética em transição?”** Esta é uma questão de precisão temporal sobre fluxos físicos reais, que não aborda os efeitos marginais de mercado. Para se tornar uma ADCV consequencial, seria necessário modelar:

- Qual usina elétrica marginal específica seria ligada ou desligada em resposta ao aumento de consumo das habitações;
- Como a demanda por materiais construtivos (como a compra de 4000 janelas de vidro) afetaria preços globais e deslocaria produção em outros setores;
- Efeitos indiretos de substituição no mercado da construção.

Esses aspectos econômicos de mercado fogem ao escopo do estudo, que visa fornecer subsídios para decisões de projeto arquitetônico baseadas no desempenho físico-energético das edificações. Conforme estabelecido por Frossard; Schallbart; Peuportier (2020), a ADCV atribucional usando matriz elétrica média projetada é uma “metodologia distinta e válida” que produz “resultados de otimização de projeto de alta qualidade” para este tipo de objetivo.

Para o objetivo desta tese (avaliar o desempenho físico-energético de habitações de interesse social sob mudanças climáticas), a abordagem **atribucional dinâmica** oferece a granularidade temporal necessária sobre os fluxos físicos reais. A abordagem consequencial traria incertezas de mercado (econômicas) que não contribuiriam para as decisões de projeto almejadas, mesmo assim, esta pesquisa se valeu de uma característica da ADCV consequencial ao enfatizar mudanças nos resultados, apoiando a tomada de decisões e o desenvolvimento de políticas (Udisi; Gorgolewski, 2025).

O uso de *Machine Learning* (ML) para prever consumo energético e cenários futuros está alinhado com a fronteira do conhecimento em ADCV. Zheng; Yan (2025) classificam explicitamente o *Machine Learning Life Cycle* (ML-LC) como uma das três grandes vertentes da avaliação dinâmica, ao lado de BIM-LC e GIS-LC. Esta tese aplica algoritmos preditivos para reduzir a incerteza de dados futuros, respondendo a uma das principais lacunas identificadas na literatura sobre ADCV.

A escolha pela ADCV atribucional, ao invés da ADCV consequencial, não representa uma limitação metodológica, mas sim o alinhamento ideal entre método e objetivo. Hansen *et*

*al.* (2023) reforçam que estudos focados em decisões de projeto devem priorizar a precisão na caracterização física dos sistemas, objetivo mais bem atendido pela abordagem atribucional.

Essa abordagem permite avaliar como decisões construtivas tomadas hoje se comportarão ao longo de 50 anos, considerando que tanto a demanda (influenciada pelo clima) quanto os impactos por unidade de energia (influenciados pela matriz elétrica) evoluem temporalmente. O objetivo descritivo-comparativo do estudo é caracterizar prospectivamente o desempenho ambiental de soluções construtivas sob cenários plausíveis de evolução climática e energética. Este objetivo demanda precisão temporal sobre fluxos físicos (ADCV atribucional), não modelagem de efeitos marginais de mercado (ADCV consequencial).

### *2.3.3 ACV de produtos e ACV de edificações: especificidades normativas*

As normas ISO 14040 (princípios e estrutura) e ISO 14044 (requisitos e diretrizes) estabelecem a estrutura geral para Avaliação do Ciclo de Vida, aplicável a produtos e serviços de diversas naturezas (ISO, 2006a, 2006b). Essas normas definem as quatro fases da ACV (objetivo e escopo, inventário, avaliação de impactos, interpretação) e princípios gerais de condução de estudos.

No entanto, a aplicação de ACV em edificações apresenta especificidades que motivaram o desenvolvimento de normas complementares, reconhecendo que construções diferem fundamentalmente de produtos industriais convencionais.

Edificações distinguem-se de produtos industriais típicos por:

1. Terem uma longa vida útil (entre 40-100 anos);
2. Fixação geográfica (se tornando dependente do clima, recursos locais e contexto regulatório específicos);
3. Multifuncionalidade (proveem simultaneamente múltiplos serviços (conforto térmico, iluminação, segurança);
4. Fase de uso dominante (em climas tropicais e temperados, a energia operacional frequentemente supera os impactos incorporados dos materiais);
5. Variabilidade de desempenho (o comportamento energético depende de fatores dinâmicos (clima, ocupação, manutenção);
6. Complexidade de fim de vida (desmontagem, reuso, reciclagem e destinação de grande volume/diversidade de materiais).

Essas características limitam a aplicabilidade direta de métodos desenvolvidos para ACV de produtos, demandando adaptações ou extensões metodológicas. A norma ISO 21931-1:2010 estabelece o *framework* metodológico para avaliação de desempenho ambiental de obras de construção, complementando a ISO 14040/14044 com especificidades do setor (ISO, 2010).

Esta norma colabora para o reconhecimento de que edificações exigem consideração de: múltiplos aspectos ambientais simultaneamente, variações geográficas e climáticas, diferentes estágios de vida útil com pesos relativos distintos, orientação para definição de unidades funcionais adequadas ao contexto construtivo, e integração com outras normas do setor.

Para iniciar as menções às extensões metodológicas de normas criadas a partir das ISO 14040/14044 (ISO, 2006a; 2006b), a ISO 15392:2019 (ISO, 2019) fornece a base conceitual para normas específicas que abordam impactos ambientais, econômicos e sociais do ambiente construído. A norma reconhece que o setor da construção civil é estratégico para o desenvolvimento sustentável por ser:

- Um setor-chave nas economias nacionais com interface significativa na redução da pobreza;
- Um dos maiores setores industriais, que embora gere empregos e agregue valor, consome recursos consideráveis com consequentes impactos econômicos, sociais e ambientais;
- Responsável pela criação do ambiente construído, que representa parcela significativa dos ativos econômicos de indivíduos, organizações e nações;
- Um setor com oportunidade considerável de demonstrar melhorias em relação aos seus impactos (ISO 15392, 2019).

A contribuição de edificações para o desenvolvimento sustentável relaciona-se ao seu desempenho ao longo do ciclo de vida e requer uma abordagem holística. Na prática, é necessário que essa abordagem integre preocupações globais de desenvolvimento sustentável com demandas específicas de funcionalidade, eficiência e economia do produto construído.

A ISO 15392: 2019 reconhece que as estratégias para sustentabilidade em edificações são essencialmente locais, diferindo em contexto e conteúdo de região para região, refletindo as pré-condições do ambiente construído e da economia locais, o contexto social, incluindo a questão cultural e relação com o patrimônio e pode se relacionar, ainda, com a redução da pobreza, a criação de empregos e moradia digna. Por esses motivos, especialmente, a norma destaca que aspectos de governança são relevantes, uma vez que estruturas administrativas bem

estabelecidas podem conter requisitos que atuam como impulsionadores para direcionar o setor da construção rumo ao desenvolvimento sustentável.

A norma europeia EN 15804:2012+A2: 2019 estabelece regras específicas para Declarações Ambientais de Produto (DAPs ou o *Environmental Product Declarations* - EPDs) de materiais e componentes de construção, definindo módulos padronizados do ciclo de vida (CSN EN15804+A2, 2019):

- Módulos A1-A3: Produção (extração, transporte, manufatura);
- Módulos A4-A5: Construção (transporte ao canteiro, instalação);
- Módulos B1-B7: Uso (manutenção, reparo, substituição, energia operacional, água);
- Módulos C1-C4: Fim de vida (demolição, transporte, processamento, disposição);
- Módulo D: Benefícios além da fronteira (reuso, reciclagem, recuperação energética).

Identificar as fases por módulo (A, B, C e D) é importante por causa do “princípio da modularidade”, ou seja, “sempre que os processos influenciarem o desempenho ambiental do produto durante o seu ciclo de vida, devem ser atribuídos ao módulo do ciclo de vida onde ocorrem” (CSN EN15804+A2, 2019). Além disso, a comparabilidade permite que EPDs de diferentes produtos sigam a mesma estrutura.

A letra A representa a produção (fornecimento de matéria-prima, transporte e manufatura) e a construção ou instalação (transporte e construção). A classificação para a fase de uso recebe a identificação da letra 'B', que varia de B1 a B7. Os módulos de B1 a B5 estão relacionados à estrutura da edificação e são descritas a seguir com base nas definições da EN 15804 (CSN EN15804+A2, 2019):

- A etapa de uso (B1) compreende qualquer emissão ao meio ambiente durante a utilização do produto já instalado, nesse caso uma edificação;
- Manutenção (B2) se refere a uma manutenção preventiva e regular;
- Reparo (B3) é a estimativa de quantos reparos (corretivo, responsivo ou reativo) surgirão durante a vida útil de referência da edificação;
- Substituição (B4) é a substituição de produtos, componentes ou sistemas da edificação devido a danos; e
- Reabilitação (B5) é a reforma de toda a edificação como parte de um programa planejado ou programado de manutenção (B2), reparo (B3) e/ou substituição (B4) de uma parte significativa do edifício, ou seja, é o mesmo dos módulos anteriores,

mas com uma atenção ao melhoramento de características. Deve incorporar também atividades de restauração e *retrofit*.

Esses módulos abrangem os impactos ocasionados pelo fornecimento de matérias-primas, transporte em determinadas fases e geração e tratamento de resíduos. Estes também incluem todos os impactos e aspectos relacionados às perdas durante esta parte do estágio de uso (ou seja, produção, transporte e processamento de resíduos e descarte de produtos e materiais perdidos).

Os módulos B6 e B7, segundo a EN 15804+A2 (2019), estão relacionados à operação do edifício. O uso de energia operacional (B6) se refere, por exemplo, à operação do sistema de aquecimento e outros serviços instalados relacionados ao edifício e ao uso operacional de água (B7) à utilização de água para operação do edifício. Segundo a EN 15804 (CSN EN15804+A2, 2019), além dos produtos para serviços de construção, B6 e B7 não serão relevantes para a maioria dos **produtos** de construção e sim para uma **edificação completa** (*Whole-building*, como citado por Collinge *et al.*, 2012b; Holman *et al.*, 2025). Isso explica o maior foco desses módulos em uma ADCV e não em estudos de ACV convencionais.

A fase de fim de vida é identificada pela letra C (desconstrução, demolição, transporte, processamento de resíduo e disposição final). Ainda há um complemento para além do ciclo, representado pela letra D, que inclui reuso, recuperação e potencial de reciclagem, quando for o caso do ciclo fechado.

É comum os pesquisadores limitarem algumas dessas fases em suas pesquisas: fase de projeto (Duprez *et al.*, 2019), energia operacional (Fouquet *et al.*, 2015) ou apenas substituição (González Mahecha *et al.*, 2020). Um estudo do berço ao portão só inclui o estágio de produção (A1-A3), o de berço ao túmulo inclui os módulos A, B e C, o de berço a berço inclui todas: A, B, C e D. Existe também o estudo de porta a porta (*gate-to-gate*) que inclui apenas o processo dentro do ambiente fabril, representado pelo módulo A3 - manufatura.

A modularidade reconhece as especificidades de cada fase do ciclo de vida. O módulo B6, por exemplo, é opcional para EPDs de produtos, mas frequentemente dominante em ACVs de edificações completas. Para edificações em climas quentes, o módulo B6 pode representar 60-80% dos impactos totais ao longo da vida útil, justificando estudos focados exclusivamente nesta fase (Sharma *et al.*, 2011; Cabeza *et al.*, 2014).

A EN 15804 reconhece que a quantificação do módulo B6 requer: simulação de desempenho energético ou medições, consideração de padrões de ocupação e clima, definição de cenário operacional (*setpoints*, perfis de uso). No contexto brasileiro, a avaliação de

edificações deve considerar as normas nacionais, como a ABNT NBR 15575 (Desempenho de edificações habitacionais) que estabelece requisitos de desempenho térmico, acústico, lumínico e a ABNT NBR ISO 14040/14044 que são adotadas nacionalmente para ACV. Além disso, estudos brasileiros frequentemente adaptam EN 15804 e ISO 21931-1, considerando a ausência de uma norma nacional específica para estudos de ACV em edificações.

A norma ISO 21931-1 (ISO, 2010) apresenta uma estrutura de métodos para avaliação do desempenho ambiental de obras de construção e a parte 1 está relacionada aos edifícios. A norma adota explicitamente uma abordagem baseada no ciclo de vida. Ela divide o ciclo de vida do edifício em estágios modulares que devem ser considerados na avaliação: antes da entrega da obra, após a entrega e fim de vida da edificação. A pré-entrega equivale à etapa de produção e construção que contempla a extração de matérias-primas, a fabricação, o transporte e instalação no canteiro de obras. O pós-entrega engloba a fase de uso (manutenção, reparo, substituição e reabilitação) e operação (energia, água). O fim de vida da edificação é sua desconstrução, transporte, reciclagem, reuso e disposição final.

A norma enfatiza quais as questões (aspectos e impactos) ambientais devem ser incluídas nos métodos de avaliação. É obrigatório, por exemplo, considerar as mudanças climáticas e uso de recursos (renováveis e não renováveis, energia e água). Quando houver dados disponíveis, deve-se considerar também acidificação, eutrofização e formação de oxidantes fotoquímicos, produção de resíduos e uso da terra.

Um edifício é considerado um sistema em operação que fornece uma série de serviços aos seus usuários, durante a fase de uso. Além disso, também oferece condições adequadas para morar, trabalhar, estudar, prestar cuidados de saúde e realizar atividades de lazer. A prestação desses serviços resulta em impactos ambientais devido aos fluxos de entrada e saída que são uma consequência da operação dos serviços do edifício.

O desempenho ambiental do edifício depende dos recursos, incluindo materiais, energia, água, entre outros, que ele utiliza. Quando os recursos são utilizados, ocorrem fluxos de emissão, incluindo emissões atmosféricas, águas residuais e resíduos. Além disso, um edifício está conectado à infraestrutura a montante e a jusante, que requer energia, água e transporte, e gera impactos ambientais. Os impactos relacionados a essas conexões, incluindo as a montante e a jusante, devem ser considerados dentro do limite do sistema definido.

O limite do sistema estabelece as fronteiras entre o sistema de produto/edifício e o ambiente ou outros sistemas, definindo o que será incluído e o que será excluído na análise. Embora ambas as normas (ISO 14040 e ISO 21931-1) compartilhem o princípio de que o limite

deve ser claro e coerente, a sua aplicação e a extensão desejada diferem significativamente devido à complexidade e natureza dos objetos analisados.

Na ISO 14040, o limite do sistema é fundamentalmente definido como o “conjunto de critérios que especificam quais processos unitários fazem parte de um sistema de produto”. O ideal é que o sistema seja modelado de forma que as entradas e saídas no limite sejam fluxos elementares (diretamente para o ambiente), com foco nos processos unitários de uma cadeia de valor.

A ISO 21931-1 define o limite do sistema de forma mais abrangente, tratando-o como a interface entre um edifício e o ambiente ou outros sistemas de produtos. A avaliação deve, se possível, incluir todo o edifício, seus serviços, obras externas relacionadas e seu entorno, abrangendo todo o seu ciclo de vida (processos a montante e a jusante). Mas, na prática, o limite do sistema é frequentemente restrito e determinado por fatores como o uso pretendido da avaliação, os usuários, as partes interessadas, as etapas do ciclo de vida a serem aplicadas e as premissas subjacentes.

A Unidade Funcional (ISO 14040) e o Equivalente Funcional (ISO 21931-1) servem ao mesmo propósito central na ACV, que é fornecer uma base comum de referência para garantir a comparabilidade dos resultados entre diferentes sistemas ou soluções. No entanto, a complexidade inerente de um edifício exige uma expansão e adaptação desse conceito.

A Unidade Funcional (UF) é a quantificação das funções identificadas (características de desempenho) de um produto. É estritamente ligada à função que o produto cumpre, como, no exemplo da própria norma, um sistema de secagem de mãos (toalha de papel e secador de ar), na qual a UF é o número idêntico de pares de mãos secas. A UF permite determinar o fluxo de referência (a quantidade de produto necessária para cumprir a função). No exemplo, seria a massa média de papel ou o volume médio de ar quente necessário por par de mãos secas, entregando um conceito focado na entrega de um serviço específico pelo produto.

O Equivalente Funcional (EF) é a adaptação da UF ao contexto de uma edificação. É definido como os requisitos funcionais e/ou técnicos quantificados para um edifício, utilizados como base de referência. O EF deve incluir fatores para a quantificação do desempenho ambiental de um edifício, que vão além da mera função: tipo do edifício (prédio de escritórios, institucional, hospital, fábrica etc.), sua ocupação (período e padrão de uso, que afeta diretamente o consumo de energia operacional) e sua vida útil (a longevidade exigida no projeto define o horizonte temporal do estudo, como 40, 50 ou 100 anos). As características principais que diferem a ACV de produto de uma ACV de edificações estão resumidas no Quadro 5.

Quadro 5: ACV de produtos *versus* ACV de edificações

| <b>Característica</b>     | <b>ACV de produtos</b>                                    | <b>ACV de edificações</b>                                                                                             |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Normas principais         | ISO 14040/14044                                           | ISO 14040/14044<br>ISO 21931-1<br>EN 15804<br>ISO 15392                                                               |
| Objeto                    | Um item físico produzido                                  | Um sistema operacional, local de convívio e conjunto de produtos                                                      |
| Referência                | Unidade Funcional (unidade necessária para secar as mãos) | Equivalente Funcional (desempenho do sistema, contexto de uso e tempo de vida (escritório ocupado 8h/dia por 40 anos) |
| Objetivo                  | Garantir a comparabilidade entre produtos                 | Garantir a comparabilidade do desempenho do edifício e das necessidades dos usuários                                  |
| Vida útil típica          | Meses ou poucos anos                                      | 20-150 anos                                                                                                           |
| Fase dominante            | Majoritariamente produção (A1-A3)                         | Frequentemente fase de uso                                                                                            |
| Fase de Uso               | Passiva (duração/desgaste).                               | Ativa e dominante (consumo de recursos, água, energia).                                                               |
| Fronteira típica          | Berço ao portão ou berço ao túmulo                        | Modular (A+B+C+D ou pré e pós-entrega e fim de vida) conforme objetivo                                                |
| Variabilidade operacional | Baixa (processo controlado)                               | Alta (clima, ocupação, manutenção)                                                                                    |
| Dependência geográfica    | Baixa                                                     | Alta (clima local influencia o desempenho da edificação)                                                              |
| Dados                     | Primários (da fábrica).                                   | Agregados (EPDs de fornecedores e cenários de uso).                                                                   |

O presente estudo adotou uma metodologia de ACV robusta, de natureza atribucional (conforme discutido na seção 2.3.1) e dinâmica em sua projeção temporal (seção 2.3.2), garantindo a conformidade com padrões internacionais e o alinhamento com os objetivos específicos da pesquisa.

A base normativa geral utilizada segue as diretrizes das normas ISO 14040 e ISO 14044, cobrindo, assim, as quatro fases obrigatórias da ACV. Adicionalmente, para otimizar a análise do ciclo de vida da edificação (conforme detalhado na seção 2.3.3), o estudo adota a estrutura modular da norma EN 15804, concentrando sua avaliação exclusivamente no módulo B6, que representa o consumo de energia operacional destinado ao resfriamento da edificação.

A decisão por este escopo restrito é estratégica e se apoia em três justificativas principais: a dominância da fase de uso em edificações em climas quentes; o alinhamento direto com o objetivo de avaliar os impactos do resfriamento sob mudanças climáticas; e a elevada vida útil dos edifícios (50 anos), que amplifica a relevância dos impactos operacionais.

Dessa forma, o estudo reconhece a limitação de não considerar os impactos incorporados (módulos A1 a A5) e a fase de fim de vida (módulo C). Contudo, a análise desses módulos não incluídos pode ser objeto de estudos complementares futuros. Esta abordagem modular e focada é consistente com a literatura internacional de ACV de edifícios prioritariamente voltada ao desempenho energético e se mostra plenamente adequada aos objetivos declarados no escopo da pesquisa, preparando o caminho para a aplicação prática dos métodos na Seção 4.

Portanto, este estudo adota uma ADCV atribucional em conformidade com:

- ISO 14040/44: estrutura metodológica de quatro fases;
- EN 15804: modularidade e foco no B6;
- ISO 21931-1: especificidades de edificações;
- Literatura científica atual: incorporação temporal via ML e simulação.

Esta abordagem representa o estado da arte em ACV de edificações, conforme demonstrado por Lira; Silva (2025), Slavkovic; Stephan (2025) e Zheng; Yan (2025).

## **2.4 Evolução da aplicação da ACV e o paradigma da ADCV**

A ACV em edificações enfrenta desafios inerentes à sua longa vida útil (VU). Variações temporais em parâmetros cruciais, como o padrão de consumo de eletricidade, as propriedades dos materiais, a infraestrutura urbana e, sobretudo, a matriz energética, induzem incertezas que refletem na precisão dos resultados (Francis; Thomas, 2022; Van De Moortel *et al.*, 2022). Resch *et al.* (2021) observam que “o tempo dos eventos influenciará tanto a magnitude provável das emissões futuras quanto seus efeitos agregados sobre um horizonte de tempo definido.”

O Pensamento do Ciclo de Vida (PCV), que visa integrar aspectos ambientais, sociais e econômicos (Ciroth *et al.*, 2011), reforça a necessidade de olhar além do produto imediato. A ISO 14001 (ISO, 2015), ao incorporar o PCV, ampliou o escopo de responsabilidade, incentivando a identificação de oportunidades para reduzir o uso de recursos e promover menor impacto ambiental (ISO, 2015; Remmen; Jensen; Frydendal, 2007). No entanto, ferramentas mais abrangentes, como a Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV), que quantificam os três pilares da sustentabilidade, ainda são pouco consideradas na construção civil, com a maioria dos estudos focada apenas nos impactos ambientais (Backes; Traverso 2021).

A aplicação da ACV em edificações evoluiu historicamente, partindo da análise de produtos de construção e sistemas (do berço ao portão) para a inclusão da edificação completa e de todas as fases do ciclo de vida (Chau; Leung; Ng, 2015; Paulsen; Sposto, 2013).

Mesmo com a expansão do conhecimento, persistem desafios significativos, especialmente nas fases de Inventário e Avaliação de Impacto de um edifício completo, que exigem grande volume de dados e, conseqüentemente, induzem o pesquisador a suposições e incertezas (Nwodo; Anumba, 2019). Em resposta, estudos de alto impacto começaram a incluir a fase de uso (Módulo B) por meio de generalizações (estimativas de dados) projetadas para toda a vida útil.

Paulsen; Sposto (2013) realizaram uma Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) em habitações brasileiras, atribuindo cerca de 70% do impacto à fase de uso, mas utilizando estimativas e omitindo sistemas de climatização. De forma similar, Cuéllar-Franca; Azapagic (2012) estimaram impactos de tipologias britânicas assumindo o consumo de energia constante ao longo de 50 anos, baseados em dados oficiais. Caldas, Lira e Sposto (2017) avançaram ao utilizar a simulação computacional (*software* DesignBuilder) para estimar o consumo de energia da fase de uso (B6), replicando o resultado para a vida útil de 50 anos, uma abordagem mais robusta que a mera estimativa baseada em dados históricos.

Diante dos desafios da variação temporal, abordagens como a Avaliação Dinâmica do Ciclo de Vida (ADCV) surgiram para incorporar o fator tempo na modelagem dos impactos (Collinge *et al.*, 2018; Rosse Caldas *et al.*, 2020; Su; Li; Zhu, 2019). A ADCV apresenta uma visão mutável e é mais adequada para edificações, pois os efeitos dinâmicos da utilização de energia operacional nos edifícios superam de longe os impactos estáticos das emissões incorporadas (Phillips; Fannon; J. Eckelman, 2022). A ADCV reflete a variação temporal diretamente no resultado do impacto da fase de operação, funcionando como um sistema de tomada de decisão que fornece *insights* claros sobre a natureza dinâmica do ambiente construído (Slavkovic; Stephan, 2025).

O trabalho pioneiro na aplicação da ADCV em edificações foi realizado por Collinge *et al.* (2012b, 2012a), focado no monitoramento de energia e qualidade ambiental interna. Esse trabalho foi subsequentemente expandido em periódicos de alto impacto. Collinge *et al.* (2013a) criaram um método para ADCV, realizando o Inventário Dinâmico do Ciclo de Vida (IDCV) com a coleta de dados primários e a previsão do consumo futuro de energia utilizando o modelo eQUEST, adicionando parâmetros exclusivos do estudo de caso. Para a Avaliação de Impacto, os autores buscaram fatores de emissão dinâmicos de acordo com as características locais de geração de energia.

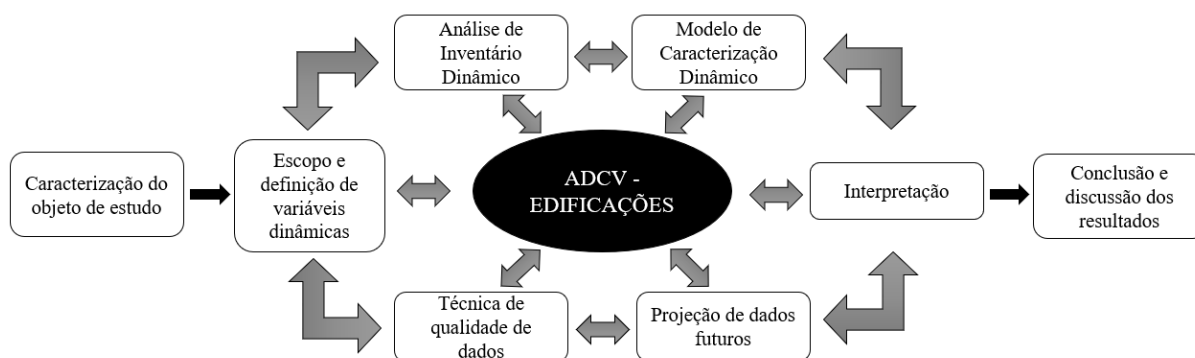
Artigos subsequentes (Collinge *et al.*, 2013b, 2014) do mesmo grupo desenvolveram uma estrutura para incorporar a Qualidade do Ambiente Interno e fatores de produtividade. Nesses estudos, os autores analisaram apenas o módulo B6 da fase de uso, com o IDCV baseado em coleta de dados primários ou Avaliação Pós-Ocupação (questionário respondido pelos usuários).

A predominância de estudos de ADCV focados no módulo B6 e a necessidade de projetar cenários futuros complexos, conforme demonstrado por Collinge *et al.* (2013a), valida a escolha metodológica central desta tese: desenvolver uma abordagem inovadora que integre variáveis locais e ferramentas computacionais avançadas, precisamente na análise dinâmica do consumo operacional de energia para resfriamento.

## 2.5 Particularidades da Avaliação Dinâmica do Ciclo de Vida (ADCV)

Diferentemente da ACV convencional, uma avaliação dinâmica tem particularidades, como considerar fatores (internos e externos) dependentes do tempo. Quando aplicada a um edifício, uma ADCV tem requisitos adicionais, como considerar projeções de dados futuros. Portanto, todas as recomendações em estudos de ADCV para edifícios podem ser categorizadas em uma nova estrutura (Figura 1).

Figura 1: Fases da Avaliação Dinâmica do Ciclo de Vida para edificações



Fonte: Lira; Silva (2025)

Conforme observado, a natureza iterativa da ACV convencional permanece em uma ADCV-edf, se tornando até mais evidente. Um estudo de ADCV-edf deve começar com a caracterização do objeto de estudo, definindo as características completas do edifício: área, localização, ocupantes e função. Depois, o pesquisador deve seguir esta ordem:

1. **Definição de Escopo e Variáveis Dinâmicas:** Definição do objetivo e o escopo do estudo e as variáveis dinâmicas a serem consideradas. Descrição dos detalhes de cada variável, o cenário coberto e suas fontes.

2. **Análise Dinâmica de Inventário (IDCV):** Procedimentos de coleta e cálculo de dados para quantificar entradas e saídas relevantes de um sistema de produto, diferenciados pelo tempo em que ocorrem.
3. **Modelo de Caracterização Dinâmica (MCD):** Este modelo traduz dados numéricos de inventário em resultados de indicadores em diferentes categorias de impacto usando fatores dinâmicos de caracterização, quando for possível.
4. **Técnica de Qualidade de Dados (TQD):** Envolve o uso de técnicas de qualidade de dados para verificar a excelência e adequação dos dados. Serve para entender a confiabilidade da coleta de resultados de indicadores e ajuda a distinguir se existem diferenças significativas (ISO, 2006). Nessa etapa são incluídas as quantificações de incertezas;
5. **Previsão de Dados Futuros (PDF):** É a definição de técnicas usadas para prever dados futuros. Resulta do comportamento de variáveis dinâmicas ao longo do ciclo de vida do edifício.
6. **Interpretação:** Esta fase apresenta os resultados em um formato gráfico ao longo de sua vida útil. Inclui conclusões, recomendações e limitações do estudo. Além disso, inclui resultados de completude, sensibilidade e consistência (ISO, 2006). Esta fase é de grande responsabilidade para o pesquisador, pois contém diretrizes e identifica pontos significativos.

A utilização da ferramenta ADCV difere da ACV convencional por sua falta de padronização, visto que as métricas e modelos de caracterização para uma avaliação dinâmica ainda estão em desenvolvimento (Negishi *et al.*, 2018; Su *et al.*, 2022a). Devido a essa restrição, e considerando que os *softwares* disponíveis estão primordialmente limitados à ACV estática, as pesquisas em ADCV aplicada a edificações, em geral, dependem do desenvolvimento de metodologias e *frameworks* próprios para a execução.

Diversos estudos têm proposto metodologias complexas para transpor essa lacuna. Su *et al.* (2020), por exemplo, elaboraram um modelo que integra BIM com ADCV e inclui componentes como um banco de dados dinâmico, matriz de energia com evolução de fontes renováveis e fatores de ponderação temporais. Embora o modelo tenha demonstrado potencial, a metodologia de execução manual e a interface não amigável dificultam sua reprodução em outros estudos.

Em uma continuidade desse esforço, Su *et al.* (2022) adaptaram o modelo anterior para focar em fluxos elementares de primeiro plano em um intervalo de tempo, priorizando a

dimensão espacial e temporal (duas cidades chinesas). Apesar de sua robustez, a especificidade do modelo o torna de difícil generalização para outras realidades geográficas.

Em contraste, Apostolopoulos *et al.* (2023) criaram a plataforma *online* VERIFY, unindo *softwares* e bases de dados (matriz energética e informações meteorológicas europeias). A plataforma apresenta vantagens em termos de operacionalidade e dados horários. Contudo, a apresentação dos resultados em um horizonte restrito a um ano de utilização compromete a representação da totalidade da vida útil (25 anos) definida pelos próprios autores.

Outro grupo tem priorizado a manipulação e o tratamento de dados. Negishi *et al.* (2018) propuseram uma metodologia geral de aplicação, a DyPLCA, focada na indicação de *softwares* e manipulação de dados, sem aplicar o modelo em um produto real. Posteriormente, o mesmo grupo (Negishi *et al.*, 2019) aplicou a metodologia em uma edificação existente, utilizando a ferramenta.

A principal limitação para a evolução da área reside, no entanto, na comunicação dos resultados. Observa-se que, em muitos estudos de ADCV-edf (Francis; Thomas, 2022; Piccardo; Dodoo; Gustavsson, 2020; Roux; Peuportier, 2013; Su *et al.*, 2021b, 2022a), a metodologia enfatiza o caráter dinâmico, mas os resultados são apresentados em um único valor total (o somatório do impacto acumulado na fase de uso). Isso impede que o leitor identifique pontos críticos ao longo dos anos ou outras unidades de tempo, camuflando a variação temporal que é a essência e o diferencial da ADCV.

### 2.5.1 Variáveis dinâmicas

Variáveis dinâmicas são aquelas dependentes e sensíveis ao tempo, que se modificam e alteram o entorno de um sistema de produto durante o período avaliado, refletindo diretamente nos impactos ambientais (Su *et al.*, 2022). Em uma ADCV, a inclusão dessas variáveis é o que promove o dinamismo da análise (Hu, 2018). Embora a consideração do maior número possível de variáveis seja ideal, a exequibilidade prática nos estudos de ADCV de edificações exige a delimitação daquelas mais relevantes, que são categorizadas e apontadas Quadro 6.

Adicionalmente, alterações urbanas (como a mudança na função da edificação ou a automação impulsionada por cidades inteligentes) também representam uma possibilidade de mudança de cenário. É necessário reconhecer que todas as variáveis dinâmicas estão interrelacionadas, sendo que a flutuação em uma categoria acaba por influenciar e ser influenciada pelas demais no cálculo do impacto acumulado.

Quadro 6: Variáveis dinâmicas contempladas em estudos de ADCV em edificações

| Variáveis dinâmicas                                  | Conceito                                                                                                                                                                                                                                 | Referências                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Melhorias de eficiência em materiais de construção   | Avanços tecnológicos em materiais que são substituídos ao longo da vida útil de um edifício, reduzindo a energia incorporada e as emissões (Hu, 2018).                                                                                   | Collinge <i>et al.</i> (2013a)<br>Su <i>et al.</i> (2017, 2021)<br>Hu (2018)<br>Negishi <i>et al.</i> (2018, 2019)<br>Van de Moortel <i>et al.</i> (2022)                                                                                                                                                                                                                                |
| Características da ocupação/comportamento do usuário | Mudanças nos hábitos de consumo, no número de ocupantes ou no padrão de uso do edifício (Su <i>et al.</i> , 2021a; Van De Moortel <i>et al.</i> , 2022).                                                                                 | Collinge <i>et al.</i> (2013a)<br>Su <i>et al.</i> (2017, 2020, 2021)<br>Su; Li; Zhu (2019)<br>Hu (2018)<br>Negishi <i>et al.</i> (2018, 2019)                                                                                                                                                                                                                                           |
| Modificação na matriz elétrica                       | Descarbonização das redes nacionais de energia, alteração das fontes (aumento de renováveis, por exemplo) e otimização dos processos de transmissão (Rosse Caldas <i>et al.</i> , 2020).                                                 | Collinge <i>et al.</i> (2013a, 2018)<br>Roux; Peuportier (2013)<br>Su <i>et al.</i> (2017, 2021)<br>Su; Li; Zhu (2019)<br>Negishi <i>et al.</i> (2018, 2019)<br>Asdrubali <i>et al.</i> (2020)<br>González Mahecha <i>et al.</i> (2020)<br>Rosse Caldas <i>et al.</i> (2020)<br>Göswein <i>et al.</i> (2021)<br>Phillips; Fannon; Eckelman (2022)<br>Van de Moortel <i>et al.</i> (2022) |
| Mudanças climáticas                                  | Aumento de temperatura já experimentado e o previsto para os próximos anos, impactando diretamente o consumo de energia elétrica e de recursos (González Mahecha <i>et al.</i> , 2020).                                                  | Collinge <i>et al.</i> (2013a)<br>Pittau <i>et al.</i> (2019)<br>Su <i>et al.</i> (2020)<br>González Mahecha <i>et al.</i> (2020)<br>Rosse Caldas <i>et al.</i> (2020)<br>Phillips, Fannon e Eckelman (2022)                                                                                                                                                                             |
| Intervenção política/ Metas governamentais           | Reflexo das mudanças em padrões e compromissos nacionais (como acordos internacionais), incluindo incentivos governamentais para edifícios de baixo consumo ou créditos de carbono (Francis; Thomas, 2022; Vahidi <i>et al.</i> , 2021). | Collinge <i>et al.</i> (2013a)<br>Hu (2018)<br>Su <i>et al.</i> (2020, 2021)<br>Göswein <i>et al.</i> (2021)<br>Francis; Thomas (2022)                                                                                                                                                                                                                                                   |

Dentre as variáveis listadas, a modificação na matriz elétrica tem sido o parâmetro dinâmico mais prevalente na literatura de ADCV-edf (Negishi *et al.*, 2019; Slavkovic; Stephan, 2025). Essa centralidade deriva do fato de que a ACV convencional utiliza um fator de emissão da matriz de produção média anual de eletricidade constante ao longo de todo o ciclo de vida, subestimando a influência da transição energética (Su; Li; Zhu, 2019). O alinhamento das metas ambientais com o desenvolvimento econômico tem impulsionado a transição energética global, um processo que influencia diretamente a atenuação dos impactos ambientais provocados pelo consumo de energia em edifícios (Su *et al.*, 2017).

Paralelamente, as características da ocupação e o comportamento do usuário também recebem atenção significativa, sendo variáveis que dependem da economia, cultura e clima. O perfil do usuário e seu comportamento são críticos na ACV, variando os resultados de acordo com a percepção da comunidade sobre o uso do edifício e sua tolerância ao risco (Hu, 2018; Negishi *et al.*, 2018). Esses perfis afetam diretamente o consumo específico de energia e recursos (Collinge *et al.*, 2013b; Su *et al.*, 2017).

Contudo, apesar de ser uma questão que impulsiona grandes transformações sociais e impacta diretamente a demanda por resfriamento, as mudanças climáticas são incluídas como variável dinâmica em poucos artigos (González Mahecha *et al.*, 2020). A projeção pessimista do IPCC (2023) sugere que as temperaturas podem aumentar significativamente, o que torna a inclusão dessa variável imperativa em estudos de ACV com foco em energia operacional, especialmente em climas quentes. A intervenção política, que engloba a descontinuidade de usinas de carvão (EUA, China, Portugal) e incentivos fiscais, é uma variável que modula todas as demais (Hu, 2018; Su *et al.*, 2020; Göswein *et al.*, 2021).

Nesta pesquisa, o foco metodológico reside na modelagem de duas variáveis dinâmicas cruciais e interconectadas para o contexto brasileiro: a **alteração da temperatura global** (como efeito das mudanças climáticas) e as **mudanças na matriz elétrica nacional** (efeito da transição energética). A mudança climática é uma variável dinâmica chave em ADCV de edifícios (Lira; Silva, 2025). O uso de regressão e redes neurais para projetar temperaturas futuras e consumo energético responde à necessidade de caracterizar a demanda de climatização sob cenários climáticos futuros. O desenvolvimento de um modelo híbrido que projeta a composição futura da matriz, considerando a descarbonização da rede elétrica, avança o estado da arte, superando o uso de cenários prontos (Van de Moortel *et al.*, 2022).

### 2.5.2 Inventário Dinâmico e projeção de dados futuros em edificações

A identificação das variáveis dinâmicas (conforme detalhado na Seção 3.5.1), como as mudanças climáticas e a alteração da matriz elétrica, exige a realização de um Inventário Dinâmico do Ciclo de Vida (IDCV). O IDCV representa o desafio de projetar fluxos de entrada e saída, particularmente o consumo de energia operacional (Módulo B6), ao longo de toda a vida útil da edificação.

O IDCV é uma evolução do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) clássico, que é aplicado nas fases estáticas de um edifício: A1-A5 (produção e instalação), B2-B5 (módulos da fase de uso que consideram uma aplicação pontual e não são variáveis no tempo) e C1-C4 (fim de vida).

O ICV se torna complexo em edificações devido: i) às durações de vida útil estendidas; ii) à presença de vários sistemas interconectados; e iii) à variabilidade climática (Su *et al.*, 2021a).

Na estrutura da ADCV-edf, o IDCV é marcado pelo desafio de reunir dados realistas e precisos ao longo do tempo, especialmente no que diz respeito aos módulos dependentes do tempo B1 (uso), B6 (uso de energia operacional) e B7 (uso de água operacional) (Collinge *et al.*, 2013a; Hu, 2018; Rosse Caldas *et al.*, 2020). Essa fase incorpora mudanças no uso de recursos ou emissões de poluentes por processos devido a fatores como tecnologia, regulamentação, comportamento de utilização e variação de temperatura (Apostolopoulos *et al.*, 2023; Su *et al.*, 2017). O IDCV tem dois aspectos principais: i) a **coleta de dados** sobre o consumo operacional de energia e ii) a **projeção** desses dados ao longo de toda a vida útil do edifício.

A coleta de dados pode ser conduzida por meio de métodos primários (leituras diretas de medidores); fontes secundárias (Francis; Thomas, 2022; Göswein *et al.*, 2021) ou dados do governo local (Beloin-Saint-Pierre *et al.*, 2019; Van De Moortel *et al.*, 2022). O período de coleta de dados primários varia significativamente na literatura, sendo que alguns estudos coletam dados por meses (Collinge *et al.*, 2013b) e outros por um ano (Asdrubali *et al.*, 2020), o que dificulta a comparação entre estudos semelhantes.

A projeção de dados futuros para o IDCV é geralmente realizada por três abordagens na literatura:

- I. **Simulação de Desempenho de Edifícios (BPS):** A BPS é o método mais prevalente, utilizando *softwares* como EnergyPlus, DesignBuilder e outros para estimar o consumo de energia sob diferentes condições climáticas e de ocupação. A maioria dos estudos foca em edifícios residenciais multifamiliares ou unifamiliares, cuja definição da unidade funcional requer consideração do tipo, requisitos técnicos, padrões de uso e Vida Útil (VU) esperada (Nwodo; Anumba, 2019).
- II. **Estimativas oficiais:** Alguns estudos dependem de metas governamentais (Phillips; Fannon; J. Eckelman, 2022; Su *et al.*, 2021b) ou cenários futuros hipotéticos (González Mahecha *et al.*, 2020), introduzindo um nível de subjetividade e potencial imprecisão.
- III. **Técnicas estatísticas convencionais:** Outros autores utilizam uma mistura de ferramentas estatísticas e dados empíricos para projetar fluxos anuais de Gases de Efeito Estufa (GEE) (Asdrubali *et al.*, 2020; Su *et al.*, 2022), o que, embora preciso para o contexto em que foi desenvolvido, pode limitar a reprodutibilidade do modelo.

Para incluir a variável dinâmica das mudanças climáticas no IDCV (González Mahecha *et al.*, 2020; Rosse Caldas *et al.*, 2020), uma das ferramentas mais utilizadas em conjunto com o BPS é o CCWorldWeatherGen (Rosse Caldas *et al.*, 2020; Shen, 2017). Esta ferramenta é robusta por permitir a geração de arquivos climáticos futuros para *software* de simulação, mostrando o efeito dinâmico do aumento da temperatura (Berardi; Jafarpur, 2020).

No entanto, a dependência dessas ferramentas apresenta um desafio significativo em relação à representatividade regional e à granularidade. A projeção pessimista do IPCC (2023) estabeleceu um cenário médio global para o aumento de temperatura. As respostas regionais a essa projeção podem variar significativamente, e as mudanças climáticas não se manifestam da mesma forma em todas as situações (Tiruta-Barna, 2021). O CCWorldWeatherGen depende de métodos de projeção estatística global, o que pode ter uma granularidade elevada e reduzir a precisão em aplicações locais (Jentsch; Bahaj; James, 2008; P.Tootkaboni *et al.*, 2021). Em um clima em mudança, a análise regional e local é fundamental para prever dados futuros mais ajustados à realidade (ISO, 2010; P.Tootkaboni *et al.*, 2021).

Esta lacuna foi abordada em estudos recentes que empregaram técnicas avançadas de *Machine Learning* para aumentar a precisão da projeção de consumo em edifícios, como demonstrado por Lira; Souza; Silva (2025), que utilizou redes neurais artificiais para modelar a demanda energética sob cenários climáticos futuros.

Em suma, a estrutura teórica atual para IDCV-edf, fortemente ancorada em simulações BPS e métodos estatísticos convencionais, está confinada a uma gama limitada de cenários. Essa abordagem aponta para um baixo nível de representatividade e precisão regional em contextos climáticos específicos. Portanto, existe uma lacuna na literatura quanto ao desenvolvimento de modelos preditivos que utilizem dados históricos locais e modelos computacionais avançados para gerar projeções de demanda energética com maior granularidade e precisão.

### 2.5.3 Avaliação do impacto e quantificação de incertezas

Com o Inventário Dinâmico do Ciclo de Vida (IDCV) estabelecido e os fluxos de energia operacional projetados no tempo, a etapa seguinte é a Avaliação Dinâmica do Impacto. Esta etapa é a tradução dos dados de inventário (ICV) em impactos ambientais significativos, seguindo as quatro fases estruturais da ACV (ISO 14040 e 14044).

Em uma ACV convencional, essa fase é a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), onde os Fatores de Caracterização (FCs) que convertem emissões (como kg de CO<sub>2</sub>)

em categorias de impacto (como Potencial de Aquecimento Global) são fixos ao longo do horizonte de tempo. No contexto da ADCV-edf, a AICV é denominada Modelo de Caracterização Dinâmica (MCD) ou Avaliação Dinâmica do Impacto do Ciclo de Vida (ADICV).

A ADICV confronta o desafio de incorporar o fator tempo na avaliação dos impactos, buscando soluções na literatura para modelar o dinamismo nos FCs. A literatura de ADCV-edf trata essa questão por:

- a. Uso de dados secundários: Adoção de FCs definidos por legislação governamental ou literatura científica com horizonte temporal específico (Peñaloza; Erlandsson; Falk, 2016; Piccardo; Dodoo; Gustavsson, 2020; Su *et al.*, 2021a).
- b. Criação de modelos próprios: Desenvolvimento de Modelos de Caracterização Dinâmica (MCD) específicos (Hu, 2018; Negishi *et al.*, 2019; Su *et al.*, 2020).

Os *softwares* de ACV convencionais (como SimaPro ou GaBi), embora essenciais para a AICV estática, não fornecem o resultado total acumulado que é sensível ao tempo de vida útil do edifício, sendo inadequados para a ADICV e para processos mais automatizados. As categorias de impacto são definidas pelo método de AICV escolhido (CML, Eco-indicator 99, etc.). O ponto de avaliação na cadeia de causa-efeito varia entre ponto médio (*midpoint*), ponto final (*endpoint*) e misto.

O ponto médio corresponde aos estágios iniciais da cadeia de causa-efeito, minimizando incertezas (emissão de CO<sub>2</sub>). O ponto final corresponde ao resultado final do efeito, que pode adicionar altos níveis de incerteza (como a emissão de CO<sub>2</sub> que pode causar danos como aumento de casos de câncer de pele) (Saade; Silva; Gomes, 2014). A avaliação mista combina parte do efeito *midpoint* e *endpoint* (Collinge *et al.*, 2018)

As emissões de CO<sub>2</sub> (Potencial de Aquecimento Global ou Mudança Climática) aparecem com recorrência na literatura de ADCV-edf, estando “na vanguarda de qualquer avaliação dinâmica de edifícios” (Phillips, Fannon e Eckelman, 2022). Outras categorias frequentemente incluídas são Potencial de Acidificação, Eutrofização e Toxicidade humana.

A incerteza é inerente a qualquer análise que envolva projeções de cenários futuros, sendo fundamental em uma ADCV para garantir a confiabilidade, robustez e aplicabilidade dos resultados (Hosamo *et al.*, 2024). A falta das dimensões espacial e temporal no ICV tradicional introduz incerteza nos resultados da AICV (ISO 14040, 2006a).

A ISO 14040 recomenda a execução de análises adicionais da qualidade de dados para a ACV convencional, sendo que na ADCV-edf, a literatura demonstra o seguinte uso:

- **Análise de Sensibilidade:** É o procedimento mais usado na literatura de ADCV-edf, focando em como mudanças nos dados e escolhas metodológicas impactam os resultados. É tipicamente organizada com base em variações de cenários (otimistas a pessimistas) e é usada para analisar a influência de:
  - Mudanças na matriz elétrica (foco na descarbonização) (Negishi *et al.*, 2019; Rosse Caldas *et al.*, 2020).
  - *Retrofit*/substituição de materiais (Fouquet *et al.*, 2015; Su *et al.*, 2021b).
  - Cenários de fim de vida e custo (Stephan; Stephan, 2020).
  - Vida útil e período de análise (Zea Escamilla *et al.*, 2016).
- **Análise de Incerteza:** Procedimento que determina como as incertezas nos dados e suposições afetam os cálculos. Poucos artigos na ADCV-edf aplicaram métodos estatísticos específicos de análise de incerteza, como Monte Carlo.
- **Análise de Contribuição:** Procedimento estatístico que identifica os dados com maior contribuição para o resultado. Não foram encontradas utilizações na literatura de ADCV-edf.

Autores como Collinge *et al.* (2014) e Vahidi *et al.* (2021) demonstraram, por meio da análise de cenários, que o potencial para redução de emissões e os impactos variam de acordo com a região e o tipo de construção, ressaltando a importância de dados e informações locais na avaliação de sensibilidade.

Para a quantificação da incerteza, a matriz de Pedigree (Ciroth *et al.*, 2016) é um exemplo de ferramenta para avaliar a qualidade dos dados, recomendada pela ISO 14040. Embora a análise de sensibilidade e a análise de cenários sejam amplamente adotadas na ADCV-edf como uma forma de quantificação, a incerteza é o grau ou distância que o valor medido está do valor verdadeiro (Rosembaum; Georgiads; Fantke, 2017), o que indica que as incertezas variam de acordo com as características espaciais e temporais de cada categoria de impacto (Lira; Silva, 2025).

Apesar da ampla utilização da análise de sensibilidade, a lacuna reside na ausência de métodos estatísticos robustos, como Monte Carlo, para a quantificação formal das incertezas introduzidas pelas variáveis dinâmicas de longo prazo. Essa necessidade de modelar a incerteza de forma mais sofisticada, aliada à complexidade da projeção de dados em climas tropicais, justifica a adoção de modelos computacionais avançados, tema da próxima seção.

## 2.6 Modelos computacionais avançados em estudos sobre edificações

As limitações inerentes aos modelos estáticos de ACV (Seção 3.4), especialmente a dificuldade em projetar o consumo de energia operacional (Módulo B6) sob cenários de mudança climática, exigem a adoção de modelos computacionais avançados. Esta seção consolida a revisão de literatura sobre as ferramentas essenciais para permitir a transição para uma análise dinâmica e prospectiva no projeto de edificações: a Simulação de Desempenho de Edifícios (BPS) como base para a geração de dados, as técnicas de Tomada de Decisão Multicritério (TDMC) para otimização de projetos, e o Aprendizado de Máquina (ML), com foco em Redes Neurais Artificiais (RNA), como mecanismo preditivo robusto. O objetivo é demonstrar como a integração dessas ferramentas soluciona a lacuna da perspectiva dinâmica na literatura de ACV-edf.

Ferramentas de Simulação de Desempenho de Edifícios (BPS), como o EnergyPlus™, são fundamentais nesta abordagem por permitirem a criação de um grande espaço amostral de alternativas de projeto (simulação paramétrica), servindo como fonte de dados para os modelos preditivos e decisórios subsequentes (Apostolopoulos *et al.*, 2023; Phillips; Fannon; J. Eckelman, 2022).

A ampliação das combinações de projeto, combinada com a necessidade de avaliar critérios conflitantes (como custo e impacto ambiental), torna a Tomada de Decisão Multicritério (TDMC) indispensável. Contudo, a tese avança ao acoplar a Rede Neural Artificial (RNA), não apenas para agilizar o TDMC, mas, para modelar o critério de impacto ambiental sob uma perspectiva dinâmica, um diferencial ausente nos estudos revisados de ADCV-edf. Essa integração configura a inovação metodológica desta pesquisa

### 2.6.1 Tomada de Decisão Multicritério em edificações

A etapa de projetar edifícios é um processo complexo que demanda uma análise global e multidisciplinar que abranja todo o ciclo de vida e atenda aos critérios conflitantes das partes interessadas (Kokaraki *et al.*, 2019). Essa necessidade conduz à otimização multicritério, que busca a melhor solução arquitetônica ao considerar simultaneamente diversos critérios de desempenho e alternativas de projeto (Bac; Alaloosi; Turhan, 2021).

Em estudos de otimização de edifícios, esse processo é frequentemente automatizado pelo acoplamento entre um programa de um *software* de BPS e um mecanismo de otimização (Nguyen; Reiter; Rigo, 2014). O BPS (também conhecido como *Building Energy Simulation* ou *Building Energy Modelling*) atua como modelo de alta fidelidade, utilizando modelos

matemáticos baseados em física para representar as características físicas, a operação esperada e as estratégias de controle do edifício (Bhavsar *et al.*, 2023). A simulação paramétrica nos modelos BPS é indispensável, pois permite a exploração eficiente de múltiplos cenários e alternativas de projeto (Chong; Xu; Poh Lam, 2015)

Neste contexto, os métodos de TDMC, como TOPSIS, AHP, ELECTRE e NSGA-II<sup>3</sup>, são adequados por possibilitarem a seleção da solução com o melhor desempenho geral, gerenciando as compensações entre critérios conflitantes de forma equilibrada (Han *et al.*, 2023; Moschetti *et al.*, 2022). A TDMC se baseia na classificação ou priorização de alternativas que, embora não atendam a todos os critérios no mesmo nível, resultam no maior benefício líquido (Kokaraki *et al.*, 2019).

A aplicação da simulação paramétrica está intrinsecamente afetada pela variabilidade das entradas, especialmente os parâmetros meteorológicos projetados ao longo da longa vida útil da edificação (IPCC, 2023). A incerteza, inerente à modelagem preditiva, é entendida como a diversidade de cenários que podem causar a lacuna de desempenho (Arbulu; Oregi; Etxepare, 2024; Rezaee *et al.*, 2015). Para lidar com essa realidade, a seleção da melhor solução deve evoluir da otimização simples para a Tomada de Decisão sob Incerteza (Bac; Alaloosi; Turhan, 2021).

Estudos avançados têm demonstrado que os métodos de quantificação de incerteza são essenciais na TDMC para testar a robustez da solução ótima em diferentes condições (Harkouss; Fardoun; Biwale, 2018; Moschetti *et al.*, 2022). Moschetti *et al.* (2022), por exemplo, investigaram o uso de TDMC em projetos de emissão zero considerando incertezas operacionais. Outros estudos acoplaram TDMC a técnicas probabilísticas: Baseer *et al.* (2023) propuseram o método pELECTRE Tri, que combina ELECTRE Tri com simulação de Monte Carlo, permitindo uma análise detalhada das incertezas em decisões sobre renovação.

Apesar da ampla utilização e evolução da TDMC, a revisão da literatura evidencia uma tripla lacuna metodológica que o presente estudo se propõe a preencher, conforme detalhado no Quadro 7:

1. Contexto e Escopo: Ausência de estudos que abordem a Habitação de Interesse Social (HIS) unifamiliar em um contexto climático de temperaturas elevadas (clima tropical quente brasileiro).

---

<sup>3</sup> *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) e Processo de Hierarquia Analítica (*Analytic Hierarchy Process* – AHP), *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II).

2. Rigor e Robustez: A grande maioria dos trabalhos não incorpora a quantificação de incertezas por meio de métodos estocásticos, deixando de validar a robustez das soluções de projeto frente às flutuações futuras.
3. Método Integrado (ADCV): Os artigos de referência não acoplam modelos preditivos dinâmicos de longo prazo (necessários para a ADCV) e a análise estocástica (Monte Carlo) aos métodos de TDMC.

Quadro 7: Escopo dos artigos relacionados com a TDMC em edificações

| Ref.                             | Critério                                                                                         | Software BPS                                 | TDMC                                                 | Incerteza                | Tipo de Edificação                                  |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------|
| Han <i>et al.</i> (2023)         | Consumo de eletricidade e luz natural                                                            | EnergyPlus                                   | SADM                                                 | -                        | Comercial (múltiplos-pisos), China                  |
| Kokaraki <i>et al.</i> (2019)    | Consumo de eletricidade, conforto térmico, estanqueidade, estética e área de piso                | EnergyPlus                                   | Vários métodos                                       | Análise de sensibilidade | Comercial (dois pisos), Escócia                     |
| Harkouss; Fardoun; Biwale (2018) | Economia, energia, meio ambiente, conforto etc.                                                  | TRNSYS                                       | Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) | Análise de sensibilidade | Residencial multifamiliar, vários climas            |
| Bac; Alaloosi; Turhan (2021)     | Critérios ergonômicos, ambientais, técnicos e econômicos                                         | Design Builder                               | SWARA, WASPAS                                        | -                        | Edificação industrial, Turquia                      |
| Gilani <i>et al.</i> (2022)      | Desempenho térmico e acústico, emissões, resíduos, consumo de eletricidade, custo, estética etc. | LIDER                                        | MIVES-Knapsack model                                 | -                        | Residencial multifamiliar, Espanha                  |
| Moschetti <i>et al.</i> (2022)   | Conforto térmico, acústico e visual, Flexibilidade energética etc.                               | Indoor Climate and Energy software (IDA ICE) | T-robust e Minimax Regret                            | Cenários                 | Comercial (múltiplos-pisos), Noruega                |
| Pannier <i>et al.</i> (2021)     | Custo, emissões, conforto térmico, satisfação do usuário etc.                                    | EnergyPlus                                   | MOO e NSGA-II                                        | -                        | Residencial social multifamiliar, França            |
| Usman; Frey (2021)               | Consumo de eletricidade e custo                                                                  | TRNSYS                                       | CRITIC e TOPSIS                                      | -                        | Residencial unifamiliar (dois pisos), vários climas |
| <b>Esta pesquisa</b>             | <b>Desempenho térmico e energético</b>                                                           | <b>EnergyPlus</b>                            | <b>TOPSIS</b>                                        | <b>Monte Carlo</b>       | <b>HIS Unifamiliar em Clima Quente</b>              |

A complexidade inerente à TDMC, que exige a avaliação de múltiplos cenários sob incerteza e variáveis não lineares (clima, matriz energética), demonstra a necessidade de mecanismos preditivos de alta velocidade e fidelidade.

Neste contexto, a RNA, tema da próxima subseção, justifica sua aplicação como um mecanismo superior ao acoplamento direto BPS-TDMC. O uso da RNA não apenas agiliza o processo de TDMC ao criar um metamodelo<sup>4</sup> de performance. Mas, principalmente, aumenta a robustez e a representatividade das projeções de desempenho dinâmico. Essa integração garante que a seleção da solução construtiva ideal não se baseie apenas em uma média estática, mas sim em um entendimento profundo e dinâmico de como o edifício reagirá às flutuações do seu entorno ao longo de toda a sua vida útil.

### 2.6.2 Rede Neural Artificial e a Avaliação do Ciclo de Vida de Edificações

A Inteligência Artificial (IA) abrange a capacidade de sistemas computacionais realizarem tarefas que tradicionalmente requerem inteligência humana, como reconhecimento de padrões e predição. Dentro desse campo, o Aprendizado de Máquina (*Machine Learning* - ML) constitui um conjunto de técnicas que permitem aos sistemas aprenderem a partir de dados, sem programação explícita (Swain; Nayyar; Palai, 2019).

Modelos de ML têm sido cada vez mais incorporados aos estudos de ACV de edifícios, oferecendo vantagens como a interpretação facilitada de padrões complexos, redução de tempo computacional e maior precisão na predição em grandes conjuntos de dados (Barros; Ruschel, 2021). Entre as técnicas de ML, as redes neurais destacam-se por sua capacidade superior de modelar relações não-lineares complexas entre variáveis, superando o desempenho de outros metamodelos e sendo ideais para problemas complexos (Duprez *et al.*, 2019).

Apesar de sua eficiência, tem havido integração limitada de RNAs com técnicas de simulação BPS sem considerar a perspectiva dinâmica da vida útil das edificações. A revisão identificou uma lacuna crítica: nenhum estudo de ACV em edificações integra a RNA em uma perspectiva dinâmica (ADCV). A aplicação da RNA com análises prospectivas é, portanto, o caminho para um planejamento estratégico informado, permitindo antecipar as implicações futuras das decisões atuais (Hosamo *et al.*, 2024).

Lira; Souza; Silva (2025) demonstraram, em um estudo relacionado, que a técnica pode ser utilizada com sucesso para projetar o consumo de eletricidade, integrando o aumento da

---

<sup>4</sup> Metamodelo é uma ferramenta para organizar e formalizar a criação de outros modelos.

temperatura como variável de entrada e demonstrando a robustez da RNA em comparação com modelos estatísticos lineares.

#### 2.6.2.1 Aplicação na literatura

A aplicação de modelos de ML, em particular as Redes Neurais Artificiais (RNA), tem crescido nos estudos de ACV de edifícios devido à sua eficiência na modelagem de relações não-lineares e na redução de custos computacionais (Fnais *et al.*, 2022). Embora a RNA seja reconhecida por seu potencial como metamodelo preditivo (Duprez *et al.*, 2019), sua integração com técnicas de simulação BPS ainda é limitada na literatura (Sharif; Hammad, 2019).

A literatura de estudos integrando BPS e ML demonstra o uso de RNA e *Support Vector Machine* (SVM) para otimização do consumo de energia. A possibilidade de usar um instrumento consistente para prever o desempenho de uma edificação antes de sua construção, capacita o tomador de decisões para escolhas mais sustentáveis mediante análise de avaliações energéticas e ambientais confiáveis (D'Amico *et al.*, 2019).

Mokhtarian Mobarakeh; Sayyaadi (2023) e Abdou *et al.* (2022) utilizaram EnergyPlus™ e TRNSYS, respectivamente, para criar bases de dados e prever o consumo de edifícios multifamiliares, focando na escolha do melhor sistema. Outros estudos integraram a RNA com a ACV para otimizar o projeto e minimizar o Potencial de Aquecimento Global ou o custo, usando BPS para construir o inventário estático (Azari *et al.*, 2016; Duprez *et al.*, 2019; Sharif; Hammad, 2019), ou seja, em uma abordagem de ACV convencional.

Conforme detalhado na Figura 2, a aplicação da RNA é variada. Para as variáveis de entrada, as características climáticas (D'Amico *et al.*, 2019; Himmetoğlu *et al.*, 2022; Jang *et al.*, 2019; Re Cecconi *et al.*, 2017; Wang; Foong; Le, 2024) e de projeto (Cecconi; Rampini, 2023; Fernandes *et al.*, 2023; Hamida *et al.*, 2021; Himmetoğlu *et al.*, 2022; Mokhtarian Mobarakeh; Sayyaadi, 2023; Xue; Wang; Chen, 2022) foram as mais comuns.

Como o foco desta tese se estreita aos artigos que combinaram a RNA com a BPS, para construir o inventário, a discussão da aplicação de RNA na literatura foi restrita a alguns estudos, para análise mais detalhada (Azari *et al.*, 2016; D'Amico *et al.*, 2019; Hamida *et al.*, 2021; Sharif; Hammad, 2019; Xue; Wang; Chen, 2022).

Figura 2: Inputs e Outputs utilizados nas RNAs investigadas (ACV-edificações)

|                                        | Inputs                                                                 |                   | Outputs                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mokhtarian-Mobarakeh e Sayyaadi (2023) | Dados de projeto e ocupação                                            | RNA classificação | Sistema de aquecimento de edifícios                                                                                                                                                                |
| Cecconi e Rampini (2023)               | Dados de projeto e Características térmicas do envelope                | RNA Regressão     | Energia (kwh/m <sup>2</sup> .ano)                                                                                                                                                                  |
| Moghaddas-Zadeh <i>et al.</i> (2023)   | Característica AVAC                                                    | 2 RNA Regressão   | COP dos splits e Capacidade atual                                                                                                                                                                  |
| Wang <i>et al.</i> (2024)              | Características térmicas da parede e clima                             | RNA Classificação | Perda de calor (classes)                                                                                                                                                                           |
| Xue <i>et al.</i> (2022)               | Dados de projeto e orientação                                          | RNA Regressão     | CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>2</sup> ) e custo (CNY/m <sup>2</sup> )                                                                                                                                 |
| Abdou <i>et al.</i> (2022)             | Dados de projeto e Características térmicas do envelope                | RNA Regressão     | Energia (kwh/m <sup>2</sup> .ano)                                                                                                                                                                  |
| Luo e Oyedele (2022)                   | Nan <sup>1</sup>                                                       | RNA Regressão     | Energia elétrica e gás                                                                                                                                                                             |
| Himmetoglu <i>et al.</i> (2022)        | Dados de projeto e dados da região (dados climáticos e sísmicos)       | RNA Regressão     | RNA1: energia (GWh)<br>RNA2: CO <sub>2</sub> (tCO <sub>2</sub> )<br>RNA3: custo (\$/m <sup>2</sup> )                                                                                               |
| Hamida <i>et al.</i> (2021)            | Dados de projeto e orientação                                          | 4 RNA Regressão   | Custo e carbono operacionais; carbono incorporado (envoltória) e CO <sub>2</sub> total/m <sup>2</sup>                                                                                              |
| Fernandes <i>et al.</i> (2019)         | Dados de projeto e ocupação                                            | 3 RNA Regressão   | Consumo de água (m <sup>3</sup> /trabalhadores) e energia (KWh/trabalhadores) e geração de resíduos (m <sup>3</sup> /trabalhadores)                                                                |
| D'Amico <i>et al.</i> (2019)           | Dados de projeto, clima e características térmicas do envelope         | RNA Regressão     | Energia (kWh/m <sup>2</sup> .year) e dados ambientais (kg CO <sub>2</sub> -eq; kg CFC11-eq; kg SO <sub>2</sub> -eq; kg PO <sub>4</sub> <sup>3</sup> -eq; kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq; MJ) |
| Jang <i>et al.</i> (2019)              | Clima e qualidade do ambiente interno                                  | RNA Regressão     | Energia (kwh)                                                                                                                                                                                      |
| Duprez <i>et al.</i> (2019)            | Dados de projeto, características térmicas do isolante e tipos de AVAC | RNA Regressão     | GWP (Kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup> )                                                                                                                                                       |
| Sharif e Hammad (2019)                 | Dados de projeto, iluminação e tipos de AVAC                           | 2 RNA Regressão   | RNA1: TEC (Kwh/m <sup>2</sup> ) e Custeio do Ciclo de Vida (CAD\$)<br>RNA2: TEC (Kwh/m <sup>2</sup> ) e ACV (Kg CO <sub>2</sub> -eq)                                                               |
| Cecconi <i>et al.</i> (2017)           | Clima                                                                  | RNA Regressão     | Demanda de energia (kWh)                                                                                                                                                                           |
| Azari <i>et al.</i> (2016)             | Características térmicas do envelope                                   | 6 RNA Regressão   | Acidificação, Eutrofização, Aquecimento Global, Photochemical Ozone Formation Potential, Ozone Depletion e Energia Operacional (MJ)                                                                |

<sup>1</sup>Nan: Não foi possível localizar a informação no texto

#### LEGENDA

Características térmicas do envelope: transmitância, absortância, entre outros

Clima: temperatura, radiação solar, velocidade do vento, etc

Dados de projeto: áreas, volumes, relação janela/parede, tipo de vidro, janela, etc

Orientação: orientação espacial em relação ao norte geográfico e localização

Tipos de AVAC: característica de AVAC e agenda

Ocupação: densidade de ocupação, número de ocupantes, público-alvo, etc

A análise da tipologia de edifícios examinada revela uma variação entre construções comerciais, institucionais e residenciais (multifamiliares e unifamiliares) (Tabela 1). Entretanto, verifica-se que nenhum desses trabalhos foi conduzido no Hemisfério Sul, nem abordou a tipologia de Habitação de Interesse Social (HIS).

Tabela 1: Estrutura teórica de RNA em estudos de ACV para edificações (usando BPS)

| Ref.                         | Tipo edificação | Vida Útil (ano) | Local          | Software BPS   |
|------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| Azari <i>et al.</i> (2016)   | Comercial       | 60              | Estados Unidos | Athena         |
| Sharif; Hammad (2019)        | Institucional   | 60              | Canadá         | Design Builder |
| D’Amico <i>et al.</i> (2019) | Comercial       | 50              | Itália         | TRNSYS         |
| Xue; Wang; Chen (2022)       | Multifamiliar   | 30              | China          | EnergyPlus     |
| Hamida <i>et al.</i> (2021)  | Unifamiliar     | 20              | Arábia Saudita | Design Builder |

Os estudos revisados na literatura que aplicaram redes neurais na ACV de edificações usando BPS não consideraram projeções futuras de variáveis dependentes do tempo. Apenas Xue; Wang; Chen (2022) consideraram o impacto da inflação nas taxas de juros ao longo dos anos e estimaram um aumento na vida útil do edifício, argumentando que o Custeio do Ciclo de Vida (CCV) é frequentemente usado para comparar investimentos iniciais com benefícios futuros de uma perspectiva econômica do ciclo de vida.

Para detalhar as principais características das RNAs construídas, suas topologias estão resumidas na Tabela 2, destacando o tamanho de amostra que varia entre 91 e 1000. Os *softwares* de BPS têm o potencial de hospedar uma ampla gama de cenários, gerando bancos de dados com centenas de amostras.

Em relação à topologia da RNA, a configuração de camadas ocultas é uma fonte potencial de erro: redes neurais profundas (com duas ou mais camadas ocultas) podem resolver problemas complexos, mas podem complicar o treinamento e aumentar os custos computacionais (Ji; Lee; Yi, 2021; Wang; Foong; Le, 2024).

Por outro lado, usar poucos neurônios nas camadas ocultas pode levar ao *underfitting*, impedindo que a rede aprenda padrões complexos (Luo; Oyedele, 2022; Wang; Foong; Le, 2024), enquanto muitos neurônios podem resultar em *overfitting*, fazendo com que a RNA aprenda padrões desnecessários (Xue; Wang; Chen, 2022). Apenas um estudo usou uma única camada oculta (Sharif; Hammad, 2019).

Tabela 2: Topologias de RNA de estudos com simulação de edificações na ACV

| Ref.                         | Parâmetros                                                                                                                                                          | Treino | Amostra | Entrada    | Saída     | Camada oculta | Neurônios Camada oculta |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------|------------|-----------|---------------|-------------------------|
| Azari <i>et al.</i> (2016)   | Função de ativação: <i>Hyperbolic-tangent &amp; sigmoid</i> & linear;<br>Algoritmo de treinamento: <i>evolutionary optimization</i> ;<br>Época: 946                 | 70%    | 91      | 6 por RNA  | 1 por RNA | 4             | 5,3,4 e 2               |
| Sharif; Hammad, (2019)       | Função de ativação: <i>Hyperbolic-tangent &amp; linear</i> ;<br>Algoritmo de treinamento: <i>Levenberg-Marquardt (LM)</i> ;<br>Época: 900                           | 70%    | 463     | 10 por RNA | 2 por RNA | 3             | 5, 6 e 4                |
| D'Amico <i>et al.</i> (2019) | Função de ativação: <i>tanh-sigmoid</i> & linear<br>Algoritmo de treinamento: <i>Gradient Descendent (GD)</i> ;<br>Momento: 0,7; Learning rate: 0,1; Época: 1000000 | 85%    | 780     | 29         | 7         | 2             | 50 e 25                 |
| Xue; Wang; Chen (2022)       | Algoritmo de treinamento: <i>Bayesian regularization</i>                                                                                                            | 70%    | 1000    | 9          | 2         | 1             | 14                      |
| Hamida <i>et al.</i> (2021)  | Algoritmo de treinamento: <i>Conjugate gradient</i>                                                                                                                 | 70%    | 201     | 6          | 4         | 2             | 13 e 4                  |

A revisão detalhada (Tabelas 3 e 4) revela uma lacuna crítica que justifica o diferencial metodológico desta tese, tanto pela ausência temporal como o contexto das pesquisas realizadas. Como percebido, nenhum estudo de ACV em edificações integra a RNA em uma perspectiva dinâmica (ADCV) com projeções futuras de variáveis dependentes do tempo (como as mudanças climáticas e a matriz elétrica). A maioria dos resultados foi apresentada em kWh/m<sup>2</sup> ao ano, destacando a falta de avaliação dinâmica.

Uma lacuna contextual também é verificada: a ausência de estudos no Hemisfério Sul e em HIS em contextos climáticos de temperaturas elevadas. Esse tipo de habitação possui características particulares que influenciam diretamente os resultados. Portanto, as simulações BPS não foram aplicadas ao contexto geográfico e social brasileiro, ressaltando a necessidade de dados locais.

#### 2.6.2.2 Fundamentos e topologia de uma rede neural

A RNA é um modelo matemático implementado computacionalmente, inspirado no sistema biológico do neurônio. Um neurônio artificial coleta os sinais de entrada, agrega-os por uma função operacional (função soma) e produz uma resposta por meio de uma função de

ativação, realizando funções não-lineares (Silva; Spatti; Flauzino, 2010). A capacidade da RNA de identificar a relação entre variáveis de entrada (*inputs*) e saída (*outputs*) reside na composição de funções de ativação e pesos sinápticos (*weights*) (D’Amico *et al.*, 2019).

O tipo de RNA mais adequado para modelagem complexa e preditiva é a *Multi-Layer Perceptron* (MLP), que se caracteriza pela presença de pelo menos uma camada intermediária (camada escondida ou oculta) situada entre a camada de entrada e a camada de saída (Silva; Spatti; Flauzino, 2010). A MLP facilita a alta distribuição de dados pela rede, permitindo que as amostras influenciem todos os neurônios das camadas (Souza *et al.*, 2019).

A lógica de conversão de dados na RNA é estabelecida em um processo de aprendizado supervisionado, baseado em um conjunto de dados de treinamento conhecido. A função da rede é encontrar o conjunto ideal de pesos que minimize o erro entre o valor previsto e o valor real (*target*).

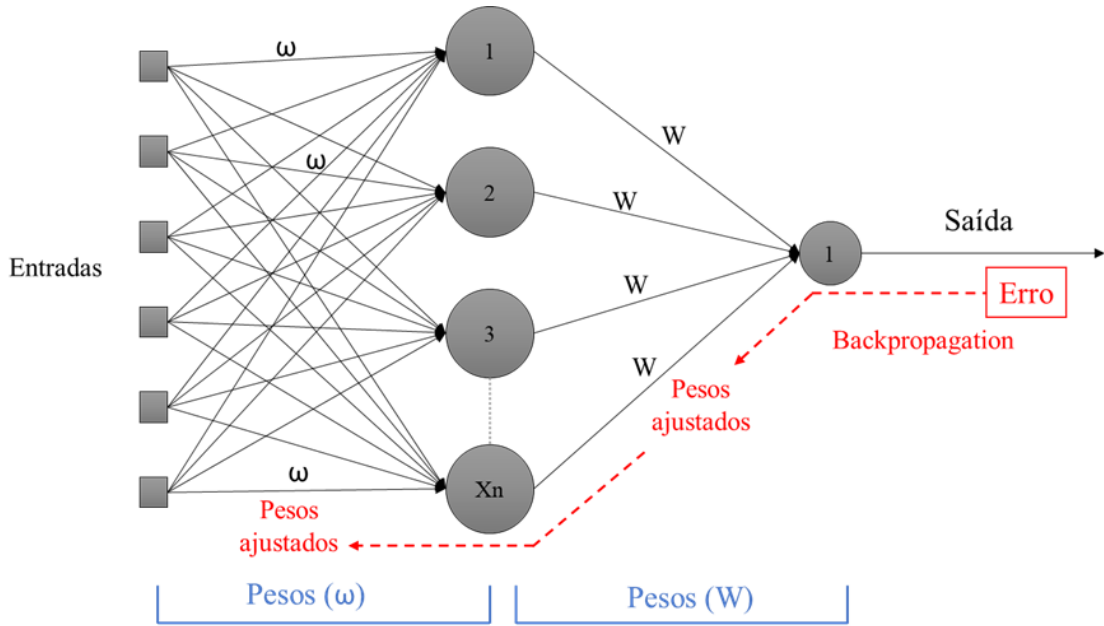
Antes do treinamento, é indispensável o pré-processamento da base de dados, incluindo o tratamento e exclusão de amostras inviáveis (Swain; Nayyar; Palai, 2019). A normalização (ou escalonamento) é necessária para aumentar a estabilidade numérica e garantir que o conjunto de treinamento e teste esteja na mesma escala. A normalização é feita por meio de funções como a MinMaxScaler (Eq. 1).

$$x_{normalizado} = \frac{(x - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})} \quad (1)$$

Onde,  $x$  é o valor original da variável de entrada,  $x_{min}$  é o valor mínimo da entrada,  $x_{max}$  é o valor máximo da entrada, e  $x_{normalizado}$  é o valor escalado da variável de entrada.

Com as variáveis normalizadas, o conjunto de dados é dividido em treinamento (70% a 85%) e teste. O treinamento fornece uma atualização iterativa dos pesos sinápticos após a apresentação dos pares entrada/saída. O erro entre o valor previsto e o real é minimizado por meio do algoritmo de *backpropagation* (retropropagação), que ajusta iterativamente os pesos sinápticos até que o erro atinja um limite inferior pré-estipulado (Figura 3).

Figura 3: Arquitetura de uma RNA com indicação do fluxo de retropropagação



Após o treinamento, a validação da aprendizagem é feita com as amostras restantes (teste), garantindo a capacidade de generalização do modelo. Em tarefas de regressão, onde o objetivo é estimar um valor contínuo (como o consumo de energia elétrica em kWh/m²), a métrica mais comum para avaliar o modelo é a função de perda Erro Quadrático Médio (*Mean Squared Error* - MSE) (Eq. 2).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2 \quad (2)$$

Onde  $n$  é o número de pontos ou amostras,  $y_i$  representa os valores observados (reais); e  $\tilde{y}_i$  representa os valores previstos.

## 2.7 Considerações sobre o capítulo

A revisão apresentada evidenciou que a avaliação ambiental de edificações em climas tropicais enfrenta desafios metodológicos específicos: i) a necessidade de considerar a variabilidade temporal de consumos energéticos sob mudanças climáticas, ii) a importância de integrar projeções de longo prazo da matriz elétrica nacional, e iii) a complexidade de avaliar múltiplos cenários construtivos e político-energéticos de forma computacionalmente viável. As ferramentas computacionais avançadas revisadas nesta seção (simulação de desempenho, aprendizado de máquina, e métodos de apoio multicritério à decisão) oferecem soluções

complementares para esses desafios quando integradas em uma abordagem metodológica coerente.

O Capítulo 3 (Materiais e Métodos) apresenta essa integração aplicada ao contexto brasileiro. A abordagem proposta operacionaliza uma ADCV prospectiva e dinâmica por meio da combinação entre: simulação termoenergética paramétrica para geração de dados, modelagem da evolução da matriz elétrica e predição de consumos energéticos variáveis por RNA, e seleção de soluções construtivas otimizadas via TDMC. As seções seguintes detalham cada componente desta integração e os procedimentos para acoplamento temporal entre demanda energética e fatores de caracterização dinâmicos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada neste estudo configura-se como uma Avaliação Dinâmica do Ciclo de Vida (ADCV), focada exclusivamente na fase operacional (módulo B6) de uma edificação residencial unifamiliar em um contexto climático tropical. Para a elaboração da técnica de ADCV-edf e sua aplicação no contexto da pesquisa, foi seguida uma sequência de integração entre conhecimentos diversos (ambiental, energético, computacional e social) que pode ser dividida em quatro macro etapas:

1. Geração de dados: definição dos os cenários construtivos (combinações de envoltória) e realização da simulação termoenergética paramétrica (EnergyPlus) para gerar a base de dados de desempenho energético das diferentes configurações.
2. Incorporação da dimensão temporal: projeção das variáveis dinâmicas do sistema: temperatura externa (regressão linear das séries históricas) e matriz elétrica: cenários de transição energética (modelo híbrido). Estas projeções alimentam o modelo preditivo.
3. Predição integrada e inventário: utilização de Redes Neurais Artificiais para integrar as variáveis e prever o consumo energético dinâmico mensal (kWh/m<sup>2</sup>). Este consumo constitui o inventário de primeiro plano (demanda elétrica), que combinado aos fatores de caracterização dinâmicos (Ecoinvent/SimaPro), forma o inventário de segundo plano.
4. Avaliação de impacto e análise comparativa: cálculo dos impactos ambientais dinâmicos (2015-2065) para cinco categorias usando ReCiPe e AWARE. Os resultados permitem uma análise comparativa entre cenários base e otimizados e uma tomada de decisão multicritério com análise de *trade-offs*.

Esta estrutura metodológica operacionaliza a ADCV para o módulo B6, alinhando-se às práticas consolidadas na literatura internacional (Beloïn-Saint-Pierre *et al.*, 2020; Negishi *et al.*, 2019; Su *et al.*, 2021b).

#### 3.1 Contexto de aplicação

Para demonstrar a aplicabilidade prática da metodologia proposta, foi selecionado um caso representativo do contexto brasileiro de habitação social: unidades habitacionais unifamiliares do Conjunto Jacinta Andrade, localizado em Teresina, Piauí (5°02'13.8"S,

42°47'33.8"W). A escolha deste contexto fundamenta-se em sua representatividade climática, tipológica e social.

Teresina exemplifica o clima tropical quente e seco (Aw na classificação Köppen-Geiger), característico de extensas regiões brasileiras, com temperatura média anual de 28°C e radiação solar horizontal global entre as mais altas do país (Saccardo *et al.*, 2023). Essas condições climáticas extremas tornam a localidade ideal para avaliar o desempenho energético de habitações sob estresse térmico acentuado, situação que tende a se intensificar com as mudanças climáticas.

As habitações analisadas seguem o padrão construtivo nacional do Programa Minha Casa, Minha Vida: edificações térreas unifamiliares de aproximadamente 40 m<sup>2</sup>, distribuídas em cinco cômodos (dois quartos, sala, cozinha e banheiro). Essa tipologia representa milhões de unidades construídas nacionalmente com características similares, conferindo relevância e escala aos resultados obtidos (BRASIL, 2024). O Conjunto Jacinta Andrade, entregue em 2015, compreende aproximadamente 4 mil unidades habitacionais (Lopes *et al.*, 2023), configurando-se como um dos maiores empreendimentos do programa no Nordeste brasileiro.

Embora aplicada a este contexto específico (Figura 4), a metodologia desenvolvida mantém sua aplicabilidade para outras regiões com características climáticas similares, habitações com tipologia padronizada do PMCMV, análises de *retrofit* em conjuntos existentes e especificações técnicas para novos empreendimentos habitacionais. A escolha por um caso real e em escala significativa fortalece a validação empírica da metodologia proposta e demonstra seu potencial de impacto em políticas públicas habitacionais.

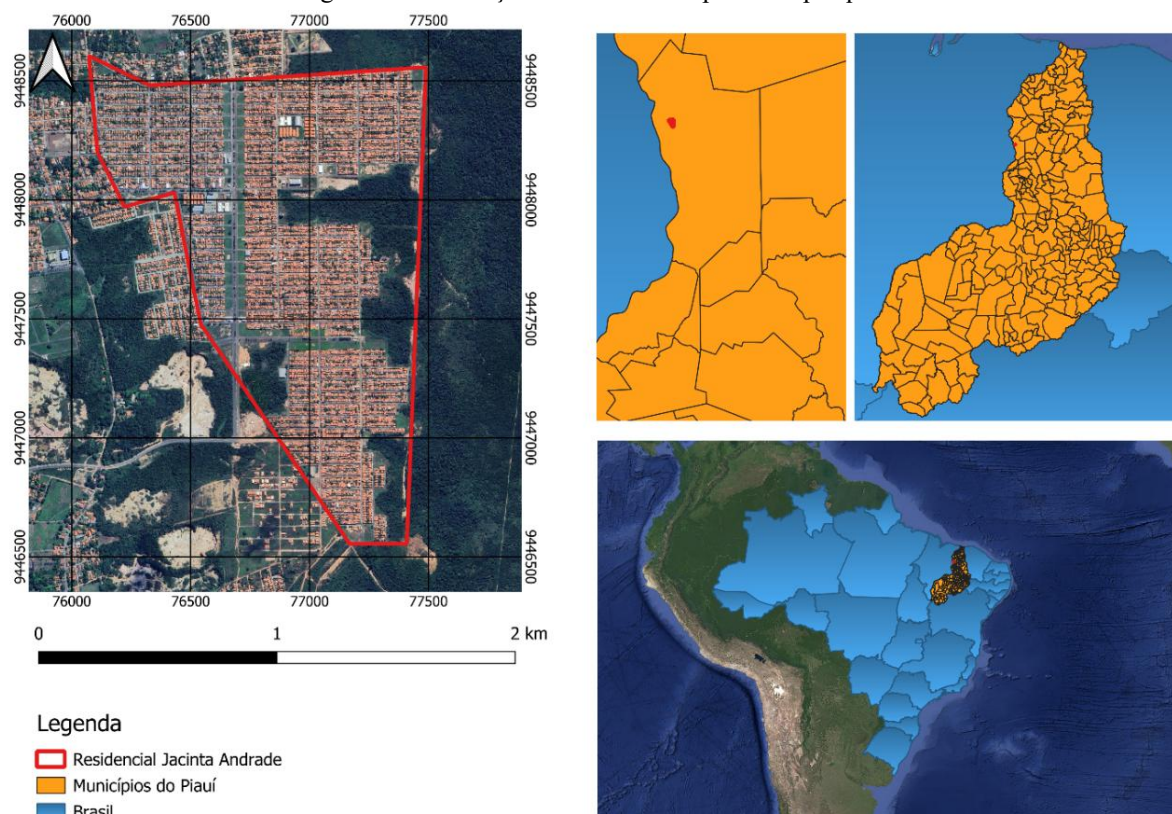
### 3.1.1 Características climáticas e diretrizes normativas

Teresina, capital do Piauí, está inserida na Zona Bioclimática 7 (ZB7) conforme classificação normativa brasileira (ABNT, 2005b), caracterizada pelo clima tropical megatérmico (Aw). Situada próxima à linha do Equador, a 74 metros de altitude, a cidade apresenta períodos climáticos distintos: quente e úmido de janeiro a maio, e quente e seco de julho a novembro (Oliveira; Romero, 2023). Destaca-se por registrar a maior temperatura máxima diária de verão entre as capitais brasileiras analisadas na NBR 15575, atingindo 37,9°C (ABNT, 2021), condição que evidencia a necessidade crítica de adaptação construtiva ao clima extremo.

Este contexto climático severo demanda estratégias projetuais específicas para redução da dependência de resfriamento artificial, objetivo que assume dimensão amplificada quando

considerado na escala de conjuntos habitacionais. A mitigação do consumo energético para climatização alinha-se aos três pilares da sustentabilidade: social, através do conforto térmico adequado; ambiental, pela redução dos impactos associados à geração elétrica; e econômico, através da diminuição da demanda energética residencial.

Figura 4: Localização do contexto empírico da pesquisa

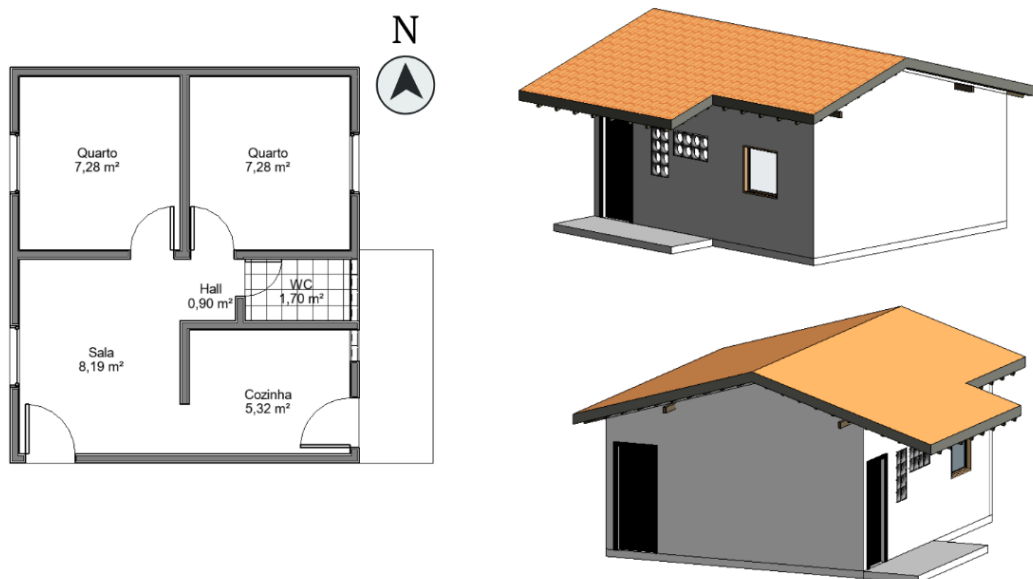


Fonte: Autora (2025), elaborado no QGIS (versão 3.44)

A habitação analisada representa a tipologia predominante do Conjunto Jacinta Andrade, que compreende 4.000 unidades distribuídas em três padrões construtivos: 92,5% das casas possuem 36 m<sup>2</sup>, as outras se distribuem em 50 m<sup>2</sup> e 57 m<sup>2</sup>, segundo dados obtidos junto à Agência de Desenvolvimento Habitacional do Piauí (Carvalho, 2018). O modelo selecionado, com 36 m<sup>2</sup> de área construída, distribui-se em cinco cômodos essenciais: sala, cozinha, banheiro e dois quartos, conforme planta apresentada na Figura 5.

A caracterização construtiva da edificação revela soluções típicas do programa habitacional: vedações verticais com 14 cm de espessura total, compostas por bloco cerâmico de 9 cm revestido com argamassa de 2,5 cm em cada face; cobertura inclinada em estrutura de madeira com telha cerâmica, entregue sem forro; e esquadrias metálicas opacas para portas e janelas (Figura 6). A planta de cobertura e detalhamento do madeiramento encontram-se no Anexo A.

Figura 5: Projeto da HIS utilizada na pesquisa



Fonte: Adaptado de Agência de Desenvolvimento Habitacional do Estado do Piauí (2011) e elaboração da autora (Revit®, 2023)

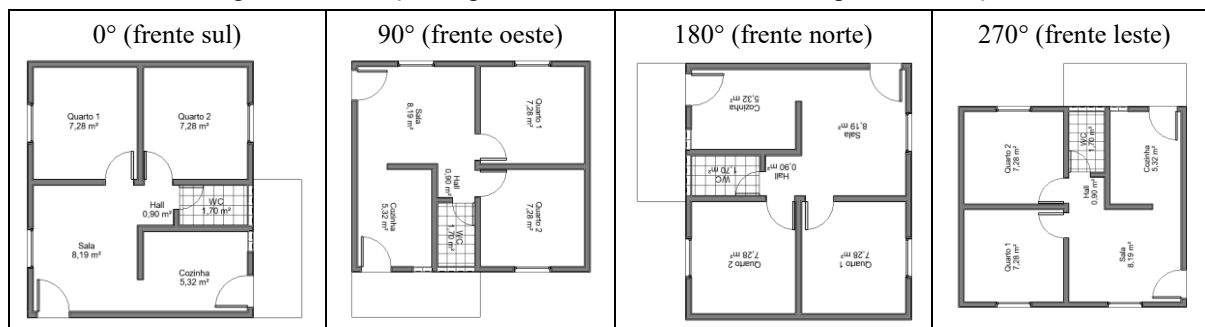
Figura 6: Componentes construtivos da HIS (obra do Conjunto Jacinta Andrade)



Fonte: Arquivo pessoal da autora (2013)

Para contemplar a variabilidade de implantação no conjunto, foram consideradas quatro orientações solares possíveis ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$ ), onde  $0^\circ$  corresponde à fachada frontal voltada para sul, resultando em diferentes exposições solares dos ambientes e, consequentemente, variações na carga térmica interna (Figura 7).

Figura 7: Orientações espaciais dos cenários considerados para a simulação



### 3.1.2 Decisões das alternativas construtivas

Para avaliar o potencial de melhoria do desempenho térmico das habitações sociais, foram definidas alternativas construtivas baseadas em três fontes: configurações reais identificadas em conjuntos habitacionais de Teresina (zonas norte e sul), recomendações normativas brasileiras (ABNT NBR 15220-3:2005 e NBR 15575:2021), e diretrizes da ferramenta Projeteee desenvolvida pelo Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2022).

A estratégia de seleção das alternativas seguiu uma abordagem sistemática, partindo do modelo de referência (habitação padrão do Conjunto Jacinta Andrade) e incorporando progressivamente melhorias construtivas viáveis técnica e economicamente para o contexto da habitação social. As alternativas foram organizadas em três componentes principais da envoltória: vedações verticais, sistema de cobertura e esquadrias.

Para as vedações verticais, foram definidas seis configurações (W1 a W6) que variam desde a solução básica atual até sistemas com isolamento térmico. As alternativas incluem blocos cerâmicos de diferentes espessuras (9 cm, 14 cm e 19 cm), adição de isolamento com lã de rocha (espessuras de 2,5 cm e 5 cm), e sistemas de isolamento térmico externo. Cada configuração foi validada quanto ao atendimento dos limites normativos de transmitância térmica ( $W/m^2K$ ), capacidade térmica ( $kJ/m^2K$ ) e, quando possível, atraso térmico (horas) e fator solar (%), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Limites normativos adotados no estudo

|                                | Sistema de Vedação                                       | Transmitância térmica (U) | Capacidade térmica (Ct) | Atraso térmico ( $\phi$ ) | Fator solar (Fso) |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------|
| NBR 15220-3                    | Paredes                                                  | $\leq 2,20$               | Alta                    | $\geq 6,5$                | $\leq 3,5$        |
|                                | Coberturas                                               | $\leq 2,00$               | Alta                    | $\geq 6,5$                | $\leq 6,5$        |
|                                | Paredes                                                  | $\leq 3,70$               | $\geq 130$              | -                         | -                 |
| NBR 15575<br>(partes 1, 4 e 5) | Coberturas M <sup>a</sup><br>(branca $\alpha \leq 0,4$ ) | $\leq 2,3 FT^b$           | -                       | -                         | -                 |
|                                | Coberturas M<br>(telha/concreto $\alpha \geq 0,4$ )      | $\leq 1,5 FT$             | -                       | -                         | -                 |
|                                | Coberturas I (branca)                                    | $\leq 1,5 FT$             | -                       | -                         | -                 |
|                                | Coberturas I (telha/concreto)                            | $\leq 1,0 FT$             | -                       | -                         | -                 |
|                                | Coberturas S (branca)                                    | $\leq 1,0 FT$             | -                       | -                         | -                 |
|                                | Coberturas S (telha/concreto)                            | $\leq 0,5 FT$             | -                       | -                         | -                 |

<sup>a</sup> Desempenho mínimo (M), intermediário (I) e superior (S)

<sup>b</sup> FT é Fator de Transmitância definido na ABNT NBR 15220-3, por meio de uma fórmula que se relaciona com a altura entre beirais adjacentes

O sistema de cobertura apresenta seis variações (R1 a R6), contemplando desde a solução mínima entregue (telha cerâmica sem forro) até configurações com múltiplas barreiras térmicas. As alternativas incluem adição de forro de PVC ou gesso, mantas de isolamento térmico, telhas termoacústicas e lajes maciças, respeitando o limite de transmitância térmica estabelecido.

Para as esquadrias, foram avaliados três tipos representativos do mercado de habitação social: janelas metálicas opacas (solução atual), janelas de madeira opaca e janelas com vidro simples 3 mm. A escolha limitada reflete as restrições orçamentárias típicas do segmento, priorizando soluções factíveis. Os detalhes das camadas que compõem os modelos construtivos estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Descrição simplificada da envoltória utilizada na pesquisa

|              | Componente | ID              | Descrição                                                                                                                                      |
|--------------|------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Real</b>  | Parede     | W1 (Referência) | Bloco cerâmico (9 cm) revestido com argamassa                                                                                                  |
|              |            | W2              | Concreto maciço (10cm)                                                                                                                         |
|              |            | W3              | Bloco de concreto (9cm) revestido com argamassa                                                                                                |
|              | Cobertura  | R1 (Referência) | Telha cerâmica                                                                                                                                 |
|              |            | R2              | Telha cerâmica e forro de PVC                                                                                                                  |
|              |            | R3              | Laje de concreto maciço (10 cm)                                                                                                                |
| <b>Ideal</b> | Parede     | W4              | Bloco cerâmico (14cm) revestido com argamassa                                                                                                  |
|              |            | W5              | Bloco cerâmico (9cm) revestido com argamassa e isolamento interno (lã de rocha de 3,8 mm)                                                      |
|              |            | W6              | Bloco de concreto (9cm) revestido com argamassa e placa composta de alumínio e poliestireno expandido (8cm) adicionado ao revestimento externo |
|              | Cobertura  | R4              | Telha termoacústica e forro de laje de concreto (10 cm)                                                                                        |
|              |            | R5              | Telha metálica e forro em laje pré-moldada                                                                                                     |
|              |            | R6              | Telha cerâmica com forro em laje pré-moldada e lã de rocha (5 cm)                                                                              |

A combinação paramétrica dessas alternativas resultou em 108 configurações únicas de envoltória (6 paredes  $\times$  6 coberturas  $\times$  3 janelas), que, ao serem aplicadas às quatro orientações solares possíveis, totalizam 432 cenários simulados. Esta abordagem permite identificar não apenas a solução ótima, mas também compreender as interações entre os diferentes componentes da envoltória e sua sensibilidade à orientação solar. O detalhamento completo das propriedades termofísicas de cada configuração encontra-se no Apêndice B.

### 3.1.3 Objetivo e escopo da ADCV-edf

O objetivo desta ADCV é quantificar e comparar os impactos ambientais associados ao consumo de energia elétrica para resfriamento de diferentes configurações construtivas de habitações unifamiliares em clima tropical (Aw), considerando a evolução temporal das mudanças climáticas e da matriz elétrica brasileira no período de 2015 a 2065.

Em uma ACV convencional de edifícios, a energia elétrica não é um fim em si; ela é um insumo requerido para prover o serviço funcional (uso/conforto) ao longo da vida útil. Por isso, a edificação precisa estar no escopo: é o seu desempenho (envoltória, operação, clima) que determina o consumo de eletricidade, a partir da qual todo o impacto ambiental é calculado.

Este estudo caracteriza-se como uma ACV prospectiva e comparativa, adotando abordagem atribucional dinâmica. A natureza prospectiva manifesta-se na modelagem de cenários futuros que incorporam tanto as projeções climáticas regionais quanto a transição energética nacional. O caráter comparativo emerge da avaliação sistemática de 432 configurações construtivas, permitindo identificar soluções otimizadas em relação ao modelo de referência atualmente implementado. A abordagem atribucional concentra-se na quantificação dos impactos físicos diretos, sem modelar efeitos marginais de mercado, enquanto o dinamismo incorpora a variabilidade temporal dos parâmetros críticos que influenciam o desempenho energético ao longo da vida útil da edificação.

A delimitação do escopo reconhece que, em uma ACV de edificações, a energia elétrica constitui um insumo necessário para prover o serviço funcional de conforto térmico. O desempenho da envoltória, em interação com as condições climáticas e padrões de operação, determina o consumo energético do qual derivam os impactos ambientais quantificados. Assim, a função do sistema consiste em prover conforto térmico adequado, mantendo a temperatura interna dentro dos limites aceitáveis ( $\leq 24^{\circ}\text{C}$ ) durante toda a vida útil da edificação.

Seguindo as diretrizes da ISO 21931-1 para ACV de edificações, estabelece-se como equivalente funcional 1 m<sup>2</sup> de área útil de habitação unifamiliar térrea localizada em clima tropical Aw, com vida útil de projeto de 50 anos e padrão de ocupação residencial contínuo. Desta definição deriva-se a unidade funcional como a provisão de conforto térmico em 1 m<sup>2</sup> de habitação durante 50 anos, sendo o fluxo de referência representado pela quantidade específica de energia elétrica necessária para cada configuração construtiva analisada, conforme determinado através de simulação termoenergética paramétrica.

A fronteira do sistema adota uma abordagem *cradle-to-grave* parcial, concentrando-se no módulo B6 (energia operacional) da estrutura modular estabelecida pela EN 15804. Esta

delimitação justifica-se pela dominância comprovada desta fase em edificações localizadas em climas tropicais, onde representa entre 67% e 80% dos impactos totais do ciclo de vida (Caldas; Lira; Sposto, 2017; Morales *et al.*, 2019). Os processos *upstream* da cadeia de fornecimento elétrico encontram-se integralmente incorporados através dos *datasets* do Ecoinvent 3.6, incluindo extração de combustíveis, construção e manutenção de infraestrutura, e perdas de transmissão e distribuição.

Temporalmente, o estudo abrange o período de 2015 a 2065, alinhado com a vida útil de projeto estabelecida pela NBR 15575 para edificações habitacionais. Geograficamente, utiliza-se Teresina-PI como contexto empírico representativo do clima tropical brasileiro, com potencial de extrapolação para regiões de características climáticas similares. Tecnicamente, considera-se sistema de resfriamento por split convencional com coeficiente de performance constante ( $COP = 3,0$ ), excluindo-se possíveis evoluções tecnológicas dos equipamentos para manter o foco na influência da envoltória. O detalhamento das descrições e justificativas para a fronteira do sistema está apresentado no Quadro 8.

Quadro 8: Delimitação e justificativa da fronteira do sistema

| Aspecto                        | Descrição                                                   | Justificativa                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de fronteira              | <i>Cradle-to-grave</i> parcial                              | Foco no módulo de maior impacto ambiental                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Módulo incluído                | Módulo B6: consumo de energia operacional para resfriamento | <ul style="list-style-type: none"> <li>Representa mais de 60% dos impactos totais em clima tropical (Caldas <i>et al.</i>, 2017; Ramesh <i>et al.</i>, 2010)</li> <li>Maior sensibilidade às mudanças climáticas (EPE, 2018)</li> <li>Diretamente influenciado pela envoltória  </li> </ul> |
| Módulos parcialmente incluídos | A1-A3: produção de materiais                                | Incorporados indiretamente via <i>datasets</i> do Ecoinvent 3.6; representam < 20% dos impactos totais (Chau <i>et al.</i> , 2015)                                                                                                                                                          |
| Módulos excluídos              | B1-B5: uso e manutenção da estrutura                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Impacto marginal no consumo de resfriamento</li> <li>Manutenção de equipamentos não altera demanda da envoltória (fora do escopo)</li> </ul>                                                                                                         |
|                                | B7: uso operacional de água                                 | Não aplicável ao escopo de resfriamento                                                                                                                                                                                                                                                     |
|                                | C1-C4: fim de vida                                          | Alta incerteza para projeções de 50 anos; tecnologias de 2065 são especulativas (Negishi <i>et al.</i> , 2019)                                                                                                                                                                              |
|                                | D: Benefícios além da fronteira                             | Não aplicável ao escopo temporal definido                                                                                                                                                                                                                                                   |

Os cenários avaliados contemplam a combinação sistemática de alternativas construtivas para vedações verticais, sistemas de cobertura e esquadrias, conforme detalhado na Seção 3.1.2, resultando em 108 configurações únicas que, aplicadas a quatro orientações solares, totalizam 432 cenários simulados. Adicionalmente, foram incorporados quatro cenários

de evolução da matriz elétrica nacional, modelados através de projeções que consideram políticas de transição energética e compromissos climáticos assumidos pelo país.

### 3.2 Simulação paramétrica do desempenho da edificação

As simulações paramétricas foram realizadas com o *software* EnergyPlus™, amplamente utilizado na literatura por sua robustez e capacidade de modelagem detalhada do comportamento térmico de edificações (Gimeno-Frontera *et al.*, 2018; González Mahecha *et al.*, 2020). O EnergyPlus™ pode ser utilizado em sua versão original ou integrado a *interfaces* ou outros *softwares* (Collinge *et al.*, 2012b; Gimeno-Frontera *et al.*, 2018; González Mahecha *et al.*, 2020; Phillips; Fannon; J. Eckelman, 2022; Rosse Caldas *et al.*, 2020).

A modelagem geométrica, baseada na planta padrão do conjunto Jacinta Andrade, teve todas as suas medidas, dados construtivos e operacionais inseridos no modelo do arquivo IDF. O IDF, com seu formato baseado em texto, descreve cada objeto de entrada em série, contendo todas as instruções para a simulação.

Nas seções a seguir são descritas as informações relevantes contidas no arquivo IDF construído para a simulação e o *script* para automatizar todos os cenários reais e ideais escolhidos.

#### 3.2.1 Arquivo IDF

A informação inicial preenchida no arquivo IDF foi relativa à localização da edificação (latitude, longitude, arquivo climático) e alguns comandos definidos pelo usuário para a leitura correta da disposição tridimensional. A geometria da edificação foi preenchida de acordo com os tópicos: zonas térmicas, superfícies, construções e materiais.

Para inclusão dos componentes construtivos no *software*, cadastrou-se primeiro todas as informações dos materiais que os compõem: espessura, condutividade térmica, densidade, calor específico e absorvância (retiradas da ABNT, 2005a e podem ser encontradas no Apêndice B, Tabela 1B). Algumas camadas inferiores a 0,5 mm não foram inseridas, por recomendação da documentação específica do desenvolvedor do *software*<sup>5</sup>, uma vez que sua omissão não compromete o resultado da simulação.

Os materiais compõem as camadas dos componentes construtivos que, por sua vez, compõem as superfícies da edificação. No detalhamento das superfícies também são

---

<sup>5</sup> Disponível em <<https://energyplus.net/documentation>>. Acesso em: 03/11/2025.

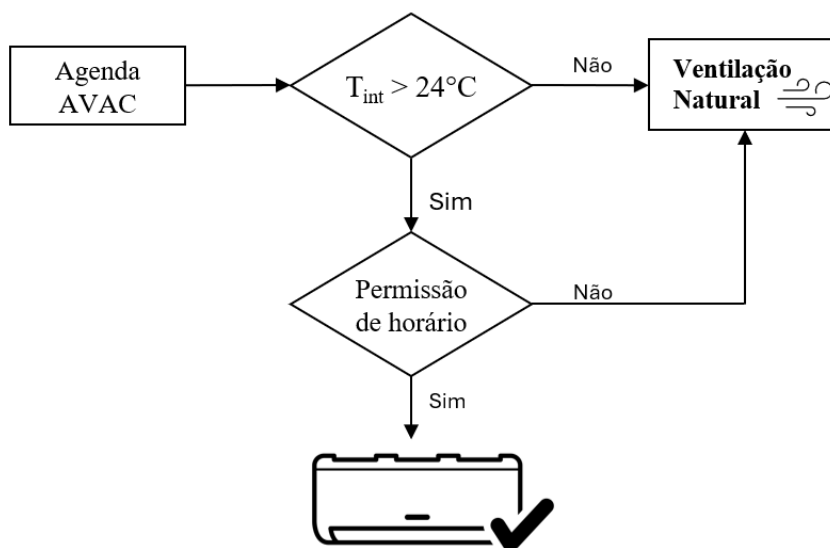
adicionadas informações da zona térmica a que aquela superfície está relacionada. Ainda sobre a geometria, informações sobre esquadrias foram acrescentadas em seguida.

Em relação à ocupação, foram adicionadas informações sobre a agenda dos ocupantes, separada por horas do dia, dias da semana e semanas do ano, as taxas metabólicas e as informações sobre ventilação natural. O sistema Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (AVAC) é detalhado para cada zona que será acionado, além das informações sobre o termostato (temperatura de ajuste: *setpoint*), agenda de acionamento e Coeficiente de Desempenho (COP). Para esse estudo, as informações válidas para todas as alternativas construtivas foram de quatro pessoas por habitação (0,111 pessoas/m<sup>2</sup>) para todos os dias do ano (100%), a temperatura de ajuste (*setpoint*) de 24°C (Aghniaey; Lawrence, 2018); e o COP do split igual a 3,0.

A análise desta tese está restrita à utilização de sistema de condicionamento artificial e nenhum outro equipamento eletroeletrônico foi considerado. Foi adotado o *Packaged Terminal Air Conditioner* (PCAT) que corresponde ao split, um aparelho muito comum no Brasil, em cada quarto da edificação. O termostato é programado para acionar o sistema AVAC sempre que a temperatura interna ultrapassar as temperaturas limites de conforto térmico, que são definidas pelo pesquisador. Além disso, a temperatura não é o único fator limitador.

O horário de acionamento do sistema é definido pelo ocupante, com base na sua preferência (agenda de acionamento). Para a condição de sistemas AVAC desligados, as condições de ventilação natural foram definidas, conforme apresentado na Figura 8, sendo estipulada a abertura de 50% das janelas quando a ventilação natural for permitida.

Figura 8: Fluxograma para acionamento do split e da ventilação natural



Para garantir uma representação realista das tendências de consumo de energia, foi necessário definir padrões preestabelecidos de operação da refrigeração, escolhidos com base em fatores socioeconômicos e comportamentais relevantes para o contexto pesquisado.

Diferentemente dos padrões de refrigeração em edifícios comerciais ou institucionais, que normalmente seguem horários predefinidos durante o horário de trabalho, a refrigeração residencial em habitações sociais para moradores de baixa renda é moldada exclusivamente pelo comportamento do usuário e pela tomada de decisões em relação à operação do ar-condicionado, apresentando desafios e oportunidades específicos. Os horários de operação selecionados foram baseados em dados empíricos e relatórios oficiais:

- Os casos extremos são 0h/dia (sem ar-condicionado) e 24h/dia (operação contínua de ar-condicionado);
- O cenário de 12 horas foi selecionado com base em um Relatório da Eletrobras sobre o uso de eletrodomésticos no Nordeste brasileiro, que indicou que os condicionadores de ar são usados, predominantemente, entre 19h e 7h na região (ELETROBRAS, 2007);
- Os cenários de 3 e 6 horas foram definidos considerando as necessidades de conforto térmico durante a noite, alinhados aos padrões brasileiros de desempenho de edificações (ABNT, 2021). Como famílias de baixa renda tendem a limitar o consumo de energia devido a restrições financeiras, foram estabelecidos períodos de resfriamento mais curtos, priorizando as horas associadas ao conforto do sono.

A justificativa para a modelagem dos cenários noturnos é corroborada por:

- i. Tipologia da edificação: Diferentemente de edifícios institucionais ou comerciais, onde o ar-condicionado é tipicamente utilizado durante o dia, o resfriamento residencial segue um padrão de uso noturno (Eli; Melo; Lamberts, 2024; Usman; Frey, 2021);
- ii. Percepção subjetiva de conforto térmico em residências: Estudos indicam que as preferências por resfriamento variam de acordo com os hábitos domésticos (Arowoiya; Moehler; Fang, 2024; Mirrahimi *et al.*, 2016);
- iii. Dados empíricos e locais: Embora estudos acadêmicos sobre o uso de ar-condicionado em moradias de baixa renda em Teresina sejam escassos, visitas *in loco* e relatos locais sugerem que a maioria dos moradores passa o dia trabalhando em outros locais e utiliza o ar-condicionado, principalmente, à noite para conforto

do sono (Carvalho, 2018). Esses padrões comportamentais observados foram incorporados a cenários predefinidos para garantir a consistência metodológica.

Com base nessas justificativas, foram estabelecidos os seguintes cenários operacionais:

- Aparelho desligado (0 horas) - sem resfriamento artificial;
- Aparelho ligado das 21:00 às 23:59 (3 horas);
- Aparelho ligado das 22:00 às 04:00 (6 horas);
- Aparelho ligado das 19:00 às 07:00 (12 horas);
- Aparelho em operação contínua (24 horas).

Esses padrões de resfriamento predefinidos foram essenciais para capturar restrições do mundo real e comportamentos dos usuários, tornando-os fundamentais para a previsão da demanda de energia. Para simular o desempenho térmico das edificações sob esses diferentes regimes operacionais e calcular a demanda energética associada, cada simulação requer um arquivo meteorológico específico (extensão “.epw”) relevante para a localização do edifício, disponível em fontes especializadas, como o site EnergyPlus™. Para estruturas brasileiras, o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações fornece esses arquivos (LABEEE, 2024). Os detalhes de todas as classes EnergyPlus™ utilizadas estão fornecidos no Quadro 1B do Apêndice B.

### 3.2.2 Script para simulações paramétricas

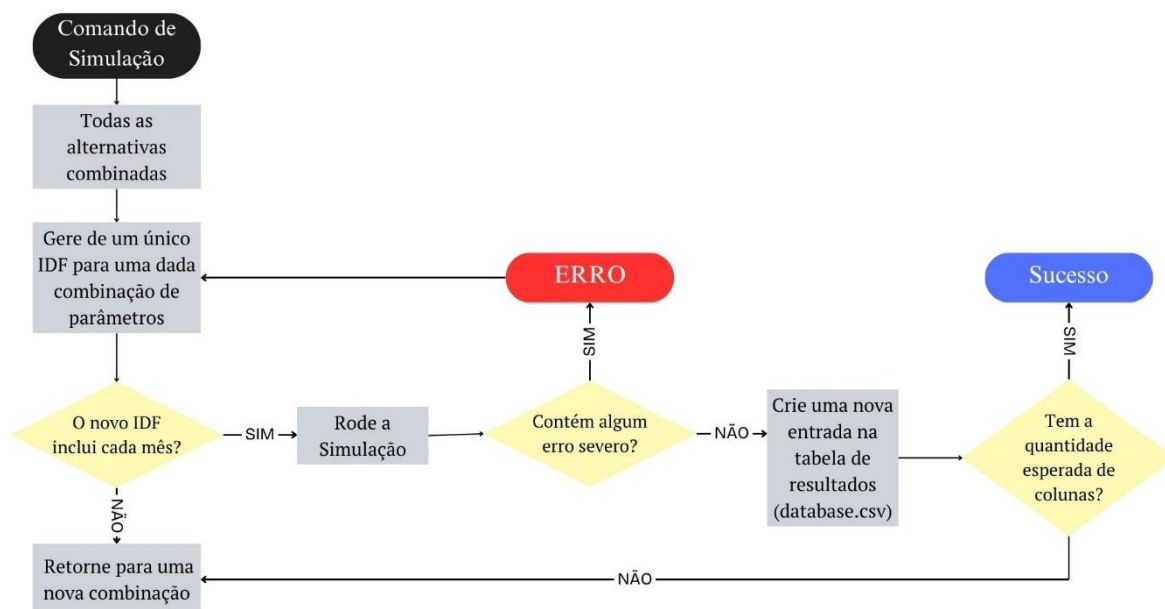
A análise paramétrica demandou a simulação de múltiplas combinações de variáveis construtivas (orientação solar e envoltória) e padrões operacionais (regimes de uso do condicionador de ar por ambiente). A atualização manual dos arquivos IDF entre permutações é propensa a erros de replicação, o que poderia levar a conclusões incorretas sobre o desempenho energético de medidas específicas. Considerando a complexidade e o alto número de combinações possíveis (10800 simulações), a execução manual seria inviável.

Para viabilizar essa análise paramétrica abrangente, foi desenvolvido um *script* em Python para automatizar a execução dos cenários. A abordagem automatizada visou garantir consistência, evitar erros de replicação manual e agilizar o processo combinatório, permitindo a integração programática entre Python e EnergyPlus™.

O *script* foi estruturado para: i) chamar o programa EnergyPlus™; ii) acessar o arquivo IDF de referência; iii) carregar o arquivo climático correspondente; iv) modificar

parametricamente as variáveis de interesse no IDF; e v) executar a simulação. O código incluiu pontos de verificação intermediários para detecção de erros (Figura 9), garantindo que todas as modificações paramétricas fossem aplicadas corretamente ao modelo base antes da execução de cada rodada.

Figura 9: Fluxograma do *Script* da Simulação Paramétrica



O processo automatizado totalizou 10.800 simulações, executadas em aproximadamente 12 horas de processamento computacional contínuo. Essas milhares de diferentes combinações (de orientação, horas de split de ambos os quartos, tipo de parede, janela e cobertura) geraram uma base final com 129.600 amostras, uma vez que os dados de consumo de eletricidade e temperatura interna foram extraídos mensalmente para cada cenário. Os principais resultados extraídos foram:

1. Consumo de eletricidade para resfriamento (kWh/m<sup>2</sup> por mês);
2. Temperatura média interna por mês (°C).

Esses dados compuseram a matriz de decisão para as próximas etapas da análise.

### 3.2.3 Construção e ajuste da base de dados

Os dados de saída do EnergyPlus™ foram ajustados (também por meio de código específico) para criar bases de dados adequadas: uma para o processo de Tomada de Decisão Multicritério e outra para a construção da Rede Neural no Inventário Dinâmico. O EnergyPlus™ gerou as saídas com informações de temperatura média interna da sala e dos quartos e a quantidade de consumo de eletricidade (para resfriamento) de cada quarto. Foram

adicionadas, portanto, as informações referentes à média da temperatura interna dos quartos e o consumo de eletricidade por m<sup>2</sup> de área construída (unidade funcional).

Em seguida, para a edificação utilizada na referência, e em conformidade com as normas locais (ABNT, 2005b, 2021) que recomendam vedações robustas para a Zona 7 (Teresina), optou-se pela substituição dos dados do material das paredes e do telhado pelo Quociente Térmico Quociente Térmico (Qt). Este parâmetro específico indica a razão entre a Capacidade Térmica (Ct, kJ/m<sup>2</sup>.K) e a Transmitância (U, W/m<sup>2</sup>.K), apresentado na Eq. 3. Essa decisão transformou as características construtivas da base de dados em um único valor numérico correspondente.

$$Q_t = \frac{C_t}{U} \quad (3)$$

Onde, Ct é a Capacidade Térmica (kJ/m<sup>2</sup>.K) e U é a Transmitância (W/m<sup>2</sup>.K).

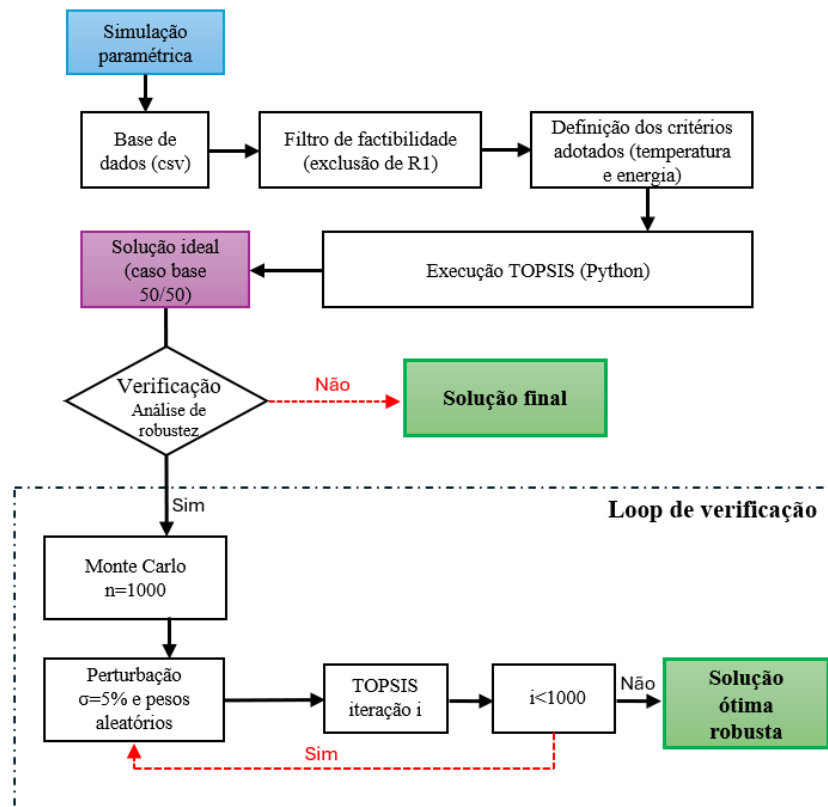
Para garantir a comparabilidade e a aderência às condições mínimas de desempenho, um conjunto viável de alternativas foi definido antes da análise multicritério. A cobertura de referência R1 (telha cerâmica sem forro) foi removida por não proporcionar uma barreira térmica mínima entre o telhado e o ambiente, condição incompatível com o funcionamento do sistema de refrigeração. As vedações “reais” restantes (embora com altos valores de U) foram mantidas para permitir a comparação técnica entre soluções viáveis. Após essa filtragem, cada alternativa foi identificada por (orientação, janela, parede, telhado).

### 3.3 Tomada de Decisão Multicritério

Na Figura 10, é apresentado o processo de seleção da melhor solução construtiva incluída na análise (escolhida pelo algoritmo de tomada de decisão multicritério) e a verificação da robustez dessa escolha por meio da simulação de Monte Carlo.

Com a base de dados completa e ajustada para esta finalidade, aplicou-se a técnica de Tomada de Decisão Multicritério TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution*) para identificar, em cada cenário de acionamento de split, a alternativa construtiva mais eficiente. Como apontado por Kokaraki *et al.* (2019), TOPSIS é uma metodologia de aplicação fácil, melhorando a compreensão por parte de tomadores de decisão, assim como BPS é uma ferramenta útil que fornece uma indicação do desempenho dos projetos examinados.

Figura 10: Infográfico da escolha da solução construtiva ótima



Com o conjunto de dados completo, o método multicritério TOPSIS foi aplicado para identificar a alternativa construtiva mais eficiente em cada cenário de uso de ar-condicionado. A matriz de decisão foi construída a partir das simulações paramétricas agregadas por alternativa (janela + parede + telhado + orientação). Dois critérios foram utilizados:

- Desempenho térmico: temperatura interna média mensal (°C);
- Desempenho energético: consumo de eletricidade para resfriamento ( $\text{kWh} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$ ).

Ambos foram tratados como critérios de custo (quanto menor, melhor). Esses critérios foram selecionados porque influenciam diretamente a demanda por resfriamento e o conforto em HIS em climas quentes. Outros indicadores, como custo de construção ou carbono incorporado, podem ser acrescentados, mas foram excluídos nesta pesquisa para garantir a comparabilidade entre cenários e devido a restrições de disponibilidade de dados.

A matriz de decisão inicial  $X$  é composta por  $i$  alternativas (combinações construtivas e de orientação) e  $j$  critérios de avaliação (desempenho energético e desempenho térmico), onde  $x_{ij}$  é o valor da  $i$ -ésima alternativa em relação ao  $j$ -ésimo critério.

O método TOPSIS é implementado seguindo as cinco etapas descritas a seguir.

### 1. Normalização da matriz de decisão

A matriz de decisão  $X$  é normalizada usando o método de normalização vetorial, transformando os valores em uma escala comparável (entre 0 e 1) na Eq. 4:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (4)$$

### 2. Ponderação da matriz normalizada

A matriz normalizada  $R$  é ponderada com os pesos de importância relativa  $w_j$  definidos para cada critério, gerando a matriz de decisão ponderada  $V$  apresentada na Eq.5:

$$v_{ij} = w_j r_{ij} \quad (5)$$

Onde  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ .

### 3. Determinação da Solução Ideal Positiva ( $A^+$ ) e Ideal Negativa ( $A^-$ )

A solução ideal positiva ( $A^+$ ) representa a melhor performance para cada critério, e a solução ideal negativa ( $A^-$ ) representa a pior performance. Como os dois critérios utilizados (consumo energético e temperatura) são critérios de custo (o menor valor é o melhor), as soluções são definidas como (Eq.6):

$$\begin{aligned} A^+ &= \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} = \left\{ \min_i v_{ij} \mid j \in J \right\} & \text{(Ideal positiva)} \\ A^- &= \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} = \left\{ \max_i v_{ij} \mid j \in J \right\} & \text{(Ideal negativa)} \end{aligned} \quad (6)$$

### 4. Cálculo da Distância Euclidiana

A distância euclidiana de cada alternativa (i) é calculada em relação à solução ideal positiva ( $d_i^+$ ) e à solução ideal negativa ( $d_i^-$ ). É a distância até a solução ideal (melhor caso - positiva) e até a solução não ideal (pior caso - negativa), como apresentado na Eq.7:

$$\begin{aligned} d_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \\ d_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \end{aligned} \quad (7)$$

### 5. Cálculo do Coeficiente de Proximidade ( $C_i$ ) e Classificação

O Coeficiente de Proximidade ( $C_i$ ) (Eq.8) é o índice de desempenho final, que mede o quão próxima a alternativa  $i$  está da solução ideal e o quão distante está da solução não-ideal:

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (8)$$

As alternativas são classificadas em ordem decrescente de  $C_i$ . Alternativas com  $C_i$  mais próximo de 1 representam a melhor escolha construtiva e operacional. Para o caso base da análise TOPSIS, foram definidos os seguintes pesos para os critérios de energia e temperatura:

1. **Cenários 3, 6, 12 e 24 h/dia:** pesos iguais  $w = (0,5; 0,5)$ , representando igual importância entre eficiência energética e conforto térmico.
2. **Cenário 0 h/dia:** peso  $w = (0; 1)$ , atribuindo importância total ao conforto térmico, uma vez que o consumo energético é nulo para todas as alternativas (critério degenerado).

Para avaliar o impacto da escolha dos pesos na ordenação das alternativas, foram realizados dois tipos de análise de sensibilidade: com pesos fixos e com pesos aleatórios:

- i. Sensibilidade com pesos fixos alternativos: configuração favorecendo conforto ( $w = 0,25; 0,75$ ) e favorecendo energia ( $w = 0,75; 0,25$ ). A concordância entre os *rankings* foi quantificada através do coeficiente de Kendall ( $\tau$ ), comparando-se a ordenação do caso base com cada configuração alternativa.
- ii. Sensibilidade com pesos aleatórios: pesos amostrados de uma distribuição Dirichlet(1,1), garantindo que a soma seja unitária. Esta distribuição uniforme não privilegia nenhum critério a priori.

Por fim, para avaliar a estabilidade das soluções sob incertezas, foi implementada uma simulação de Monte Carlo com as seguintes características com 1000 iterações e perturbação dos dados  $\pm 5\%$  (multiplicação por fatores aleatórios  $N(\mu=1, \sigma=0,05)$ ). As variáveis perturbadas foram os dois critérios de escolha da solução ótima: consumo energético e temperatura.

A estratégia de ponderação no Monte Carlo foi feita com dois experimentos: pesos fixos conforme caso base e pesos aleatórios Dirichlet (1,1) a cada iteração. O limite de  $\pm 5\%$  segue as diretrizes ASHRAE (2014) para incerteza aceitável em calibração de modelos energéticos e as mil iterações garantem convergência estatística com viabilidade computacional. Avaliou-se a

frequência de permanência das alternativas nas primeiras posições (Top-1, Top-3, Top-5) e a variabilidade do índice de desempenho  $C_i$ .

### 3.4 Técnica de Avaliação Dinâmica do ciclo de vida (ADCV)

A metodologia de ADCV-edf desenvolvida nesta tese integra variáveis temporalmente dependentes através de ferramentas computacionais avançadas, permitindo quantificar a evolução dos impactos ambientais ao longo da vida útil de 50 anos. Distingue-se da ACV convencional pelo tratamento explícito de duas variáveis dinâmicas fundamentais: o aumento progressivo da temperatura devido às mudanças climáticas e a evolução da composição da matriz elétrica brasileira decorrente da transição energética. A Figura 11 sintetiza as seis etapas metodológicas que operacionalizam a ADCV-edf, estruturadas para capturar a complexidade temporal dos impactos ambientais em edificações de longa vida útil.

A primeira etapa estabeleceu o escopo das variáveis dinâmicas, delimitando os parâmetros que evoluem temporalmente: temperatura externa (variável climática) e composição da matriz elétrica (variável energética). Estas variáveis foram selecionadas com base em sua relevância comprovada na literatura internacional (Frapin *et al.*, 2022; Pittau *et al.*, 2019) e sua influência direta no consumo energético operacional.

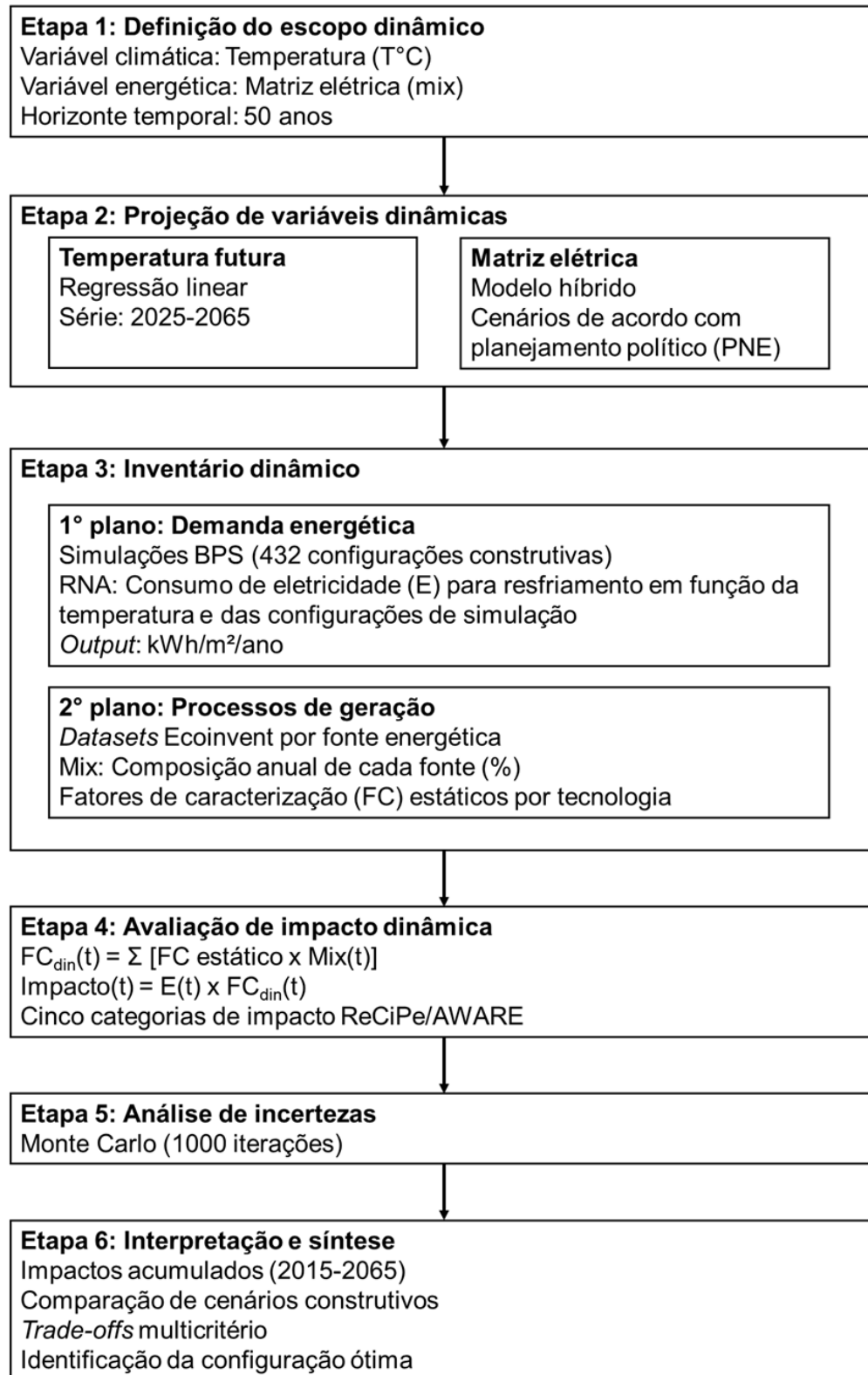
Na segunda etapa, desenvolveram-se os modelos de projeção para o período 2025-2065. A temperatura futura é projetada através de regressão linear aplicada às séries históricas locais, posteriormente integrada via Redes Neurais Artificiais para capturar não-linearidades. A evolução da matriz elétrica utiliza modelo híbrido que combina tendências históricas com cenários de políticas energéticas nacionais.

A terceira etapa está relacionada à construção do inventário dinâmico estruturado em dois planos complementares. O inventário de primeiro plano quantifica a demanda anual de eletricidade para resfriamento  $E(t)$  em kWh/m<sup>2</sup>/ano, obtida através de simulações paramétricas no EnergyPlus considerando as temperaturas projetadas. O inventário de segundo plano compila os processos de geração elétrica por fonte energética, extraídos do Ecoinvent 3.6, dos quais derivam-se os fatores de caracterização específicos para cada tecnologia de geração.

A quarta etapa constitui o núcleo da abordagem dinâmica, onde o cálculo de impactos é realizado anualmente através da equação:  $\text{Impacto}(t) = E(t) \times \text{FC\_dinâmico}(t)$  onde  $E(t)$  representa o consumo energético no ano  $t$  (variável com o clima) e  $\text{FC\_dinâmico}(t)$  o fator de caracterização ponderado pela composição da matriz naquele ano. Esta abordagem captura

simultaneamente o efeito do aquecimento global sobre a demanda e a descarbonização progressiva da oferta elétrica.

Figura 11: Etapas de elaboração da técnica de ADCV-edf proposta



A quinta etapa aplica simulação de Monte Carlo para quantificar as incertezas inerentes às projeções de longo prazo, gerando distribuições probabilísticas dos impactos futuros. Finalmente, a sexta etapa consolida os resultados através da integração temporal dos impactos anuais, permitindo análises comparativas robustas entre configurações construtivas.

As categorias de impacto selecionadas capturam diferentes dimensões da sustentabilidade: Potencial de Aquecimento Global (GWP) para avaliar a contribuição climática; Demanda Energética Cumulativa relacionada à eficiência; Escassez Hídrica (AWARE) crítica para sistemas hidrotérmicos; e Esgotamento de Recursos Minerais, relevante para tecnologias renováveis intensivas em materiais.

Esta metodologia avança em relação aos modelos existentes (Apostolopoulos *et al.*, 2023; Negishi *et al.*, 2019; Su; Li; Zhu, 2019) ao integrar projeções climáticas locais com transição energética nacional através de ferramentas computacionais acessíveis, eliminando a dependência de *softwares* proprietários especializados e permitindo replicação em contextos similares.

### 3.5 Inventário Dinâmico do ciclo de vida

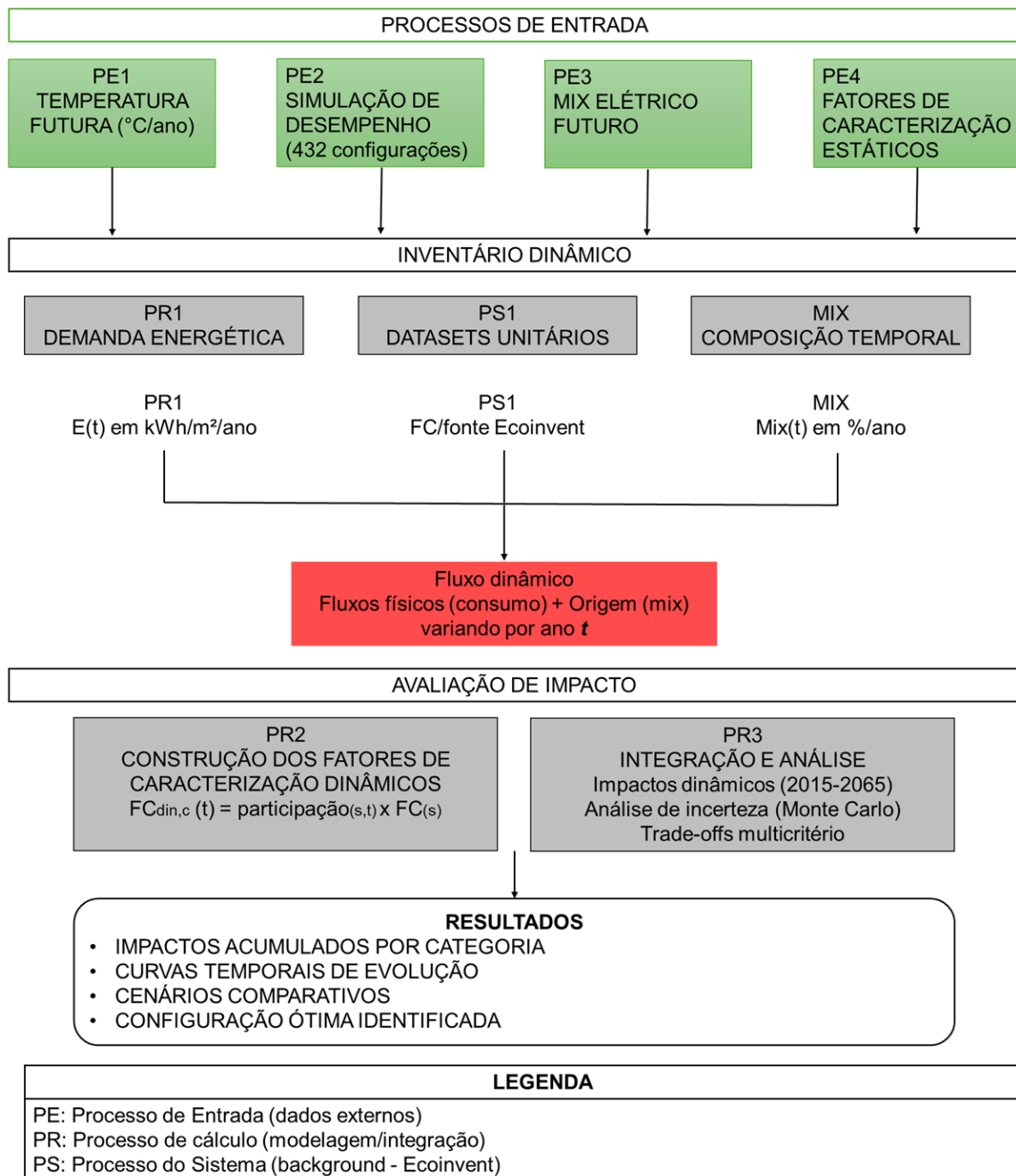
O desenvolvimento do Inventário Dinâmico constitui o elemento central para operacionalizar a ADCV-edf, diferenciando-se do inventário estático convencional pela incorporação explícita da variabilidade temporal.

Esta seção apresenta a estrutura metodológica para construção de um inventário que evolui anualmente, capturando tanto as mudanças na demanda energética (influenciada pelo clima, detalhado em Lira; Souza; Silva, 2025) quanto na oferta elétrica (determinada pela transição da matriz).

O inventário foi estruturado em dois planos complementares para garantir transparência e reprodutibilidade, conforme ilustrado na Figura 12. Esta abordagem permite separar claramente os processos *foreground* (específicos do estudo) dos processos *background* (dados secundários), facilitando atualizações e adaptações futuras.

Figura 12: Sistema de Inventário Dinâmico integrado

ADCV PROSPECTIVA - EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS (2015-2065)  
Sistema de Inventário Dinâmico Integrado



### 3.5.1 Fluxo de demanda da edificação (foreground)

O inventário de primeiro plano (

Quadro 9) quantifica a demanda energética anual  $E(t)$  para resfriamento, constituindo a interface entre a edificação e o sistema elétrico. Este plano captura as especificidades do objeto de estudo através da integração de quatro processos de entrada (PE) que alimentam o cálculo da demanda:

1. PE1: Temperatura futura: Séries temporais de temperatura projetadas para 2015-2065
2. PE2: Simulação de desempenho: Base de dados com 432 configurações simuladas
3. PE3: Mix elétrico futuro: Composição percentual anual da matriz (background)
4. PE4: Fatores de caracterização: Impactos por kWh de cada fonte (background)

Quadro 9: Componentes do inventário de primeiro plano

| Item                            | Descrição                                                                  | Unidade                         | Fonte            |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------|
| Demanda base                    | Consumo referência (24°C)                                                  | kWh/m <sup>2</sup> /ano         | EnergyPlus       |
| Incremento térmico              | Aumento de temperatura                                                     | °C mensal/ano                   | Regressão linear |
| Incremento demanda eletricidade | Aumento por °C adicional                                                   | kWh/m <sup>2</sup> /temperatura | Rede Neural      |
| Série temporal                  | E(t) para t=2015-2065                                                      | kWh/m <sup>2</sup> /ano         | Modelo integrado |
| Cidade/clima                    | Teresina (EPW: BRA_PI_Teresina.818320_INMET, disponível em (LABEEE, 2024)) |                                 |                  |
| <i>Setpoints</i>                | 24°C, para resfriamento; 60°C para aquecimento                             |                                 |                  |
| Perfis de ocupação              | Densidade ocupacional: 100% 0,111 pessoas.m <sup>-2</sup>                  |                                 |                  |

A quantificação da demanda E(t) ocorre através de dois métodos complementares descritos nas seções seguintes.

### 3.5.1.1 Modelagem preditiva via Rede Neural Artificial

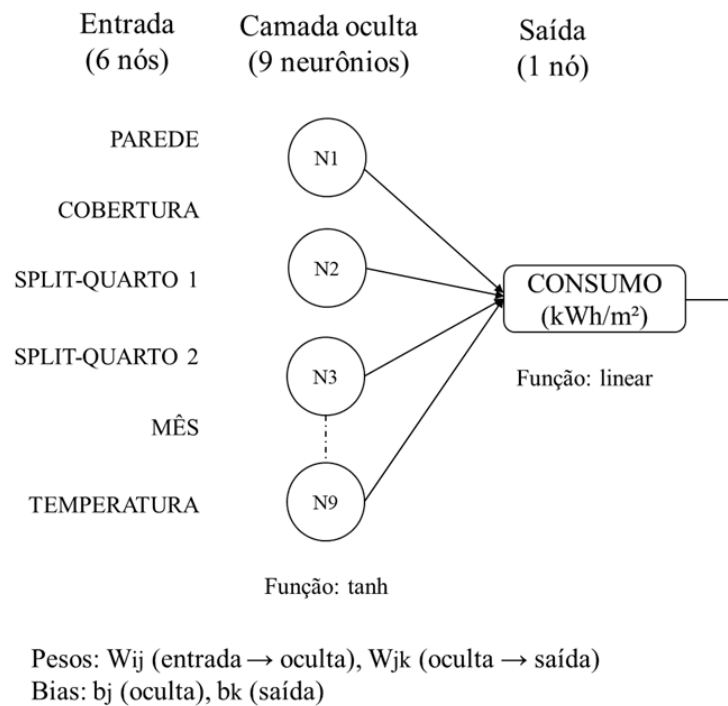
Para estimar o consumo de eletricidade ao longo da vida útil considerando variações climáticas, foi desenvolvida uma Rede Neural Artificial (RNA) do tipo *Perceptron Multicamadas* (MLP). O desenvolvimento metodológico seguiu um processo rigoroso de seleção de variáveis e otimização de hiperparâmetros.

A modelagem inicial da RNA considerou um conjunto de oito (8) variáveis de entrada, abrangendo características construtivas, operacionais e climáticas. As variáveis Iniciais (8 Neurônios) foram: 1. orientação espacial, 2. tipo de parede, 3. tipo de cobertura, 4. tipo de janela, 5. perfil de operação do ar-condicionado para o quarto 1, 6. perfil de operação do ar-condicionado para o quarto 2, 7. mês (variando de 1-12), e 8. temperatura externa média mensal (°C).

Para verificar a relevância de cada preditor e otimizar a complexidade da rede, foi utilizada a técnica SelectKBest. Esta análise estatística indicou que as variáveis orientação Espacial e tipo de janela apresentavam contribuição marginal e puderam ser removidas do *dataset* sem prejuízo significativo ao poder preditivo do modelo.

O modelo final foi estabelecido com seis (6) variáveis de entrada (nós), o que resultou em uma arquitetura mais eficiente e com menor risco de *overfitting* (Figura 13). Cada variável na camada de entrada, corresponde aos 6 regressores: características construtivas (parede e cobertura), configuração dos sistemas de climatização (splits nos quartos 1 e 2), e variáveis climáticas (mês e temperatura externa). A arquitetura implementada (Figura 13) realiza estimação direta do consumo energético para cada configuração de entrada, não se tratando de uma rede recorrente ou de predição multi-passos. Cada conjunto de entrada produz uma estimativa de consumo correspondente àquelas condições específicas.

Figura 13: Arquitetura da RNA desenvolvida



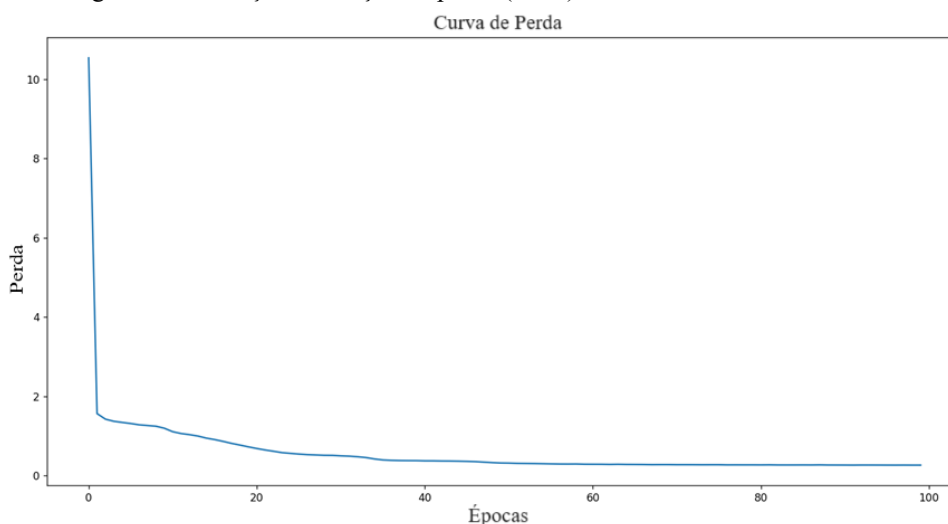
Os hiperparâmetros são as configurações definidas *a priori* que controlam o processo de aprendizagem (taxa de aprendizado, número de épocas, arquitetura). Os parâmetros são os pesos (*weights*) e *bias* aprendidos durante o treinamento através da retropropagação do erro. Para escolha dos hiperparâmetros, seguiu-se um processo sistemático em três etapas: exploração inicial, otimização da arquitetura e determinação do número ótimo de neurônios.

A exploração inicial compreende testes preliminares que foram realizados com um valor arbitrário de 10 neurônios na camada oculta. Isso serviu como ponto de partida para a avaliação inicial de hiperparâmetros (funções de ativação, otimizadores, entre outros). A busca exaustiva com validação cruzada *5-fold* avaliou as melhores combinações para o modelo arbitrário: a função de ativação (com as opções “relu”, “logistic” e “tanh”), o algoritmo de otimização (“adam”, “lbfgs” e “sgd”), o tamanho do lote (100 e 300) e a taxa de aprendizado (0,001 e 0,01).

A otimização da arquitetura foi feita para identificar a complexidade ideal da rede. Para isso, foi realizada uma busca exaustiva testando o número de neurônios na camada oculta (de 1 a 12), avaliando o desempenho do modelo por meio das métricas MAE, RMSE e  $R^2$ . Os resultados da otimização de arquitetura indicaram que 9 neurônios apresentaram o melhor desempenho, com  $R^2 = 0,99$ , atingindo o ponto ideal de *trade-off* entre a complexidade do modelo e a capacidade de generalização.

O monitoramento da função de perda (*loss function*) durante o treinamento mostrou estabilização após aproximadamente 50 épocas. Para garantir a convergência total e estabilidade do modelo, o número de épocas finais foi fixado em 200 (representando uma margem de segurança de 4 vezes), balanceando o custo computacional e a convergência (Figura 14).

Figura 14: Evolução da função de perda (MSE) durante o treinamento da RNA



Foram comparados três algoritmos de otimização por meio de validação cruzada: Adam (adaptativo moderno), L-BFGS e SGD (métodos clássicos). O algoritmo Adam com função de ativação tangente hiperbólica (*tanh*) apresentou melhor desempenho (MSE = 0,132 na validação cruzada;  $R^2 = 0,997$  no conjunto de teste), sendo selecionado para as análises subsequentes. Os hiperparâmetros adotados estão apresentados na Tabela 5.

O modelo final de 9 neurônios demonstrou alta capacidade de generalização e precisão para projeções futuras, conforme evidenciado pelas métricas de desempenho no conjunto de teste:

- $R^2$  (Coeficiente de Determinação) = 0,99
- RMSE (Erro Quadrático Médio) = 0,701 kWh/m<sup>2</sup>.ano<sup>-1</sup>
- MAE (Erro Absoluto Médio) = 0,504 kWh/m<sup>2</sup>.ano<sup>-1</sup>

Tabela 5: Hiperparâmetros otimizados da RNA

| Hiperparâmetro              | Valor selecionado |
|-----------------------------|-------------------|
| Neurônios na camada oculta  | 9                 |
| Função de ativação (oculta) | tanh              |
| Função ativação (saída)     | linear            |
| Otimizador                  | Adam              |
| Taxa de aprendizado         | 0,01              |
| Épocas                      | 200               |
| Tamanho do lote             | 100               |

### 3.5.1.2 Projeção de temperaturas futuras

O aumento da temperatura global, previsto em até 4°C até o ano de 2100 (em relação a 1900) pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), afeta diretamente o consumo de energia elétrica para o condicionamento das edificações. A dependência dos resultados da simulação computacional de um arquivo climático fixo (LABEEE, 2024), como o do ano de 2016, torna a utilização dessas projeções obsoleta a longo prazo.

Para resolver esta limitação e evitar a complexidade e o custo computacional de gerar novos arquivos climáticos e simulações completas no *software* de BPS, esta pesquisa propôs uma abordagem simplificada e inovadora: o treinamento da RNA considerando a temperatura externa como uma variável de entrada.

A projeção de temperaturas mensais futuras foi realizada por meio de regressão linear simples. Esta escolha é adequada, pois busca a tendência histórica da temperatura ao longo do tempo. Os dados históricos mensais de temperatura foram coletados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023), cobrindo pelo menos dez anos para garantir a robustez das projeções.

A análise foi conduzida utilizando a biblioteca *sklearn* em *Python*. A regressão linear simples foi aplicada para cada mês isoladamente, com a temperatura como variável dependente e o ano como variável independente. Os coeficientes angular e linear obtidos na regressão formularam a equação de projeção, permitindo estimar as temperaturas mensais futuras para todo o horizonte de vida útil do edifício.

A regressão da RNA foi conduzida utilizando a temperatura externa como a única variável climática de entrada, estabelecendo uma conexão direta entre a física da construção (representada pelas demais variáveis de envoltória) e a temperatura externa.

O modelo EnergyPlus processou o arquivo climático completo na geração dos dados de treinamento, e o metamodelo RNA extrai e simplifica os padrões dominantes, mantendo a fidelidade para a análise comparativa das alternativas construtivas.

Este método simplifica o processo geral da ADCV, eliminando a necessidade de gerar novos arquivos climáticos complexos ou conduzir simulações adicionais no BPS. As temperaturas previstas foram inseridas diretamente no *dataset* de treinamento da RNA, permitindo que a rede preveja o consumo mensal de eletricidade durante toda a vida útil do edifício e, assim, facilitando o planejamento de gerenciamento da demanda e consumo de energia.

### 3.5.2 Identificação dos processos unitários (*background*)

O inventário de segundo plano (*background*) compilou os processos de geração elétrica e seus impactos ambientais associados, sendo extraído do banco de dados Ecoinvent 3.6 através do *software* SimaPro (versão 9.0.0.48).

Para garantir a precisão da ADCV evitar a dupla contagem (*double counting*), adotou-se uma estratégia de desagregação. Ao invés de utilizar o *dataset* agregado de mercado (“electricity, BR”), foram extraídos os fatores de caracterização individuais (estáticos) de cada fonte energética que compõe o mix brasileiro: hidrelétrica, eólica, solar, térmica a gás, biomassa, carvão e nuclear.

Esta abordagem permite reconstruir anualmente o mix elétrico por meio da ponderação da participação de cada fonte na matriz projetada. A unidade funcional utilizada para o inventário de segundo plano foi de 1 kWh do produto eletricidade de alta voltagem.

O Quadro 10 detalha os processos de referência, a unidade funcional, o método de impacto e a localização de cada fonte energética, tal como foram utilizados no *software*. Esta identificação de processo e versão garante a plena reprodutibilidade do inventário.

A seleção dos *datasets* priorizou a representatividade tecnológica e geográfica em relação ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Para a biomassa, adotou-se o processo de planta anexa (*bagasse co-generation, annexed plant*), que é o predominante no setor sucroenergético brasileiro. Para a solar fotovoltaica, utilizou-se o *dataset* global (RoW - *Rest of the World*) na ausência de um processo específico e totalmente representativo do contexto brasileiro no banco de dados. Os demais processos (hidrelétrica, termelétrica, nuclear, carvão) correspondem às tecnologias efetivamente empregadas no SIN ou foram ajustados para refletir a realidade

brasileira, permitindo que este inventário seja usado de forma precisa para converter o consumo de eletricidade projetado em impactos ambientais.

Quadro 10: Inventário de segundo plano

| Fonte                       | Campo                  | Descrição                                                                                               |
|-----------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Eólica                      | Processo de referência | Electricity, high voltage, electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S            |
|                             | Localização            | Nordeste brasileiro (Brazil, North-eastern grid)                                                        |
| Hidrelétrica (reservatório) | Processo de referência | Electricity, high voltage, electricity production, hydro, reservoir, tropical region   Cut-off, S       |
|                             | Localização            | Nordeste brasileiro (Brazil, North-eastern grid)                                                        |
| Gás Natural                 | Processo de referência | Electricity, high voltage, electricity production, natural gas, combined cycle power plant   Cut-off, S |
|                             | Localização            | Nordeste brasileiro (Brazil, North-eastern grid)                                                        |
| Solar                       | Processo de referência | Electricity, high voltage, electricity production, solar thermal parabolic trough, 50 MW   Cut-off, S   |
|                             | Localização            | Rest-of-World (RoW)                                                                                     |
| Biomassa                    | Processo de referência | Electricity, high voltage, sugarcane processing, modern annexed plant   Cut-off, S                      |
|                             | Localização            | Nordeste brasileiro (Brazil, North-eastern grid)                                                        |
| Nuclear                     | Processo de referência | Electricity, high voltage, electricity production, nuclear, pressure water reactor   Cut-off, S         |
|                             | Localização            | Sudeste brasileiro (Brazil, South-eastern grid)                                                         |
| Óleo combustível/diesel     | Processo de referência | Electricity, high voltage, electricity production, oil   Cut-off, S                                     |
|                             | Localização            | Nordeste brasileiro (Brazil, North-eastern grid)                                                        |
| Carvão                      | Processo de referência | Electricity, high voltage, electricity production, hard coal   Cut-off, S                               |
|                             | Localização            | Nordeste brasileiro (Brazil, North-eastern grid)                                                        |

### 3.5.3 Composição temporal da matriz (mix elétrico)

A precisão da ADCV depende diretamente da projeção do mix elétrico (matriz de geração de energia elétrica) ao longo da vida útil da edificação (2015 a 2065). Para capturar as transformações esperadas no setor, resultantes de fatores naturais e intervenções políticas, foi desenvolvido um modelo híbrido de projeção da matriz elétrica.

O modelo híbrido foi construído para superar as limitações de modelos puramente estatísticos ou baseados apenas em dados discretos de política pública. Essa construção evita o “excesso de ajuste” de modelos puramente estatísticos quando os dados de política são escassos, binários e não perfeitamente alinhados ao período histórico, tentando ser mais fiel à realidade quanto é possível. Sua arquitetura combina quatro elementos essenciais: i) tendências

históricas, ii) cenários de política pública realistas, iii) características de interação (sinergias e competição) e iv) regras específicas por fonte/cenário.

Inicialmente, foram testados modelos preditivos como Rede Neural, *Random Forest* e regressões lineares, mas estes apresentaram desempenho insatisfatório ( $R^2$  negativo e instabilidade) devido à natureza discreta das variáveis de política e à ausência de alguma estabilidade no longo período.

A decisão metodológica foi de adotar uma calibração curta e estável (2014-2023) para capturar o regime recente da matriz (expansão eólica/solar, estabilização hídrica, e termelétricas como garantia). A intersecção inicial entre dados históricos e dados de variáveis externas de política foram de 18 anos (2006-2023) apontou os seguintes problemas: baixa sobreposição efetiva entre as séries relevantes e variáveis de política binárias tornavam a variação das fontes abruptas (0/1), o que gerava quebras abruptas e instabilidade nas projeções.

Para cada fonte ( $s$ ), uma regressão linear simples (Eq.9) foi ajustada para estabelecer a tendência inercial da sua participação ( $p$ ) no mix:

$$p(t) = \alpha_s + \beta_s \cdot t \quad (9)$$

Onde,  $\beta_s$  é a inclinação, em p.p./ano. O valor de  $R^2$  representa a aderência ao período de referência (Tabela 6).

Tabela 6: Tendência histórica de fontes energéticas brasileiras

| Fonte                 | Coefficiente regressão (direção) | $R^2$ |
|-----------------------|----------------------------------|-------|
| Gás natural           | -0,756                           | 0,59  |
| Carvão a vapor        | -0,210                           | 0,77  |
| Óleo diesel           | -0,154                           | 0,58  |
| Óleo combustível      | -0,272                           | 0,67  |
| Outras não-renováveis | -0,047                           | 0,72  |
| Nuclear               | -0,066                           | 0,74  |
| Lixívia/resíduos      | 0,057                            | 0,56  |
| Outras renováveis     | 0,027                            | 0,87  |
| Eólica                | 1,182                            | 0,98  |
| Solar                 | 0,687                            | 0,77  |
| Hidráulica            | -0,354                           | 0,15  |

Essas tendências servem de referência para os ajustes por política. É importante ressaltar o baixo valor do coeficiente de determinação da fonte hidráulica, que reflete estabilização recente e não erro de modelagem.

Para incorporar as variáveis de política no histórico e influenciar as projeções futuras, foi preciso elaborar curvas contínuas realistas. Primeiro, foi preciso superar a variação abrupta trazida pelos números binários além da falta de granularidade temporal das políticas. Para tal, foram elaboradas variáveis contínuas, de zero até um (ou de um até zero, em caso de declínio). Isso significa que as variáveis foram parametrizadas em  $[0,1]$ , moduladas e o valor de referência derivado das tendências 2014-2023 (linear aditiva) ou, quando adequado (em casos como a solar, por exemplo), um crescimento multiplicativo ancorado em 2023. Todas as formas foram inspiradas em trajetórias plausíveis para cada setor, como apresentado a seguir:

- **Energia solar (META\_SOLAR):** curva S com aceleração pós-2030, estabilizando a partir de 2040, considerando intensidade de incentivo e viabilidade percebidos no PNE 2030/2050 e marcos regulatórios.
- **Energia eólica (META\_EOLICA):** rampa quase linear crescente até 0,8, também considerando os incentivos apresentados em PNE 2030/2050, leilões e expansão histórica.
- **Surgimento de novas tecnologias (NOVAS\_TECNOLOGIAS):** crescimento gradual a partir de 2025, saturando por volta de 2035-2040 (ex.: hidrogênio verde -  $H_2V$ , armazenamento de carbono), especialmente pelas diretrizes apontadas no PNE 2050 e programas de incentivo à pesquisa.
- **Fonte gás natural (POLITICA\_TERMICA\_GAS):** ciclo político-operacional com curva senoidal e ruído determinístico por ano. As definições foram feitas com base na dependência ou uso estratégico de fontes térmicas a gás, especialmente considerando possíveis crises hídricas.
- **Hidrelétrica (META\_HIDRICA):** quase constante alta (0,8-1,0), sofrendo pressão competitiva indireta de novas renováveis. Isso provém da continuidade histórica e da viabilidade da fonte hidráulica, dada a predominância histórica.
- **Energia nuclear (META\_NUCLEAR):** baixa e estável, mas foi criado um cenário específico considerando apoio a expansão nuclear em Angra.
- **Biomassa (META\_CANA):** estabilidade moderada (0,6-0,8), considerando a competitividade da biomassa (bagaço de cana) e as políticas de bioenergia.

Todas foram parametrizadas para refletir decolagem–aceleração–saturação (ou ciclos), evitando saltos binários artificiais. Na decolagem, a aceleração acontece de forma lenta,

acelerando e, depois, estabilizando na saturação. A partir das curvas de tendência e projeção, foram derivadas características específicas (*features*) de interação e aceleração temporal que capturam interações e não-linearidades:

- **Sinergia** (quando políticas se reforçam mutuamente): como a sinergia renovável, definida na junção de Eólica e Solar e outras quatro renováveis (Eólica, Solar, Hídrica e Biomassa);
- **Competição** (conflito entre térmicas e renováveis): renováveis *versus* térmica a gás;
- **Tempo e aceleração** (mudanças se aceleram após 2030): tempo normalizado e efeito quadrático pós-2030, amplificando efeitos de política no médio prazo.

Foram testados quatro cenários exploratórios (C) com diferenças marcantes, refletindo diversas intensidades de políticas (multiplicadores de 0,7 a 1,5): BASE (transição moderada); RENOVÁVEIS\_ACELERADAS (reforço solar/eólica); FÓSSIL\_RESISTENTE (incentivos persistentes a térmicas); e NUCLEAR\_PLUS (aposta seletiva em nuclear).

A projeção final da participação de cada fonte é submetida a restrições de plausibilidade (mínimos/máximos realistas, como teto de 35% para a fonte eólica) e à normalização anual para somar 100% em cada ano  $t$ .

Um pseudocódigo está apresentado a seguir para resumir as linhas de comando que representam o modelo híbrido desenvolvido. Para cada cenário C:

a) gerar séries META\_\* e POLITICA\_TERMICA\_GAS (curvas S, rampas, senoide e ruído determinístico);

b) derivar *features*:

\_\_ para cada ano  $t$  em 2024 até 2065:

\_\_ para cada fonte  $s$ :

\_\_ valor\_base <- tendência\_2014\_2023( $s$ ) aplicada até  $t$  (ou crescimento

multiplicativo  $p$ / solar)

\_\_ valor\_final <- aplicar moduladores de política/features e regras por fonte/cenário

\_\_ valor\_final <- aplicar mínimos/máximos e não-negatividade

\_\_ normalizar shares\_ $s(t)$  para somar 100%

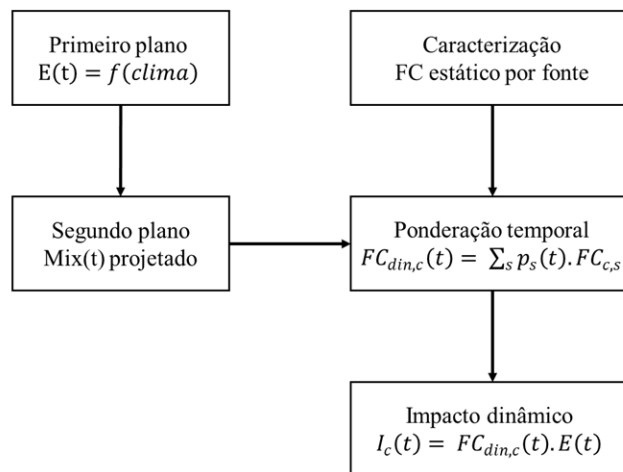
O modelo final garante a coerência interna (evitando saltos espúrios e garantindo a reprodutibilidade) e serve como o vetor físico completo do Inventário Dinâmico: no ano  $t$ , a casa consome  $E(t)$  (em kWh), compostos pela participação percentual (participação) de cada fonte (solar, eólica etc.), permitindo o cálculo do impacto ambiental dinâmico.

O modelo híbrido não se propõe a ser uma “previsão de meta oficial”, mas uma representação contínua e plausível da evolução da matriz. Os limites são heurísticos e documentados, e sua validação reside na coerência interna e na robustez para o propósito da ADCV.

### 3.6 Avaliação de Impacto Dinâmica do Ciclo de Vida

A avaliação de impacto transforma os fluxos inventariados em indicadores ambientais, respondendo “qual o dano ambiental desse consumo energético?”. A abordagem dinâmica desenvolvida integra os dois planos do inventário através de fatores de caracterização temporalmente variáveis e está graficamente resumida na Figura 15.

Figura 15: Fluxograma de integração inventário-impacto  
INVENTÁRIO DINÂMICO → AVALIAÇÃO DE IMPACTO



A metodologia de avaliação foi estruturada em três etapas sequenciais:

- i) Caracterização estática por fonte energética;
- ii) Ponderação temporal e cálculo do fator dinâmico;
- iii) Cálculo do impacto dinâmico final ( $I_c$ );

O modelo mostrado no primeiro plano está disponível na íntegra em Lira, Souza e Silva (2025) e captura clima local, condições de envoltória, uso e operação. No segundo plano, as fontes de eletricidade brasileiras foram modeladas em *software* de ACV convencional, para capturar tecnologias e políticas do sistema elétrico. Com base na projeção para os anos futuros, foram incorporados os consumos de eletricidade para resfriamento calculados no primeiro plano para obter os impactos ambientais (seção 3.6.3) em quatro categorias principais: clima,

água, recurso e energia. A Avaliação de Impacto Dinâmica (ADICV) combina ambos os inventários ano a ano.

### 3.6.1 Caracterização estática por fonte energética

Aplicou-se métodos de avaliação de impacto reconhecidos internacionalmente aos *datasets* individuais de cada tecnologia de geração, extraindo fatores de caracterização estáticos (FC) por kWh gerado (Tabela 7). Os métodos selecionados e suas respectivas categorias foram:

- Mudança climática: ReCiPe 2016, Midpoint (H), Potencial de Aquecimento Global (PAG)/ *Global warming* - GWP 100 (unidade: kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh);
- Escassez de recursos fósseis: ReCiPe 2016, Midpoint (H), Escassez de recursos fósseis/ *Fossil resource scarcity* (unidade: kg oil<sub>-eq</sub>/kWh).
- Escassez hídrica: AWARE (Available Water Remaining), uso de água (unidade: m<sup>3</sup> world<sub>-eq</sub>/kWh);
- Demanda Energética Cumulativa: CED (*Cumulative Energy Demand*, MJ/kWh). CED v1.11 (unidade: MJ/kWh)
- Escassez de recursos minerais: ReCiPe 2016 Midpoint (H), *Mineral resource scarcity* (unidade: kg Cu<sub>-eq</sub>/kWh);

Tabela 7: Fatores de Caracterização (FCs) estáticos por fonte

| Fonte        | Clima<br>(kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh) | Escassez<br>Recurso fóssil<br>(kg oil <sub>-eq</sub> /kWh) | Água<br>(m <sup>3</sup> /kWh) | Energia<br>(MJ/kWh) | Escassez Recurso<br>mineral<br>(kg Cu <sub>-eq</sub> /kWh) |
|--------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------|
| Eólica       | 0,00940                               | 0,002628                                                   | 0,003269                      | 4,00911             | 0,0003498                                                  |
| Hidrelétrica | 0,08088                               | 0,001120                                                   | 0,065466                      | 3,85045             | 0,0001070                                                  |
| Gás natural  | 0,46975                               | 0,146240                                                   | 0,002601                      | 6,68596             | 0,0000900                                                  |
| Solar        | 0,05037                               | 0,008582                                                   | 0,013349                      | 0,75116             | 0,0012000                                                  |
| Biomassa     | 0,02083                               | 0,011999                                                   | 0,028337                      | 10,62809            | 0,0004460                                                  |
| Nuclear      | 0,01143                               | 0,002836                                                   | 0,003350                      | 13,40754            | 0,0007090                                                  |
| Óleo         | 0,72853                               | 0,247420                                                   | 0,009866                      | 11,39179            | 0,0002580                                                  |
| Carvão       | 1,22733                               | 0,250300                                                   | 0,011557                      | 11,47637            | 0,0002550                                                  |

Fonte: Ecoinvent (v3.6)

Seguindo prática consolidada na literatura de ADCV (Collinge *et al.*, 2013a; Su *et al.*, 2022; Van De Moortel *et al.*, 2022), foram adotados fatores de caracterização constantes no tempo. Como observado por Lira; Silva (2025), “a maioria dos modelos de AICV ainda assume FCs estáticos”, sendo o dinamismo incorporado através da evolução da composição da matriz

elétrica. Esta abordagem é explicitamente validada por Van de Moortel *et al.* (2022): “o impacto ambiental [por unidade] permanece inalterado ao longo do tempo, mudando apenas de acordo com o uso bruto de energia”.

### 3.6.2 Ponderação temporal e construção dos Fatores de Caracterização Dinâmicos

A transformação dos fatores estáticos em dinâmicos constitui o elemento central da ADCV, permitindo capturar a evolução temporal dos impactos unitários da eletricidade consumida.

Para cada ano  $t$  e categoria de impacto  $c$ , o Fator de Caracterização Dinâmico  $FC_{din,c}(t)$  representa o perfil ambiental médio de 1 kWh consumido da rede elétrica brasileira, calculado através da ponderação apresentada na Eq.10:

$$FC_{din,c}(t) = \sum_s p_s(t) \cdot FC_{c,s} \quad (10)$$

Onde,  $FC_{din,c}(t)$  é o Fator de Caracterização Dinâmico da categoria  $c$  no ano  $t$ ;  $FC_{c,s}$  é o fator de caracterização estático da fonte  $s$  para categoria  $c$  (Tabela 9);  $p_s(t)$  é a participação percentual da fonte  $s$  na matriz elétrica no ano  $t$ ; e  $s$  são as fontes energéticas (hidro, eólica, solar, gás, biomassa, nuclear, óleo, carvão).

O  $FC_{din,c}(t)$  é uma variável intensiva (propriedade do fluxo de energia), resultante da ponderação dos fatores de caracterização estáticos de cada fonte ( $FC_{c,s}$ ) pela sua participação projetada no mix energético nacional ( $p_s(t)$ ).

Este fator dinâmico é uma variável intensiva (propriedade por unidade de fluxo), que evolui anualmente conforme a transição da matriz elétrica, capturando a descarbonização progressiva (redução de participação para fontes fósseis), a expansão renovável (aumento da participação de fontes como eólica/solar) e variações sazonais e políticas energéticas.

### 3.6.3 Cálculo do impacto dinâmico anual e acumulado

O impacto ambiental anual  $I_c(t)$  para cada categoria  $c$  resulta da multiplicação do consumo energético pelo fator de caracterização dinâmico correspondente:

$$I_c(t) = FC_{din,c}(t) \cdot E(t) \quad (11)$$

Onde,  $I_c(t)$  é o impacto ambiental na categoria  $c$  no ano  $t$ ;  $E(t)$  é o consumo anual de eletricidade para resfriamento ( $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$ ) obtido via RNA alimentada com temperatura projetada;  $FC_{din,c}(t)$  é o fator dinâmico da Eq. 10.

Esta formulação captura simultaneamente os efeitos climático e energético temporais. Efeito climático é percebido no aumento progressivo de  $E(t)$  devido ao aquecimento global e o Efeito energético é a evolução de  $FC_{din,c}(t)$  pela transição da matriz.

A título de comparação, o impacto acumulado ao longo da vida útil (2015-2065) é dado por:

$$I_{c,total} = \sum_{2015}^{2065} I_c(t) \quad (12)$$

As perdas de transmissão e distribuição (T&D = 17% no Brasil) estão incorporadas nos *datasets* do Ecoinvent utilizados, não requerendo correção adicional. Esta abordagem mantém consistência com os processos de geração em alta tensão modelados. Para transparência e reprodutibilidade, os *scripts* Python completos, incluindo as funções de carregamento de dados e o modelo híbrido de projeção da matriz energética, são depositados e mantidos na íntegra no repositório de código aberto ([Github](#)).

### 3.6.4 Exemplo de aplicação

Para ilustrar a metodologia, considera-se o impacto climático em 2035:

1. Consumo de eletricidade para resfriamento  $E(2035) = 356,08 \text{ kWh/m}^2 \text{ no} \cdot \text{ano}$  de 2035 (projetado pela RNA);
2. Mix (2035) = 46,7% hidro, 31,9% eólica, 11,8% solar, 0% gás, 1,5% nuclear e 3,8% bagaço de cana (a partir da projeção da matriz elétrica elaborada pelo modelo híbrido);
3.  $FC_{din,clima}(2035) = (0,081 \times 0,47) + (0,009 \times 0,32) + (0,050 \times 0,12) + (0,470 \times 0) + \dots = 0,048 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{kWh}$  (pela multiplicação dos FC da Tabela 10 e a participação de cada fonte na matriz elétrica do ano de 2035)
4.  $I_{clima}(2035) = 356,08 \times 0,048 = 16,98 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{m}^2 \cdot \text{no ano}$  de 2035 (multiplicando o consumo total no ano e o FC dinâmico para a categoria clima)

### 3.6.5 Análise de incertezas e indicadores complementares

Para avaliar a segurança energética e resiliência da matriz, calculou-se o índice de Herfindahl-Hirschman (HHI) anualmente de todas as fontes  $s$ :

$$HHI(t) = \sum_s p_s(t)^2 \quad (13)$$

Onde,  $p_s(t)$  é a participação da fonte  $s$  no ano  $t$ , com  $\sum_s p_s(t) = 1$ .

Valores HHI próximos a 1 indicam concentração (dependência), enquanto valores menores indicam diversificação. Adicionalmente, monitorou-se a participação das Fontes Renováveis Variáveis (VRE - Variable Renewable Energy):

$$VRE(t) = p_{eólica}(t) + p_{solar}(t) \quad (14)$$

As VRE, diferentemente de hidrelétricas com reservatório e biomassa (fontes despacháveis), não podem ter sua potência controlada devido à variabilidade dos recursos naturais (vento e radiação), representando desafio operacional ao sistema elétrico (IEA, 2018).

Para a quantificação de incertezas, empregou-se a simulação de Monte Carlo (n=1000 iterações) considerando três fontes de variabilidade:

1. Consumo  $E(t)$ : log-normal centrada em 1 (coeficiente de variação igual a 10%), representando incertezas climáticas e comportamentais;
2. Fatores  $FC_{c,s}$ : log-normal centrada em 1 (coeficiente de variação igual a 15%), capturando incertezas tecnológicas e metodológicas;
3. Composição da matriz  $p_s(t)$ : distribuição de Dirichlet ( $\alpha$ ) com parâmetro de concentração  $k=120$  que garante  $\sum_s p_s = 1$  (constraint probabilística) e reflete incertezas políticas e econômicas.

Para cada iteração, recalculam-se os fatores dinâmicos, os impactos anuais e os impactos acumulados. Os resultados reportados incluem média, percentis (p5-p95), coeficiente de variação e análise de sensibilidade global, com *seed* fixada para reprodutibilidade.

### 3.7 Interpretação dos resultados da ADCV

A interpretação segue a estrutura da ISO 14044, expandida para capturar aspectos dinâmicos únicos da ADCV. Conduziu-se verificações iterativas em cada fase: no inventário dinâmico com a análise de sensibilidade para projeções de temperatura, validação da RNA com dados independentes e verificação de completeza dos *datasets*. Na fase de avaliação de impacto, foram feitas análises de cenários alternativos de transição energética, consistência entre categorias de impacto e garantia de alinhamento com EN 15804 para módulo B6.

A dimensão temporal permite identificar os períodos críticos e os elementos dominantes em cada cenário, além de fazer uma varredura entre várias categorias de impacto e a adaptação climática das configurações construtivas. A ADCV revela aspectos compensatórios ao avaliar se a transição energética pode compensar parcialmente o aumento de consumo por aquecimento ou se as decisões construtivas hoje determinam impactos por 50 anos, justificando a especificação inicial. Estas análises fundamentam decisões adaptativas para edificações de longa vida útil, considerando incertezas climáticas e energéticas futuras.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação dos resultados segue uma estrutura progressiva, partindo de análises das variáveis isoladas do desempenho termoenergético, avançando para otimização multicritério e culminando na avaliação dinâmica de impactos ao longo de 50 anos. Esta sequência permite compreender desde os mecanismos físicos fundamentais até as implicações ambientais de longo prazo das decisões construtivas.

### 4.1 Desempenho termoenergético dos componentes construtivos

A avaliação iniciou-se pelo modelo de referência, simulado conforme parâmetros estabelecidos na Seção 3.2: ocupação de 4 pessoas (0,111 pessoas/m<sup>2</sup>), *setpoint* de 24°C e COP igual a 3 para o sistema *split*. Esta configuração base, representativa de mais de 4.000 unidades do Conjunto Jacinta Andrade, estabelece a referência para comparação das alternativas propostas.

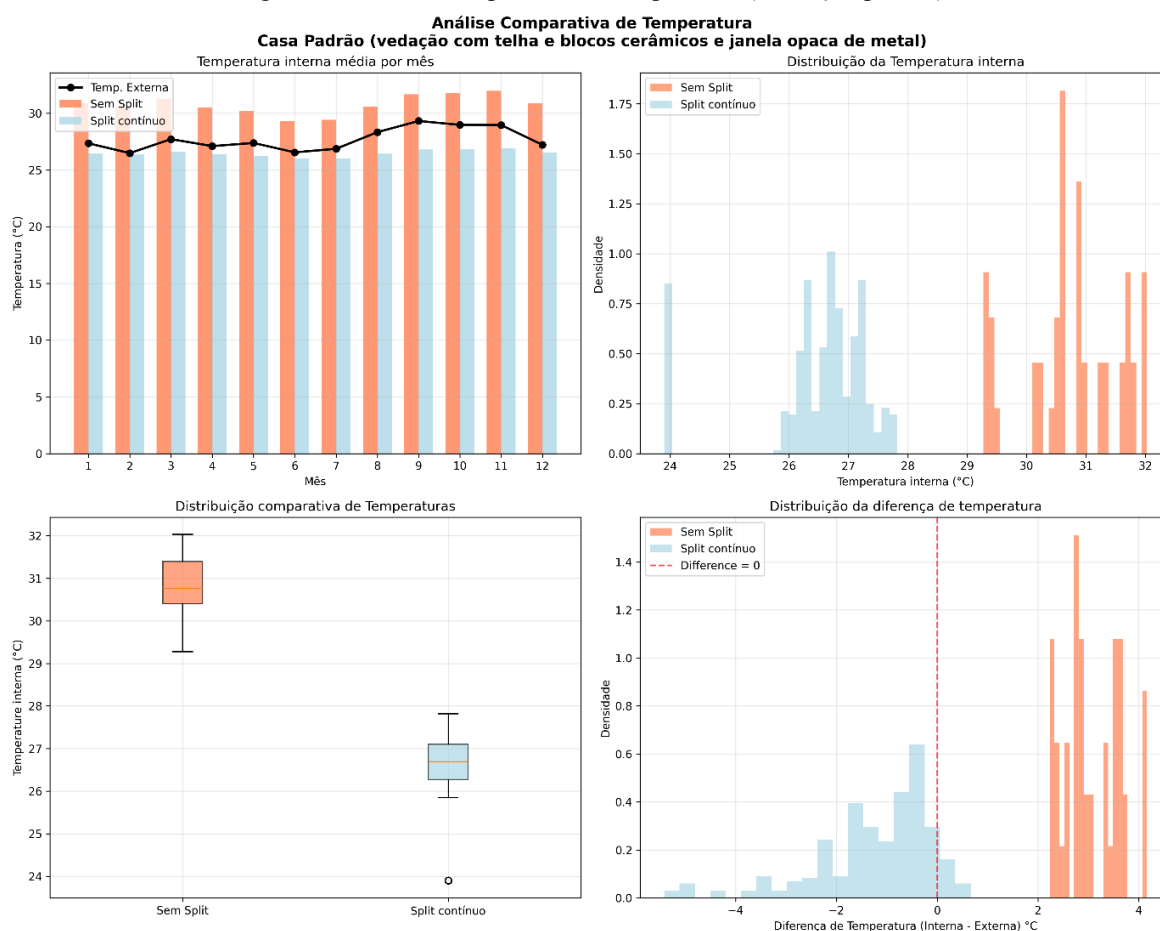
#### 4.1.1 Caracterização térmica do modelo de referência

A habitação padrão apresenta inadequação crítica ao clima tropical de Teresina, evidenciada pelo superaquecimento persistente ao longo de todo o ano. A Figura 16 demonstra que, sem climatização artificial, as temperaturas internas excedem sistematicamente as externas, caracterizando um efeito “estufa” incompatível com habitabilidade adequada.

Os resultados revelam alguns aspectos a serem discutidos a seguir. A envoltória atual amplifica o desconforto ao invés de mitigá-lo. Nos meses mais críticos (setembro-novembro), a temperatura interna supera a externa em 3-4°C, atingindo picos de +4,1°C em fevereiro. Este fenômeno ocorre mesmo em dias amenos (temperatura externa de 27°C), quando a temperatura interna atinge 29-30°C. Isso mostra que a envoltória padrão causa um efeito de amplificação térmica.

A operação contínua do split (24h/dia) reduz a temperatura interna em média 4,30°C, sendo a única estratégia capaz de manter condições próximas ao limite superior de conforto (24°C). Operações parciais mostram-se insuficientes, com temperaturas diurnas permanecendo elevadas mesmo com o sistema ativo, provando a dependência da climatização.

Figura 16: Análise comparativa de temperatura (habitação padrão)



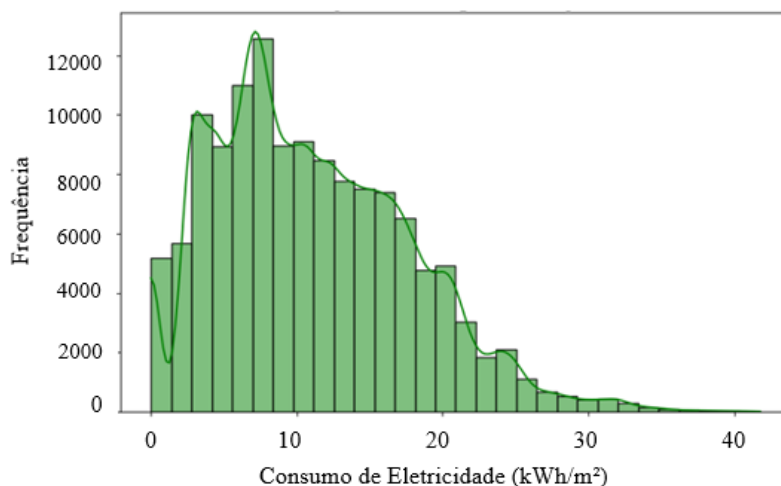
Sem climatização artificial, a edificação não atende aos requisitos mínimos da NBR 15220-3 em nenhum período do ano, confirmando que o condicionamento artificial transcende o conforto, sendo questão de habitabilidade básica. Estes resultados estabelecem que o consumo energético para resfriamento (módulo B6) constitui demanda essencial e não opcional, justificando seu papel como principal contribuinte aos impactos ambientais do ciclo de vida. Em cenário de aquecimento global projetado (+3-4°C até 2100, IPCC 2023), a temperatura interna poderá atingir 33-34°C sem climatização, intensificando exponencialmente a dependência energética e os impactos associados.

#### 4.1.2 Eletricidade para resfriamento: influência de perfis de uso e sazonalidade

A análise do consumo energético baseou-se em 129.600 simulações, capturando a interação entre variáveis construtivas, climáticas e comportamentais. Os resultados revelam forte heterogeneidade no consumo, variando de 0 a 41,8 kWh/m<sup>2</sup>·no mês, evidenciando que o desempenho energético depende da combinação entre envoltória e padrões de uso. Para

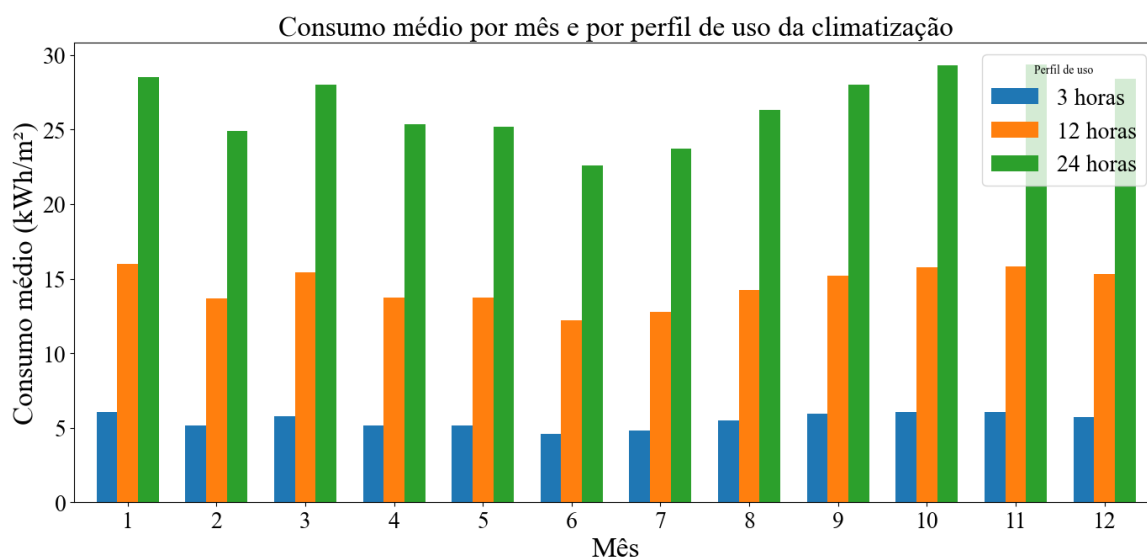
sistematizar a análise, o consumo foi estratificado em três faixas: baixo ( $<15 \text{ kWh/m}^2$ ), médio ( $15\text{-}30 \text{ kWh/m}^2$ ) e alto ( $>30 \text{ kWh/m}^2$ ). A distribuição de frequências, apresentada na Figura 17, revela predominância de consumos baixos a médios, refletindo o uso restrito de climatização característico de habitações sociais.

Figura 17: Histograma da base de dados de resfriamento



O comportamento do usuário emerge como determinante primário do consumo, superando inclusive variações climáticas sazonais. A Figura 18 quantifica esse efeito, comparando três perfis representativos de uso do split.

Figura 18: Consumo mensal por perfil de uso do modelo de referência



O perfil restrito (uso noturno emergencial - 3h/dia) tem um consumo médio 5-6  $\text{kWh/m}^2\cdot\text{ao mês}$ . No perfil parcial (período noturno completo - 12h/dia) o consumo médio é 13-16  $\text{kWh/m}^2\cdot\text{mês}$  e no perfil contínuo (climatização integral - 24h/dia): 25-28  $\text{kWh/m}^2\cdot\text{mês}$ .

A transição entre perfis multiplica o consumo por fatores de 2,6 (3h→12h) e 5,0 (3h→24h), enquanto variações sazonais de temperatura alteram o consumo em apenas 20-25%. Esta desproporcionalidade indica que estratégias de gestão comportamental podem ser mais efetivas que melhorias incrementais na envoltória, embora ambas sejam necessárias.

Diferentemente de climas temperados onde a sazonalidade permite períodos de alívio térmico, Teresina apresenta demanda persistente ao longo do ano. Mesmo nos meses “menos quentes” (junho-julho), o consumo permanece em 75-80% do pico anual, confirmando a inexistência de estação termicamente confortável sem climatização. Esta constância tem implicações para a ADCV prospectiva: o aquecimento global projetado (aumento entre 3 e 4°C até 2065) não apenas intensificará o consumo nos meses críticos, mas eliminará progressivamente os breves períodos de menor demanda, potencialmente dobrando o consumo anual até o final da vida útil da edificação.

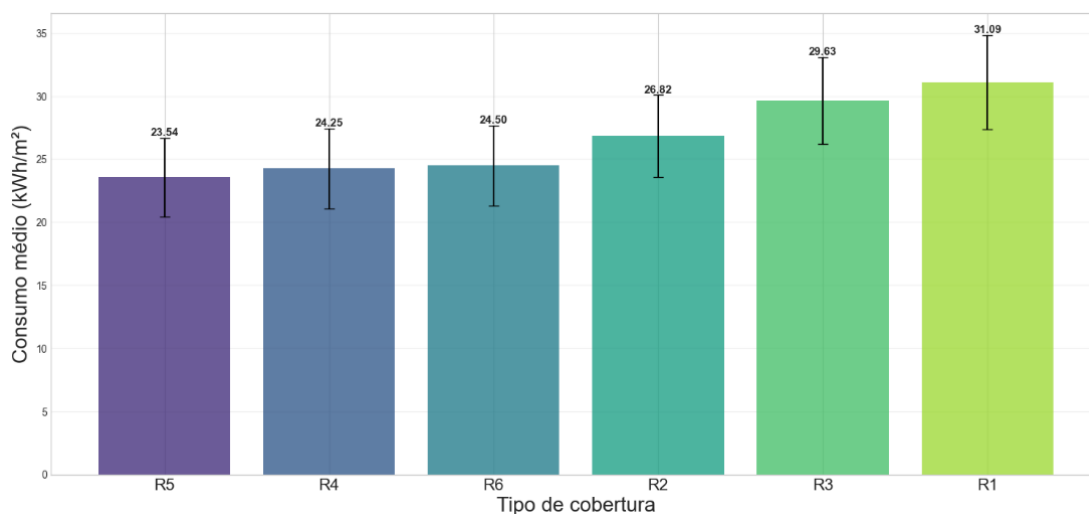
Os resultados sugerem hierarquia de prioridades para *retrofit* e novas construções. Para um período de curto prazo, as melhorias na envoltória para reduzir ganhos térmicos, permitindo conforto aceitável com perfis restritos de climatização. Para viabilizar o uso parcial do split, devem ser incorporadas estratégias passivas (sombreamento, ventilação cruzada, massa térmica) em um médio prazo. Para longo prazo, deve haver um reconhecimento de que, sob cenários climáticos futuros, a climatização contínua será inevitável, demandando soluções construtivas mais eficientes. Essa análise fundamenta a necessidade de avaliar configurações alternativas de envoltória (Seção 4.2) e seus impactos dinâmicos de longo prazo (Seção 4.4).

#### 4.1.3 Desempenho comparativo das alternativas construtivas

Esta seção avalia o potencial de redução do consumo energético através de melhorias na envoltória, comparando sistematicamente as alternativas propostas sob operação contínua de climatização (24h/dia).

A cobertura demonstrou ser o componente de maior impacto no desempenho termoenergético, com variações de até 35% no consumo entre alternativas (Figura 19). A configuração de referência (R1 - telha cerâmica sem forro) representa o pior cenário, intensificando o armazenamento diurno de calor e retardando a dissipação noturna.

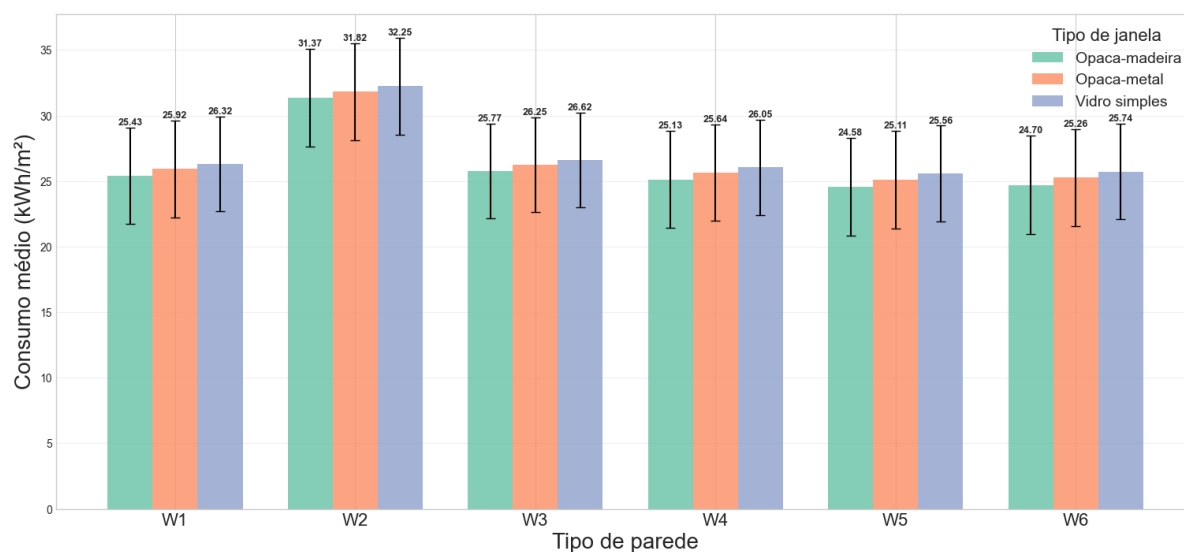
Figura 19: Consumo médio de eletricidade por tipo de cobertura



R1: telha cerâmica; R2: telha cerâmica com forro de PVC; R3: laje maciça de concreto; R4: telha termoacústica com forro (laje de concreto); R5: telha metálica com forro (laje pré-moldada); R6: telha cerâmica com forro e isolante (laje pré-moldada com lã de rocha);

As configurações com melhor desempenho incorporam barreiras térmicas múltiplas: telha termoacústica, metálica ou cerâmica com forro em laje pré-moldada ou maciça e com ou sem isolamento. A adição de massa térmica (laje) combinada com isolamento demonstra eficácia superior, amortecendo oscilações térmicas e reduzindo picos de carga. Mesmo intervenções simples como forro de PVC (R2) proporcionam melhorias significativas com investimento mínimo. As paredes apresentaram segunda maior influência, com potencial de redução de até 21% no consumo (Figura 20).

Figura 20: Consumo médio de eletricidade por tipo de parede e janela



W1: bloco cerâmico (9cm); W2: concreto maciço; W3: bloco de concreto (9cm); W4: bloco cerâmico (14cm); W5: bloco cerâmico (9cm) com isolamento interno (lã de rocha); W6: bloco de concreto com isolante externo (placa composta de alumínio e poliestireno expandido)

O desempenho ótimo foi alcançado pela configuração W5 (bloco cerâmico e isolamento interno de lã de rocha), que reduz em média 6,73 kWh/m<sup>2</sup>·mês comparado ao padrão W2. Para esquadrias, a janela de madeira opaca superou consistentemente as outras opções, especialmente quando comparada ao vidro simples, que apresentou ganhos solares excessivos (aumento de 15% no consumo de eletricidade). A opacidade emerge como característica fundamental em clima tropical, contrariando paradigmas de climas temperados onde maximizar iluminação natural é prioritário.

A combinação de menor consumo de eletricidade (W5 + R4 + janela opaca de madeira) demonstra que melhorias integradas superam a soma das contribuições individuais. Este efeito sinérgico justifica abordagem no *retrofit*, priorizando intervenções simultâneas sobre melhorias incrementais. Estes resultados fundamentam a análise multicritério subsequente (Seção 4.2), que integra desempenho energético com indicador de conforto térmico para identificar soluções robustas sob incertezas climáticas futuras.

## 4.2 Solução ótima por cenário por decisão multivariada

Os 432 cenários simulados parametricamente (Seção 3.2) geraram matriz de desempenho multidimensional, requerendo metodologia sistemática para identificação de soluções ótimas. A técnica TOPSIS foi aplicada para integrar múltiplos indicadores de desempenho, considerando *trade-offs* entre eficiência energética, conforto térmico e viabilidade construtiva.

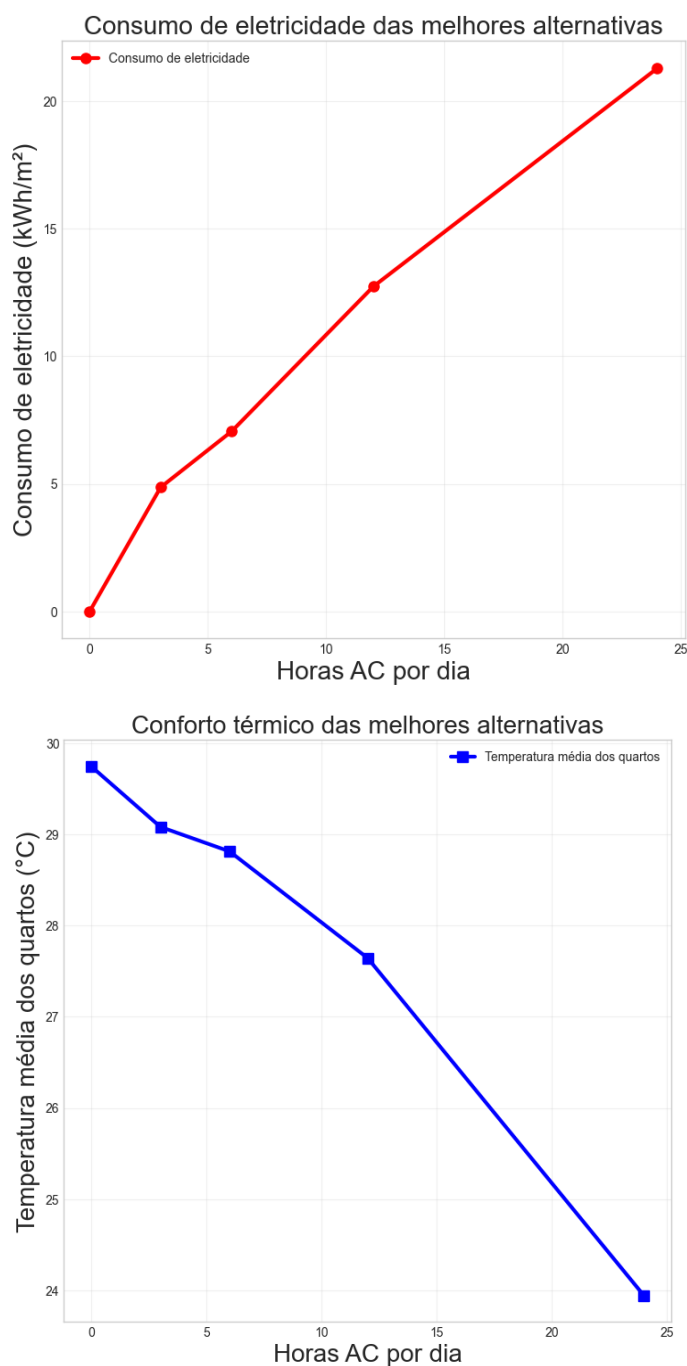
Enquanto a análise univariada permite compreender efeitos isolados de parâmetros individuais, a seleção de soluções construtivas na prática requer a avaliação simultânea de múltiplos critérios, muitas vezes conflitantes. Esta seção apresenta a aplicação do método TOPSIS para identificar configurações que otimizam o equilíbrio entre desempenho térmico e eficiência energética. A análise multivariada (ou multicritério) é complementada por: i) estudo de sensibilidade dos pesos atribuídos aos critérios, verificando a robustez das soluções identificadas; ii) validação por simulação de Monte Carlo, incorporando incertezas; e iii) avaliações de sazonalidade e orientação espacial, refinando as recomendações para o contexto tropical brasileiro.

### 4.2.1 TOPSIS e classificação de alternativas

Observou-se uma compensação clara: à medida que o tempo de uso do ar-condicionado aumenta, a temperatura interna média se aproxima do ponto de ajuste (24 °C), enquanto o

consumo de eletricidade aumenta. A inclinação do consumo de 12 para 24 h é mais acentuada do que de 3 para 6 h, indicando uma diminuição do retorno do conforto por hora adicional de operação (Figura 21).

Figura 21: Compensação entre conforto e energia



Utilizando dois critérios (consumo específico anual e temperatura interna média mensal) com pesos iniciais iguais (50/50), a classificação das cinco principais combinações para cada cenário de uso (3, 6, 12 e 24 h/dia) está apresentada na Tabela 8.

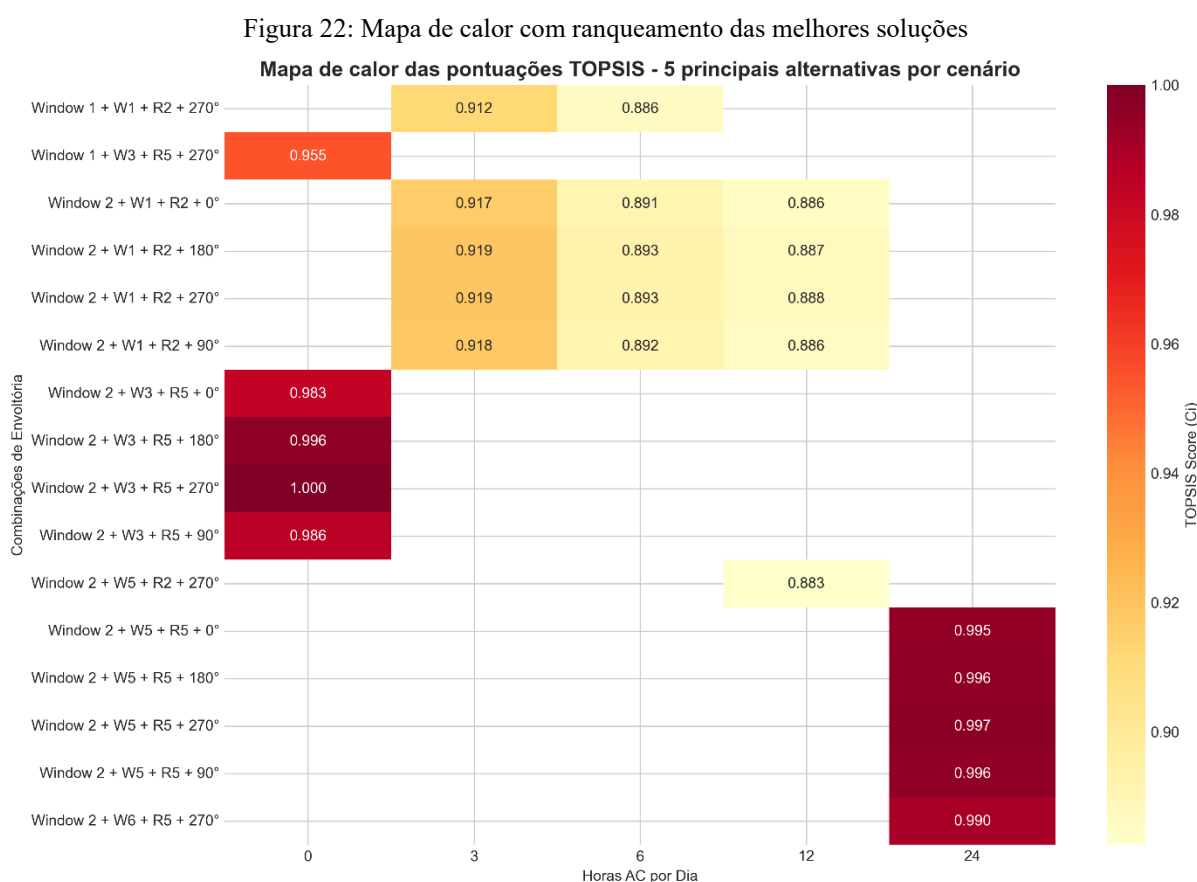
Tabela 8: Ranqueamento das melhores soluções (TOPSIS)

| Cenário (h/dia por quarto) | ID                        | C <sub>i</sub> | Posição no ranqueamento |
|----------------------------|---------------------------|----------------|-------------------------|
| 3                          | Janela 2 + W1 + R2 + 180° | 0,919          | 1                       |
|                            | Janela 2 + W1 + R2 + 270° | 0,919          | 2                       |
|                            | Janela 2 + W1 + R2 + 90°  | 0,918          | 3                       |
|                            | Janela 2 + W1 + R2 + 0°   | 0,917          | 4                       |
|                            | Janela 1 + W1 + R2 + 270° | 0,912          | 5                       |
| 6                          | Janela 2 + W1 + R2 + 180° | 0,893          | 1                       |
|                            | Janela 2 + W1 + R2 + 270° | 0,893          | 2                       |
|                            | Janela 2 + W1 + R2 + 90°  | 0,892          | 3                       |
|                            | Janela 2 + W1 + R2 + 0°   | 0,891          | 4                       |
|                            | Janela 1 + W1 + R2 + 270° | 0,886          | 5                       |
| 12                         | Janela 2 + W1 + R2 + 270° | 0,888          | 1                       |
|                            | Janela 2 + W1 + R2 + 180° | 0,887          | 2                       |
|                            | Janela 2 + W1 + R2 + 90°  | 0,886          | 3                       |
|                            | Janela 2 + W1 + R2 + 0°   | 0,886          | 4                       |
|                            | Janela 2 + W5 + R2 + 270° | 0,883          | 5                       |
| 24                         | Janela 2 + W5 + R5 + 270° | 0,997          | 1                       |
|                            | Janela 2 + W5 + R5 + 180° | 0,996          | 2                       |
|                            | Janela 2 + W5 + R5 + 90°  | 0,996          | 3                       |
|                            | Janela 2 + W5 + R5 + 0°   | 0,995          | 4                       |
|                            | Janela 2 + W6 + R5 + 270° | 0,990          | 5                       |

A Figura 22 apresenta os mesmos resultados em formato de mapa de calor, incluindo o índice de proximidade TOPSIS ( $C_i$ ), que quantifica a separação relativa entre as alternativas. Observa-se uma diferenciação dos padrões de desempenho conforme o perfil de uso: para regimes de 3-6 h/dia, a configuração W1+R2 com janela opaca apresenta os maiores valores de  $C_i$  (0,89-0,92) em todas as orientações analisadas; para 12 h/dia, alternativas isoladas (como W5) passam a apresentar índices comparáveis ( $C_i \approx 0,89$ ), mantendo R2 no *ranking*; e para uso contínuo (24 h/dia), a configuração R5+W5 com janela opaca resulta nos maiores índices de proximidade independentemente da orientação ( $C_i = 0,995 - 0,997$ ), indicando maior afastamento da solução não-ideal.

A configuração padrão (W1/R2) apresenta o melhor índice TOPSIS nos cenários de baixo consumo (3-6 h/dia) devido à interação entre a forma de avaliação do conforto térmico e o padrão de uso da climatização, por meio de dois mecanismos:

- Primeiro: a agregação temporal mensal da métrica de graus-hora de desconforto atenua a penalização de picos de temperatura. Em operação noturna (6 h/dia), o *setpoint* de 24°C reduz a temperatura interna durante o período climatizado, enquanto os picos diurnos (quando o sistema está desligado) são diluídos no cálculo mensal. Consequentemente, o superaquecimento diurno característico da configuração R2/W1 é minimamente refletido nessa métrica agregada.
- Segundo: a elevada transmitância térmica (U) da envoltória não isolada facilita a dissipação de calor para o exterior durante o período de climatização noturna. Quando o ambiente é resfriado, a maior condutividade térmica da configuração W1/R2 acelera a transferência de calor, permitindo que o sistema atinja e mantenha o *setpoint* de 24°C em menor tempo, reduzindo assim o consumo energético noturno em comparação com alternativas isoladas. Com ponderação equivalente entre critérios térmico e energético (50/50), esse comportamento térmico favorece a classificação da configuração W1/R2 no método TOPSIS para perfis de uso de 3-6 h/dia.



Este comportamento é consistente com a presença recorrente da janela opaca entre as cinco primeiras posições, com envoltórias leves e não isoladas preenchendo as posições seguintes. Em contraste, a persistência de R5 e W5 em 12–24 h confirma que o isolamento com laje/forro predomina em operações mais intensivas. A ausência de uma única alternativa que permaneça entre as cinco principais em múltiplos cenários reforça que a robustez depende do regime operacional.

A análise por cenário de uso revela diferenciação nos padrões de desempenho das configurações. Para perfis de 3-6 h/dia, a orientação sul ( $180^\circ$ ) e a janela de madeira opaca exercem influência preponderante sobre o desempenho, enquanto as configurações R2 (cobertura) combinadas com W3/W4 (paredes) apresentam equilíbrio adequado entre critérios térmico e energético nas posições intermediárias do ranqueamento (a partir da 11ª posição), em cenários de disponibilidade limitada de climatização.

Para uso de 12 h/dia, as configurações W4/W5 combinadas com R2 mantêm desempenho estável, evidenciando o equilíbrio entre inércia térmica, isolamento das paredes e dissipação noturna de calor, o que ressalta a relevância do isolamento da envoltória vertical nesse regime operacional.

Para operação contínua (24 h/dia), a configuração R5+W5 com janela opaca resulta nos maiores índices de proximidade independentemente da orientação, indicando que o isolamento térmico intensivo da cobertura com a presença de laje/forro e das paredes prevalece como estratégia prioritária em regime de climatização contínua.

Considerando que o critério térmico adotado (graus-hora de desconforto como média mensal) não captura explicitamente picos diurnos de temperatura, realizou-se análise de sensibilidade com pesos alternativos (25/75 e 75/25) e simulação de Monte Carlo, confirmando a manutenção do padrão de classificação descrito.

O resultado da diferença (em relação ao consumo de eletricidade) da HIS analisada nesta pesquisa está apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Consumo de energia elétrica para resfriamento (simulação BPS) na situação de split 24/h.dia

| HIS                           | Consumo de eletricidade (kWh/m².ano) | Variação |
|-------------------------------|--------------------------------------|----------|
| HIS padrão                    | 379,8                                | -        |
| HIS padrão (com forro de PVC) | 339,3                                | -10,7%   |
| HIS – solução ótima           | 287,0                                | -24,4%   |

Esses resultados demonstram que, em um ano, a redução com a solução ótima foi de quase 25% (92,8 kWh/m².ano) na situação ideal de uso contínuo de split. Com a ausência de

variáveis dinâmicas externas ao longo do tempo, esse valor seria o mesmo para os 50 anos de vida útil da habitação. Ou seja, desconsiderando as variáveis dinâmicas, a diferença entre os projetos de HIS seria de 4640 kWh/m<sup>2</sup>.

#### 4.2.2 Análise de sensibilidade considerando diferentes pesos de critérios

Para avaliar a robustez das classificações à ênfase relativa entre desempenho energético e térmico, o caso base (50/50) foi comparado com duas configurações: 25/75 (prioridade ao conforto) e 75/25 (prioridade à energia). A concordância geral da classificação foi medida pelo  $\tau$  de Kendall.

Os resultados indicam alta estabilidade geral: com ênfase em energia (75/25), a concordância é muito alta em todos os cenários ( $\tau \geq 0,968$ ), indicando mudanças mínimas na classificação. Com ênfase em conforto (25/75), a concordância permanece alta em 3–6 h ( $\tau=0,805$ – $0,864$ ) e muito alta em zero h ( $\tau=1,000$ ) e 24 h ( $\tau=0,997$ ). Ainda assim, cai para  $\tau=0,742$  em 12 h, indicando maior sensibilidade quando o uso do sistema é intermediário e o critério térmico ganha peso. A estabilidade mais relevante foi avaliada pela sobreposição do Top 5 (índice de Jaccard) com e sem considerar a orientação (Tabela 10), para complementar o resultado anterior.

Tabela 10: Coeficientes entre a classificação de base 50/50 e as configurações 25/75; 75/25

| Cenário<br>(h/quarto.dia) | Coef. Kendall          | Índice Jaccard com<br>orientação | Índice Jaccard<br>sem orientação | Conclusão                                                                    |
|---------------------------|------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 0                         | 1 (ambos os pesos)     | 100%                             | 100%                             | Invariância completa                                                         |
| 3-6 h (75/25 - energia)   | $\tau \geq 0,968$      | 66,7%                            | 100%                             | As mesmas vedações permanecem no topo; apenas as orientações são reordenadas |
| 3-6 h (25/75 - conforto)  | $\tau = 0,805 - 0,864$ | 0%                               | 0%                               | Substituição completa do Top-5 por alternativas isoladas (W5/R5).            |
| 12 h (75/25 - energia)    | 0,978                  | 66,7%                            | 100%                             | Estabilidade da envoltória                                                   |
| 12 h (25/75 - conforto)   | 0,742                  | 0%                               | 0%                               | Substituição completa do Top-5 por alternativas isoladas                     |
| 24 h (75/25 - energia)    | 0,999                  | 100%                             | 100%                             | Alta robustez                                                                |
| 24 h (25/75 - conforto)   | 0,997                  | 66,7%                            | 100%                             | Alta robustez, com variações residuais de orientação                         |

Nota: Jaccard (Top-5): 66,7% = 4 itens em comum; 100% = conjuntos idênticos;

$\tau \geq 0,90$  = muito alto; 0,70-0,90 = alto; 0,50-0,70 = moderado.

A priorização da energia (75/25) preserva o conjunto das melhores envoltórias do caso base, com diferenças limitadas à orientação. A priorização do conforto (25/75) substitui o Top 5 nos regimes de 3 a 12 h, favorecendo W5/R5, o que explica a queda em  $\tau$  e os *Jaccards* nulos nesses cenários. Em 0 h e 24 h, a classificação é estável para qualquer peso. Esses resultados reforçam que soluções isoladas são competitivas em uma ampla faixa de pesos, enquanto 12 h concentra maior sensibilidade ao *trade-off* conforto/energia. A Tabela C1 (Apêndice C) mostra todas as cinco principais alternativas completas para cada configuração de peso e cenário.

#### 4.2.3 Análise de incerteza: validação da solução ideal

A incerteza foi abordada por meio de simulações de Monte Carlo. Para cada iteração, calculou-se a classificação TOPSIS. A Tabela 11 resume, por cenário, P (classificação/rank = 1), P (Top-3), P (Top-5), classificação mediana, classificação entre quartis (IQR) e Índice de Confiabilidade ( $C_i$ ).

Tabela 11: Estabilidade de Monte Carlo

| Cenário<br>(h/dia) | P(rank=1)<br>(%) | P(Top-3)<br>(%) | P(Top-5)<br>(%) | Classificação<br>mediana | Classificação<br>IQR | $C_i$<br>(mediana) | $C_i$ (p5) | $C_i$<br>(p95) |
|--------------------|------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|----------------------|--------------------|------------|----------------|
| 0                  | 6,1              | 14,7            | 20,2            | 20                       | 37                   | 0,798              | 0,610      | 1,000          |
| 3                  | 5,4              | 14,9            | 20,9            | 20                       | 90                   | 0,859              | 0,511      | 0,971          |
| 6                  | 8,4              | 19,5            | 29,9            | 11                       | 45,3                 | 0,848              | 0,435      | 0,964          |
| 12                 | 2,9              | 9,2             | 14,9            | 26                       | 134                  | 0,828              | 0,423      | 0,956          |
| 24                 | 9,8              | 23,4            | 33,7            | 10                       | 35,3                 | 0,916              | 0,554      | 0,987          |

Nota:  $n = 1000$  iterações, aplicando  $\pm 5\%$  de ruído multiplicativo aos critérios e pesos aleatórios por cenário: Dirichlet (1,1) para 3–24 h;  $w = (0,1)$  para 0 h.

- P(rank=1): Probabilidade de ser o topo (melhor opção). O percentual de vezes que a solução testada ficou em primeiro lugar (rank 1) em todas as iterações da simulação de Monte Carlo.
- P(Top-3): Probabilidade de estar entre os 3 Melhores. O percentual de vezes que a solução testada ficou em qualquer posição entre 1ª e 3ª (Top 3) em todas as iterações.
- P(Top-5): Probabilidade de estar entre os 5 Melhores. O percentual de vezes que a solução testada ficou em qualquer posição entre 1ª e 5ª (Top 5) em todas as iterações.
- Classificação mediana: Valor Central da Classificação. A classificação que separa as 50% piores das 50% melhores classificações obtidas pela solução. Indica a tendência central do ranking.

- Classificação IQR: Amplitude de Variação da Classificação. O Intervalo Interquartil (IQR) da classificação. É a diferença entre o 75º percentil e o 25º percentil do ranking. Mede a estabilidade ou dispersão da classificação: um IQR baixo significa que o item testado sempre fica em posições muito próximas (alta estabilidade).
- $C_i$  (mediana): Mediana do Índice de Confiabilidade. O valor central (mediana) de algum Índice de Confiabilidade ( $C_i$ ) calculado para o cenário. Esse índice é uma métrica de saída que mede a performance ou a adequação do cenário.
- $C_i$  (p5): Percentil do Índice de Confiabilidade. O valor do Índice de Confiabilidade no qual 5% dos resultados da simulação ficaram abaixo dele. É uma medida de risco/pessimismo: indica o pior cenário (mais arriscado) esperado com 95% de confiança.
- $C_i$  (p95): Percentil do Índice de Confiabilidade. O valor do Índice de Confiabilidade no qual 95% dos resultados da simulação ficaram abaixo dele. É uma medida de otimismo/alto desempenho: indica o melhor cenário esperado com 95% de confiança (ou seja, apenas 5% dos resultados foram melhores).

Observa-se uma robustez crescente à medida que o tempo de uso do ar-condicionado (AC) aumenta. O resultado da probabilidade é relativamente baixo provavelmente por incluir a mudança nas orientações espaciais. Embora o cenário 24 h/dia nem sempre seja o melhor (rank=1), ele frequentemente está bem-posicionado e consistentemente aparece entre as melhores opções. Da mesma forma, este cenário apresenta o menor valor do IQR, garantindo maior estabilidade da solução na classificação. O  $C_i$  mediano elevado indica baixa dispersão relativa.

Por outro lado, o regime de 12 h/dia apresenta maior variabilidade nos índices de proximidade entre as alternativas avaliadas, indicando que a classificação é mais sensível a variações nos parâmetros de entrada quando o uso da climatização se situa em intensidade intermediária.

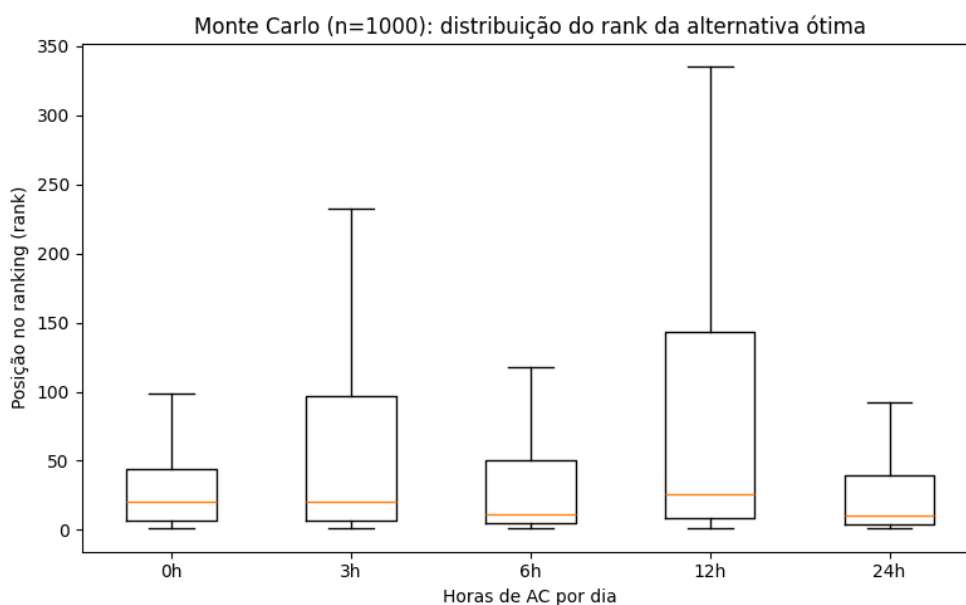
Os regimes de 0 a 3 h/dia, por sua vez, apresentam robustez moderada na classificação, comportamento consistente com a predominância do desempenho térmico passivo da envoltória sobre os resultados. Nesses cenários de uso eventual ou ausência de climatização, as propriedades termofísicas da edificação determinam majoritariamente o conforto térmico, reduzindo a influência de parâmetros operacionais incertos.

Em conjunto, esses resultados mostram que as envoltórias com isolamento são mais estáveis em operação contínua (24 h), enquanto o cenário intermediário (12 h) concentra a

maior incerteza, precisamente onde o equilíbrio entre conforto e energia é mais sensível a mudanças de peso e ruído de dados.

Os resultados (Figura 23) evidenciam diferenças substanciais na robustez da classificação conforme o regime operacional analisado. Para uso contínuo (24h/dia), a alternativa ótima mantém-se consistentemente nas primeiras posições, demonstrando que, mesmo sob variações paramétricas, a configuração de máxima resistência térmica (R5+W5) prevalece como solução de melhor desempenho multicritério. Essa baixa variabilidade confirma que, em regime de climatização ininterrupta, o isolamento térmico intensivo constitui estratégia dominante e robusta.

Figura 23: Distribuição de classificação da alternativa ótima de base por cenário (Monte Carlo)



Em contraste, o regime de 12h/dia apresenta a maior variabilidade dentre todos os perfis analisados. Essa elevada sensibilidade confirma a caracterização prévia desse cenário como “zona de transição” entre mecanismos térmicos distintos. Isso significa que, no caso de intensidade intermediária de uso, múltiplas configurações apresentam desempenho comparável, tornando a classificação sensível a pequenas variações nos critérios de avaliação e parâmetros de entrada.

Para uso eventual (3h/dia), observa-se também variabilidade elevada, embora inferior à de 12h/dia, refletindo a competição entre estratégias de baixa resistência térmica (que favorecem dissipação noturna) e estratégias de inércia térmica moderada. O regime de 6h/dia apresenta comportamento intermediário, indicando maior consolidação em torno de um grupo reduzido de alternativas candidatas.

Na ausência de climatização, a posição da alternativa ótima situa-se consistentemente na faixa intermediária do ranking, com variabilidade moderada. Esse comportamento reflete a predominância do desempenho térmico passivo da envoltória, onde propriedades de inércia térmica e ventilação natural determinam o conforto, reduzindo a sensibilidade a parâmetros operacionais incertos.

Portanto, a análise de Monte Carlo reforça três conclusões principais: i) o regime de 12h/dia constitui o cenário de maior incerteza na tomada de decisão, demandando critérios adicionais de contexto para seleção da alternativa ótima; ii) o uso contínuo (24h/dia) apresenta a maior robustez, com solução ótima bem definida independentemente de variações paramétricas; e iii) para perfis de uso eventual (0-6h/dia), a sensibilidade moderada sugere que múltiplas estratégias de projeto podem resultar em desempenho satisfatório, ampliando as possibilidades de escolha em função de restrições econômicas ou de disponibilidade de materiais.

Esses resultados enfatizam a importância de considerar não apenas o desempenho médio das alternativas, mas também a robustez da solução frente a incertezas inerentes ao processo de modelagem, especialmente em cenários de tomada de decisão com informações limitadas ou parâmetros sujeitos a variabilidade real (como padrões de ocupação e eficiência de equipamentos).

A análise multicritério através do método TOPSIS foi conduzida considerando as condições climáticas atuais, tendo a otimização sido desenvolvida para o cenário base de referência. Posteriormente, a robustez da solução identificada foi validada por meio de simulação de Monte Carlo, demonstrando-se que a alternativa construtiva selecionada mantém sua eficiência e desempenho satisfatório mesmo quando submetida aos cenários de mudanças climáticas projetados, cuja análise detalhada é apresentada na seção subsequente.

#### *4.2.4 Sazonalidade e orientação espacial*

A orientação é decisiva em condições de baixo uso de AC (3 a 6 h/dia), com a orientação 180° frequentemente aparecendo entre as melhores alternativas, indicando que, quando o tempo de operação é limitado, o controle solar passivo (orientação + envoltória) rege o desempenho. Em condições de operação de 24 h, o efeito da orientação diminui quando a envoltória está bem isolada (por exemplo, R5 + W5), atenuando as diferenças na exposição solar.

A demanda por resfriamento atinge o pico em setembro-novembro, e fevereiro apresenta uma anomalia consistente com o armazenamento de calor e a liberação retardada em

configurações com isolamento leve. Esses padrões destacam a necessidade de ir além das médias anuais e usar a granularidade temporal.

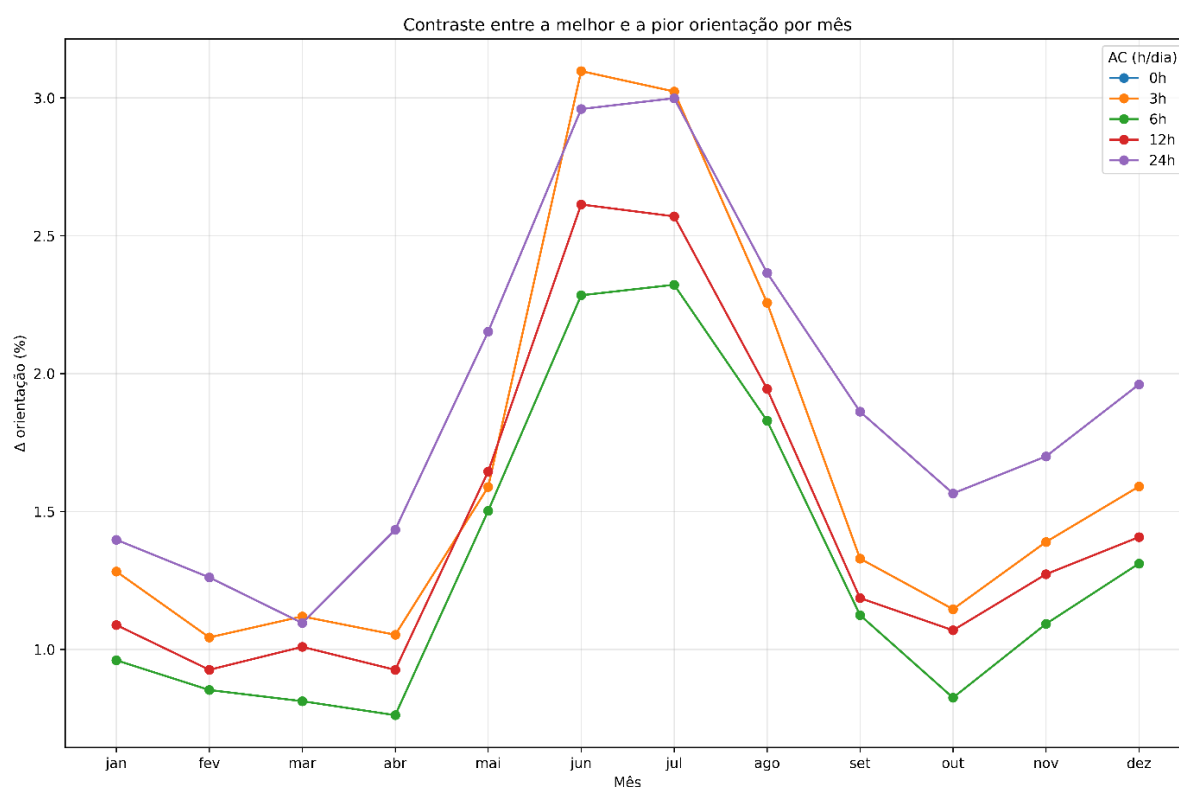
O contraste  $\Delta_{orient}(\%)$  é a diferença entre a pior e a melhor orientação em cada mês e cenário, normalizada pela média mensal (Eq.15):

$$\Delta_{orient}(\%) = \frac{\max - \min}{media} \times 100, \quad (15)$$

Onde *max* é o consumo da pior orientação; *min* o consumo da melhor orientação; e *media* é a média nas quatro orientações (0°, 90°, 180°, 270°).

A orientação menos favorável consome  $\Delta\%$  a mais que a mais favorável, em relação à média mensal. Conforme ilustrado na Figura 24, observam-se picos nos meses de junho-julho, período em que a assimetria Leste-Oeste se intensifica. Nesse intervalo, a orientação menos favorável excede o consumo da melhor orientação em aproximadamente 3% da média mensal.

Figura 24: Contraste entre a melhor e a pior orientação de cada mês (por cenário)



Mínimos de consumo são registrados em abril-outubro, quando as orientações apresentam um comportamento mais convergente (com uma penalidade marginal). Com um baixo valor de AC (3-6 h), as curvas demonstram um aumento acentuado, indicando uma maior influência do desempenho passivo (orientação e envoltória).

Em um ciclo de 24 h, a disparidade entre as orientações é mitigada quando a envoltória apresenta alto isolamento (por exemplo, R5 + W5) que atenua a exposição solar. Este fator coincide com o pico de consumo total em setembro-novembro: nestes meses, embora as condições sejam mais severas, as orientações demonstram maior convergência ( $\Delta$  reduz), ao passo que em junho-julho, a hierarquia de desempenho entre as orientações é mais distinta.

Para complementar a análise de sazonalidade, foi calculado o Índice de Pico Sazonal (Pico(t)) conforme a Eq.16. Este índice, determinado anualmente para cada tipologia habitacional, identifica não apenas o valor máximo de consumo de energia (**E**), mas também o mês (**m**) de sua ocorrência.

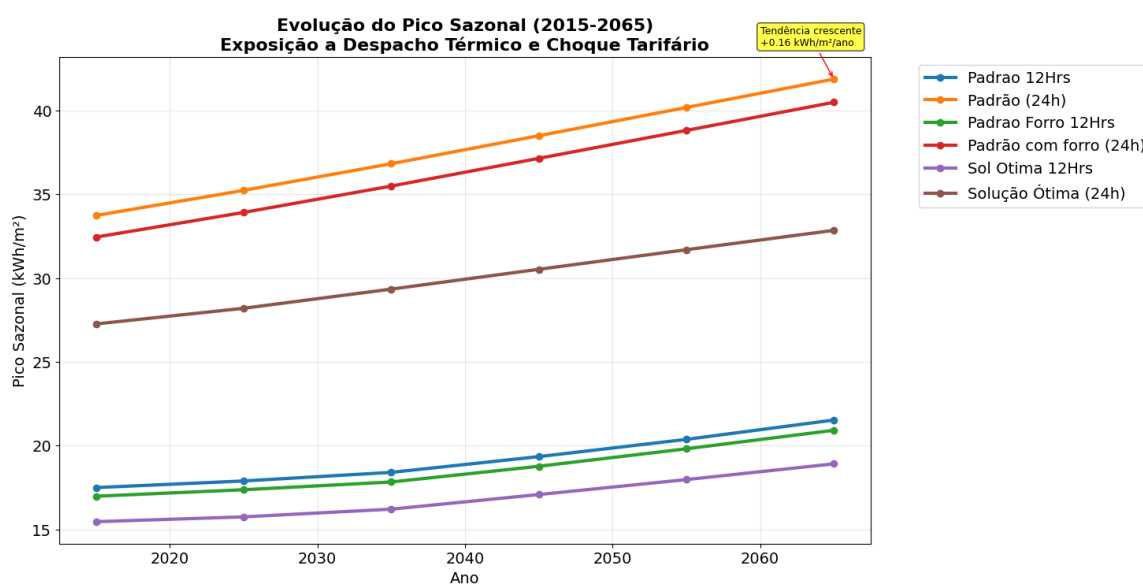
No Brasil, o aumento da demanda energética em picos sazonais frequentemente exige o acionamento de usinas termelétricas com custos operacionais mais elevados. Tal despacho térmico é o mecanismo que ocasiona o aumento da tarifa para o consumidor final por meio do sistema de bandeiras tarifárias (bandeira vermelha).

$$Pico(t) = \max_{\{m \in \{1, \dots, 12\}\}} E_m(t) \quad (16)$$

Onde max é valor máximo de consumo (**E**) do mês **m** (varia de 1 a 12).

A análise da tendência temporal do Pico(t) reflete a projeção da intensidade de picos de demanda que potencialmente levam ao despacho térmico oneroso e, conseqüentemente, ao choque tarifário. A evolução de 2015 a 2065 (Figura 25) demonstra se a vulnerabilidade do sistema a essas demandas críticas está aumentando ou diminuindo.

Figura 25: Evolução do pico sazonal (2015-2065)

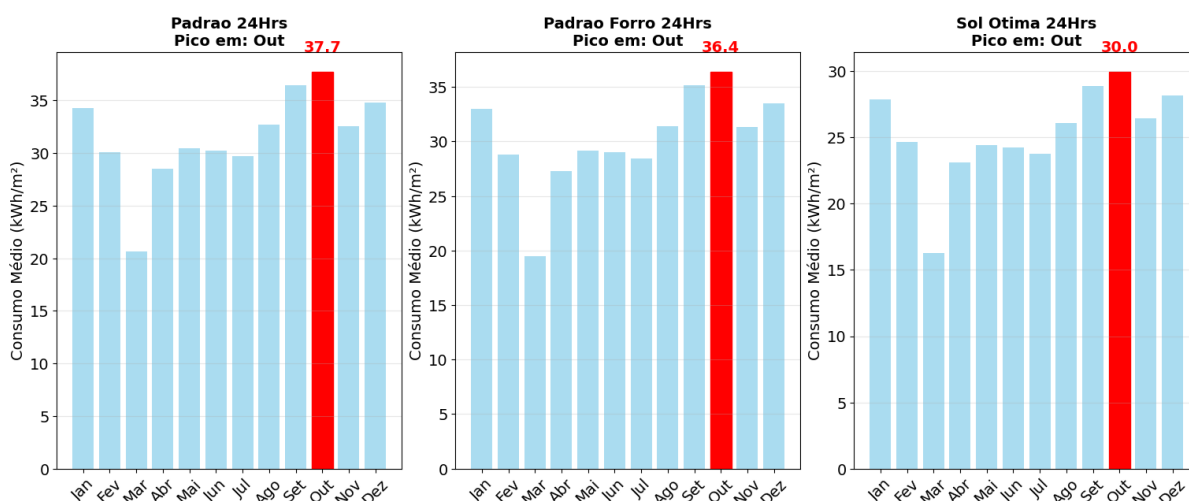


Verifica-se que a tendência de crescimento é comum a todas as soluções analisadas, indicando uma maior exigência futura de despacho térmico. Contudo, a solução ótima apresenta uma reta de regressão com inclinação significativamente menor, o que sugere uma capacidade de mitigação do valor de pico entre 15% e 25%. Este resultado evidencia o impacto econômico e energético positivo da adoção de projetos com desempenho bioclimático superior.

Para avaliar o padrão sazonal, foram identificados quais meses são consistentemente críticos (Figura 26). O mês de outubro concentra os picos nas três soluções construtivas, se correlacionando diretamente com o período seco e quente.

Figura 26: Padrão sazonal das habitações

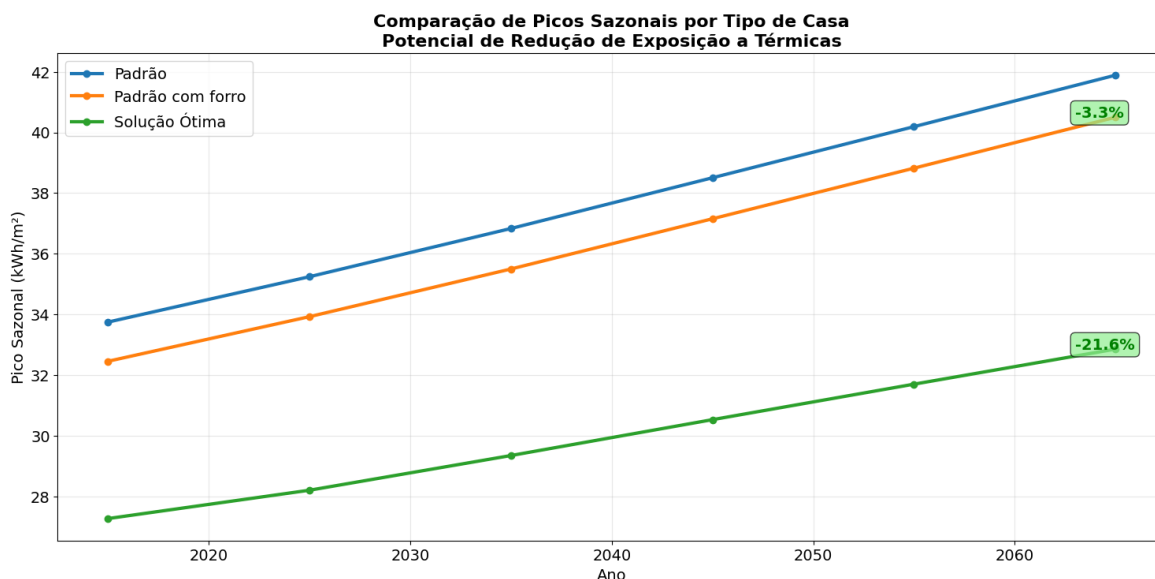
**Padrão Sazonal - Identificação de Meses Críticos**



A comparação entre os três tipos de habitações (Figura 27) quantifica o potencial de redução do pico através de melhorias construtivas (como forro, orientação solar e isolantes térmicos).

Observa-se mudanças significativas ao priorizar melhorias na envoltória. Recomenda-se que programas habitacionais incorporem obrigatoriamente essas especificações, pois o custo adicional é muito inferior ao benefício permanente aos moradores, evitando a perpetuação da pobreza energética.

Figura 27: Comparação dos picos sazonais por tipo de habitação



#### 4.2.5 Discussão

Esta seção integra os resultados apresentados, contextualizando-os à luz da revisão bibliográfica e aos objetivos desta pesquisa. São discutidas as implicações práticas dos achados para o projeto de habitações sociais em climas tropicais, os *trade-offs* identificados entre diferentes critérios de desempenho, e as relações entre decisões construtivas e políticas energéticas nacionais. Também são abordadas limitações metodológicas e sua influência sobre a interpretação dos resultados.

##### 4.2.5.1 Economia de consumo de eletricidade da solução ótima

Na literatura, poucas pesquisas abordam o clima tropical. Os artigos que analisaram a classificação climática Aw são resumidos na Tabela 12. Usman e Frey (2021) relataram uma economia de 29,4% no caso ótimo em relação ao caso base, cuja demanda de energia foi de 120 kWh/m².ano. Pannier *et al.* (2021) observaram uma demanda de 81,22 kWh/m².ano no caso base, com o caso ótimo promovendo uma economia de 47%.

O caso base de Usman; Frey (2021) é um edifício residencial de dois andares que utiliza janelas de vidro duplo e uma determinada espessura de isolamento que satisfaz os limites de transmitância térmica exigidos pelas normas. As janelas ocupam 20% em relação às paredes da fachada sul no caso-base é de 20%. O caso ótimo inclui uma vedação com isolamento de alto nível e uma maior fração de sombreamento das aberturas. Pannier *et al.* (2021) consideraram o caso base como edifício existente sem renovações e mediram seu desempenho inicial pela

classe energética da construção e pelo consumo de energia antes da intervenção. A solução ótima é um conjunto de ações que representam os agendamentos de reforma/*retrofit* que minimizam o custo de investimento global e o consumo de energia final para aquecimento (acumulado ao longo de 20 anos).

Tabela 12: Resultados de economia de eletricidade na solução ótima em estudos de clima semelhante

| Ref.<br>(clima tropical)        | Modelo base/padrão                                      | Solução<br>ótima | Temperatura de ajuste para<br>resfriamento |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------------------|
| Usman e Prey<br>(2021)          | 120 kWh/m <sup>2</sup> .ano                             | - 29,4%          | 25°C                                       |
| Pannier <i>et al.</i><br>(2021) | 81,22 kWh/m <sup>2</sup> .ano                           | - 47%            | 26°C                                       |
| <b>Esta pesquisa</b>            | <b>340 kWh/m<sup>2</sup>.ano (padrão com<br/>forro)</b> | <b>- 15,6%</b>   | <b>24°C</b>                                |

As diferenças nos resultados desta pesquisa em relação à literatura citada merecem atenção e algumas particularidades entre cada uma podem explicar as discrepâncias observadas. O principal fator é a diferença nas características construtivas. Nos casos-base dos dois artigos, já estavam presentes paredes e coberturas com baixa transmitância térmica, janelas maiores com vidro reforçado e isolamento térmico na envoltória. Além disso, estratégias passivas, como sombreamento das aberturas, também foram incluídas no projeto base. Outra diferença significativa reside na temperatura *setpoint* no verão: nesta pesquisa, foi adotada uma temperatura de 24°C, enquanto na literatura foram utilizados 25°C (Usman; Frey, 2021) e 26°C (Pannier *et al.*, 2021).

Outro ponto de divergência refere-se à influência da orientação espacial. Usman; Frey (2021) concluíram que a orientação desempenha um papel significativo no ganho solar, enquanto os resultados desta tese (apresentados na seção 4.2) apontaram o tipo de construção como o fator mais relevante no cenário de 24 horas/dia, em vez da orientação espacial.

Como observado, nos contextos pesquisados pelos autores citados foram empregadas estratégias passivas, isolamento térmico e envoltórias com maior espessura e resistência à transmissão de calor (Gilani *et al.*, 2022; Moschetti *et al.*, 2022; Pannier *et al.*, 2021; Usman; Frey, 2021). No entanto, o Brasil e outros países da América Latina devem adotar essas estratégias de forma mais consistente, especialmente em construções de caráter social. Caso o Conjunto Jacinta Andrade tivesse sido construído com a alternativa ótima sugerida nesta pesquisa, a diferença para o modelo de referência seria de 92,8 kWh/m<sup>2</sup> ao ano. Assim, a demanda anual de eletricidade (apenas em um ano) para resfriamento artificial teria uma economia de 14 milhões de kWh em todo o conjunto habitacional (14 GWh).

É comum a análise de edificações multifamiliares na comunidade científica (Gilani *et al.*, 2022; Harkouss; Fardoun; Biwole, 2018), frequentemente consideradas verticais e de múltiplos pisos (Han *et al.*, 2023; Kokaraki *et al.*, 2019; Moschetti *et al.*, 2022). Usman; Frey (2021) consideraram uma residência unifamiliar, mas com dois pavimentos. Pannier *et al.* (2021) fizeram uma TDMC para uma residência social francesa, mas no formato vertical (com 5 e 10 pavimentos). As habitações sociais brasileiras construídas para suprir o déficit habitacional são entregues em conjuntos horizontais, pela disponibilidade de espaço na região (Leal Junior *et al.*, 2022).

Seguindo seu caráter social, o comportamento do usuário deve ser analisado no pós-ocupação, para que adaptações projetuais consigam otimizar a demanda de eletricidade, equilibrando conforto com o menor consumo possível de energia elétrica. Como observado, a resposta das alternativas construtivas muda de acordo com os diferentes padrões de resfriamento. Tomadores de decisão são capazes de fazer uma escolha adequada dentre as soluções propostas, explorando as possibilidades e suas consequências.

#### 4.2.5.2 Adequação bioclimática brasileira

O referencial teórico citado nesta pesquisa demonstra avanços relevantes no uso de ferramentas de simulação energética e técnicas de apoio à decisão. No entanto, observa-se que, na maioria dos casos, o foco está em edificações verticais, com maior complexidade construtiva e localizadas em climas temperados ou frios (como observado na seção 2.6.1). Além disso, poucos trabalhos incorporam a análise de incerteza no processo decisório, o que reduz a confiabilidade das alternativas recomendadas quando aplicadas a contextos específicos.

Em contraste, esta tese aborda uma situação ainda pouco explorada na literatura: a avaliação de habitações sociais unifamiliares em clima tropical quente, com ênfase na escolha de soluções construtivas baseadas em critérios de desempenho térmico e energético. Os resultados obtidos permitem comparações diretas com estudos como os de Usman; Frey (2021) e Pannier *et al.* (2021), cujos casos base já contemplavam elementos como isolamento térmico e vidros de melhor desempenho, o que justifica as menores demandas energéticas observadas. A solução considerada ideal neste estudo, composta por janela opaca de madeira, parede com isolamento interno (modelo W5) e cobertura termoacústica com forro de laje pré-moldada, promoveu uma redução de quase 100 kWh/m<sup>2</sup>.ano mesmo sem abordar outras estratégias passivas e alterações no projeto.

A escolha dos sistemas construtivos de vedação que compõem a solução ideal não se baseou apenas em critérios de desempenho, mas também em aspectos de viabilidade técnica e aderência ao contexto da construção social brasileira. A janela opaca de madeira, por exemplo, demonstrou desempenho superior em todos os cenários simulados, principalmente por impedir o ganho solar direto em ambientes de longa permanência, como os dormitórios. Diferentemente do vidro comum, que apresentou os piores resultados térmicos, a madeira oferece resistência térmica natural e reduz a transmitância da abertura, além de ser amplamente disponível no mercado nacional.

No que diz respeito às paredes, a alternativa W5 (bloco cerâmico de 9 cm com isolamento interno em lã de rocha) apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho térmico e viabilidade construtiva. Essa composição mantém a tipologia construtiva culturalmente utilizada em construções brasileiras, ao mesmo tempo em que incorpora uma camada de isolamento térmico leve, que pode ser incluída no processo executivo tradicional.

Já nas coberturas, o melhor desempenho foi observado na configuração R5, com telha metálica e forro de laje pré-moldada, e na R4, que utiliza telha termoacústica com isolamento entre chapas metálicas. Ambas oferecem alta capacidade de atenuação térmica, fundamental para mitigar os efeitos da radiação solar direta, especialmente nos meses em que as temperaturas são mais elevadas (setembro a novembro).

A análise dos diferentes padrões de resfriamento artificial também permitiu observar como a solução construtiva influencia o desempenho final da edificação em função da intensidade de uso do equipamento. Nos cenários com menor acionamento (3 e 6 horas por dia), a orientação espacial e as estratégias passivas tornaram-se ainda mais relevantes, evidenciando a importância da rotação da edificação no lote e da escolha adequada dos componentes da envoltória. Por outro lado, no cenário de uso contínuo (24 horas/dia), a solução construtiva ideal se mostrou robusta independentemente da orientação, o que reforça seu potencial de aplicação padronizada em grandes conjuntos habitacionais.

Os resultados obtidos nesta pesquisa não apenas demonstram o impacto positivo da adoção de soluções construtivas mais adequadas ao clima local, como também evidenciam o potencial da metodologia proposta para subsidiar decisões de projeto em contextos de habitação social. A integração entre simulação paramétrica, análise multicritério e verificação de incertezas representa um avanço em relação às abordagens tradicionais, geralmente baseadas em médias anuais ou critérios únicos de avaliação.

Ao considerar múltiplos cenários de uso, diferentes orientações e variáveis técnicas da envoltória, a pesquisa oferece um modelo de análise replicável e aplicável a outros contextos

climáticos e habitacionais. Essa abordagem pode apoiar políticas públicas voltadas à eficiência energética, à justiça climática e ao aprimoramento das condições de moradia da população de baixa renda, reforçando o papel do projeto arquitetônico como instrumento de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas e promoção da sustentabilidade urbana.

A identificação da solução construtiva ótima através da análise multicritério representa, contudo, apenas o primeiro passo na avaliação da resiliência e sustentabilidade das habitações sociais propostas. Para validar a robustez dessa configuração ideal frente às transformações previstas para as próximas décadas, faz-se necessário submetê-la a um rigoroso teste de estresse temporal, incorporando as dinâmicas de mudança que caracterizam tanto o clima quanto a matriz energética brasileira.

A seção seguinte apresenta, portanto, a aplicação da avaliação dinâmica do consumo operacional de energia à solução ótima identificada, examinando seu desempenho ao longo dos 50 anos de vida útil da edificação sob diferentes cenários de aquecimento global e evolução do sistema elétrico nacional, permitindo assim verificar se as decisões projetuais tomadas no presente manterão sua eficácia diante das incertezas e variabilidades futuras.

#### 4.2.5.3 Além da envoltória: estratégias complementares

O objetivo desta tese está restrito ao desempenho físico-ambiental da habitação, abordando a otimização dos materiais construtivos da envoltória (paredes, coberturas e janelas) por meio de simulações térmicas e ADCV. A estratégia metodológica empregada focou, portanto, na quantificação da mitigação de impacto e na redução do consumo energético operacional (módulo B6) decorrentes da escolha de materiais isolantes.

É fundamental, contudo, reconhecer que o desempenho térmico ideal e a sustentabilidade de HIS em um clima tropical quente (Zona Bioclimática 7) dependem também da correta aplicação de estratégias arquitetônicas e urbanísticas mais amplas. Embora estas estratégias não tenham sido objeto de simulação e quantificação detalhada nesta pesquisa, sua aplicação potencializa o conforto térmico passivo e reduz a dependência de sistemas de resfriamento artificial.

As recomendações a seguir complementam as soluções de envoltória robustas identificadas nas seções anteriores, seguindo as diretrizes amplamente recomendadas pela ABNT NBR 15220-3. É importante notar que a ABNT NBR 15220-3 (norma de conforto térmico lançada em 2005) encontra-se em processo de revisão técnica pelo Comitê Brasileiro de Construção Civil (ABNT TR 15220-3-1:2024). O projeto de atualização propõe um

refinamento das 8 zonas bioclimáticas atuais para um modelo que abranja a diversidade climática dos municípios brasileiros de forma individualizada, incorporando dados meteorológicos mais recentes que já refletem os impactos das mudanças climáticas globais. Isso é relevante porque as estratégias de resfriamento passivo preconizadas pela norma atual foram desenhadas para um contexto climático de décadas atrás e podem estar se tornando insuficientes.

Além da envoltória, podem ser citadas estratégias já consolidadas nas diretrizes normativas para construções habitacionais e estratégias urbanas que a literatura apresenta como positivas para amenizar o estresse térmico (Oliveira; Romero, 2023).

O sombreamento das aberturas (fundamental em regiões com alta insolação, como a ZB7, refere-se ao uso de elementos arquitetônicos fixos (como beirais, brises ou venezianas) para bloquear a radiação solar direta sem impedir a ventilação. Essa técnica é essencial para interromper o ganho térmico nas janelas, que, no clima tropical, aumenta o consumo de eletricidade para resfriamento quando vidros simples são utilizados ao invés da solução opaca (madeira ou metalon).

Para quartos (cômodos com ocupação prolongada) mais expostos ao ganho solar (especialmente Norte e Oeste), é recomendada a inclusão de beirais para bloquear a radiação solar direta na maior parte do dia. Mas, as legislações municipais não estabelecem a obrigatoriedade desse elemento.

O planejamento do paisagismo e da arborização no entorno da edificação deve ser visto como um componente ativo da performance térmica. A arborização consiste na inclusão planejada de árvores de copa densa próximas à edificação. Essa medida atua duplamente pois a sombra reduz diretamente a temperatura das superfícies externas (paredes e cobertura), diminuindo o calor absorvido e o processo de evapotranspiração das plantas promove o resfriamento do ar no entorno imediato (microclima) (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014).

Apesar de projetos urbanos de conjuntos habitacionais já incluírem áreas verdes de posse da prefeitura, seria ideal se cada lote priorizasse o plantio de árvores a 3 a 5 metros da edificação, dando prioridade estratégica ao lado Oeste para bloquear o sol da tarde. O projeto deve integrar espécies nativas de copa densa com raízes não agressivas, para evitar desgastes nas fundações e calçadas.

A resiliência climática das habitações sociais não depende apenas da unidade individual, mas também do desenho urbano do conjunto habitacional. Estratégias urbanas envolvem o planejamento de calçadas, recuos e a permeabilidade do solo em larga escala. Estas medidas favorecem a ventilação entre edificações e têm potencial de redução do efeito de ilha de calor

urbana, um fenômeno comum em conjuntos densos com grande área de pavimentação. Áreas permeáveis e superfícies claras diminuem a retenção de calor (Lamberts; Triana, 2007; Oliveira; Romero, 2023).

As calçadas, embora sejam espaços públicos, estabelecem uma zona de transição entre o lote privado e a via pública, podendo influenciar significativamente o conforto ambiental das edificações e a drenagem urbana. A legislação de calçadas de Teresina (Lei Complementar nº 5.592/2021) reconhece essa influência ao estabelecer diretrizes que vão além da acessibilidade e redução da poluição visual, exigindo o uso de materiais de cores claras e com baixa capacidade de retenção de calor. Tal especificação técnica visa reduzir a formação de ilhas de calor no entorno imediato das edificações, minimizando o ganho térmico nas paredes externas.

Complementarmente, as legislações municipais estabelecem recuos mínimos obrigatórios que garantem distâncias adequadas entre edificações vizinhas, favorecendo a ventilação natural e impedindo o adensamento excessivo. Essas normativas urbanísticas, quando aplicadas em conjunto, configuram um sistema de controle do microclima urbano que beneficia diretamente o desempenho térmico das habitações.

O uso de elementos tradicionais adaptados ao clima local, que foram muitas vezes suprimidos na busca por padronização e redução de custo em HIS, pode ser reincorporado ao projeto. Elementos como varandas, pé-direito alto, cobogós e ventilação cruzada funcionam como estratégias passivas. A varanda atua como uma zona de transição térmica, amortecendo a transferência de calor para o interior. O pé-direito alto permite a estratificação do ar quente, mantendo as camadas inferiores mais frescas. A ventilação cruzada, por sua vez, garante a renovação constante do ar sem necessidade de gasto energético, sendo o cobogó uma alternativa favorável.

A cor da envoltória é um dos fatores mais simples e eficazes para controlar o ganho térmico. A escolha de tintas e revestimentos claros para superfícies externas maximiza a refletância solar (albedo), fazendo com que a radiação seja devolvida à atmosfera em vez de absorvida pelo material. Embora essas estratégias complementares não tenham sido incorporadas ao escopo desta pesquisa, reconhece-se sua importância para estudos futuros de otimização integrada. Retornando ao foco desta investigação, apresentam-se a seguir os resultados do inventário dinâmico das configurações analisadas.

### 4.3 Inventário Dinâmico do consumo operacional de energia

Nesta seção, estão apresentados os resultados da abordagem metodológica desenvolvida para a construção de um Inventário Dinâmico de Ciclo de Vida (IDCV) com foco específico no consumo de energia operacional de edifícios (módulo B6 do ciclo de vida). Este método utiliza modelos computacionais de análise de dados e foi adaptado ao contexto de uma unidade de Habitação de Interesse Social (HIS) localizada em Teresina/PI. Assim, são descritas as justificativas para as escolhas feitas. Os resultados demonstram efetivamente a praticidade e a eficácia da técnica proposta, ilustrando seu potencial para ser replicada e aplicada a outros cenários.

#### 4.3.1 Desempenho da Rede Neural

Para garantir a variação do consumo de eletricidade de acordo com o aumento esperado da temperatura global, uma RNA *Multi-Layer Perceptron* (MLP) para regressão foi construída. Foi feita uma seleção das melhores variáveis de entrada e a função *SelectKBest* foi aplicada para todas as oito variáveis, obtendo a pontuação de cada uma, onde os maiores valores indicavam que aquela variável de entrada estava mais relacionada com a variável de saída. Assim, após o teste, verificou-se que as variáveis ORIENTAÇÃO e JANELA não tinham relação expressiva com o consumo de energia elétrica, sendo eliminadas da RNA. O modelo tem, então, seis variáveis (seis neurônios) de entrada: horas de split do quarto 1 (Q1), horas de split do quarto 2 (Q2), Qt parede, Qt cobertura, mês e temperatura externa.

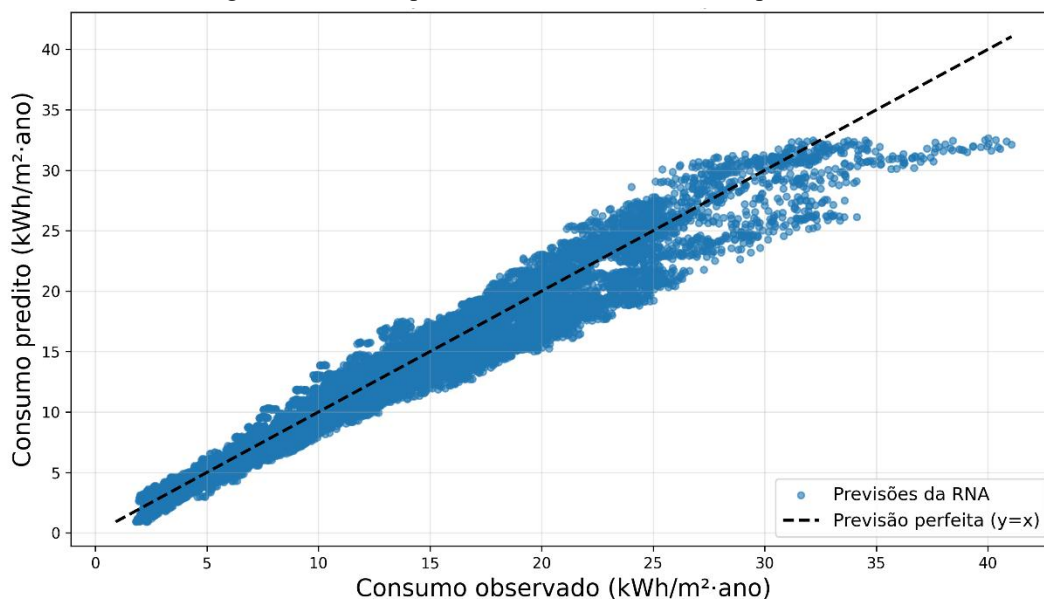
Como o objetivo é treinar a rede para previsão do consumo de eletricidade para condicionamento artificial da edificação, foram desconsiderados os resultados cujo consumo é igual a zero, ou seja, quando o split está desligado nos dois quartos, que corresponde a 5184 linhas. A base de dados foi reduzida para 124416 amostras.

Embora o modelo tenha sido configurado para até 200 épocas com tolerância de 0,0001, a perda estabilizou após aproximadamente 40 iterações, indicando convergência precoce. Testes exploratórios com até 1000 épocas confirmaram que não havia ganhos adicionais de desempenho após a estabilização. Portanto, o limite de 200 épocas foi mantido como margem de segurança computacional, garantindo convergência completa sem desperdício de recursos.

A Figura 28 representa o gráfico dos valores reais e previstos de toda a RNA. Os pontos azuis correspondem aos pares (real, previsto) e a linha tracejada corresponde à previsão perfeita da RNA treinada. Para uma previsão 100% eficaz e precisa, os pontos azuis deveriam coincidir com a linha tracejada ( $y=x$ ). É possível perceber que o modelo é bem ajustado, com uma leve

tendência a subestimar os valores mais altos (acima de 35 kWh/m<sup>2</sup>·ano), onde os pontos ficam ligeiramente abaixo da linha. O gráfico de dispersão (valores preditos *versus* observados) é essencial para validar modelos preditivos. O R<sup>2</sup> de 0,997 e o alinhamento quase perfeito com a linha de 45° demonstram que o modelo tem excelente capacidade preditiva. As métricas de avaliação do resultado da RNA foram: Erro médio absoluto (MAE): 0,503999; MSE: 0,49117 e RMSE: 0,70083.

Figura 28: Valores preditos vs. Valores observados pela RNA



A Figura 29 apresenta a Matriz de Confusão, utilizada aqui como uma ferramenta de validação qualitativa da RNA. Para tal, os dados contínuos de consumo foram categorizados em três classes: baixo (entre 0 e 15 kWh/m<sup>2</sup>), consumo médio (entre 15 e 30 kWh/m<sup>2</sup>) e consumo alto (maior de 30 kWh/m<sup>2</sup>).

A concentração das amostras na diagonal principal reflete uma acurácia de 97%, evidenciando a robustez do modelo. Notadamente, a ausência de classificações errôneas entre extremos (previsão de consumo 'baixo' para valores reais 'altos') confirma a confiabilidade da rede para a tomada de decisão em projetos de habitação social.

Todas as seis variáveis de entrada da RNA foram combinadas para avaliar a correlação entre si (Figura 30). Observa-se que não foi detectada nenhuma multicolinearidade extrema. Os valores baixos são próximos ao zero entre todas as variáveis, significando que são independentes entre si, ou seja, cada variável contribui com informações únicas para o modelo, se complementando entre si.

Figura 29: Matriz de confusão da RNA

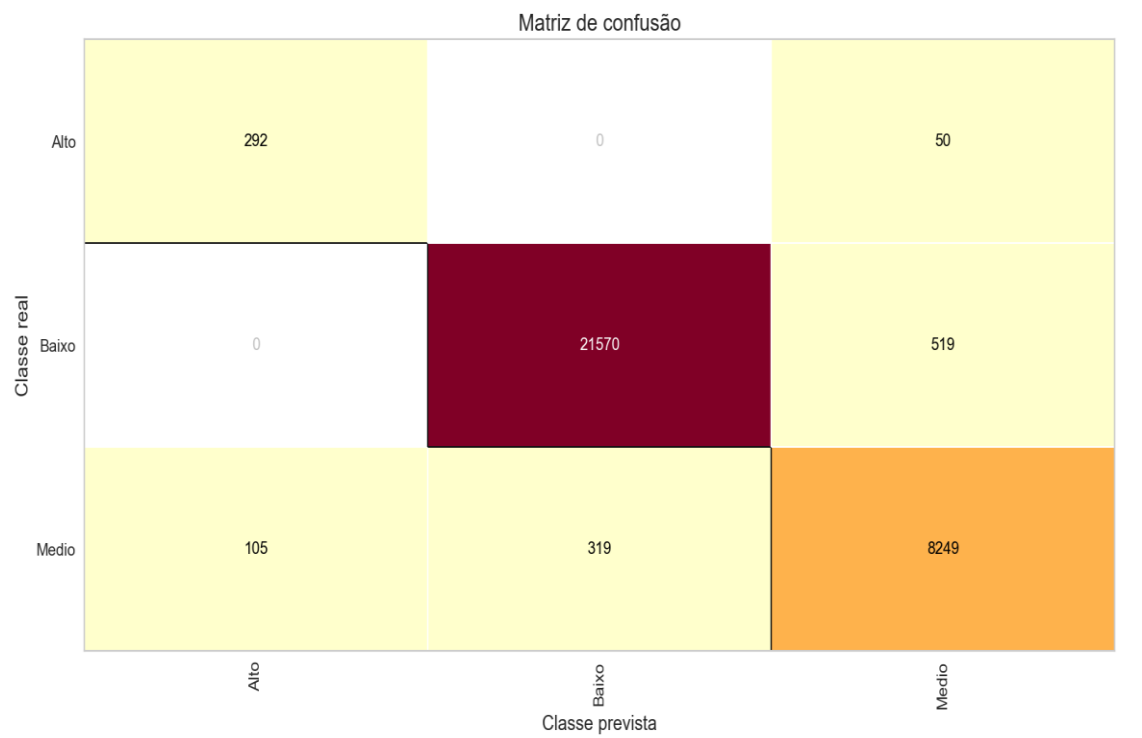
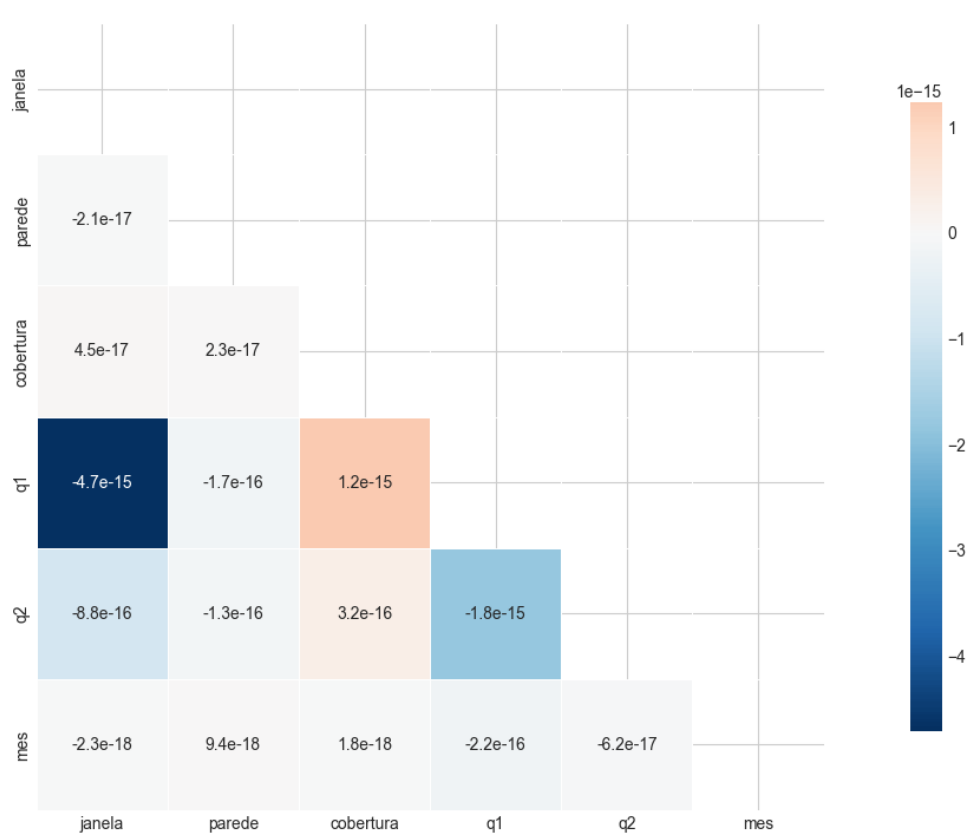


Figura 30: Matriz de correlação das variáveis de entrada da RNA

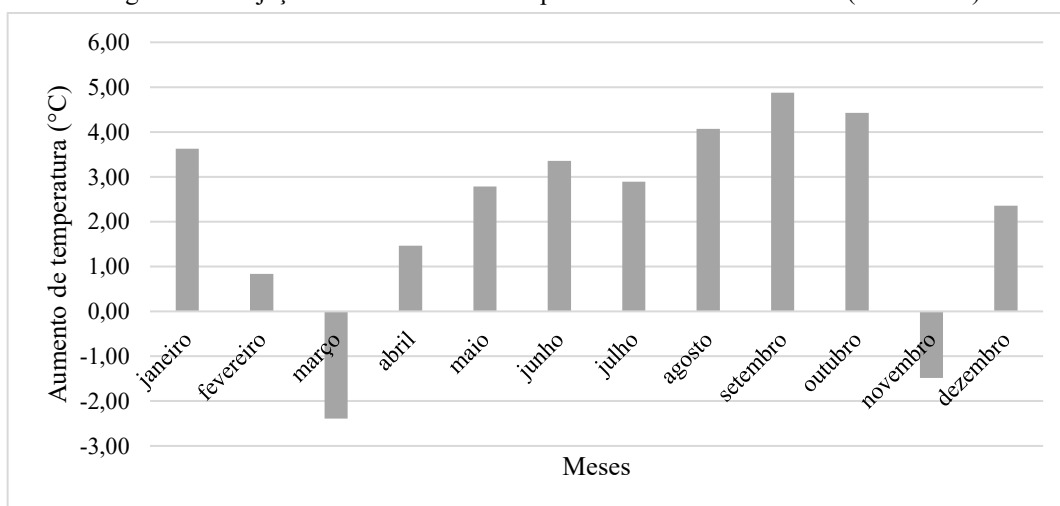


#### 4.3.2 Projeção futura da temperatura: regressão linear

Para projetar as temperaturas futuras, foram utilizados dados históricos de Teresina, Piauí (INMET, 2023), abrangendo o período de 2008 a 2022. Um modelo de regressão linear foi então aplicado para prever a temperatura externa de bulbo seco até 2065, que corresponde ao fim da vida útil esperada da edificação.

A regressão linear foi conduzida individualmente para cada mês para considerar aspectos sazonais (Figura 31). Os resultados revelam uma diminuição nas temperaturas médias durante março e novembro ao longo da vida útil. Apesar desses declínios, a temperatura média anual se alinha com a projeção do IPCC de um aumento de 4 °C entre 1900 e 2100 (IPCC, 2023). A temperatura caiu em março e novembro e aumentou nos outros meses, atingindo o pico em setembro.

Figura 31: Projeção do Aumento de Temperatura Média em Teresina (2015-2065)



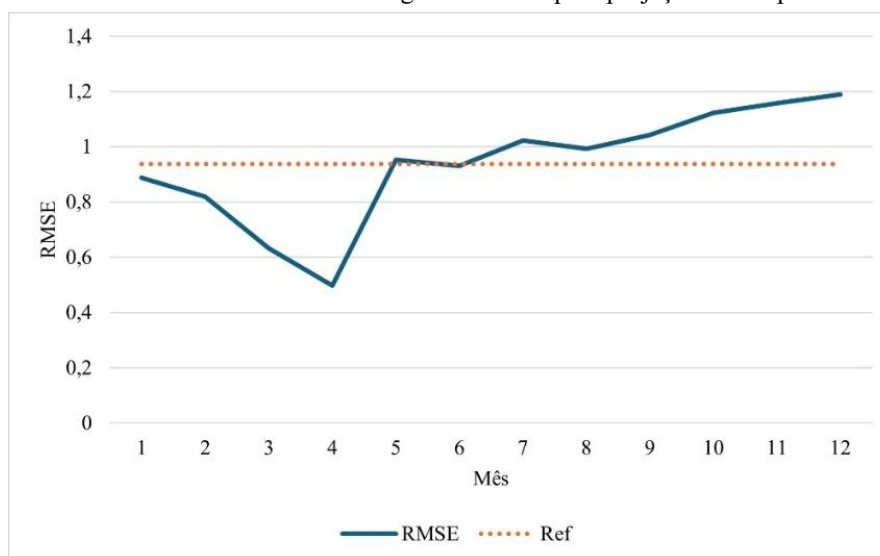
A previsão da temperatura externa para cada mês auxilia na compreensão do comportamento do clima ao longo do ano. Essas informações podem ser valiosas para tomadores de decisão, possibilitando a implementação de medidas sociais e intervenções públicas para orientar a população sobre como lidar com temperaturas elevadas durante os meses mais quentes. Além disso, essas previsões podem ser utilizadas na fase de planejamento de edificações, permitindo a adoção de estratégias construtivas mais eficientes, como o uso de materiais mais adequados para suportar variações térmicas significativas.

Em regiões com estações bem definidas ou onde é necessário aquecimento, outras estratégias devem ser desenvolvidas, seguindo a mesma lógica da análise proposta neste estudo. O impacto das mudanças climáticas difere entre as regiões, tornando essenciais análises regionais e localizadas (P.Tootkaboni *et al.*, 2021).

A incerteza nas projeções de temperatura foi quantificada pelo RMSE mensal (na Figura 32), variando de 0,5°C (abril) a 1,2°C (dezembro). A linha pontilhada representa o RMSE médio anual (0,95°C). Valores mais elevados em abril e nos meses de verão (set-dez) indicam maior incerteza nas projeções para esses períodos, refletindo a variabilidade climática sazonal.

Os meses com maiores valores de RMSE coincidem com os períodos mais quentes do ano, o que pode indicar o impacto das mudanças climáticas na variabilidade das altas temperaturas.

Figura 32: RMSE mensal do modelo de regressão linear para projeção de temperaturas futuras



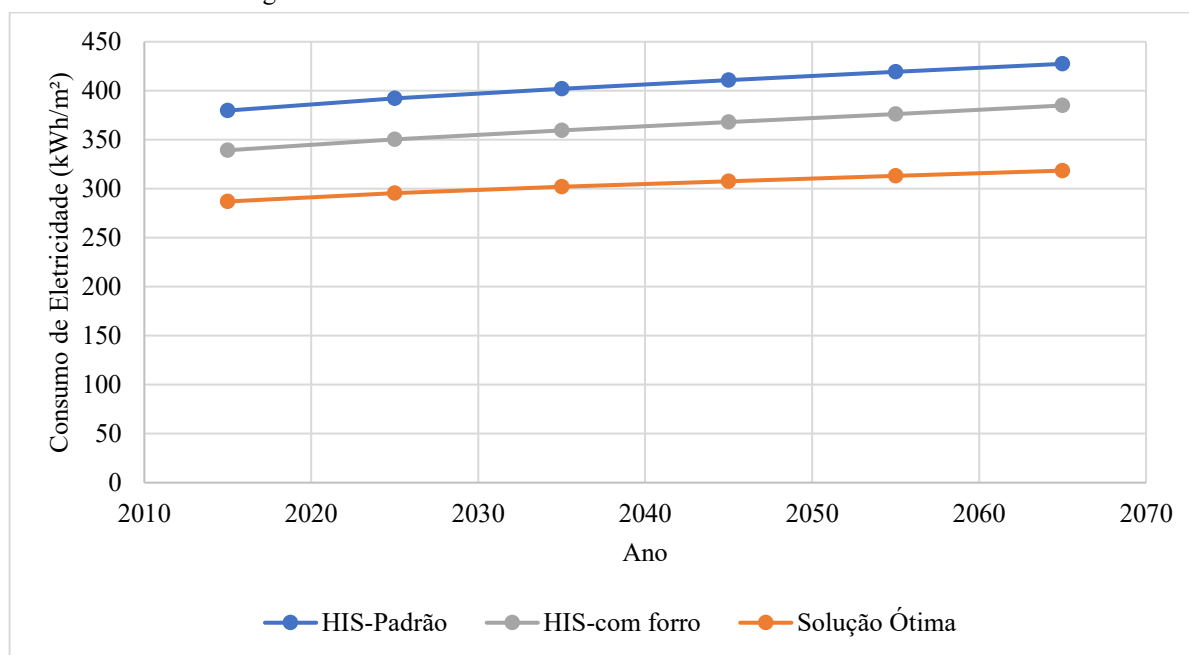
#### 4.3.3 Efeitos da mudança climática no consumo de eletricidade

Uma análise aprofundada do consumo de energia para cada mês, comparando dados de 2015 a 2065, revela algumas tendências interessantes. Março e novembro apresentam uma diminuição no consumo de eletricidade ao longo do tempo, com novembro tendo uma diminuição menor e mais consistente. No entanto, essa diminuição é compensada pela tendência geral de aumento no consumo de eletricidade ao longo da vida útil do edifício, indicando um aumento geral na demanda de energia, apesar dessas reduções mensais.

As variações mais significativas ocorrem no cenário de uso de 3 horas, particularmente em janeiro e setembro, onde as disparidades no consumo são mais pronunciadas. Em contraste, o cenário de uso de 24 horas mostra um aumento significativo no consumo de energia a cada ano, impulsionado por picos de temperatura em torno do meio-dia. Isso destaca a crescente demanda de energia associada à operação prolongada durante os momentos mais quentes do dia e ressalta o impacto do clima e dos padrões de uso no consumo de energia a longo prazo.

Considerando o cenário de 24 horas/quarto.dia, a Figura 33 apresenta o resultado comparativo durante a vida útil da edificação: a HIS como foi entregue para a população (HIS-Padrão), a HIS padrão acrescida de forro de PVC, elemento mínimo para instalação de ar-condicionado (HIS-com forro) e HIS se fosse construída com o projeto ideal (Solução Ótima).

Figura 33: Consumo de eletricidade na vida útil das HIS reais e ideal



Considerando apenas a variável dinâmica de Mudança Climática, percebe-se o efeito positivo a longo prazo da substituição do modelo construtivo convencional pela solução ótima, alcançando redução de 17,3% em 2065 (comparando apenas com o modelo com forro). Para avaliar o efeito direto do aumento de temperatura, diferentes cenários hipotéticos de aquecimento global foram analisados, considerando um regime de uso de ar-condicionado intermediário, 11 de 12 horas por dia.

A análise foi baseada na temperatura média de 2015 (ano base), com incrementos de +1°C, +2°C e +3°C na temperatura externa para quantificar seu efeito no consumo de energia. Os incrementos positivos de temperatura foram selecionados com base em projeções climáticas para a região de Teresina, conforme relatado pelo IPCC (IPCC, 2023) e outros estudos regionais (Cunha Ferreira; Kemenes, 2023; Rodrigues; Parente; Fernandes, 2024). Incrementos negativos de temperatura não foram considerados nesta análise, pois representam cenários de resfriamento global menos prováveis para as condições climáticas de Teresina.

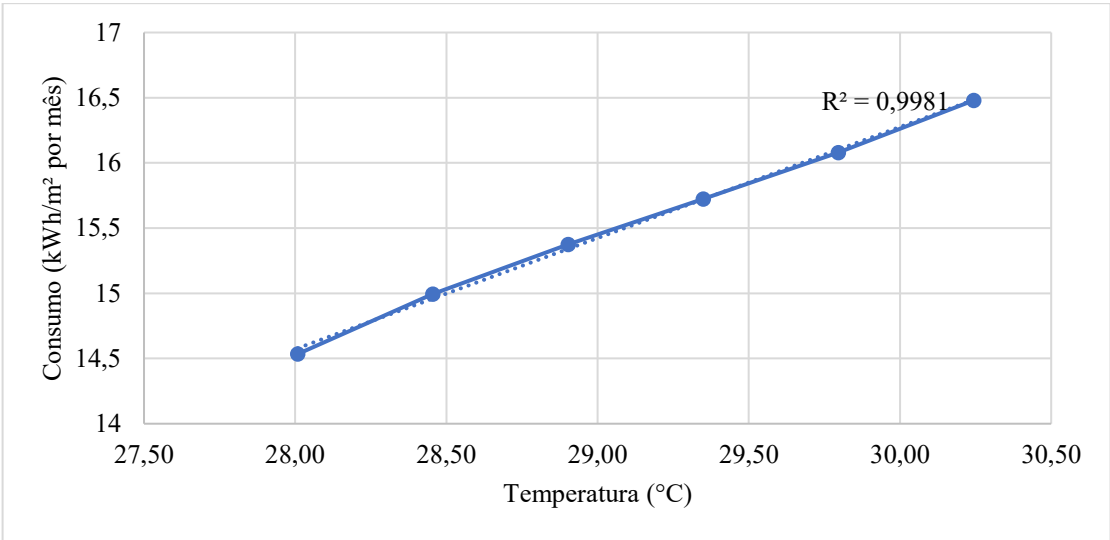
Os resultados indicam que para cada aumento de 1°C na temperatura externa, há um aumento médio de 8% no consumo de energia elétrica para resfriamento, conforme mostrado na Tabela 13.

Tabela 13: Aumento do consumo de eletricidade para cada aumento de 1°C na temperatura externa

| Cenário         | Temperatura (°C) | Consumo (kWh/m²) | Variação a partir do ano-base (%) |
|-----------------|------------------|------------------|-----------------------------------|
| Ano-base (2015) | 28               | 174,41           | -                                 |
| +1°C            | 29               | 190,45           | + 09%                             |
| +2°C            | 30               | 202,59           | + 16%                             |
| +3°C            | 31               | 215,60           | + 24%                             |

O cenário mais extremo (+3°C) evidencia a crescente demanda energética associada ao aumento das temperaturas. Esses resultados reforçam a necessidade de estratégias adaptativas para mitigar os impactos térmicos e reduzir o consumo de energia em edificações em climas quentes. Além disso, a correlação entre o aumento da temperatura externa e o consumo de energia elétrica para resfriamento apresenta alto coeficiente de determinação (Figura 34), confirmando a relação direta entre essas variáveis.

Figura 34: Correlação entre Temperatura Externa e Consumo por mês (12 h/quarto.dia)



Uma análise de sensibilidade baseada em cenários de projeção climática disponíveis na literatura foi conduzida para verificar a robustez e a aplicabilidade do modelo proposto em diferentes contextos. Essa análise, detalhada na próxima seção, visa validar a metodologia e subsidiar o desenvolvimento de estratégias de eficiência energética focadas na adaptação de edificações às mudanças climáticas.

4.3.4 Análise de sensibilidade: projeção da temperatura

A integração dinâmica de dados é um aspecto central de uma ADCV, e a análise de cenários é uma forma de modelar a incerteza (Hosamo *et al.*, 2024). Para elucidar o impacto

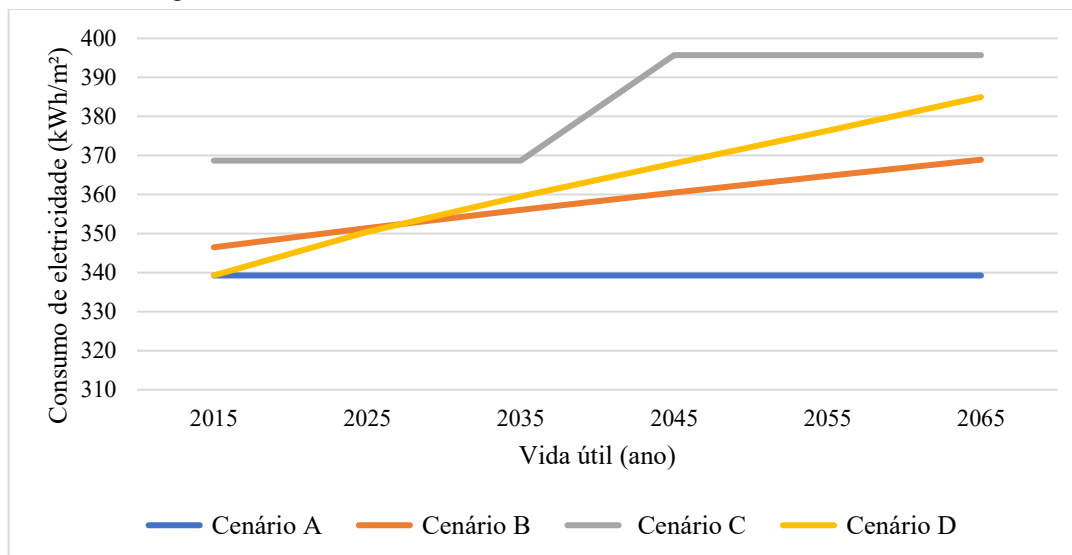
das variações de temperatura no consumo de eletricidade para ar-condicionado em uma HIS, quatro cenários distintos foram analisados:

- **Cenário A:** Cenário de referência que considera que a temperatura não irá aumentar ao longo do tempo. Ele reflete premissas típicas relatadas na literatura (Alotaibi *et al.*, 2022; Apostolopoulos *et al.*, 2023; Atmaca; Atmaca, 2015; Cabeza *et al.*, 2014; Piccardo; Dodoo; Gustavsson, 2020; Su *et al.*, 2022a) e serve de comparação para os modelos dinâmicos
- **Cenário B:** Este cenário aplica um aumento fixo para a temperatura alinhado com as projeções globais de aumento apontadas pelo IPCC (IPCC, 2023). Examina as implicações de um aumento uniforme e moderado da temperatura ao longo do tempo, representando uma abordagem global comumente adotada em estudos sobre mudanças climáticas.
- **Cenário C:** Usa a ferramenta *Climate Change World Weather File Generator* (CCWorldWeatherGen), que é utilizada na literatura (González Mahecha *et al.*, 2020; Rosse Caldas *et al.*, 2020) para gerar dados climáticos futuros por meio do método de *morphing*. Esta técnica ajusta dados meteorológicos históricos com base nas variações relativas mensais em relação ao período de base (1961-1990). O fato de ser uma ferramenta *online* gratuita é uma vantagem que a torna amplamente utilizada. No entanto, devido a possíveis diferenças no período de referência entre os dados de arquivos climáticos, podem ocorrer imprecisões nos resultados da ferramenta (Jentsch; Bahaj; James, 2008; P.Tootkaboni *et al.*, 2021). Para este estudo, um arquivo EPW contendo as características climáticas de Teresina foi usado como dados meteorológicos base para transformação, gerando arquivos meteorológicos futuros para os períodos de 2020 (2010-2039) e 2050 (2040-2069). O período de 2080 (2070-2099) foi desconsiderado porque estava além do tempo de vida considerado para a VU adotada nesta pesquisa;
- **Cenário D:** Este cenário utiliza um aumento progressivo da temperatura derivado de dados climáticos locais por meio de regressão linear. Ele fornece uma previsão mais localizada e realista dos impactos da temperatura, refletindo a dinâmica climática regional específica ao longo da vida útil do edifício.

Cada cenário foi analisado considerando o uso de ar-condicionado 24 horas por dia nos dois quartos da HIS (Figura 35). Essa abordagem permite uma comparação detalhada da

demanda de energia sob diferentes projeções de temperatura futura e condições operacionais, revelando *insights* sobre o desempenho energético do edifício a longo prazo.

Figura 35: Cenários de aumento de consumo durante a vida útil do edifício



Os quatro cenários apresentados representam diferentes projeções da evolução da temperatura ao longo do tempo e como isso impacta o consumo total de eletricidade para o resfriamento da HIS. O gráfico apresenta o comportamento do consumo por metro quadrado da área construída ao longo dos anos, indicando como cada cenário de projeção se desdobra para o uso de split contínuo.

No Cenário A, não há aumento de temperatura ao longo dos 50 anos de vida útil do edifício, servindo como base para demonstrar o consumo estático ao longo do tempo. Este cenário não reflete a realidade das condições climáticas futuras, visto que aumentos de temperatura já são observados anualmente.

A projeção global do IPCC (Cenário B) resultou em uma reta de aumento gradual no consumo de eletricidade para refrigeração, refletindo um aumento constante e preocupante ao longo dos anos. O último relatório do IPCC mostra que um aumento de 4°C na temperatura ao longo de 200 anos impacta significativamente o consumo, mesmo que pareça pequeno, especialmente em cidades como Teresina, que já enfrentam altas temperaturas.

A comparação entre os cenários C e D destaca uma discrepância fundamental na projeção de consumo de energia. A ferramenta CCWorldWeatherGen (Cenário C) projeta aumentos na temperatura global, mas não considera os dados históricos e as nuances climáticas regionais específicas. Consequentemente, os resultados provavelmente estão superestimados, fornecendo uma previsão menos precisa do que os modelos que incorporam tendências localizadas (Jentsch; Bahaj; James, 2008; P.Tootkaboni *et al.*, 2021). Além disso, assume

valores de temperatura constantes em cada intervalo de 20 anos, limitando ainda mais sua precisão.

A ferramenta do Cenário C gera dados meteorológicos futuros usando modelos climáticos globais que aplicam mudanças generalizadas aos climas regionais. Embora essa abordagem seja vantajosa por sua acessibilidade e ampla aplicação, ela não considera tendências climáticas regionais específicas ou dados históricos, que podem ser determinantes para previsões precisas de energia em contextos altamente localizados, como Teresina. Em contraste, o Cenário D integra dados locais, fornecendo uma projeção mais fundamentada que se alinha mais estreitamente com o desempenho energético real do edifício ao longo do tempo.

Ao incorporar dados históricos de temperatura e refinar as projeções com base nas mudanças climáticas locais, o Cenário D oferece uma avaliação mais realista do consumo futuro de energia. Ferramentas globais são valiosas para avaliações amplas, mas modelos localizados podem fornecer resultados mais precisos, especialmente para regiões com condições climáticas únicas, como Teresina. Portanto, o consumo no Cenário D pode ser considerado mais representativo da demanda real, evitando as estimativas de consumo inflacionadas geradas por ferramentas globais.

#### *4.3.5 Efeito dos padrões de operação para resfriamento no consumo de energia*

Três cenários (3, 12 e 24 horas/quarto.dia) foram analisados para avaliar o impacto dos padrões de operação do sistema de refrigeração. A projeção da temperatura externa, obtida por regressão linear, foi incorporada ao modelo desenvolvido para dois tipos de habitação: a HIS padrão com forro de PVC e a Solução Ótima (com parede de bloco cerâmico de maior espessura e isolamento térmico, além de telhado metálico com forro de laje pré-moldada). Os resultados da análise para toda a vida útil da edificação são apresentados na Tabela 14, incluindo os valores médios de consumo de energia e o Desvio Padrão (DP) correspondente para cada cenário.

No cenário de uso de 3 horas, particularmente em janeiro e setembro, as disparidades acentuadas no consumo indicam que mesmo a opção limitada de resfriamento é suscetível a flutuações sazonais de temperatura. Em contraste, o cenário de uso de 24 horas mostra consistentemente um aumento anual substancial no consumo de energia, principalmente devido aos picos de temperatura por volta do meio-dia. Esse resultado ressalta o impacto da operação prolongada durante os períodos mais quentes do dia na demanda de energia a longo prazo.

Tabela 14: Padrão de operação na vida útil da HIS padrão e Solução Ótima

| HIS                             | Agenda AVAC<br>(hora/quarto.dia) | Consumo de eletricidade para resfriamento por ano (2015-2065) |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
|                                 |                                  | 2015                                                          | DP  | 2025  | DP  | 2035  | DP  | 2045  | DP  | 2055  | DP  | 2065  | DP  |
| HIS<br>padrão<br>(com<br>forro) | 3                                | 54,3                                                          | 0,7 | 57,3  | 0,8 | 59,8  | 1,1 | 61,2  | 1,5 | 64,4  | 1,9 | 68,1  | 2,1 |
|                                 | 12                               | 174,4                                                         | 1,6 | 179,9 | 1,7 | 184,5 | 2,2 | 188,7 | 2,8 | 193,0 | 3,7 | 197,8 | 4,5 |
|                                 | 24                               | 339,3                                                         | 3,0 | 350,4 | 3,3 | 359,5 | 4,0 | 367,9 | 4,9 | 376,3 | 5,9 | 385,0 | 6,7 |
| Solução<br>Ótima                | 3                                | 64,5                                                          | 0,6 | 66,9  | 0,6 | 68,8  | 0,9 | 70,5  | 1,2 | 71,8  | 1,7 | 73,5  | 2,1 |
|                                 | 12                               | 158,9                                                         | 1,3 | 163,2 | 1,4 | 166,7 | 1,8 | 169,9 | 2,3 | 172,9 | 3,0 | 176,2 | 3,8 |
|                                 | 24                               | 287,0                                                         | 2,5 | 295,4 | 2,6 | 302,0 | 3,2 | 307,6 | 4,0 | 313,0 | 4,8 | 318,5 | 5,6 |

A análise permite avaliar a influência do aumento das temperaturas externas ao longo das décadas. Os resultados indicam que o desvio padrão do consumo de energia aumenta progressivamente com o aumento da temperatura externa e o tempo de uso diário do sistema de resfriamento.

No cenário de 2065, o DP quase triplica em relação ao valor obtido na HIS real, refletindo a crescente instabilidade no consumo de energia ao longo do tempo. Além disso, quanto maior o número de horas de resfriamento utilizadas, maior a dispersão dos valores registrados, sendo esse efeito mais pronunciado na HIS padrão (com forro) em comparação com a solução ótima. Esses resultados indicam que a variação sazonal do consumo se intensificará no futuro, com períodos de altas temperaturas apresentando picos de demanda mais pronunciados. Ao mesmo tempo, meses mais amenos tenderão a registrar valores ainda mais baixos de consumo de eletricidade.

#### 4.3.6 Discussão

Para situar esta tese com a literatura de RNA em edificações, os resultados foram extrapolados para uma vida útil de 50 anos, mantendo a base de comparação com os artigos analisados e garantindo que os valores sejam apresentados por metro quadrado de área construída. A única exceção de comparação direta de consumo é Hamida *et al.* (2021), que focou apenas em emissões de CO<sub>2</sub> e custos. Os resultados obtidos (Azari *et al.*, 2016; Hamida *et al.*, 2021; Sharif; Hammad, 2019) respaldam a ordem de grandeza do consumo operacional projetado para uma unidade habitacional social brasileira, que se situa em torno de 18.000 kWh/m<sup>2</sup> ao longo da vida útil.

Em contraste, os resultados significativamente inferiores obtidos por D'Amico *et al.* (2019) e Xue *et al.* (2022) (variando de 34,5 a 3.247 kWh/m<sup>2</sup>) decorrem da análise exclusiva de edifícios de alto desempenho e estratégias passivas em climas temperados. Essa discrepância demonstra a necessidade crítica de planejar todo o ciclo de vida das edificações de acordo com o comportamento operacional real e as variáveis dinâmicas às quais a região de clima quente tropical está sujeita. Os resultados desta tese refletem a realidade de uma HIS brasileira, onde fatores como aumento da densidade de ocupação, maior número de horas de resfriamento e extensão da vida útil do edifício aumentarão o consumo de energia, validando o foco desta pesquisa.

Para além da ordem de grandeza, a confiabilidade dos resultados desta pesquisa é corroborada pelas métricas de rigor do modelo preditivo de RNA. Nos modelos preditivos analisados, foram apresentados resultados variados para comprovar o desempenho da RNA, como R<sup>2</sup> (D'Amico *et al.*, 2019; Duprez *et al.*, 2019; Hamida *et al.*, 2021; Jang *et al.*, 2019; Luo; Oyedele, 2022; Re Cecconi *et al.*, 2017; Sharif; Hammad, 2019), MSE (Azari *et al.*, 2016; Luo; Oyedele, 2022; Sharif; Hammad, 2019; Xue; Wang; Chen, 2022), gráfico de valores reais vs. valores previstos (Azari *et al.*, 2016; Hamida *et al.*, 2021; Sharif; Hammad, 2019; Xue; Wang; Chen, 2022). Essa avaliação da acurácia e precisão mostram se a RNA é uma alternativa confiável para atingir o objetivo do trabalho.

Os trabalhos de D'Amico *et al.* (2019) e Himmetoğlu *et al.* (2022) demonstraram que os modelos de RNA são capazes de atingir alta precisão, com coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) tipicamente superiores a 0,90. A Tabela 15 contém a comparação entre os valores de R<sup>2</sup>, MSE ou MAE das RNAs (em estudos de ACV para edificações) que consideraram o consumo de energia elétrica de edificações como *output* e tiveram seus valores apresentados. Alguns artigos não mencionaram qualquer métrica (Abdou *et al.*, 2022; Cecconi; Rampini, 2023; Sharif; Hammad, 2019).

Tabela 15: Comparação de métricas de RNA com *output* de energia elétrica (kWh/m<sup>2</sup>.ano)

| Ref.                            | R2            | MSE                              | MAE                              | RMSE                                |
|---------------------------------|---------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Luo; Oyedele (2022)             | 0,841 e 0,959 | -                                | 2,37 e 3,50 kWh                  | 4,04 e 4,71 kWh                     |
| Himmetoğlu <i>et al.</i> (2022) | 0,9922        | -                                | -                                | -                                   |
| D'Amico <i>et al.</i> (2019)    | 0,9998        | -                                | -                                | 0,10 a 0,14 kWh/m <sup>2</sup> .ano |
| Re Cecconi <i>et al.</i> (2017) | 0,818         | -                                | -                                | -                                   |
| <b>Esta pesquisa</b>            | <b>0,997</b>  | <b>0,5 kWh/m<sup>2</sup>.ano</b> | <b>0,5 kWh/m<sup>2</sup>.ano</b> | <b>0,7 kWh/m<sup>2</sup>.ano</b>    |

Na presente tese, o modelo de projeção de consumo de eletricidade atingiu um nível de acurácia preditiva comparável ou superior aos estudos de referência. Este rigor garante a

validade das projeções de inventário e confere robustez às análises de impacto ambiental prospectivas.

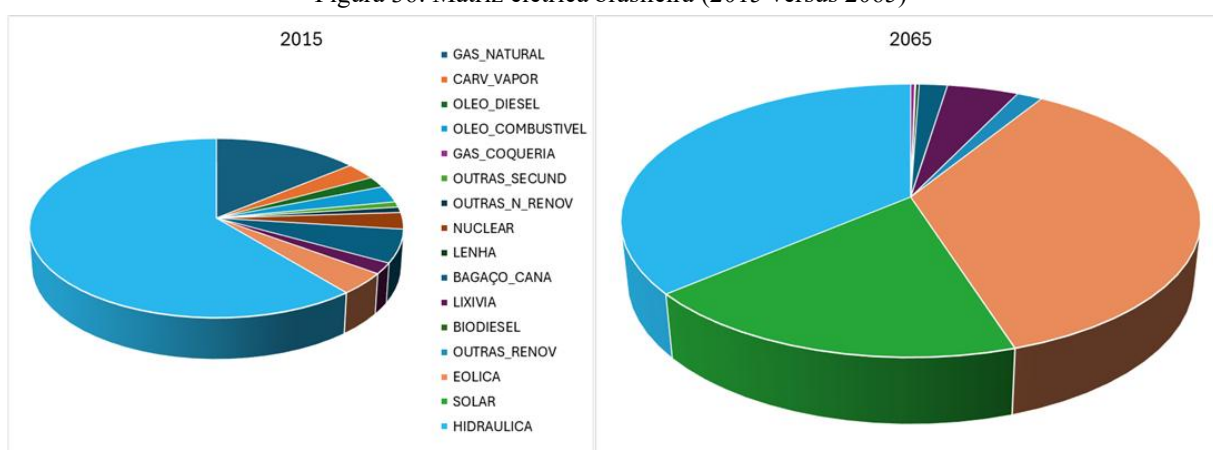
#### 4.4 Avaliação Dinâmica do Impacto Ambiental

Os resultados desta seção estão estruturados da seguinte forma: apresentação dos resultados da projeção da matriz elétrica brasileira e seus impactos ambientais, organizados por impactos na geração de eletricidade e impacto anual para resfriamento da edificação. Para concluir, são apresentadas as implicações desses impactos numa escala de bairro (conjunto habitacional).

##### 4.4.1 Matriz elétrica brasileira: projeção futura

A matriz elétrica brasileira no ano de 2065 (último ano da análise) foi projetada com base no modelo híbrido desenvolvido e apresentado no item 3.5.3 da metodologia, considerando o cenário base (sem interferência política). O ano de 2015 está demonstrado a partir de dados reais, coletados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2025). A comparação direta do primeiro e último ano de análise está apresentada na Figura 36. Apesar de uma redução considerável, a fonte hidráulica terá a maior participação na matriz (36,3%), empatada com a fonte eólica. Há também uma participação expressiva da fonte solar (18,6%). Fontes não-renováveis serão inexpressivas no ano de 2065.

Figura 36: Matriz elétrica brasileira (2015 versus 2065)



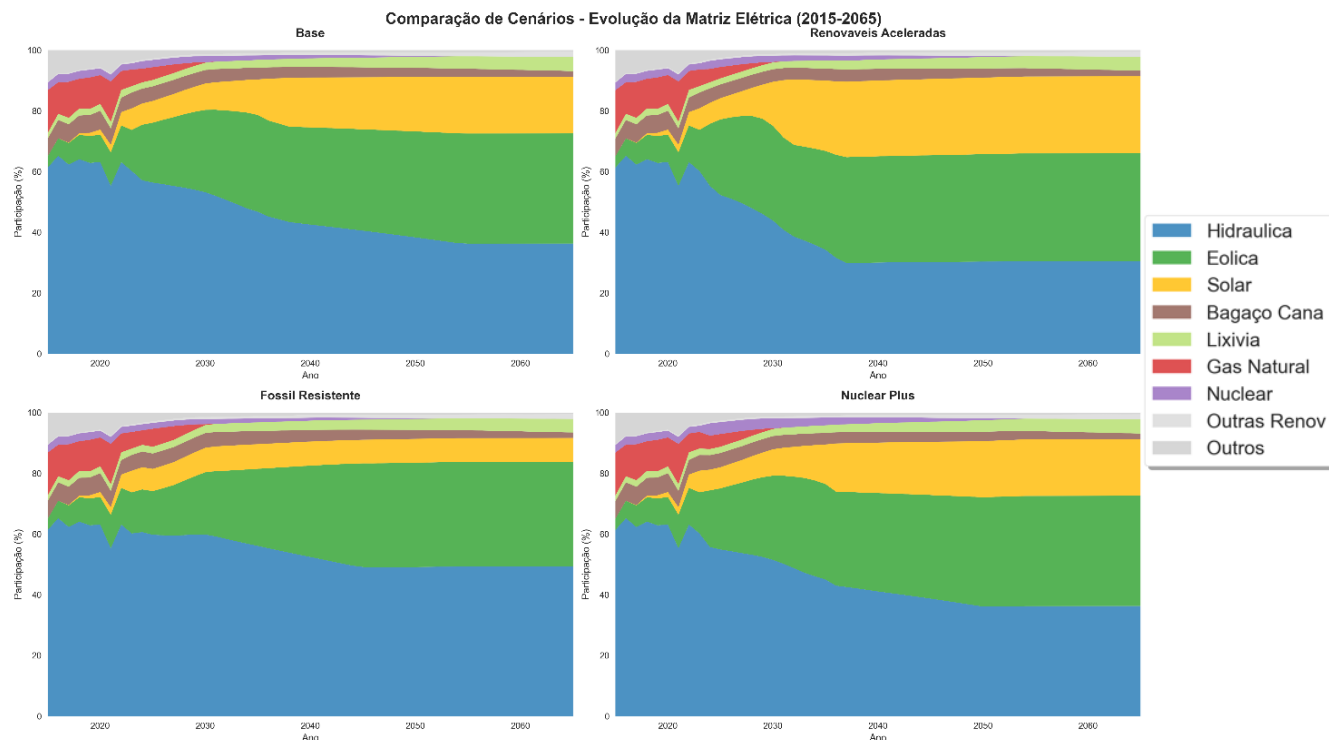
A evolução da matriz elétrica para diferentes cenários durante o período analisado está apresentada na Figura 37. Observa-se que gás natural, lixívia e bagaço de cana possuem evoluções iguais, independente do cenário político escolhido. A fonte de hidreletricidade possui

redução mais expressiva no cenário de aceleração das renováveis, sendo ativamente substituída pelo avanço das fontes solar e eólica, enquanto possui maior participação no cenário de fóssil resistente.

Mesmo com o incentivo na fonte nuclear, sua evolução não é continuamente preservada, visto que em 2065 será aproximadamente igual a zero. O investimento de políticas brasileiras nesta fonte é, então, desaconselhado, já que a tendência histórica/política está caminhando para outra direção. Outras considerações podem ser inferidas sobre a Figura 37:

- O período 2025-2035 parece ser um ponto de inflexão crítico para a transição energética;
- A diversificação energética varia consideravelmente entre cenários, com implicações para segurança energética;
- A dominância da fonte hidráulica pode ser problemática considerando mudanças climáticas e variabilidade hídrica e climatológica;
- A visualização sugere que as políticas energéticas adotadas nas próximas décadas determinarão o perfil da matriz elétrica brasileira em 2065.

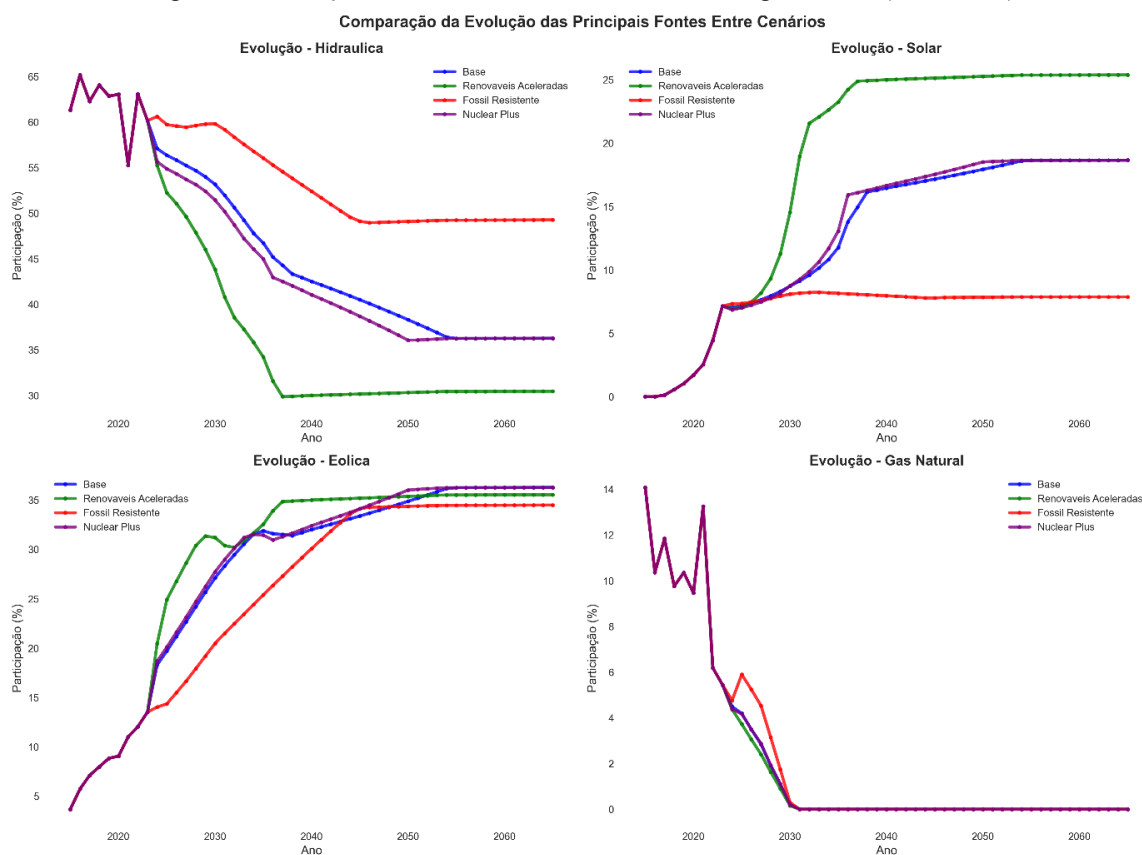
Figura 37: Evolução da matriz elétrica (2015-2065) em diferentes cenários políticos



Independente das decisões políticas, a participação das fontes solar e eólica demonstrou um aumento consistente ao longo do horizonte de projeção. Este crescimento é fundamentado em vetores que superam as decisões políticas conjunturais, incluindo o aumento de incentivo nos custos dessas tecnologias nos últimos anos, tornando-as altamente competitivas com fontes tradicionais, e o enorme potencial geográfico do Brasil (alta irradiação solar e ventos de excelente fator de capacidade, especialmente no Nordeste). Adicionalmente, a busca global por descarbonização e a necessidade de diversificação da matriz para mitigar a dependência hídrica conferem a essas fontes um papel estratégico e de prioridade econômica em qualquer planejamento de longo prazo.

Para uma visualização mais precisa, a Figura 38 apresenta as fontes hidráulica, solar, eólica e gás natural para cada cenário político. O investimento em renováveis desloca a evolução na fonte hidráulica e, investe nas fontes fósseis, há um aumento na participação hídrica. A eólica apresenta uma evolução inerente, se estabilizando após o ano de 2045. Essa estabilidade é antecipada para o ano de 2035 no cenário de renováveis. A evolução da fonte solar é interrompida consideravelmente no cenário fóssil resistente. O gás natural apresenta um declínio constante, independente do direcionamento político.

Figura 38: Evolução das fontes hidráulica, solar, eólica e gás natural (2015-2065)

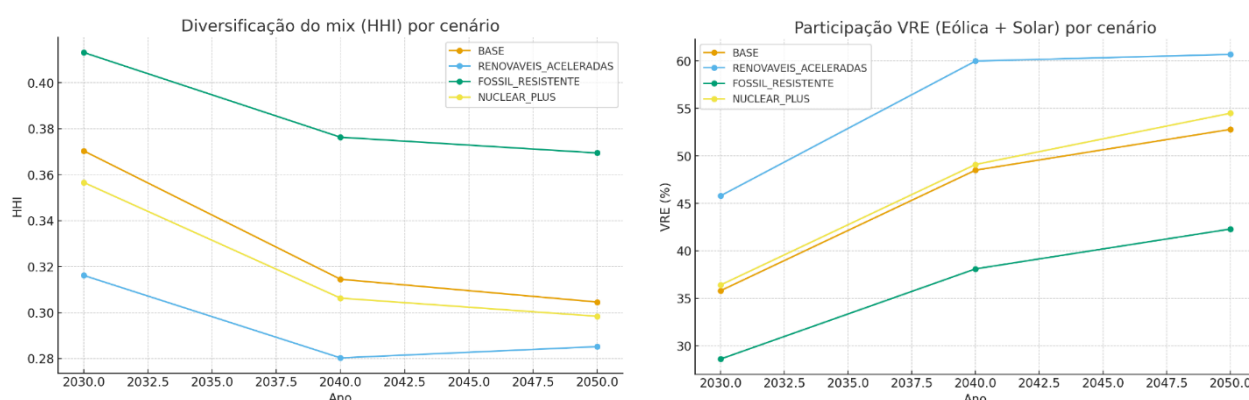


Embora o crescimento da Solar e Eólica confira robustez e sustentabilidade à matriz, é obrigatório reconhecer os riscos estratégicos inerentes a esta expansão. As tecnologias de geração fotovoltaica e eólica de última geração, assim como os sistemas de armazenamento de energia a elas associados, apresentam uma acentuada dependência de minerais e matérias-primas críticas (como terras raras, lítio, cobalto e níquel).

Para o Brasil, esta dependência impõe um desafio de segurança energética no futuro (EPE, 2020). A ausência de uma cadeia de suprimentos interna robusta para a produção de componentes primários coloca o país em uma posição de vulnerabilidade a choques de preço e geopolíticos nas cadeias de mineração globais. Portanto, a transição energética deve ser planejada não apenas em termos de expansão de capacidade, mas também considerando a estratégia de industrialização e domínio sobre o ciclo de vida e a reciclagem desses materiais críticos, sob pena de trocar uma dependência energética (hídrica/fóssil) por uma dependência tecnológica e mineral.

O resultado do índice de Herfindahl–Hirschman (HHI) está apresentado na Figura 39 e quantifica a diversificação da matriz em cada cenário. O cenário “Renováveis Aceleradas” possui maior diversificação de fontes ao longo do tempo. A Figura 39 também apresenta o VRE, que é o percentual do somatório das fontes eólica e solar por cenário, confirmando o que foi apresentado anteriormente: a expressiva contribuição das duas fontes está presente no cenário de aceleração das renováveis e a menor participação no cenário de incentivo às fontes não-renováveis (fóssil resistente).

Figura 39: Índice de Herfindahl–Hirschman (HHI) e VRE por cenário



Em 2050, no cenário Base, a matriz é composta por 38,3% hidráulica, 34,9% eólica e 17,9% solar, com VRE = 52,8% e HHI = 0,303 (concentração média). Em Renováveis Aceleradas, observa-se a maior participação de variáveis renováveis, com 35,4% eólica e 25,3% solar (VRE = 60,7%), hidráulica 30,3% e HHI = 0,284 (maior diversificação). Em Fóssil

Resistente, a matriz permanece mais concentrada em hidráulica (49,1%) e reduz a solar (7,9%), mantendo eólica com 34,4% de participação (VRE = 42,3%, HHI = 0,368: maior concentração). Por fim, o Nuclear Plus combina 36,0% eólica e 18,5% solar (VRE = 54,5%) com 36,1% hidráulica; a fração nuclear, embora crescente, permanece <1% (HHI = 0,297). Em todos os cenários, gás natural se anula em 2050, refletindo a retirada gradual de térmicas no longo prazo.

Cenários com menor participação hidráulica e maior diversificação (HHI baixo), como Renováveis Aceleradas, tendem a reduzir a exposição a riscos hídricos (como a dependência de reservatórios) e a choques relacionados. Em contrapartida, a elevação de VRE sugere maior pressão mineral (recursos). Já em Fóssil Resistente, a concentração (HHI=0,368) e o prolongamento da dominância hídrica indicam *trade-offs* potenciais com uso de água e resiliência do sistema, mesmo com possíveis ganhos climáticos.

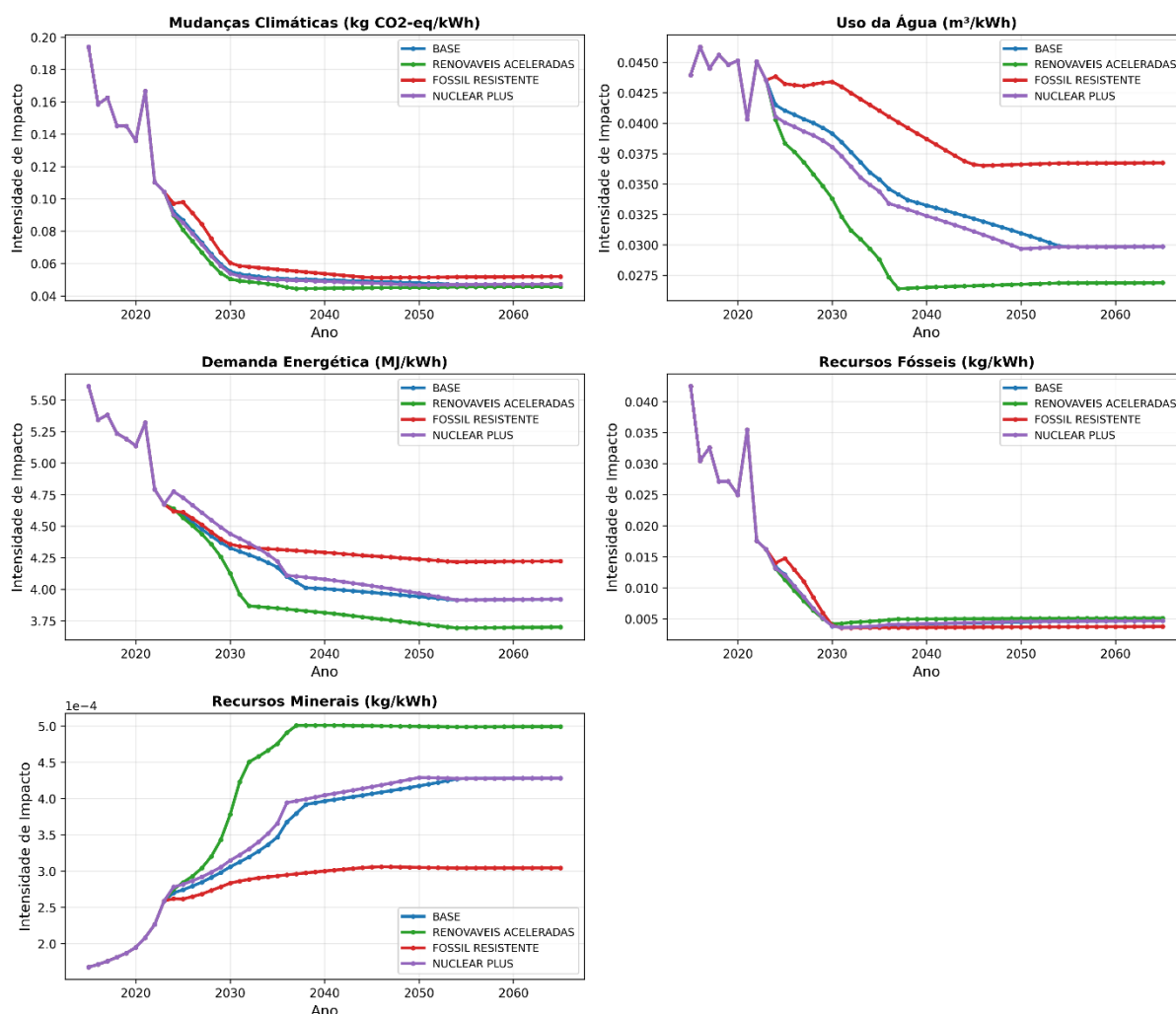
#### 4.4.2 Impactos ambientais para geração de energia elétrica

Todos os resultados apresentados nesta seção estão relacionados ao impacto para geração de energia elétrica, considerando os cenários políticos que alteram a projeção da matriz elétrica brasileira. De maneira geral, o aumento na participação das renováveis e redução das fontes fósseis provoca uma redução (e posterior estabilização) nos impactos ambientais relacionados ao clima e à escassez de recursos fósseis para a geração de eletricidade brasileira.

A Figura 40 apresenta a evolução separada por categorias de impacto (clima, água, energia e escassez de recursos). A única categoria que teve aumento em todos os cenários foi a de escassez de recursos minerais. Para a confecção de painéis solares, baterias e pás eólicas (dentre outros), é preciso uma quantidade significativa de materiais específicos, como cobalto, lítio etc.

É evidente que os impactos associados a fontes renováveis estão voltados para a etapa de manufatura, e não de continuidade de operação das usinas (como acontece nas usinas termelétricas que precisam de carvão para seu funcionamento). Então, no processo de transição energética brasileira, o impacto mineral se concentra na fabricação e instalação, enquanto combustíveis fósseis têm impacto contínuo durante a operação. Portanto, houve transferência dos impactos de combustíveis fósseis (contínuos) para materiais (manufatura), com benefício líquido positivo a longo prazo.

Figura 40: Evolução dos fatores de caracterização dinâmicos



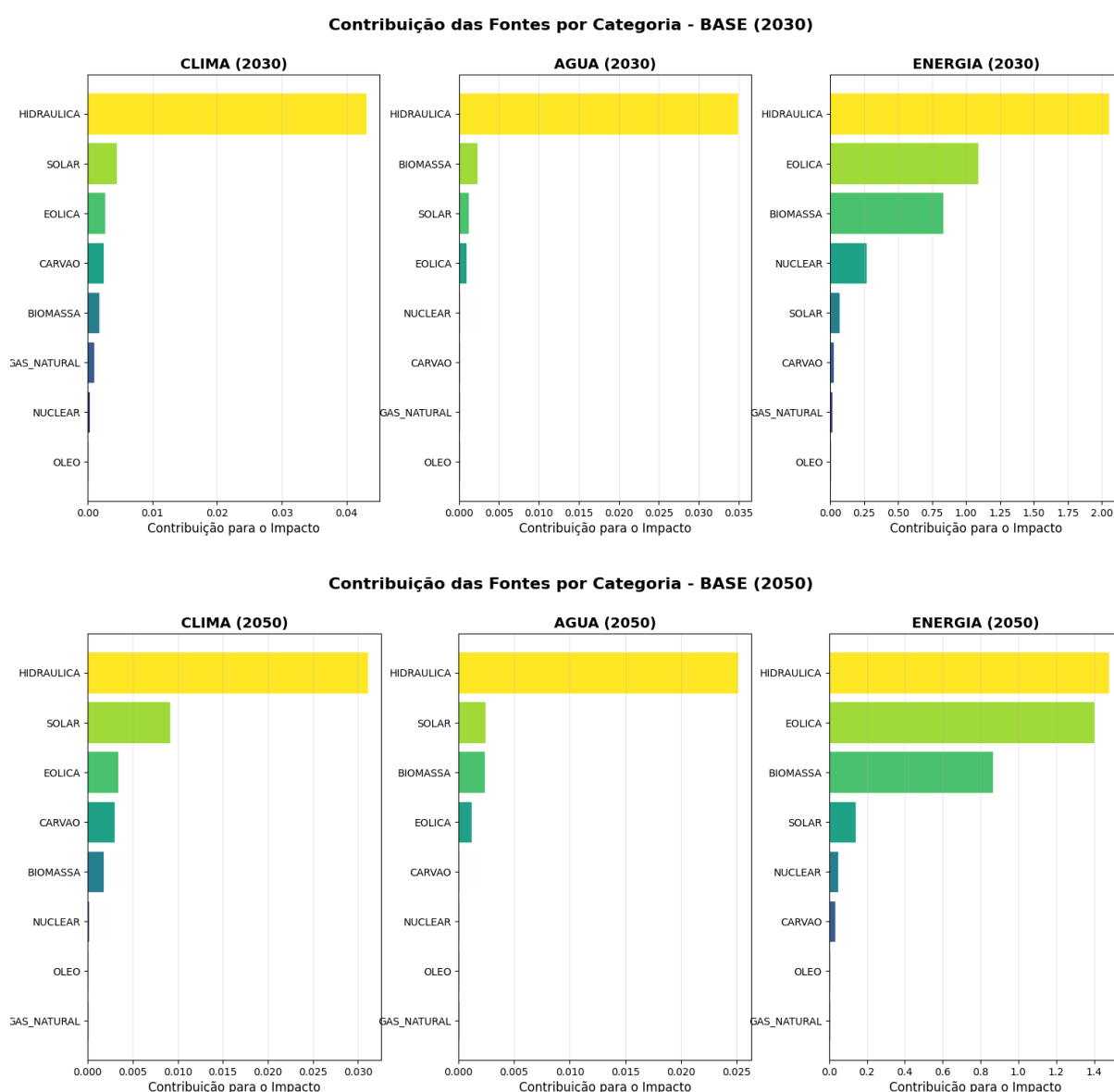
As categorias de impacto mais representativas (CED, PAG e uso de água), setorizadas em energia, clima, água, respectivamente, foram agrupadas para melhor comparação nos anos de 2030 e 2050, no cenário Base (Figura 41). A fonte hidráulica domina totalmente as categorias clima e água, tanto em 2030 como em 2050. Um cenário que prioriza a redução de emissões de carbono pode aumentar o consumo de água (devido à hidroeletricidade) ou a escassez de recursos minerais (devido à infraestrutura solar/eólica).

Embora o Brasil tenha uma matriz de energia limpa, a água consumida na produção de energia hidrelétrica (principalmente por evaporação nos reservatórios) tem um potencial de escassez muito alto, estando suscetível à hidrologia local. Isso demonstra que eletricidade limpa não significa impacto zero, o que aumenta a ênfase na utilização da ferramenta de ACV.

A fonte hidráulica pode figurar como uma significativa contribuinte em emissões de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>-eq). Devido à decomposição da matéria orgânica em grandes reservatórios na região tropical, ocorre uma elevada emissão de metano (CH<sub>4</sub>). A

consideração adequada destas emissões e a utilização de fatores de Potencial de Aquecimento Global (PAG) atualizados elevam substancialmente a pegada climática da hidroeletricidade. Isso demonstra que as modelagens convencionais de Inventário de Ciclo de Vida (ACV), frequentemente baseadas em bancos de dados como o *Ecoinvent* sejam suficientes para capturar a precisão total dos gases equivalentes. O resultado desmistifica a premissa de que a hidroeletricidade é uma fonte de baixo carbono em todos os contextos e ressalta a importância de inventários específicos para reservatórios tropicais para um cálculo fidedigno.

Figura 41: Contribuição das fontes energéticas por categoria de impacto (2030 e 2050)



Para as categorias analisadas, a barra da **Hidráulica** em 2050 é menor que em 2030. Esses resultados validam o modelo híbrido, pois mesmo no cenário Base, o aumento da participação das fontes eólica e solar diminui a intensidade de impacto ambiental da matriz ao

longo do tempo. A matriz se torna mais limpa e menos intensiva em água, o que reforça o papel da transição na mitigação de impactos.

A categoria CED (**Energia**) mostra o consumo de recursos não-renováveis. Em 2030, a hidráulica e a eólica são as maiores. Em 2050, a hidráulica ainda domina, mas a eólica se torna a segunda maior contribuinte, e a biomassa se mantém alta. As fontes renováveis como eólica e, em menor grau, solar, embora de baixo carbono, têm uma alta intensidade de materiais e infraestrutura (uso de aço, concreto, minerais e metais raros), o que se reflete na pegada de recurso fóssil/energia.

Para alcançar metas mais ambiciosas, é necessário focar na descarbonização total da matriz, excluindo fontes fósseis. Esse é um ponto que merece atenção, especialmente a respeito do pico sazonal e aumento da demanda energética, já que, ainda que a presença dessas fontes diminua, elas ainda contribuem significativamente para o impacto climático e energético.

#### *4.4.3 Impacto ambiental anual do consumo de eletricidade para resfriamento*

Para a avaliação dos impactos ambientais acumulados, adotou-se o cenário conservador de uso contínuo (24h/dia), representando o limite crítico de dependência do resfriamento artificial. Esta seção detalha a Avaliação Dinâmica do Impacto do Ciclo de Vida (ADICV) das habitações para o período de 51 anos (2015-2065), utilizando o metro quadrado (m<sup>2</sup>) como unidade funcional para todos os indicadores de impacto (Figura 42).

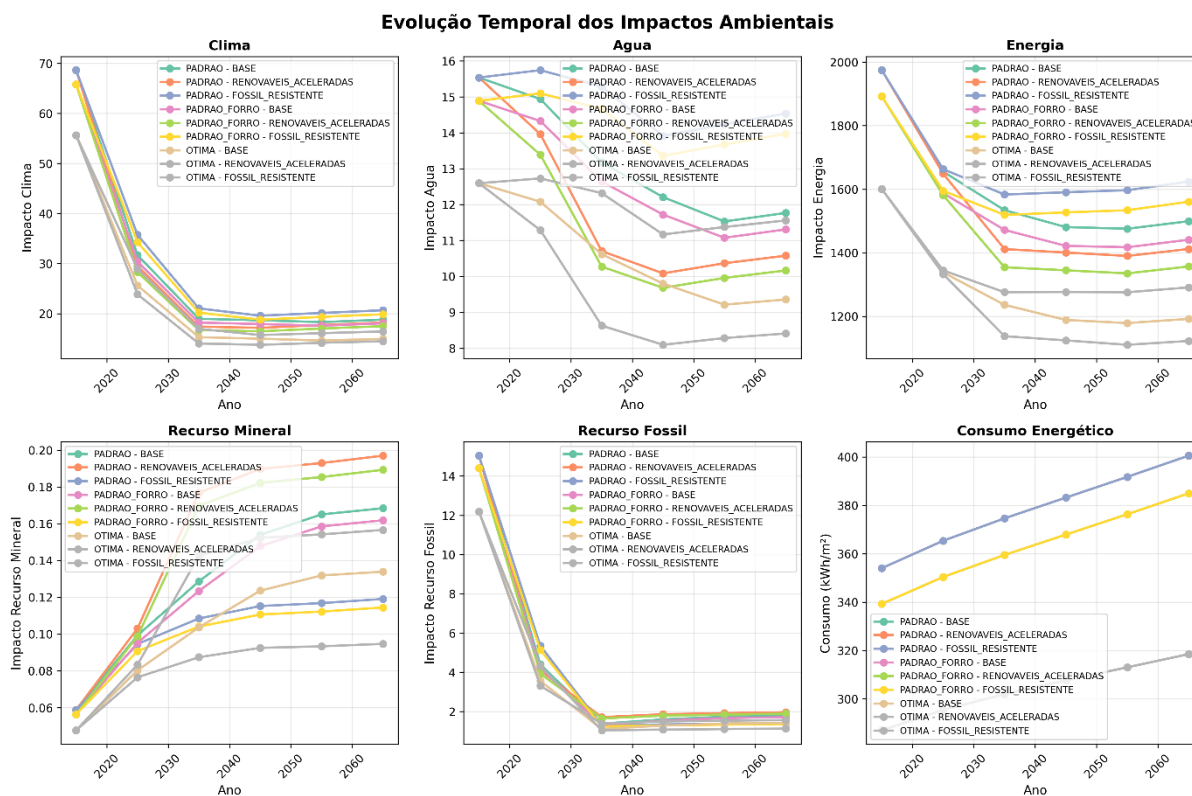
A análise da evolução temporal dos impactos ambientais revela um aspecto relevante para a discussão sobre adaptação climática em países com diferentes matrizes energéticas. Observa-se que, no contexto brasileiro, o aumento progressivo do consumo de eletricidade para climatização (que é uma resposta direta ao aquecimento global) apresenta trajetórias de impacto diferenciadas conforme o cenário de transição energética adotado.

No cenário de Renováveis Aceleradas, apesar do aumento no consumo elétrico, os impactos nas categorias de Mudanças Climáticas e Recursos Fósseis demonstram tendência decrescente após 2040, evidenciando que uma matriz elétrica progressivamente mais limpa pode efetivamente mitigar os impactos ambientais mesmo com demanda crescente.

Este resultado contrasta com o que seria esperado em países dependentes de termelétricas a carvão ou gás natural, onde o aumento da demanda por resfriamento criaria um ciclo de retroalimentação, onde um maior consumo elétrico, geraria mais emissões de GEE, que promovem um maior aquecimento do ambiente (efeito estufa) e que resulta em uma maior necessidade de resfriamento. No caso brasileiro, a predominância de fontes renováveis permite

que o aumento da demanda energética para adaptação climática não resulte em amplificação proporcional dos impactos ambientais, especialmente quando políticas de transição energética sustentável são implementadas.

Figura 42: Evolução temporal dos impactos ambientais por m<sup>2</sup> de área construída



Os resultados acumulados por equivalente funcional (m<sup>2</sup>) são destacados na Tabela 16 para os três cenários de mudança na matriz elétrica: base, fóssil\_resistente e renováveis\_aveleradas, para cada tipo de habitação analisada. A configuração ótima demonstra reduções consistentes de aproximadamente 24% em todos os impactos ambientais comparada à casa padrão, confirmando que as melhorias na envoltória proporcionam benefícios ambientais proporcionais à redução do consumo energético. Mesmo a casa padrão com forro no cenário de Renováveis Aceleradas apresenta impactos climáticos menores (+14,6%) que a configuração ótima no cenário Fóssil Resistente, demonstrando que a descarbonização da matriz energética pode compensar parcialmente deficiências construtivas, embora não substitua a importância de melhorias na envoltória.

O cenário de Renováveis Aceleradas apresenta reduções significativas nos impactos relacionados ao clima (-3,7%) e água (-10%), porém com aumentos moderados em recursos minerais (+18,6%), refletindo a demanda material das tecnologias renováveis. Inversamente, o

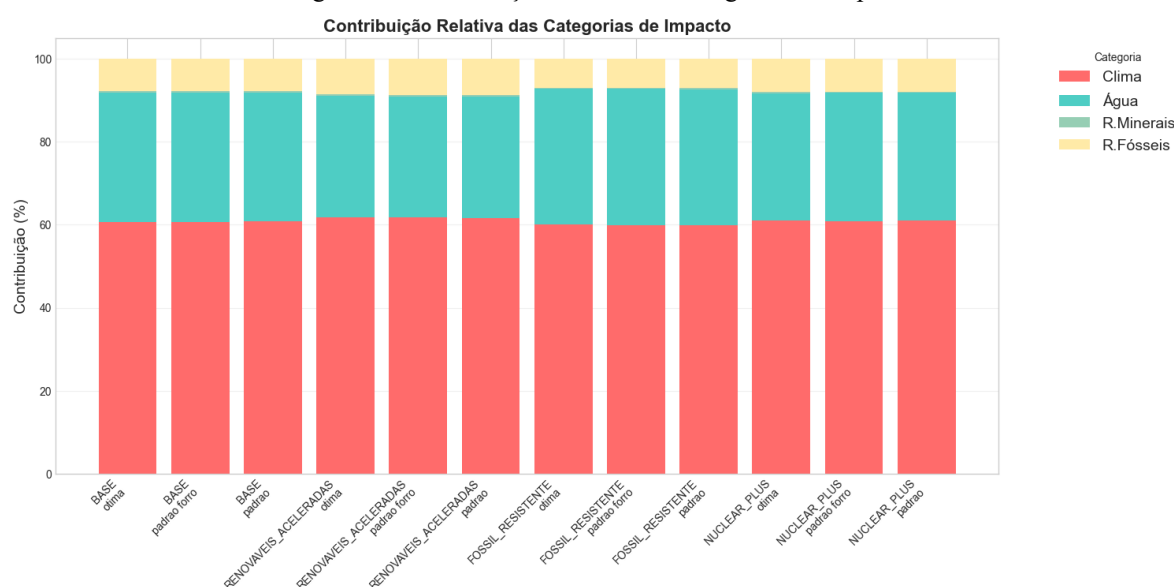
cenário Fóssil Resistente intensifica os impactos climáticos (+6,1%) e hídricos (+12,7%), evidenciando a vulnerabilidade ambiental da dependência de combustíveis fósseis.

Tabela 16: Impactos ambientais acumulados por m<sup>2</sup> (2015-2065)

|            | Cenário                  | Clima<br>(kgCO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup> ) | Escassez<br>hídrica<br>(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ) | Demanda de<br>Energia<br>(MJ/m <sup>2</sup> ) | Escassez<br>mineral<br>(kgCu-eq/m <sup>2</sup> ) | Escassez fóssil<br>(kg oil-eq/m <sup>2</sup> ) |
|------------|--------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Padrão     | Base                     | 175,01                                           | 79,15                                                    | 9619,39                                       | 0,77                                             | 25,94                                          |
|            | Fóssil resistente        | 185,77                                           | 89,25                                                    | 10031,57                                      | 0,61                                             | 25,84                                          |
|            | Renováveis<br>aceleradas | 168,58                                           | 71,23                                                    | 9237,41                                       | 0,92                                             | 26,60                                          |
| Padrão com | Base                     | 167,88                                           | 75,96                                                    | 9231,47                                       | 0,74                                             | 24,87                                          |
|            | Fóssil resistente        | 178,21                                           | 85,65                                                    | 9627,35                                       | 0,59                                             | 24,78                                          |
|            | Renováveis<br>aceleradas | 161,71                                           | 68,35                                                    | 8864,68                                       | 0,88                                             | 25,51                                          |
| Ótima      | Base                     | 141,06                                           | 63,66                                                    | 7735,14                                       | 0,62                                             | 20,95                                          |
|            | Fóssil resistente        | 149,71                                           | 71,74                                                    | 8064,83                                       | 0,49                                             | 20,88                                          |
|            | Renováveis<br>aceleradas | 135,89                                           | 57,30                                                    | 7429,06                                       | 0,74                                             | 21,48                                          |

Ao traduzir a demanda de resfriamento em pressões ambientais, observa-se que o impacto é dominado pelas categorias de Clima e Água (Figura 43), que juntas respondem por mais de 90% da pegada total, refletindo a alta intensidade hídrica da matriz elétrica nacional.

Figura 43: Contribuição relativa das categorias de impacto

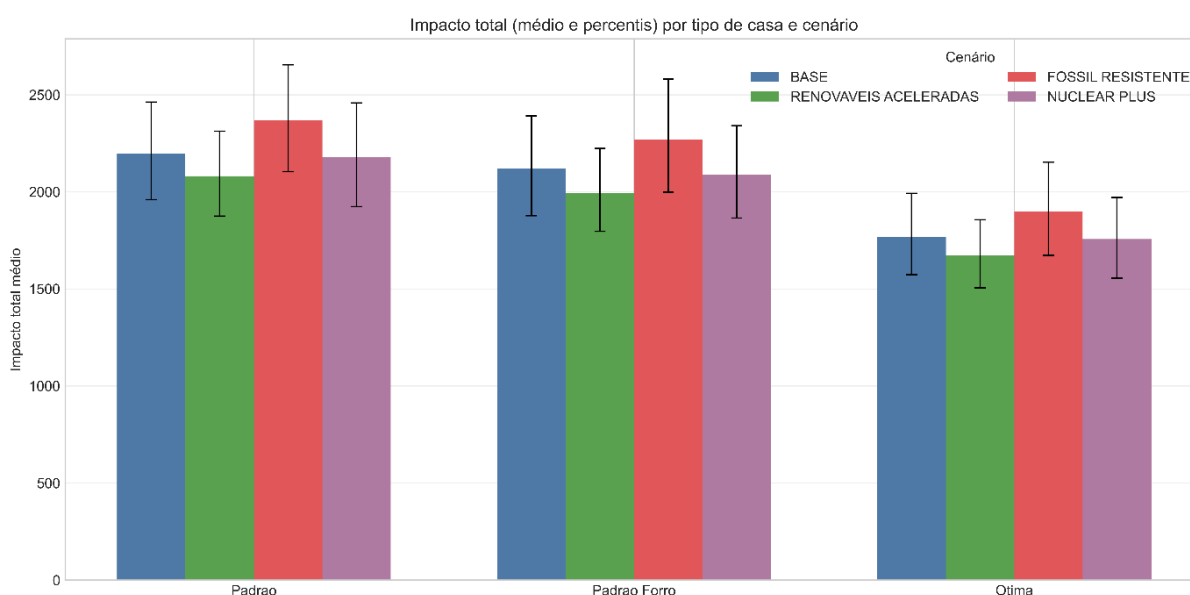


No cenário Fóssil Resistente, é possível perceber uma ligeira elevação da barra amarela (Recursos Fósseis). Isso corrobora com análise anterior que a persistência de fontes térmicas

(gás natural, carvão) nesse cenário, mesmo que em menor proporção, aumenta a contribuição para o impacto de Recursos Fósseis, contrastando com os outros cenários mais limpos.

O gráfico apresentado na Figura 44 detalha a contribuição de cada tipo de habitação para os impactos, explorando como as mudanças na matriz elétrica e na eficiência da envoltória influenciam a pegada ambiental ao longo do tempo. A solução ótima reduziu entre 18 e 20% no valor de impacto em todas as categorias, apenas pela otimização da envoltória em relação à solução padrão.

Figura 44: Impacto total por projeto e por cenário

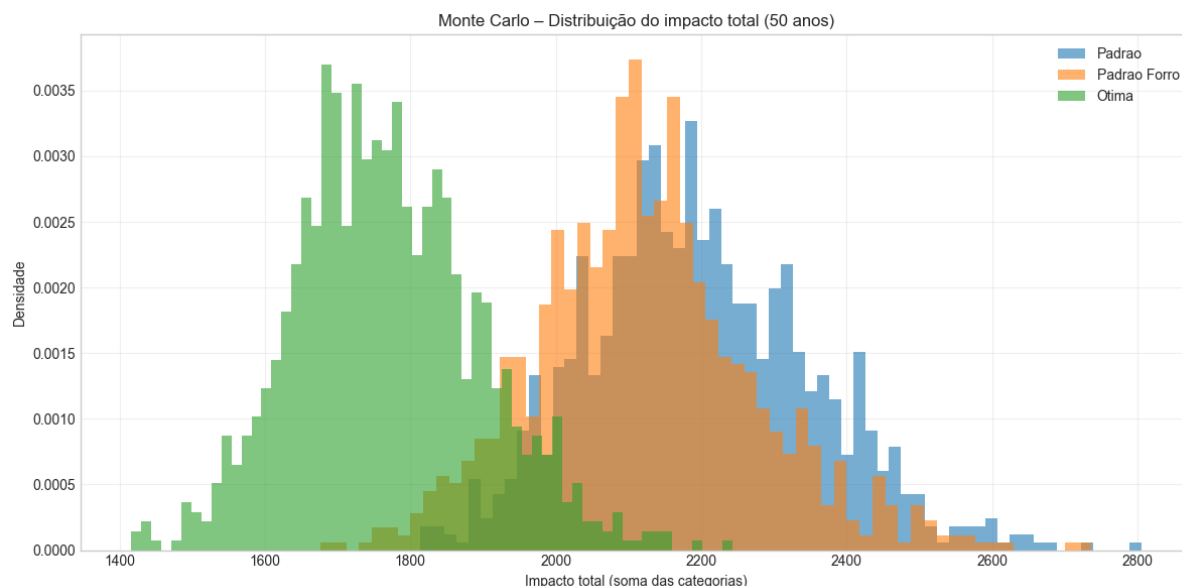


Esse gráfico comprova que a evolução da matriz elétrica tem uma influência direta no impacto ambiental da habitação, e que políticas que favorecem fontes renováveis ou nucleares são mais benéficas. A uniformidade das barras de erro em todos os cenários e tipos de casa sugere que a incerteza nos fatores do modelo (desvios no consumo, na matriz etc.) tem um impacto similar em todos os casos. O que realmente muda os resultados é a política do cenário, e não a variabilidade intrínseca dos dados.

O impacto total acumulado está apresentado na Figura 45. A distribuição de impacto da Solução Ótima (verde) está integralmente deslocada para a esquerda, cobrindo uma faixa de impacto significativamente menor do que as demais soluções. Estatisticamente, as incertezas inerentes à análise (variação no consumo, na matriz, nos fatores de caracterização) não anulam a eficácia do projeto, pois a otimização arquitetônica é robusta o suficiente para garantir um desempenho ambiental consistentemente superior, independentemente dos ruídos do modelo.

As duas distribuições de solução padrão (azul e laranja) se sobrepõem majoritariamente, indicando que a diferença de desempenho entre elas, embora existente, não é totalmente separável sob as incertezas consideradas.

Figura 45: Distribuição do impacto total nos diferentes tipos de projeto (Monte Carlo)



É possível, portanto, que o projeto Padrão, em um cenário de incerteza favorável (como uma matriz energética mais limpa), apresente um impacto total menor do que o projeto Padrão com forro em um cenário desfavorável. Isso sinaliza um risco no investimento simples de melhoramento da edificação (*retrofit*): a simples adição do forro não garante, em todas as condições futuras, a redução do impacto. Por outro lado, a sobreposição do Padrão com forro com a Solução Ótima é muito pequena (intersecção entre as curvas verde e laranja), reforçando novamente a superioridade da Solução Ótima.

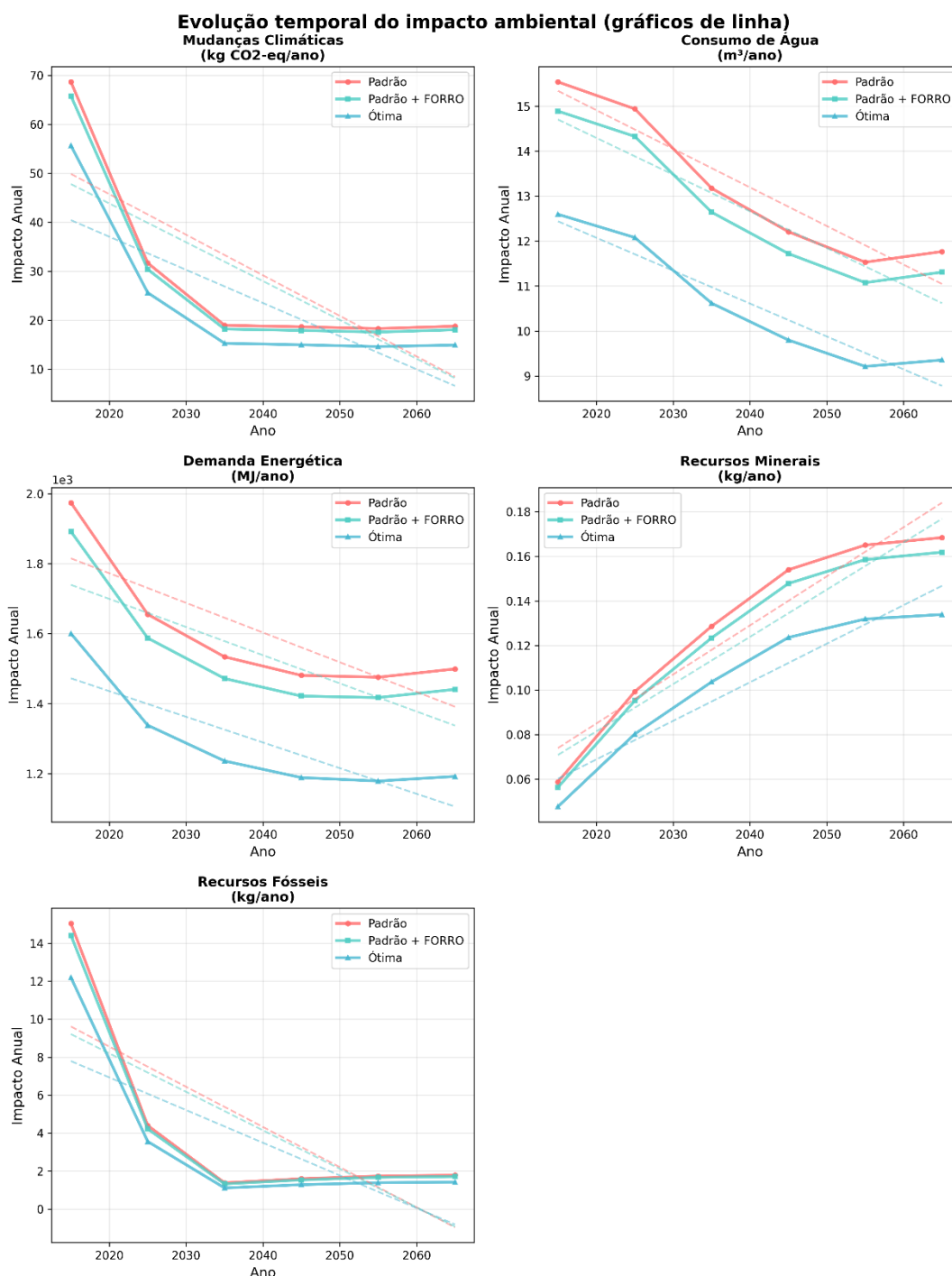
A mudança na envoltória reduz a demanda (desloca a curva para a esquerda) e a matriz limpa reduz a intensidade (achata a curva), isso confirma que a otimização passiva da envoltória é uma estratégia robusta, cujos benefícios ambientais superam as oscilações variáveis da matriz energética ou dos fatores de caracterização de impacto. As escolhas de projeto e de cenários políticos são, na verdade, combinações para minimizar o impacto ambiental a longo prazo, favorecendo conforto para o usuário.

Em escala urbana, a aplicação da Solução Ótima nas 4.000 unidades do Conjunto Jacinta Andrade mitigaria, em 51 anos, a emissão de 4.800 toneladas de CO<sub>2</sub>-eq e o consumo de 2,3 milhões de m<sup>3</sup> de água (refletindo a alta intensidade hídrica da matriz brasileira). Esses valores evidenciam que a eficiência da envoltória em conjuntos habitacionais de grande porte

transcende a melhoria técnica individual, configurando-se como uma estratégia de mitigação climática em escala municipal e de gestão de recursos em regiões semiáridas.

A evolução temporal por categorias de impacto está apresentada na Figura 46.

Figura 46: Evolução temporal dos impactos ambientais na vida útil da edificação

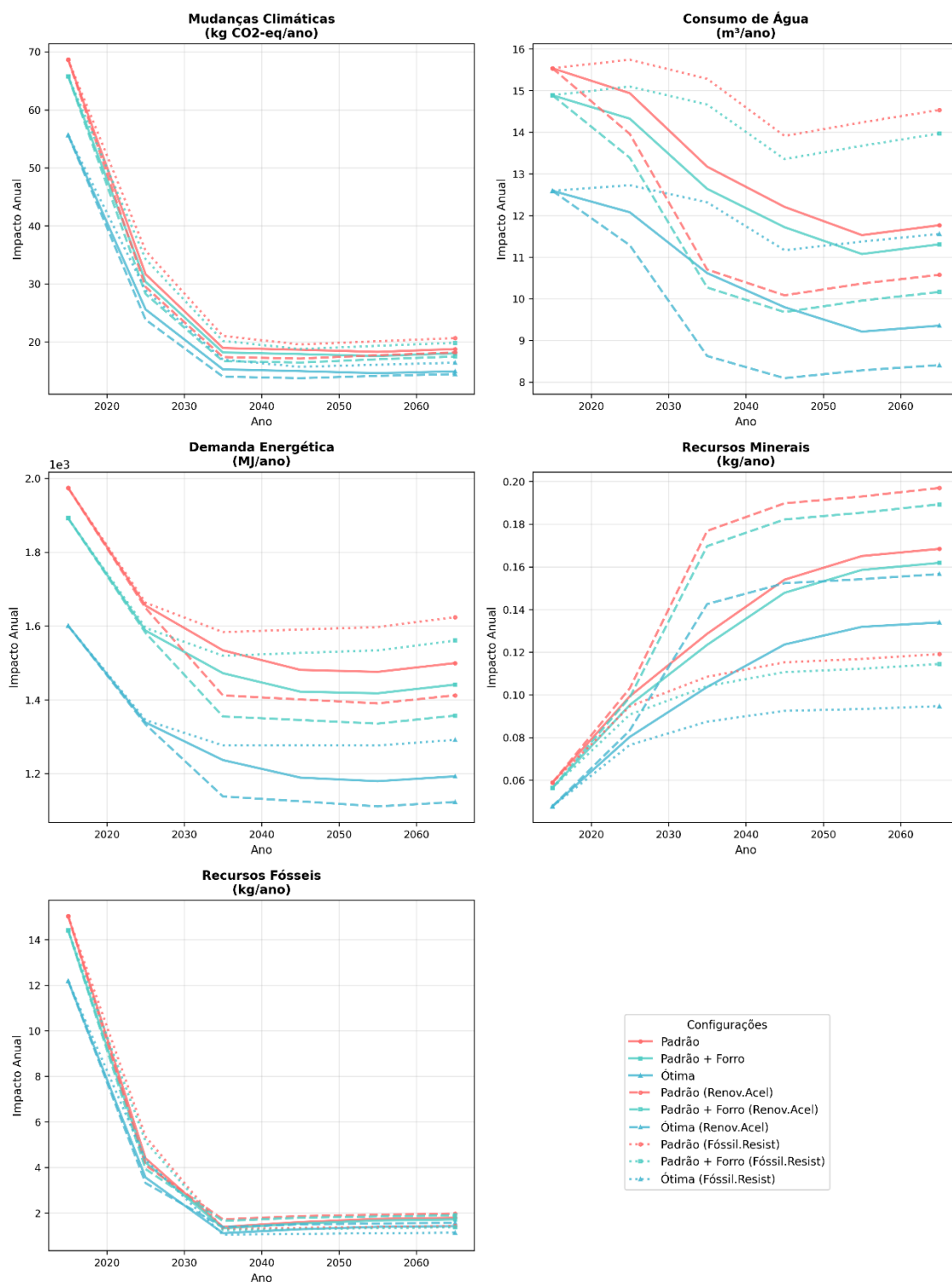


A curva de impacto ambiental de uma edificação não é uma linha reta, como apresentado nas linhas de tendência (linha tracejada) e são sensíveis às mudanças da matriz elétrica. No

gráfico, é possível perceber como um mesmo tipo de casa responde de forma variada a diferentes futuros energéticos.

Para verificar melhor a sensibilidade dos cenários políticos nas decisões de projeto (Figura 47), o ideal é comparar na mesma imagem a curva de impacto para diferentes cenários. Nos gráficos, observa-se os cenários base, fóssil resistente e renováveis aceleradas.

Figura 47: Evolução temporal dos impactos ambientais e comparação por cenários

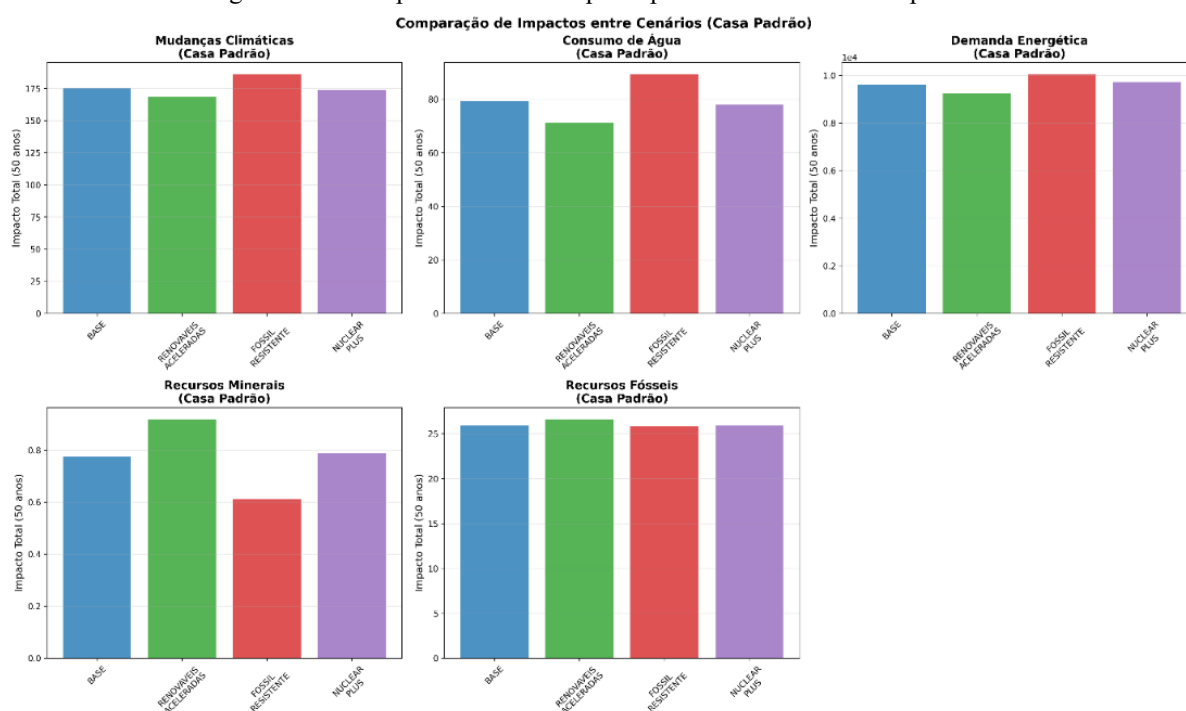


Em várias categorias de impacto, é possível ver a linha da Solução Ótima em um cenário desfavorável cruzar a linha da Padrão com forro em um cenário favorável. Isso demonstra que a solução ótima não é estática e depende de múltiplos fatores variáveis e futuros. Sem o acompanhamento de políticas energéticas, mesmo o melhor projeto perde a sua vantagem ambiental.

#### 4.4.4 Implicações para as Habitações de Interesse Social (HIS)

A Figura 48 apresenta o comportamento do impacto ambiental nos diferentes cenários políticos para a casa padrão, como foi entregue para o usuário. Os resultados das casas padrão com forro e solução ótima estão apresentadas no Apêndice C.

Figura 48: O comportamento do impacto para diferentes cenários políticos



Para a categoria **Escassez de recursos**, observa-se que o cenário Renováveis Aceleradas (verde) apresenta o maior impacto em Recursos Minerais. Uma discussão anterior deve ser retomada: um futuro com muita energia eólica e solar (Renováveis Aceleradas) é ótimo para o clima, mas exige um investimento inicial maior em infraestrutura e materiais, o que se reflete no aumento da pegada de recursos minerais. Além disso, temas como descomissionamento e destinação correta de resíduos no pós-uso estão ganhando força nas discussões acerca de fontes renováveis.

A categoria **Água** demonstra grande sensibilidade às decisões políticas do mix elétrico. O cenário Fóssil Resistente (vermelho), que mantém uma alta dependência da hidrelétrica, geralmente tem o maior consumo de água em comparação com os cenários renováveis. A escassez de água é um risco não-climático que é exacerbado pela manutenção de políticas energéticas que dependem de usinas hidrelétricas de grande reservatório, ligando as políticas energéticas à vulnerabilidade hídrica do país.

Esta seção contextualiza os impactos ambientais identificados na escala do conjunto habitacional real onde as análises foram conduzidas: um empreendimento de 4.000 unidades em Teresina-PI, representativo dos grandes conjuntos de HIS construídos no Brasil nas últimas duas décadas. A transposição dos resultados unitários (por m<sup>2</sup>) para a escala territorial revela que as 4.000 habitações funcionam, coletivamente, como um sistema ambiental distribuído de magnitude comparável a bairros, dentro de infraestruturas urbanas convencionais.

Ao longo de 51 anos, o conjunto habitacional demandará entre 11,4 milhões de m<sup>3</sup> (padrão) e 9,2 milhões de m<sup>3</sup> (ótima) de recursos hídricos indiretos através da geração hidrelétrica. As emissões climáticas acumuladas variam entre 25.200 toneladas (padrão) e 20.400 toneladas de CO<sub>2</sub>-eq (ótima), posicionando o conjunto na mesma ordem de grandeza de emissões de frotas de transporte público de cidades médias<sup>6</sup>.

A multiplicação dos resultados por 4.000 unidades demonstra que decisões de projeto em HIS incidem sobre a capacidade de indicadores de saúde pública e financeira local. Ao reduzir a dependência de climatização artificial e, consequentemente, o valor das faturas de energia, o projeto construtivo atua como uma estratégia de manutenção da acessibilidade econômica habitacional e de prevenção a patologias relacionadas ao desconforto térmico.

#### 4.4.5 Discussão

A relevância prática desta pesquisa não está restrita à quantificação dos impactos de habitações isoladas, estabelecendo uma conexão direta entre o desempenho microclimático em Teresina e o direcionamento da política energética nacional. Os resultados demonstram que a eficácia da mitigação ambiental em projetos de HIS não é estática, mas uma variável dependente da trajetória da matriz elétrica brasileira.

---

<sup>6</sup> Considerando 1 ônibus que transporta 70 passageiros por 100 km e emite 126 kg CO<sub>2</sub> ([fonte](#)) e uma cidade média com 100 mil habitantes.

O principal achado deste estudo é a prova de que a otimização arquitetônica é a defesa mais robusta contra o risco ambiental futuro. A Solução Ótima proposta alcança uma redução de quase 20% no impacto total acumulado em todas as categorias. Essa mitigação, consistente em todos os cenários de incerteza, valida a premissa de que o investimento em *design* passivo e eficiência de envoltória deve ser a prioridade política imediata (Pannier *et al.*, 2021; Rosse Caldas *et al.*, 2020; Usman; Frey, 2021).

Contudo, os resultados do cenário Fóssil Resistente revelaram um alerta: embora um projeto construtivo ótimo garanta a menor pegada, a persistência de fontes poluentes na matriz eleva o custo ambiental de toda a pegada de carbono e recursos, diminuindo o benefício percentual do esforço local. Priorizar fontes fósseis representa um retrocesso em relação à transição energética.

A análise dinâmica da pegada ambiental deve ser integrada às diretrizes de planejamento do setor. Os resultados estabelecem alguns pontos de relevância para os órgãos reguladores, a serem discutidos a seguir.

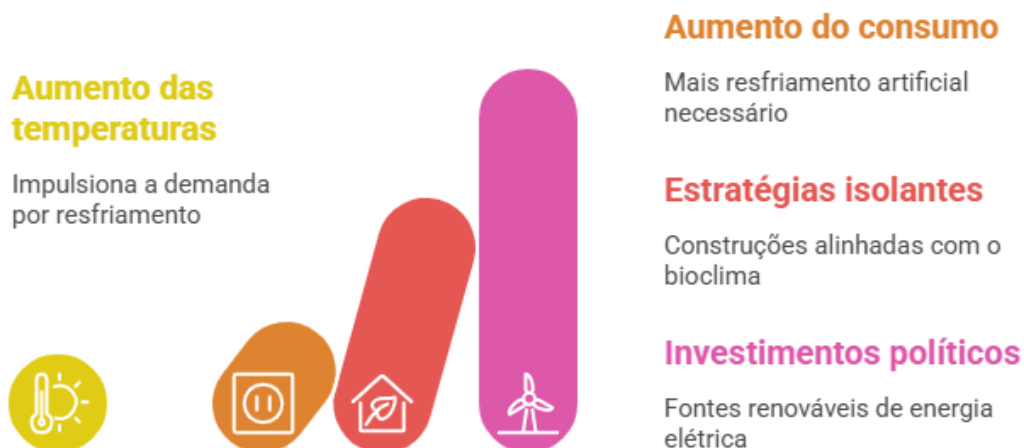
A alta dominância da categoria água (escassez hídrica) na pegada, mesmo em cenários de alta renovabilidade, aponta um conflito direto com os objetivos de planejamento, como os estabelecidos no PNE 2050. Isso sinaliza que o avanço das energias renováveis deve focar em fontes de baixo consumo hídrico (Solar e Eólica) para desvincular a pegada da HIS do risco de seca e da pressão sobre reservatórios.

Sem o incentivo de políticas de descarbonização acelerada (cenário Renovável Acelerado), o impacto ambiental de uma casa com *design* padrão hoje pode ser mais alto em 2065 do que se houvesse a adesão total à solução ótima. É uma espécie de liberdade permitida ao usuário vivenciar um conforto térmico necessário diante do aumento das temperaturas externas e inerente aumento do uso de condicionadores de ar. Em suma, o aumento das temperaturas provoca aumento do consumo para resfriamento artificial e, para lidar com as consequências do aquecimento global, tem-se duas soluções que, se e quando combinadas, surtem um efeito melhor: i) estratégias construtivas isolantes e alinhadas com o bioclima da região; e ii) cenários políticos com investimentos em fontes renováveis para a geração de energia elétrica. O encadeamento de estratégias provocados pelo aumento de temperatura está apresentado na Figura 49.

O potencial de mitigação comprovado pela Solução Ótima corrobora a eficácia de instrumentos normativos de eficiência energética, como a Etiquetagem de Edifícios (BRASIL, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços, 2022), e reforça a necessidade

de sua adoção obrigatória em programas de HIS para garantir que o *design* otimizado se torne o padrão mínimo.

Figura 49: Encadeamento de estratégias para resfriamento artificial em edificações



Em última análise, o desempenho ambiental de projetos de HIS em Teresina atua como um termômetro da política energética nacional: a otimização da envoltória oferece o benefício imediato, mas apenas uma transição energética acelerada e consistente garante o máximo de segurança ambiental para as gerações futuras. Além disso, o impacto da crise climática é muito maior no sul global, onde estratégias construtivas podem ser grandes aliadas.

#### 4.5 Posicionamento metodológico da ADCV-edf: transparência, escopo e modelagem de cenários

A comparação direta com os estudos previamente publicados sobre Avaliação Dinâmica do Ciclo de Vida aplicada a edificações (ADCV-edf) é limitada, uma vez que os resultados frequentemente são apresentados em formato gráfico, dificultando a extração de dados quantitativos comparáveis. No entanto, essas comparações ainda podem ser viabilizadas por meio de outras estratégias. A Tabela 17 resume os estudos que aplicaram a abordagem de ADCV-edf utilizando simulações termoenergéticas para a etapa de inventário dinâmico.

Dentre os estudos analisados, apenas Phillips; Fannon; Eckelman (2022) utilizaram o *software* EnergyPlus™ em sua configuração original. A adoção desse *software*, especialmente quando associada à automação via *scripts*, pode facilitar a geração de múltiplos cenários, ampliando o escopo amostral das análises. Observa-se ainda que a maioria das pesquisas é voltada para edificações residenciais multifamiliares.

Foram selecionados apenas as pesquisas que incorporaram explicitamente a variável dinâmica da mudança climática em suas análises, dentro do referencial teórico da ADCV-edf,

o que se aplica apenas aos estudos de Phillips; Fannon; Eckelman (2022), Rosse Caldas *et al.* (2020) e González Mahecha *et al.* (2020). O referencial é também limitado quanto aos cenários analisados, o que ressalta a baixa representatividade das análises realizadas.

Tabela 17: Panorama teórico-científico de ADCV-edf e simulações termoenergéticas

| Referência                            | Software de BPS                      | Tipo de Edificação                      | Variável dinâmica |                 | Cenários | Projeção de dados futuros |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------|-----------------|----------|---------------------------|
|                                       |                                      |                                         | Mudança climática | Matriz elétrica |          |                           |
| Apostolopoulos <i>et al.</i> (2023)   | INTEMA.building                      | Residencial multifamiliar               |                   |                 | 1        | -                         |
| Phillips; Fannon; Eckelman (2022)     | EnergyPlus                           | Comercial                               | x                 | x               | 9        | Metas oficiais            |
| Vahidi <i>et al.</i> (2021)           | Building Energy Optimization (BEopt) | Residencial multifamiliar e unifamiliar |                   | x               | 84       | Metas oficiais            |
| Rosse Caldas <i>et al.</i> (2020)     | DesignBuilder                        | Residencial unifamiliar                 | x                 | x               | 2        | Ferramenta computacional  |
| González Mahecha <i>et al.</i> (2020) | DesignBuilder                        | Residencial unifamiliar                 | x                 | x               | 6        | Ferramenta computacional  |
| Stephan e Stephan (2020)              | DEROB-LTH                            | Residencial multifamiliar               |                   | x               | 2        | Estimativa (cenários)     |
| Piccardo <i>et al.</i> (2020)         | VIP-Energy                           | Residencial multifamiliar               |                   | x               | 18       | -                         |
| Negishi <i>et al.</i> (2019)          | COMETH                               | Residencial multifamiliar               |                   | x               | 6        | Metas oficiais            |
| Negishi <i>et al.</i> (2018)          | COMETH                               | -                                       |                   | x               | 4        | Metas oficiais            |
| Gimeno-Frontera <i>et al.</i> (2018)  | DesignBuilder                        | Comercial                               |                   |                 | 4        | Metas oficiais            |
| Wu <i>et al.</i> (2017)               | DeST                                 | Residencial multifamiliar e comercial   |                   |                 | 26       | Metas oficiais            |
| Collinge <i>et al.</i> (2012b)        | DesignBuilder                        | Comercial                               |                   |                 | 1        | Dados secundários         |

De modo geral, os estudos tendem a considerar apenas um cenário fixo de análise (como observado em Collinge *et al.*, 2012b; Gimeno-Frontera *et al.*, 2018; Negishi *et al.*, 2019; Stephan; Stephan, 2020; Vahidi *et al.*, 2021). No entanto, quando o escopo é ampliado para incluir diferentes técnicas construtivas ou localizações geográficas distintas, observa-se um aumento expressivo no número de cenários avaliados (Apostolopoulos *et al.*, 2023; González

Mahecha *et al.*, 2020; Phillips; Fannon; Eckelman, 2022; Piccardo; Dodoo; Gustavsson, 2020; Rosse Caldas *et al.*, 2020; Wu; Peng; Lin, 2017).

Adicionalmente, observa-se que as projeções de dados futuros adotadas nesses estudos são comumente baseadas em metas oficiais do governo ou em modelos estatísticos convencionais. Em contraste, esta tese propõe uma abordagem inovadora ao utilizar projeções matemáticas empregadas em uma base de dados extensa (composta por mais de 120 mil amostras e cerca de 10 mil cenários simulados para a edificação analisada), aumentando substancialmente a representatividade e a robustez dos resultados obtidos.

## 5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa propôs uma abordagem integrada para a avaliação ambiental do resfriamento de edificações em climas tropicais, com foco especial na realidade brasileira. Por meio da combinação entre simulações termoenergéticas paramétricas, métodos de apoio multicritério à decisão, modelagem preditiva com redes neurais e a projeção dinâmica de impactos ambientais, foi possível explorar os efeitos combinados das decisões de projeto e das políticas energéticas sobre o desempenho ambiental futuro de edificações.

O consumo de energia aumentou 14% entre 2015 e 2065 para o cenário de operação contínua do sistema de resfriamento, reforçando a importância de avaliações dinâmicas em comparação com abordagens estáticas que não capturam as variações climáticas ao longo do tempo. No contexto brasileiro de habitação social, o consumo total de eletricidade para resfriamento artificial pode chegar a 18.000 kWh/m<sup>2</sup> ao longo da vida útil da edificação.

Os resultados evidenciam que as habitações sociais convencionais apresentam desempenho térmico insatisfatório em climas quentes, com maior variabilidade térmica interna e dependência de resfriamento artificial. Essa constatação reforça a necessidade de políticas habitacionais que considerem estratégias passivas de conforto térmico já na fase de projeto, conforme demonstrado pela análise TOPSIS, que identificou soluções construtivas com desempenho superior e menores impactos ambientais.

A automação de simulações paramétricas foi essencial, pois permitiu a análise eficiente e a geração de uma base amostral substancial para cenários futuros, com menor tempo computacional. Essa escala de análise, que abrange as interações entre projeções climáticas, materiais e padrões operacionais, confere representatividade estatística aos resultados, mitigando vieses observados em análises com escopo limitado.

A solução construtiva selecionada por meio da técnica TOPSIS apresentou, além de melhor desempenho térmico e energético, menores impactos ambientais ao longo do tempo. Isso reforça a ideia de que decisões bem fundamentadas na etapa de projeto têm efeitos duradouros e relevantes sobre a sustentabilidade das edificações. Mas, os cenários políticos devem estar alinhados com o arcabouço sustentável de projeções energéticas futuras. A solução padrão em cenários políticos mais sustentáveis apresentou menor impacto ambiental que a solução ótima em cenários desfavoráveis.

A aplicação da Avaliação Dinâmica do Ciclo de Vida (ADCV) (para resfriamento artificial da habitação) demonstrou que a evolução da matriz elétrica nacional modifica substancialmente a pegada ambiental ao longo do tempo. Enquanto cenários renováveis

atenuam consideravelmente os impactos, a manutenção de fontes fósseis compromete e anula os avanços ambientais desejados. Em outras palavras: não há edifício sustentável em uma matriz elétrica insustentável. A ADCV prospectiva dinâmica permite revelar e quantificar essa interdependência de forma explícita.

A análise do conjunto habitacional de 4.000 unidades em Teresina ilustra como a agregação espacial de HIS transforma decisões de projeto em fenômenos ambientais de escala territorial. Programas habitacionais de larga escala não são apenas políticas sociais, mas também intervenções ambientais territoriais que influenciam balanços de carbono municipais, segurança hídrica regional e metabolismo urbano. A ausência de otimização energética em conjuntos dessa natureza representa, portanto, uma externalidade ambiental evitável através de melhorias de projeto com custos incrementais relativamente modestos.

Com base nos achados, recomenda-se:

1. **Priorização de investimentos em soluções construtivas otimizadas** desde a concepção dos conjuntos habitacionais, maximizando a eficácia da mitigação por unidade de investimento;
2. **Aceleração da transição para fontes renováveis variáveis (solar e eólica)**, acompanhada de estratégias de gestão da demanda por recursos minerais através de economias circulares e desenvolvimento de cadeias de reciclagem;
3. **Não investir em energia nuclear**, dado que as projeções indicam participação aproximadamente nula em 2065, independentemente de incentivos políticos, sugerindo inviabilidade econômica frente às alternativas renováveis, possivelmente pela baixa atuação histórica desta fonte no Brasil;
4. **Desenvolvimento de mecanismos de financiamento** que reconheçam o benefício ambiental de longo prazo de habitações com alto desempenho energético, considerando não apenas emissões de carbono, mas também pressões hídricas e minerais;
5. **Monitoramento contínuo dos indicadores de diversificação energética (HHI) e participação de renováveis variáveis (VRE)** como métricas de resiliência e sustentabilidade da matriz elétrica.

A variável dinâmica aumento temperatura externa é relevante em um cenário de mudanças climáticas, pois está diretamente relacionada com o consumo de eletricidade para resfriamento. Do mesmo modo, a variação da matriz elétrica é uma pauta que influencia diretamente a atenuação dos impactos das demandas do consumo residencial de eletricidade, estando suscetível a decisões políticas.

## 5.1 Contribuições e inovações

A principal contribuição científica deste trabalho reside na integração metodológica entre ferramentas computacionais e abordagens preditivas, aplicadas a um problema ambiental concreto e de alta relevância: o impacto do resfriamento artificial de edificações em climas tropicais.

Entre as inovações destacam-se:

- O uso de simulações paramétricas detalhadas para gerar uma base sólida de desempenho térmico e energético;
- A aplicação da tomada de decisão multicritério para seleção da solução construtiva mais equilibrada;
- A construção de um inventário e avaliação de impacto dinâmicos prospectivos, integrando projeções climáticas e a modelagem da matriz elétrica nacional considerando múltiplos cenários político-energéticos.

Essa abordagem interdisciplinar permite responder de forma prospectiva a perguntas complexas, como: *qual será o impacto ambiental futuro de uma decisão construtiva tomada hoje?* ou *de que maneira políticas públicas alteram o desempenho ambiental de um mesmo edifício ao longo do tempo?* Tais respostas são valiosas não apenas no campo acadêmico, mas também para o planejamento urbano, a formulação de políticas públicas e a transição energética.

## 5.2 Limitações e sugestões para trabalhos futuros

Apesar dos avanços, este trabalho apresenta algumas limitações metodológicas que abrem espaço para pesquisas futuras. A principal delas refere-se ao foco exclusivo na fase operacional da edificação (módulo B6), excluindo os impactos associados à produção e fim de vida dos materiais. Ainda que a escolha metodológica seja justificada pelo peso do consumo energético em climas quentes, uma abordagem completa de ADCV complementa e enriquece a análise.

Outra limitação diz respeito a inventários de ciclo de vida no âmbito da modelagem de uma ACV. A avaliação de impacto foi baseada em fatores de caracterização médios por fonte energética e, portanto, assume homogeneidade de impactos dentro de uma mesma categoria, o que pode suavizar particularidades regionais importantes.

Como sugestões para trabalhos futuros, apresenta-se:

- Utilização de outros cenários para simulação paramétrica em diferentes tipos de edificações;
- Inclusão de novas variáveis externas na projeção da matriz elétrica, como pressão por descarbonização, integração regional de sistemas e disponibilidade hídrica;
- Utilização de fatores de caracterização dinâmicos;
- Aplicação do modelo em edificações reais, com validação empírica do consumo previsto e dos impactos ambientais associados; e
- Utilização de técnicas complementares, como otimização multicritério e algoritmos evolucionários, para seleção de soluções construtivas mais robustas.

### 5.3 Validação das hipóteses

A validação das três hipóteses desta pesquisa consolida contribuições fundamentais para o planejamento sustentável de habitações sociais em contexto de mudanças climáticas. A confirmação de que soluções construtivas otimizadas reduzem em 24,5% tanto o consumo energético quanto os impactos ambientais associados estabelece parâmetros quantitativos para políticas habitacionais baseadas em evidências. A demonstração de que a evolução da matriz elétrica altera substancialmente os resultados ambientais (com variações de até 12,7% entre cenários) legitima a ADCV como ferramenta indispensável para avaliações prospectivas, superando as limitações das análises estáticas convencionais.

Mais significativamente, a comprovação de que investimentos em fontes renováveis compensam o aumento de 14% na demanda por resfriamento decorrente do aquecimento global revela uma sinergia crítica: enquanto cenários de renováveis aceleradas mitigam progressivamente os impactos apesar do aumento de consumo, matrizes baseadas em combustíveis fósseis criam ciclos de retroalimentação que amplificam tanto a demanda quanto os impactos ambientais.

Esta interdependência entre eficiência construtiva e transição energética estabelece que a sustentabilidade de habitações sociais brasileiras não pode ser alcançada através de intervenções isoladas, exigindo uma abordagem sistêmica que articule decisões projetuais imediatas com trajetórias de descarbonização de longo prazo. Assim, esta tese demonstra que o enfrentamento dos desafios habitacionais e climáticos do Brasil demanda não apenas edificações termicamente adequadas, mas fundamentalmente uma matriz elétrica que

transforme o inevitável aumento de demanda por climatização em oportunidade de desenvolvimento sustentável, e não em amplificação da crise climática.

## REFERÊNCIAS

- ABDEL-RAHMAN, Wael Salah Mansour. Thermal performance optimization of parametric building envelope based on bio-mimetic inspiration. **Ain Shams Engineering Journal**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 1133–1142, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2090447920301337>. Acesso em: 16 nov. 2024.
- ABDOU, N. *et al.* Prediction and optimization of heating and cooling loads for low energy buildings in Morocco: An application of hybrid machine learning methods. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 61, p. 105332, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710222013389>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- ABNT. **ABNT NBR 15220-2 Desempenho Térmico de Edificações Parte 2: componentes e elementos construtivos das edificações — resistência e transmitância térmica — métodos de cálculo**. [S. l.]: [s. d.], 2005. Disponível em: <http://abntcatalogo.com.br>.
- ABNT. **ABNT NBR 15575 Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais**. [S. l.]: [s. d.], 2021. Disponível em: <http://abntcatalogo.com.br>.
- AGHNIAEY, Sama; LAWRENCE, Thomas M. The impact of increased cooling setpoint temperature during demand response events on occupant thermal comfort in commercial buildings: A review. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 173, p. 19–27, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778817338719>. Acesso em: 18 nov. 2024.
- ALOTAIBI, Badr Saad *et al.* Life Cycle Assessment of Embodied Carbon and Strategies for Decarbonization of a High-Rise Residential Building. **Buildings**, [s. l.], v. 12, n. 8, p. 1203, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/8/1203>. Acesso em: 27 jun. 2024.
- APOSTOLOPOULOS, Vasilis *et al.* An integrated life cycle assessment and life cycle costing approach towards sustainable building renovation via a dynamic online tool. **Applied Energy**, [s. l.], v. 334, p. 120710, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261923000740>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- ARBULU, Markel; OREGI, Xabat; ETXEPARE, Lauren. Parametric simulation tool for the enviro-economic evaluation of energy renovation strategies in residential buildings with life cycle thinking: PARARENOVATE-LCT. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 312, p. 114182, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778824002986>. Acesso em: 16 nov. 2024.
- AROWOIYA, Victor Adetunji; MOEHLER, Robert Christian; FANG, Yihai. Digital twin technology for thermal comfort and energy efficiency in buildings: A state-of-the-art and future directions. **Energy and Built Environment**, [s. l.], v. 5, n. 5, p. 641–656, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666123323000314>. Acesso em: 12 mar. 2025.
- ASHRAE. **Measurement of energy, demand, and water savings**. [S. l.]: ASHRAE GUIDE, 2014. GUIDELINE. Disponível em: [www.ashrae.org/standards](http://www.ashrae.org/standards). .
- ATMACA, Adem; ATMACA, Nihat. Life cycle energy (LCEA) and carbon dioxide emissions (LCCO2A) assessment of two residential buildings in Gaziantep, Turkey. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 102, p. 417–431, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778815300414>. Acesso em: 27 jun. 2024.

AZARI, Rahman *et al.* Multi-objective optimization of building envelope design for life cycle environmental performance. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 126, p. 524–534, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778816304236>. Acesso em: 25 jun. 2024.

BAC, Ugur; ALALOOSI, Khalid Abdulwahab Mohamed Saed; TURHAN, Cihan. A comprehensive evaluation of the most suitable HVAC system for an industrial building by using a hybrid building energy simulation and multi criteria decision making framework. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 37, p. 102153, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710221000097>. Acesso em: 17 nov. 2024.

BACKES, Jana Gerta; TRAVERSO, Marzia. Application of Life Cycle Sustainability Assessment in the Construction Sector: A Systematic Literature Review. **Processes**, [s. l.], v. 9, n. 7, p. 1248, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/7/1248>. Acesso em: 7 jan. 2025.

BARROS, Natalia Nakamura; RUSCHEL, Regina Coeli. Machine learning for whole-building life cycle assessment: A systematic literature review. *In: PROCEEDINGS OF THE 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING IN CIVIL AND BUILDING ENGINEERING: ICCCBE 2020, 2021. Anais [...].* [S. l.]: [s. d.], 2021. p. 109–122.

BERARDI, Umberto; JAFARPUR, Pouriya. Assessing the impact of climate change on building heating and cooling energy demand in Canada. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 121, p. 109681, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136403211930886X>. Acesso em: 23 set. 2024.

BHAVSAR, S. *et al.* Machine learning surrogate of physics-based building-stock simulator for end-use load forecasting. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 296, p. 113395, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778823006254>. Acesso em: 16 nov. 2024.

BRASIL, Ministério das Cidades. Bases de Dados do Programa Minha Casa, Minha Vida. *In: 15 jul. 2024.* Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/habitacao/programa-minha-casa-minha-vida/bases-de-dados-do-programa-minha-casa-minha-vida>. Acesso em: 8 nov. 2024.

BRASIL, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. INMETRO - Programa Brasileiro de Etiquetagem. *In: TABELAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.* 14 jul. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/condicionadores-de-ar>. Acesso em: 8 nov. 2024.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. PROJETEEEE, Projetando Edificações Energeticamente Eficientes. ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS. *In: DESENVOLVIDO PELA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, EM PARCERIA COM: LABEELABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES.* 14 jul. 2022. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteeee/componentes-construtivos/>. Acesso em: 1 set. 2023.

BUYLE, Matthias; BRAET, Johan; AUDENAERT, Amaryllis. Life cycle assessment in the construction sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 26, p.

379–388, 2013. Disponível em:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113002876>. Acesso em: 18 dez. 2024.

CABEZA, Luisa F. *et al.* Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 29, p. 394–416, 2014. Disponível em:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113005777>. Acesso em: 27 jun. 2024.

CALDAS, Lucas Rosse; LIRA, Júlia Santiago De Matos Monteiro; SPOSTO, Rosa Maria. Avaliação do ciclo de vida de habitações de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e painéis pré-moldados de concreto considerando diferentes zonas bioclimáticas. **LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 138–167, 2017. Disponível em: <http://lalca.acv.ibict.br/lalca/article/view/3823>. Acesso em: 25 jun. 2024.

CAO, Xiaodong; DAI, Xilei; LIU, Junjie. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 128, p. 198–213, 2016. Disponível em:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778816305783>. Acesso em: 7 jan. 2025.

CARVALHO, Ilana. **SUSTENTABILIDADE NAS HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL: ANÁLISE DO RESIDENCIAL JACINTA ANDRADE, EM TERESINA, PIAUÍ**. 2018. 144 f. Dissertação - Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente - UFPI, Teresina, 2018. Disponível em: Acesso em: 13 out. 2022.

CECCONI, Fulvio Re; RAMPINI, Luca. Data driven economic scenarios for retrofitting residential buildings in a northern Italian region. 2023. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. [S. l.]: [s. d.], 2023. p. 012113. Disponível em:  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1196/1/012113>. Acesso em: 25 jun. 2024.

CHAU, C.K.; LEUNG, T.M.; NG, W.Y. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. **Applied Energy**, [s. l.], v. 143, p. 395–413, 2015. Disponível em:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626191500029X>. Acesso em: 25 jun. 2024.

CHONG, Adrian; XU, Weili; POH LAM, Khee. Uncertainty Analysis in Building Energy Simulation. A Practical Approach. *In*: 2015 BUILDING SIMULATION CONFERENCE, 2015. **Anais [...]**. [S. l.]: [s. d.], 2015. Disponível em:  
[https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=bs2015\\_2131](https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=bs2015_2131). Acesso em: 16 nov. 2024.

CIROTH, Andreas *et al.* Empirically based uncertainty factors for the pedigree matrix in ecoinvent. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 21, n. 9, p. 1338–1348, 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11367-013-0670-5>. Acesso em: 29 out. 2024.

CIROTH, Andreas *et al.* **Towards a life cycle sustainability assessment: making informed choices on products**. paris: UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2011. Disponível em:  
<https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2011%20-%20Towards%20LCSA.pdf>. Acesso em: 3 out. 2023.

COLLINGE, W. O. *et al.* Dynamic life cycle assessment: framework and application to an institutional building. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 538–552, 2013a.

COLLINGE, William O. *et al.* Dynamic Life Cycle Assessments of a Conventional Green Building and a Net Zero Energy Building: Exploration of Static, Dynamic, Attributional, and Consequential Electricity Grid Models. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 52, n. 19, p. 11429–11438, 2018. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.7b06535>. Acesso em: 25 jun. 2024.

COLLINGE, W. O. *et al.* Indoor environmental quality in a dynamic life cycle assessment framework for whole buildings: Focus on human health chemical impacts. **Building and Environment**, [s. l.], v. 62, p. 182–190, 2013b. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132313000309>. Acesso em: 25 jun. 2024.

COLLINGE, W. O. *et al.* Integrating Indoor environmental quality metrics in a dynamic life cycle assessment framework for buildings. In: 2012 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUSTAINABLE SYSTEMS AND TECHNOLOGY (ISSST 2012), 2012a, Boston, MA. **2012 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST)**. Boston, MA: IEEE, 2012a. p. 1–6. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6227992/>. Acesso em: 25 jun. 2024.

COLLINGE, W. O. *et al.* Measuring whole-building performance with dynamic LCA: a case study of a green university building. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIFE CYCLE ASSESSMENT AND CONSTRUCTION, 2012b, Nantes, France. **Anais [...]**. Nantes, France: RILEM, 2012b. p. 309–317.

COLLINGE, William O. *et al.* Productivity metrics in dynamic LCA for whole buildings: Using a post-occupancy evaluation of energy and indoor environmental quality tradeoffs. **Building and Environment**, [s. l.], v. 82, p. 339–348, 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132314002911>. Acesso em: 25 jun. 2024.

COTA, Daniela Abritta; SILVA, Ana Luiza Aureliano. Programa “Minha Casa, Minha Vida” (Faixa 1) Em São João Del Rei, Mg: Uma Análise Crítica. **Geoiंगा**, [s. l.], v. 8, n. 2, 2016.

CSN EN15804+A2. **Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products**. [S. l.]: European Committee for Standardization (CEN), 2019.

CUÉLLAR-FRANCA, Rosa M.; AZAPAGIC, Adisa. Environmental impacts of the UK residential sector: Life cycle assessment of houses. **Building and Environment**, [s. l.], v. 54, p. 86–99, 2012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132312000443>. Acesso em: 7 jan. 2025.

CUNHA FERREIRA, Luanny Gabriele; KEMENES, Alexandre. A influência dos eventos climáticos extremos na climatologia da planície litorânea piauiense. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 32, p. 634–657, 2023. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/16349>. Acesso em: 16 nov. 2024.

D’AMICO, A. *et al.* Artificial Neural Networks to assess energy and environmental performance of buildings: An Italian case study. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v.

239, p. 117993, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965261932863X>. Acesso em: 25 jun. 2024.

DUPREZ, Sandrine *et al.* Improving life cycle-based exploration methods by coupling sensitivity analysis and metamodels. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 44, p. 70–84, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210670718309818>. Acesso em: 25 jun. 2024.

EKVALL, Tomas. Attributional and Consequential Life Cycle Assessment. In: JOSÉ BASTANTE-CECA, María *et al.* (org.). **Sustainability Assessment at the 21st century**. [S. l.]: IntechOpen, 2020. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/sustainability-assessment-at-the-21st-century/attributional-and-consequential-life-cycle-assessment>. Acesso em: 3 dez. 2025.

EKVALL, Tomas; WEIDEMA, Bo P. System boundaries and input data in consequential life cycle inventory analysis. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 161–171, 2004. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/BF02994190>. Acesso em: 3 dez. 2025.

ELETROBRAS, PROCEL-INFO. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso-ano base 2005**. Rio de Janeiro - RJ - Brasil: Eletrobras, 2007.

ELI, Letícia G.; MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto. How to improve the thermal performance of buildings with one simulation run? The heat exchange index applied to hot climates. **Building and Environment**, [s. l.], v. 258, p. 111606, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132324004487>. Acesso em: 16 nov. 2024.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Dados abertos de consumo mensal e anual de energia elétrica por região. In: 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>. Acesso em: 10 mar. 2025.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia 2050. In: 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em: 10 mar. 2025.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética na edificação**. 2018. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT%20EPE%20030\\_2018\\_18Dez2018.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT%20EPE%20030_2018_18Dez2018.pdf). Acesso em: 3 nov. 2025.

FERNANDES, Gláucia *et al.* Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil. [s. l.], 2023.

FINNVEDEN, Göran *et al.* Recent developments in Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 91, n. 1, p. 1–21, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479709002345>. Acesso em: 3 dez. 2025.

FNAIS, Abdulrahman *et al.* The application of life cycle assessment in buildings: challenges, and directions for future research. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 27, n. 5, p. 627–654, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11367-022-02058-5>. Acesso em: 25 jun. 2024.

FOUQUET, Marine *et al.* Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings: Application to biogenic carbon and global warming assessment. **Building and Environment**, [s. l.], v. 90, p. 51–59, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132315001316>. Acesso em: 25 jun. 2024.

FRANCIS, Ann; THOMAS, Albert. A framework for dynamic life cycle sustainability assessment and policy analysis of built environment through a system dynamics approach. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 76, p. 103521, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210670721007873>. Acesso em: 25 jun. 2024.

FRAPIN, Marie *et al.* Modelling long-term and short-term temporal variation and uncertainty of electricity production in the life cycle assessment of buildings. **Applied Energy**, [s. l.], v. 307, p. 118141, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261921014173>. Acesso em: 25 abr. 2025.

FROSSARD, M; SCHALBART, P; PEUPORTIER, B. Dynamic and consequential LCA aspects in multi-objective optimisation for NZEB design. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s. l.], v. 588, n. 3, p. 032031, 2020. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/588/3/032031>. Acesso em: 3 dez. 2025.

GILANI, Golshid *et al.* An enhanced multi-criteria decision-making approach oriented to sustainability analysis of building facades: A case study of Barcelona. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 54, p. 104630, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S235271022200643X>. Acesso em: 19 nov. 2024.

GIMENO-FRONTERRA, Beatriz *et al.* Sustainability of non-residential buildings and relevance of main environmental impact contributors' variability. A case study of food retail stores buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 94, p. 669–681, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032118304635>. Acesso em: 25 jun. 2024.

GONZÁLEZ MAHECHA, Rosa Esperanza *et al.* Constructive systems for social housing deployment in developing countries: A case study using dynamic life cycle carbon assessment and cost analysis in Brazil. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 227, p. 110395, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778820306678>. Acesso em: 25 jun. 2024.

GUINEE, Jeroen B. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 7, n. 5, p. 311, BF02978897, 2002. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/BF02978897>. Acesso em: 3 dez. 2025.

HAMIDA, Amneh *et al.* Environmental impacts cost assessment model of residential building using an artificial neural network. **Engineering, Construction and Architectural Management**, [s. l.], v. 28, n. 10, p. 3190–3215, 2021. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ECAM-06-2020-0450/full/html>. Acesso em: 25 jun. 2024.

HAN, Zhen *et al.* An interactive multi-criteria decision-making method for building performance design. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 282, p. 112793, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778823000233>. Acesso em: 18 nov. 2024.

HANSEN, Rasmus Nøddegaard *et al.* A systematic review of consequential LCA on buildings: the perspectives and challenges of applications and inventory modelling. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 131–145, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11367-022-02126-w>. Acesso em: 8 out. 2024.

HARKOUSS, Fatima; FARDOUN, Farouk; BIWOLE, Pascal Henry. Passive design optimization of low energy buildings in different climates. **Energy**, [s. l.], v. 165, p. 591–613, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544218317791>. Acesso em: 17 nov. 2024.

HIMMETOĞLU, Salih *et al.* Green building envelope designs in different climate and seismic zones: Multi-objective ANN-based genetic algorithm. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [s. l.], v. 53, p. 102505, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213138822005550>. Acesso em: 25 jun. 2024.

HOLMAN, Cameron *et al.* Future grid mix impacts on whole-building life cycle assessment. **Environmental Research: Infrastructure and Sustainability**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 015025, 2025. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2634-4505/adc154>. Acesso em: 25 abr. 2025.

HONG, Tianzhen; LANGEVIN, Jared; SUN, Kaiyu. Building simulation: Ten challenges. **Building Simulation**, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 871–898, 2018. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12273-018-0444-x>. Acesso em: 16 nov. 2024.

HOSAMO, Haidar *et al.* Building sustainability through a novel exploration of dynamic LCA uncertainty: Overview and state of the art. **Building and Environment**, [s. l.], v. 264, p. 111922, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132324007649>. Acesso em: 30 ago. 2024.

HU, Ming. Dynamic life cycle assessment integrating value choice and temporal factors—A case study of an elementary school. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 158, p. 1087–1096, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778817319874>. Acesso em: 25 jun. 2024.

IEA. **World Energy Outlook**. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. .

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia - INMET**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 3 nov. 2023.

IPCC. **AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023**. [S. l.]: [s. d.], 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. .

ISO, International Organization for Standardization. **ISO 14001:2015 – Environmental management systems – Requirements with guidance for use**. [S. l.]: [s. d.], 2015.

ISO, International Organization for Standardization. **ISO 14044: 2006 Environmental management—life cycle assessment— Requirements and guidelines**. Geneva, Switzerland. [S. l.]: [s. d.], 2006.

ISO, International Organization for Standardization. **ISO 15392: 2019 Sustainability in buildings and civil engineering works — General principles**. , 2019.

ISO, International Organization for Standardization. **ISO 21931: 2010 Sustainability in building construction — Framework for methods of assessment of the environmental performance of construction works — Part 1: Buildings**. , 2010.

JANG, Jihoon *et al.* Development of an Improved Model to Predict Building Thermal Energy Consumption by Utilizing Feature Selection. **Energies**, [s. l.], v. 12, n. 21, p. 4187, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/21/4187>. Acesso em: 25 jun. 2024.

JENTSCH, Mark F.; BAHAI, AbuBakr S.; JAMES, Patrick A.B. Climate change future proofing of buildings—Generation and assessment of building simulation weather files. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 40, n. 12, p. 2148–2168, 2008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778808001400>. Acesso em: 29 ago. 2024.

Jl, Sukwon; LEE, Bumho; YI, Mun Yong. Building life-span prediction for life cycle assessment and life cycle cost using machine learning: A big data approach. [s. l.], v. 205, p. 108267, 2021.

KOKARAKI, Nikoleta *et al.* Testing the reliability of deterministic multi-criteria decision-making methods using building performance simulation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 112, p. 991–1007, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032119304113>. Acesso em: 17 nov. 2024.

LABEEE. **Arquivos Climáticos | Laboratório de Eficiência Energética em Edificações**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/pt-br/downloads/arquivos-climaticos>. Acesso em: 5 ago. 2023.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. São Paulo: Eletrobras, 2014.

LAMBERTS, Roberto; TRIANA, Maria Andrea. **Tecnologias para construção habitacional mais sustentável: Tecnologias para construção habitacional mais sustentável**. São Paulo: [s. d.], 2007.

LEAL JUNIOR, Jose Hamilton Lopes *et al.* Habitação de interesse social e o plano diretor de ordenamento territorial de Teresina, Piauí: uma tentativa de alinhamento à nova agenda urbana. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 403–415, 2022. Disponível em: <https://www.sustenere.co/index.php/rica/article/view/6922>. Acesso em: 16 nov. 2024.

LEVASSEUR, Annie *et al.* Considering Time in LCA: Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 44, n. 8, p. 3169–3174, 2010. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es9030003>. Acesso em: 29 out. 2024.

LIANG, Yumin *et al.* Decarbonization potentials of the embodied energy use and operational process in buildings: A review from the life-cycle perspective. **Heliyon**, [s. l.], v. 9, n. 10, p. e20190, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S240584402307398X>. Acesso em: 25 jun. 2024.

LIRA, Julia Santiago; SILVA, Elaine Aparecida. A systematic literature review of dynamic life cycle assessment in Buildings: Challenges and guidelines. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 111, p. 113503, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710225017401>. Acesso em: 15 set. 2025.

LIRA, Júlia Santiago De Matos Monteiro; SOUZA, Calebe Paiva; SILVA, Elaine Aparecida. A novel approach to dynamic life cycle assessment: Integrating climate change and cooling operation patterns in building energy consumption forecasting. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 337, p. 115656, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037877882500386X>. Acesso em: 15 abr. 2025.

LOPES, Wilza Gomes Reis *et al.* Habitação de Interesse Social e Acesso à Terra Urbana: Análise do residencial Jacinta Andrade, em Teresina - Piauí. [s. l.], v. 8, n. 3, p. 71–89, 2023.

LUO, X.J.; OYEDELE, Lukumon O. Life cycle optimisation of building retrofitting considering climate change effects. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 258, p. 111830, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778822000019>. Acesso em: 25 jun. 2024.

MEDEIROS, Raimundo Mainar De; HOLANDA, Romildo Morant De. Bom Jesus do Piauí – Brasil e suas flutuações nas amplitudes térmicas mensal, anual e dos trimestres quentes e frios. **Revista Científica Rural**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 1–15, 2023. Disponível em: <http://ediurcamp.urcamp.edu.br/index.php/RCR/article/view/3104>. Acesso em: 16 nov. 2024.

MIRRAHIMI, Seyedehzahra *et al.* The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot–humid climate. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 53, p. 1508–1519, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115010254>. Acesso em: 12 mar. 2025.

MOKHTARIAN MOBARAKEH, Jalil; SAYYAADI, Hoseyn. A novel methodology based on artificial intelligence to achieve the formost Buildings’ heating system. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 286, p. 116958, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890423003047>. Acesso em: 25 jun. 2024.

MORALES, Michele *et al.* Regionalized inventory data in LCA of public housing: A comparison between two conventional typologies in southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 238, p. 117869, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619327398>. Acesso em: 8 dez. 2025.

MOSCHETTI, Roberta *et al.* Assessing Responsive Building Envelope Designs through Robustness-Based Multi-Criteria Decision Making in Zero-Emission Buildings. **Energies**, [s. l.], v. 15, n. 4, p. 1314, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/4/1314>. Acesso em: 16 nov. 2024.

NEGISHI, Koji *et al.* An operational methodology for applying dynamic Life Cycle Assessment to buildings. **Building and Environment**, [s. l.], v. 144, p. 611–621, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132318305535>. Acesso em: 25 jun. 2024.

NEGISHI, Koji *et al.* Evaluating climate change pathways through a building’s lifecycle based on Dynamic Life Cycle Assessment. **Building and Environment**, [s. l.], v. 164, p.

106377, 2019. Disponível em:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132319305876>. Acesso em: 25 jun. 2024.

NGUYEN, Anh-Tuan; REITER, Sigrid; RIGO, Philippe. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, [s. l.], v. 113, p. 1043–1058, 2014. Disponível em:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261913007058>. Acesso em: 17 nov. 2024.

NWODO, Martin N.; ANUMBA, Chimay J. A review of life cycle assessment of buildings using a systematic approach. **Building and Environment**, [s. l.], v. 162, p. 106290, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132319305001>. Acesso em: 25 jun. 2024.

OLIVEIRA, Ylana Leal Melo de; ROMERO, Marta Adriana Bustos. Arquitetura Bioclimática do Espaço Público: Análise do Residencial Parque Brasil, em Teresina, PI. In: V ENCONTRO LATINO-AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 2023, Bahia. **Anais [...]**. Bahia: [s. d.], 2023.

PANNIER, Marie-Lise *et al.* Identifying optimal renovation schedules for building portfolios: Application in a social housing context under multi-year funding constraints. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 250, p. 111290, 2021. Disponível em:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778821005740>. Acesso em: 19 nov. 2024.

PARAVANTIS, John A. *et al.* Statistical and machine learning approaches for energy efficient buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 330, p. 115309, 2025. Disponível em:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778825000398>. Acesso em: 23 abr. 2025.

PAULSEN, Jacob Silva; SPOSTO, Rosa Maria. A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “MY HOUSE MY LIFE”. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 57, p. 95–102, 2013. Disponível em:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778812006056>. Acesso em: 6 jan. 2025.

PEÑALOZA, Diego; ERLANDSSON, Martin; FALK, Andreas. Exploring the climate impact effects of increased use of bio-based materials in buildings. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 125, p. 219–226, 2016. Disponível em:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816313046>. Acesso em: 25 jun. 2024.

PETERS, Pedro *et al.* A holistic analysis of environmental impacts and improvement pathways for the Brazilian electric sector based on long-term planning and life cycle assessment. **Applied Energy**, [s. l.], v. 377, p. 124505, 2025. Disponível em:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261924018889>. Acesso em: 24 abr. 2025.

PHILLIPS, Robert; FANNON, David; J. ECKELMAN, Matthew. Dynamic modeling of future climatic and technological trends on life cycle global warming impacts and occupant satisfaction in US office buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 256, p. 111705, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778821009890>. Acesso em: 25 jun. 2024.

PICCARDO, Chiara; DODOO, Ambrose; GUSTAVSSON, Leif. Retrofitting a building to passive house level: A life cycle carbon balance. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 223, p. 110135, 2020. Disponível em:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778820307751>. Acesso em: 25 jun. 2024.

PITTAU, Francesco *et al.* Retrofit as a carbon sink: The carbon storage potentials of the EU housing stock. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 214, p. 365–376, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618340356>. Acesso em: 3 nov. 2025.

PLEVIN, Richard J.; DELUCCHI, Mark A.; CREUTZIG, Felix. Using Attributional Life Cycle Assessment to Estimate Climate-Change Mitigation Benefits Misleads Policy Makers. **Journal of Industrial Ecology**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 73–83, 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jiec.12074>. Acesso em: 3 dez. 2025.

P.TOOTKABONI, Mamak *et al.* A Comparative Analysis of Different Future Weather Data for Building Energy Performance Simulation. **Climate**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 37, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2225-1154/9/2/37>. Acesso em: 29 ago. 2024.

RAMESH, T.; PRAKASH, Ravi; SHUKLA, K.K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 42, n. 10, p. 1592–1600, 2010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778810001696>. Acesso em: 18 dez. 2024.

RE CECCONI, Fulvio *et al.* Surrogate Models to Cope With Users' Behaviour in School Building Energy Performance Calculation. In: 2017 BUILDING SIMULATION CONFERENCE, 2017. **Anais [...]**. [S. l.]: [s. d.], 2017. Disponível em: [https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=bs2017\\_558](https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=bs2017_558). Acesso em: 25 jun. 2024.

REMMEN, Andreas; JENSEN, Allan Astrup; FRYDENDAL, Jeppe. **Life cycle management: a business guide to sustainability**. [S. l.]: UNEP/Earthprint, 2007. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7894/DTI0889PA.pdf?sequence=3&am%3BisAllowed=>. Acesso em: 14 dez. 2024.

REZAEI, Roya *et al.* Assessment of uncertainty and confidence in building design exploration. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing**, [s. l.], v. 29, n. 4, p. 429–441, 2015. Disponível em: [https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0890060415000426/type/journal\\_article](https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0890060415000426/type/journal_article). Acesso em: 16 nov. 2024.

RODRIGUES, Eugénio; PARENTE, Jean; FERNANDES, Marco S. Building for tomorrow: Analyzing ideal thermal transmittances in the face of climate change in Brazil. **Applied Energy**, [s. l.], v. 355, p. 122360, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261923017245>. Acesso em: 16 nov. 2024.

ROSEMBAUM, Ralph k; GEORGIADS, Stylianos; FANTKE, Peter. Uncertainty management and sensitivity analysis. In: LIFE CYCLE ASSESSMENT: THEORY AND PRACTICE. [S. l.]: Springer International Publishing, 2017. p. 271–321.

ROSSE CALDAS, Lucas *et al.* Bamboo bio-concrete as an alternative for buildings' climate change mitigation and adaptation. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 263, p. 120652, 2020.

ROUX, Charlotte; PEUPORTIER, Bruno. Evaluation of The Environmental Performance of Buildings Using Dynamic Life Cycle Simulation. In: 2017 BUILDING SIMULATION CONFERENCE, 2013. **Anais [...]**. [S. l.]: [s. d.], 2013. Disponível em: [https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=bs2013\\_1052](https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=bs2013_1052). Acesso em: 25 jun. 2024.

SAADE, Marcella RM; SILVA, Maristela G; GOMES, Vanessa. Lyfe Cycle Assessment – LCS and the phase of Environmental Impact Assessment considerations on the use of. [s. l.], v. 12, n. 3, p. 109–116, 2014. Disponível em: <https://www.naturezaonline.com.br/revista/article/view/207>. Acesso em: 14 fev. 2023.

SACCARDO, Ronaldo Ricardo *et al.* Investment in photovoltaic energy: An attempt to frame Brazil within the 2030 passage target of the Paris agreement. **Cleaner Energy Systems**, [s. l.], v. 5, p. 100070, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2772783123000201>. Acesso em: 16 nov. 2024.

SCHAUBROECK, Thomas *et al.* Attributional & Consequential Life Cycle Assessment: Definitions, Conceptual Characteristics and Modelling Restrictions. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 13, p. 7386, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/13/7386>. Acesso em: 3 dez. 2025.

SHARIF, Seyed Amirhosain; HAMMAD, Amin. Developing surrogate ANN for selecting near-optimal building energy renovation methods considering energy consumption, LCC and LCA. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 25, p. 100790, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710218311811>. Acesso em: 25 jun. 2024.

SHEN, Pengyuan. Impacts of climate change on U.S. building energy use by using downscaled hourly future weather data. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 134, p. 61–70, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778816308283>. Acesso em: 23 set. 2024.

SILVA, Ivan Nunes da; SPATTI, Danilo Hernane; FLAUZINO, Rogério Andrade. **Redes Neurais Artificiais para Engenharia e Ciências Aplicadas**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2010.

SLAVKOVIC, Katarina; STEPHAN, André. Dynamic life cycle assessment of buildings and building stocks – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 212, p. 115262, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032124009882>. Acesso em: 23 abr. 2025.

SOUZA, Calebe *et al.* Artificial Neural Network Application for Structural Damage Diagnosis from Vibration Measurements. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DYNAMIC PROBLEMS OF MECHANICS, 2019. **DINAME2019**. [s. l.]: ABCM, 2019. Disponível em: <http://abcm.org.br/anais-de-eventos/DIN2019/0093>. Acesso em: 26 jun. 2024.

STEPHAN, André; STEPHAN, Laurent. Achieving net zero life cycle primary energy and greenhouse gas emissions apartment buildings in a Mediterranean climate. **Applied Energy**, [s. l.], v. 280, p. 115932, 2020.

SU, Shu *et al.* A Comprehensive Dynamic Life Cycle Assessment Model: Considering Temporally and Spatially Dependent Variations. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 19, n. 21, p. 14000, 2022a.

SU, Shu *et al.* A Comprehensive Dynamic Life Cycle Assessment Model: Considering Temporally and Spatially Dependent Variations. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 19, n. 21, p. 14000, 2022b. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/21/14000>. Acesso em: 24 abr. 2025.

SU, Shu *et al.* Assessment models and dynamic variables for dynamic life cycle assessment of buildings: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 28, n. 21, p. 26199–26214, 2021a. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11356-021-13614-1>. Acesso em: 25 jun. 2024.

SU, Shu *et al.* BIM-DLCA: An integrated dynamic environmental impact assessment model for buildings. **Building and Environment**, [s. l.], v. 183, p. 107218, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132320305898>. Acesso em: 25 jul. 2024.

SU, Shu *et al.* Dynamic global warming impact assessment integrating temporal variables: Application to a residential building in China. **Environmental Impact Assessment Review**, [s. l.], v. 88, p. 106568, 2021b. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0195925521000184>. Acesso em: 25 jun. 2024.

SU, Shu *et al.* Dynamic LCA framework for environmental impact assessment of buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 149, p. 310–320, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778816320898>. Acesso em: 25 jun. 2024.

SU, Shu; LI, Xiaodong; ZHU, Yimin. Dynamic assessment elements and their prospective solutions in dynamic life cycle assessment of buildings. **Building and Environment**, [s. l.], v. 158, p. 248–259, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132319303269>. Acesso em: 25 jun. 2024.

SWAIN, K.P.; NAYYAR, Anand; PALAI, G. Prediction of optical specifications through ANN model to design a monochromatic optical filter for all three optical windows. **Optik**, [s. l.], v. 198, p. 163314, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030402619312124>. Acesso em: 23 dez. 2024.

TIRUTA-BARNA, Ligia. A climate goal-based, multicriteria method for system evaluation in life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 26, n. 10, p. 1913–1931, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11367-021-01991-1>. Acesso em: 25 jun. 2024.

UDISI, B; GORGOLEWSKI, M. A systematic review of consequential life cycle assessment in whole building life cycle assessment. **Environmental Research Communications**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 022003, 2025. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7620/adb669>. Acesso em: 8 dez. 2025.

USMAN, Muhammad; FREY, Georg. Multi-Objective Techno-Economic Optimization of Design Parameters for Residential Buildings in Different Climate Zones. **Sustainability**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 65, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/1/65>. Acesso em: 16 nov. 2024.

VAN DE MOORTEL, Els *et al.* Dynamic Versus Static Life Cycle Assessment of Energy Renovation for Residential Buildings. **Sustainability**, [s. l.], v. 14, n. 11, p. 6838, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/11/6838>. Acesso em: 25 jun. 2024.

WANG, Liping *et al.* The interactive indoor-outdoor building energy modeling for enhancing the predictions of urban microclimates and building energy demands. **Building and Environment**, [s. l.], v. 248, p. 111059, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132323010867>. Acesso em: 16 nov. 2024.

WANG, W.; FOONG, L.K.; LE, B.N. The impact of thermal insulating materials in heat loss control in smart green buildings using experimental and swarm intelligent analysis. [s. l.], v. 31, p. 38553–38572, 2024.

WEIDEMA, Bo P. *et al.* Attributional or consequential Life Cycle Assessment: A matter of social responsibility. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 174, p. 305–314, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617325829>. Acesso em: 3 dez. 2025.

WONG, Billy C.L. *et al.* Parametric building information modelling and optimality criteria methods for automated multi-objective optimisation of structural and energy efficiency. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 75, p. 107068, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710223012470>. Acesso em: 16 nov. 2024.

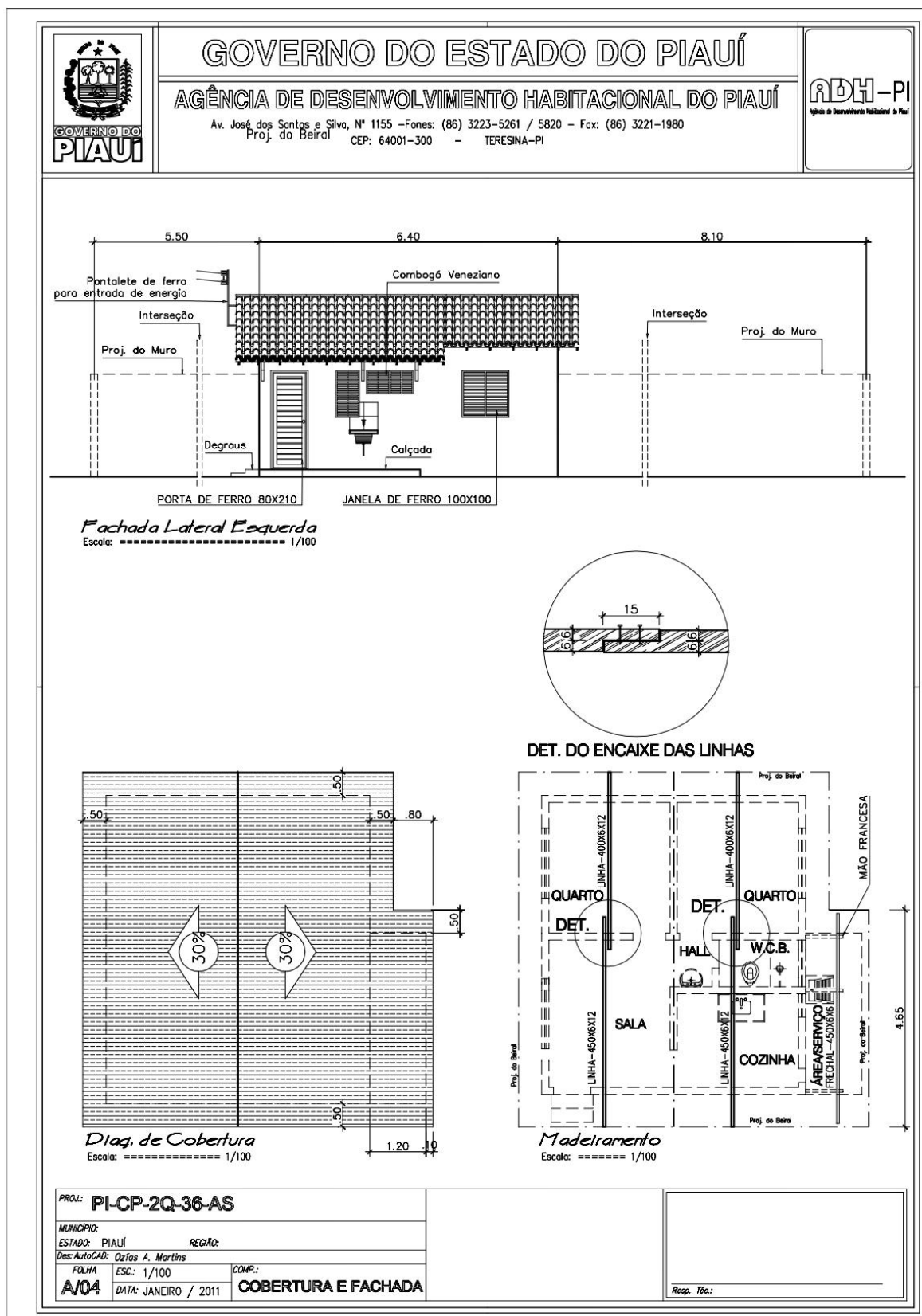
XUE, Q; WANG, Z; CHEN, Q. Multi-objective optimization of building design for life cycle cost and CO2 emissions: A case study of a low-energy residential building in a severe cold climate. [s. l.], v. 15, p. 83–98, 2022.

ZAMAGNI, Alessandra; PESONEN, Hanna-Leena; SWARR, Thomas. From LCA to Life Cycle Sustainability Assessment: concept, practice and future directions. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 18, n. 9, p. 1637–1641, 2013. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11367-013-0648-3>. Acesso em: 3 dez. 2025.

ZHENG, Lin; YAN, Xiaoyu. A review of buildings dynamic life cycle studies by bibliometric methods. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 332, p. 115453, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778825001835>. Acesso em: 5 jun. 2025.

## ANEXO A: PLANTA DE COBERTURA E MADEIRAMENTO DA HIS

Planta de cobertura e madeiramento da HIS utilizada no estudo. casa com 36 m<sup>2</sup>, situada no Conjunto Habitacional Jacinta Andrade, zona norte de Teresina-PI.



## APÊNDICE A: APÊNDICE TÉCNICO

### Conceitos específicos das áreas do conhecimento trabalhadas nesta pesquisa.

**Arquitetura da rede:** disposição ou arranjo dos neurônios, uns em relação ao outro, de maneira fixa e genérica. Exemplos de arquitetura de rede neural: redes feedforward (alimentação à frente), redes feedforward de camadas múltiplas, redes recorrentes e redes reticuladas.

**Aspecto ambiental:** característica das obras de edificações, partes das edificações, processos ou serviços relacionados ao seu ciclo de vida que podem causar uma alteração no meio ambiente.

**Backpropagation:** é o fundamento matemático que fornece a informação (o gradiente) consumidas pelos otimizadores para realizar a otimização efetiva.

**Capacidade térmica (Ct):** quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema.

**Categoria de impacto:** classe que representa as questões ambientais relevantes às quais os resultados da análise do inventário do ciclo de vida podem ser associados.

**Conforto térmico:** satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente.

**Edifício de Energia-Zero** (*Zero Energy Building* - ZEB): é o edifício que comprova que o consumo de energia local da sua operação anual é zerado por uma combinação de alta eficiência energética e geração de energia por fontes renováveis.

**Época:** Uma Época é o momento em que todo o conjunto de dados de treinamento já foi passado pela rede neural uma única vez. Ou seja, é a frequência com que o conjunto de dados completo é usado para treinar a rede.

**Função de perda** (*Loss Function*): é uma métrica que quantifica a margem de erro do modelo. O objetivo central de todo o treinamento da rede neural (usando um otimizador como o Gradiente Descendente) é minimizar o valor dessa Função de Perda.

**Função de ativação:** função matemática não-linear aplicada à saída de cada neurônio em uma camada da rede (exceto a camada de entrada). Ela determina se um neurônio deve ser “ativado” e qual será a magnitude desse sinal de saída para ser transmitido à próxima camada.

**Granularidade:** nível de detalhe ou especificidade com que os dados são coletados, agregados ou apresentados. Quanto mais baixa a granularidade, mais os gráficos são limpos e claros, ideais para mostrar tendências de longo prazo (exemplo: dados anuais). Quanto maior a granularidade, maior a aproximação da visualização (exemplo: dados horários).

**Indicador de categoria de impacto:** representação quantificável de uma categoria de impacto.

**Inércia Térmica:** é a capacidade de um material ou de um componente construtivo (como uma parede ou laje) de armazenar calor e liberá-lo lentamente ao longo do tempo. Materiais de alta inércia (pesados) demoram para aquecer e demoram para esfriar. Materiais leves (ex: *drywall*, madeira leve, isolantes) possuem baixa inércia.

**Mix elétrico** (ou mix de geração de energia elétrica): é a expressão utilizada para descrever a composição percentual das diferentes fontes primárias de energia utilizadas para gerar a eletricidade que abastece uma rede ou sistema. Em publicações internacionais, o conceito é frequentemente referido como “Electricity Mix”. No contexto do Brasil, o Mix Elétrico está diretamente ligado à Matriz Elétrica Nacional, que detalha a participação de fontes como hidráulica, eólica, solar, biomassa, gás natural e carvão na geração total de eletricidade do país.

**Otimizador:** é o algoritmo que utiliza a Taxa de Aprendizagem e o gradiente (a inclinação do erro) calculado pela Função de Perda para ajustar os pesos da rede. Seu objetivo é minimizar a Função de Perda e, assim, fazer com que as previsões do modelo fiquem o mais próximas possível dos valores reais.

**Soluções passivas:** estratégias de projeto ou construção que utilizam os recursos naturais e as características físicas da edificação (sem o uso de equipamentos mecânicos, elétricos ou eletrônicos) para melhorar o conforto térmico, reduzir o consumo de energia e controlar o ambiente interno. Para então reduzir a necessidade de sistemas ativos (ar-condicionado, aquecimento, iluminação artificial).

**Tamanho do lote** (*batch size*): é um hiperparâmetro que define o número de amostras de treinamento que o modelo processará antes de atualizar seus pesos internos (parâmetros). Em vez de calcular o erro (a perda) e ajustar a rede a cada exemplo de treinamento (o que seria o modo *Stochastic*), o *Batch Size* agrupa dados. A rede processa o lote, calcula a média do erro para aquele lote e só então faz o ajuste nos pesos.

**Taxa de Aprendizagem** (*Learning Rate*): é um hiperparâmetro que controla a magnitude do ajuste feito nos pesos da rede em resposta ao erro que a Função de Perda calculou. Quanto menor a taxa de aprendizagem, o modelo converge de forma lenta (leva muito tempo e épocas), mas tem maior chance de encontrar um ponto mínimo mais preciso.

**Tolerância:** é um critério de parada antecipada usado para finalizar o treinamento ou um processo iterativo. A Tolerância permite parar o treinamento quando a melhora no erro (ou perda) é insignificante, mesmo que o número total de épocas ainda não tenha sido atingido.

**Topologia de RNA:** considerando dada arquitetura, a topologia significa diferentes possibilidades de composições estruturais com diferentes quantidades de neurônios nas camadas de entrada, oculta e de saída da rede.

**Transmitância térmica (U):** é o inverso da resistência térmica total, que por sua vez, é o somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo as resistências superficiais interna e externa. Quanto maior o valor de transmitância, mais baixa é a resistência daquele componente à passagem de calor.

**Vida Útil (VU):** período de tempo em que um edifício e/ou seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos, mantendo níveis aceitáveis de desempenho, considerando a periodicidade e a correta execução dos processos de manutenção.

**Zona bioclimática:** região geográfica homogênea quanto aos elementos climáticos que interferem nas relações entre ambiente construído e conforto humano.

### **Licenças**

QGIS v. 3.44 – licença gratuita.

EnergyPlus v. 23.1 – licença gratuita.

Revit v. 23.0.11.19 – licença educacional.

SimaPro v. 9.0.0.48 (Ecoinvent v. 3.6) – licença comercial viabilizada para fins estritamente acadêmicos e de pesquisa.

## APÊNDICE B: DEFINIÇÕES METODOLÓGICAS

**Tabela 1B: Detalhes construtivos e características térmicas das paredes e coberturas**

| Componente | Nome  | Camadas                                     |
|------------|-------|---------------------------------------------|
| Parede     | Real  | W1 (Ref.)                                   |
|            |       | Argamassa (camada externa)                  |
|            |       | Bloco cerâmico (9cm)                        |
|            |       | Argamassa (camada interna)                  |
|            |       | $U = 2,37$                                  |
|            |       | $Ct = 151$                                  |
| Parede     | Real  | W2                                          |
|            |       | Concreto maciço (10 cm)                     |
|            |       | $U = 4,4$                                   |
|            |       | $Ct = 240$                                  |
|            |       | W3                                          |
|            |       | Argamassa (camada externa)                  |
| Parede     | Real  | Bloco de concreto (9cm)                     |
|            |       | Argamassa (camada interna)                  |
|            |       | $U = 2,79$                                  |
|            |       | $Ct = 183$                                  |
|            |       | W4                                          |
|            |       | Argamassa (camada externa)                  |
| Parede     | Real  | Bloco cerâmico (14 cm)                      |
|            |       | Argamassa (camada interna)                  |
|            |       | $U = 1,83$                                  |
|            |       | $Ct = 161$                                  |
|            |       | W5                                          |
|            |       | Argamassa (camada externa)                  |
| Parede     | Ideal | Bloco cerâmico (9 cm)                       |
|            |       | Lã de rocha (3,8 mm)                        |
|            |       | Argamassa (camada interna)                  |
|            |       | $U = 0,8$                                   |
|            |       | $Ct = 144,8$                                |
|            |       | W6                                          |
| Parede     | Ideal | Placa de alumínio composto (camada externa) |
|            |       | Poliestireno expandido (8 cm)               |
|            |       | Argamassa                                   |
|            |       | Bloco de concreto (9 cm)                    |
|            |       | Argamassa (camada interna)                  |
|            |       | $U = 0,32$                                  |
| Cobertura  | Real  | $Ct = 200$                                  |
|            |       | R1 (Ref.)                                   |
|            |       | Telha cerâmica (camada externa)             |
|            |       | $U = 4,5$                                   |
|            |       | $Ct = 18,4$                                 |
|            |       | R2                                          |
| Cobertura  | Real  | Telha cerâmica (camada externa)             |
|            |       | Forro de PVC (camada interna)               |

|       |    |                                                                                                                                                                        |
|-------|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|       |    | U = 1,75<br>Ct = 21                                                                                                                                                    |
|       | R3 | Laje de concreto maciço (10 cm)<br>U = 3,74<br>Ct = 220                                                                                                                |
|       | R4 | Telha Termoacústica (camada de poliuretano entre duas chapas metálicas) (camada externa)<br>Forro de laje de concreto (10 cm) (camada interna)<br>U = 0,68<br>Ct = 229 |
| Ideal | R5 | Telha metálica simples (camada externa)<br>Forro em laje pré-moldada (camada interna)<br>U = 1,8<br>Ct = 169                                                           |
|       | R6 | Telha cerâmica (camada externa)<br>Lã de rocha (5 cm)<br>Forro em laje pré-moldada (camada interna)<br>U = 0,6<br>Ct = 206,9                                           |

**Quadro 1B: Classes e objetos utilizados na simulação EnergyPlus™.**

| Simulação de Edificação – EnergyPlus™ versão 23.1 |                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Parâmetros de simulação                           | Controle de simulação (simulation control)                                                                                   |
|                                                   | Edifício (Building)                                                                                                          |
|                                                   | Passo de tempo (time step)                                                                                                   |
| Localização e Clima                               | Localização                                                                                                                  |
|                                                   | Período de dimensionamento: Dia de projeto (Design Day) e tipo de condição do arquivo de clima (Weather File Condition Type) |
|                                                   | Tempo de simulação (run period)                                                                                              |
|                                                   | Temperatura do solo no local (Site Ground Temperature): superfície e profundidade                                            |
| Agenda                                            | Tipo de limite                                                                                                               |
|                                                   | Agenda: compacta                                                                                                             |
| Elementos de construção de superfície             | Material (inclui camada de ar)                                                                                               |
|                                                   | Material da janela                                                                                                           |
|                                                   | Construção                                                                                                                   |
| Zonas térmicas e superfícies                      | Regras da Geometria Global                                                                                                   |
|                                                   | Zona                                                                                                                         |
|                                                   | Superfície da Construção: Detalhada                                                                                          |
|                                                   | Superfície da Abertura (fenestration): Detalhada                                                                             |
| Ganhos internos                                   | Ocupação                                                                                                                     |
| Fluxo de Ar por Zona                              | Ventilação por Zona: Vazão de Projeto                                                                                        |
| Template AVAC                                     | Zona: Termostato                                                                                                             |
|                                                   | Zona: Ar-Condicionado Terminal Embalado (PCAT)                                                                               |
| Relatório de saída (Output)                       | Variáveis                                                                                                                    |
|                                                   | Tabela                                                                                                                       |
|                                                   | Controle                                                                                                                     |
|                                                   | Projeto                                                                                                                      |

**Tabela 2B: Características e Propriedades térmicas dos materiais utilizados nos sistemas de vedação (vertical e cobertura)**

| ID              | Nome do material               | Espessura (m)                                     | Condutividade térmica (W/(m.K)) | Densidade de massa aparente (kg/m <sup>3</sup> ) | Calor específico (kJ/(kg.K)) |
|-----------------|--------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------|
| Parede1 (W1)    | Bloco cerâmico                 | 0,006                                             | 0,9                             | 1300                                             | 920                          |
|                 | Câmara de ar                   | Resistência térmica: 0,16 ((m <sup>2</sup> .K)/W) |                                 |                                                  |                              |
|                 | Argamassa (reboco)             | 0,025                                             | 1,15                            | 1800                                             | 1000                         |
| Parede2 (W2)    | Concreto                       | 0,10                                              | 1,75                            | 2200                                             | 1000                         |
| Parede3 (W3)    | Bloco concreto                 | 0,02                                              | 1,75                            | 2200                                             | 1000                         |
|                 | Argamassa (reboco)             | 0,025                                             | 1,15                            | 1800                                             | 1000                         |
|                 | Câmara de ar                   | Resistência térmica: 0,16 ((m <sup>2</sup> .K)/W) |                                 |                                                  |                              |
| Parede4 (W4)    | Bloco cerâmico                 | 0,006                                             | 0,9                             | 1300                                             | 920                          |
|                 | Câmara de ar                   | Resistência térmica: 0,16 ((m <sup>2</sup> .K)/W) |                                 |                                                  |                              |
|                 | Argamassa (reboco)             | 0,025                                             | 1,15                            | 1800                                             | 1000                         |
| Parede5 (W5)    | Bloco cerâmico                 | 0,006                                             | 0,9                             | 1300                                             | 920                          |
|                 | Câmara de ar                   | Resistência térmica: 0,16 ((m <sup>2</sup> .K)/W) |                                 |                                                  |                              |
|                 | Argamassa (reboco)             | 0,025                                             | 1,15                            | 1800                                             | 1000                         |
|                 | Lã de Rocha                    | 0,038                                             | 0,045                           | 20                                               | 750                          |
| Parede6 (W6)    | Bloco concreto                 | 0,02                                              | 1,75                            | 2200                                             | 1000                         |
|                 | Argamassa (reboco)             | 0,025                                             | 1,15                            | 1800                                             | 1000                         |
|                 | Câmara de ar                   | Resistência térmica: 0,16 ((m <sup>2</sup> .K)/W) |                                 |                                                  |                              |
|                 | Poliestireno expandido         | 0,08                                              | 0,04                            | 15                                               | 1420                         |
| Cobertura1 (R1) | Telha cerâmica                 | 0,006                                             | 0,9                             | 1300                                             | 920                          |
| Cobertura2 (R2) | Telha cerâmica                 | 0,006                                             | 0,9                             | 1300                                             | 920                          |
|                 | Forro de PVC                   | 0,01                                              | 0,2                             | 1200                                             | 0                            |
|                 | Câmara de ar                   | Resistência térmica: 0,16 ((m <sup>2</sup> .K)/W) |                                 |                                                  |                              |
| Cobertura3 (R3) | Concreto                       | 0,10                                              | 1,75                            | 2200                                             | 1000                         |
| Cobertura4 (R4) | Telha metálica com poliuretano | 0,06                                              | 0,03                            | 40                                               | 1670                         |
|                 | Câmara de ar                   | Resistência térmica: 0,16 ((m <sup>2</sup> .K)/W) |                                 |                                                  |                              |
|                 | Concreto                       | 0,10                                              | 1,75                            | 2200                                             | 1000                         |
| Cobertura5 (R5) | Telha metálica                 | 0,06                                              | 230                             | 2700                                             | 880                          |
|                 | Câmara de ar                   | Resistência térmica: 0,16 ((m <sup>2</sup> .K)/W) |                                 |                                                  |                              |

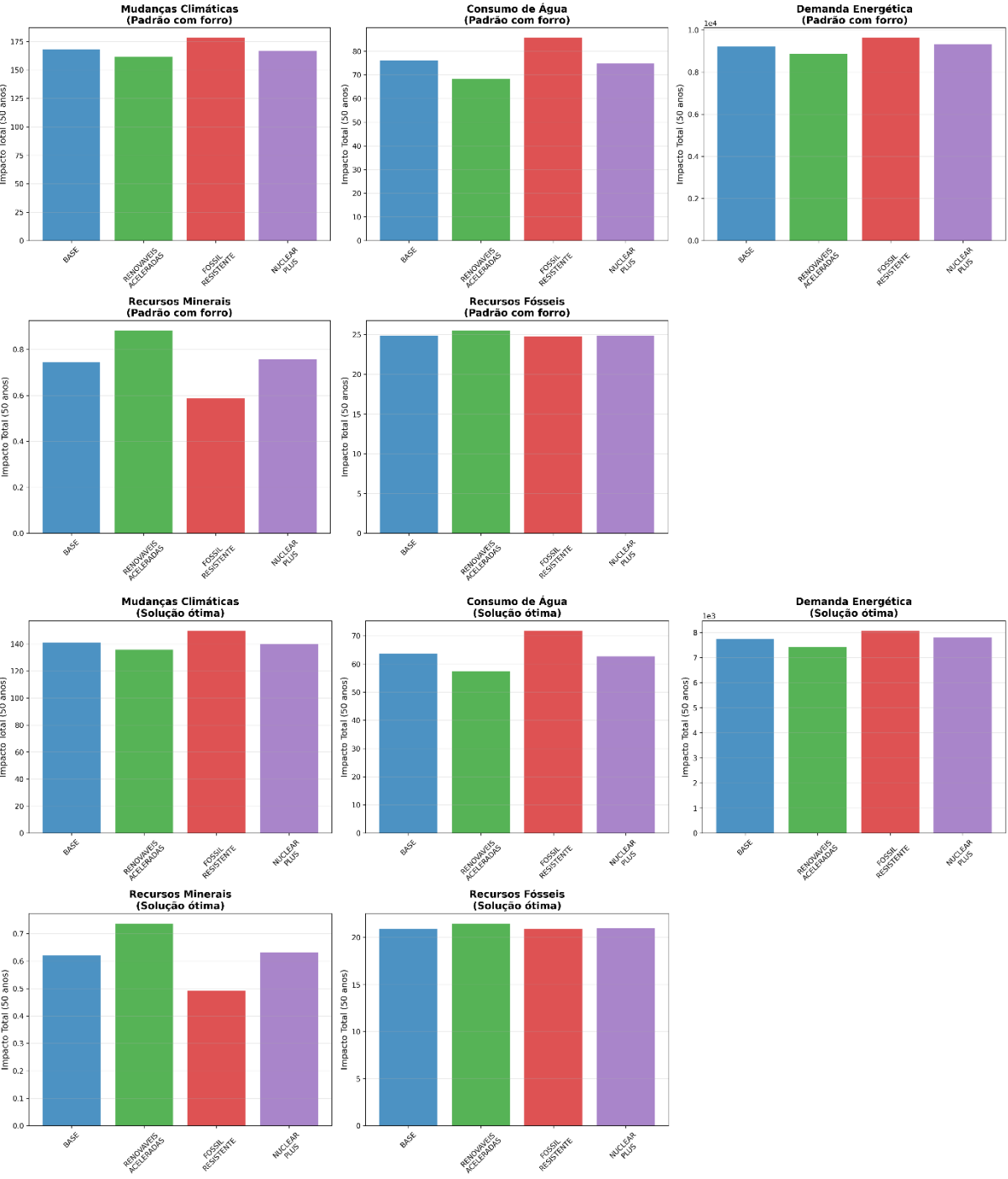
|                 |                         |                                      |       |      |      |
|-----------------|-------------------------|--------------------------------------|-------|------|------|
|                 | Concreto                | 0,04                                 | 1,75  | 2200 | 1000 |
|                 | Bloco cerâmico (lajota) | 0,006                                | 0,9   | 1300 | 920  |
|                 | Argamassa               | 0,01                                 | 1,15  | 1800 | 1000 |
| Cobertura6 (R6) | Telha cerâmica          | 0,006                                | 0,9   | 1300 | 920  |
|                 | Câmara de ar            | Resistência térmica: 0,16 ((m².K)/W) |       |      |      |
|                 | Lã de Rocha             | 0,05                                 | 0,045 | 20   | 750  |
|                 | Concreto                | 0,04                                 | 1,75  | 2200 | 1000 |
|                 | Bloco cerâmico (lajota) | 0,006                                | 0,9   | 1300 | 920  |
|                 | Argamassa               | 0,01                                 | 1,15  | 1800 | 1000 |

## APÊNDICE C: RESULTADOS COMPLEMENTARES

**Tabela C1: Top 5 de alternativas por peso (análise de sensibilidade)**

| Cenário | Rank | 50/50                     | 25/75                     | 75/25                     |
|---------|------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 0       | 1    | Window 2 + W3 + R5 + 270° | Window 2 + W3 + R5 + 270° | Window 2 + W3 + R5 + 270° |
|         | 2    | Window 2 + W3 + R5 + 180° | Window 2 + W3 + R5 + 180° | Window 2 + W3 + R5 + 180° |
|         | 3    | Window 2 + W3 + R5 + 90°  | Window 2 + W3 + R5 + 90°  | Window 2 + W3 + R5 + 90°  |
|         | 4    | Window 2 + W3 + R5 + 0°   | Window 2 + W3 + R5 + 0°   | Window 2 + W3 + R5 + 0°   |
|         | 5    | Window 1 + W3 + R5 + 270° | Window 1 + W3 + R5 + 270° | Window 1 + W3 + R5 + 270° |
| 3       | 1    | Window 2 + W1 + R2 + 180° | Window 2 + W1 + R5 + 90°  | Window 2 + W1 + R2 + 180° |
|         | 2    | Window 2 + W1 + R2 + 270° | Window 2 + W1 + R5 + 180° | Window 2 + W1 + R2 + 90°  |
|         | 3    | Window 2 + W1 + R2 + 90°  | Window 2 + W1 + R5 + 270° | Window 2 + W1 + R2 + 270° |
|         | 4    | Window 2 + W1 + R2 + 0°   | Window 2 + W1 + R5 + 0°   | Window 2 + W1 + R2 + 0°   |
|         | 5    | Window 1 + W1 + R2 + 270° | Window 2 + W5 + R5 + 90°  | Window 1 + W1 + R2 + 90°  |
| 6       | 1    | Window 2 + W1 + R2 + 180° | Window 2 + W1 + R5 + 180° | Window 2 + W1 + R2 + 180° |
|         | 2    | Window 2 + W1 + R2 + 270° | Window 2 + W1 + R5 + 90°  | Window 2 + W1 + R2 + 90°  |
|         | 3    | Window 2 + W1 + R2 + 90°  | Window 2 + W1 + R5 + 270° | Window 2 + W1 + R2 + 270° |
|         | 4    | Window 2 + W1 + R2 + 0°   | Window 2 + W1 + R5 + 0°   | Window 2 + W1 + R2 + 0°   |
|         | 5    | Window 1 + W1 + R2 + 270° | Window 1 + W1 + R5 + 90°  | Window 1 + W1 + R2 + 90°  |
| 12      | 1    | Window 2 + W1 + R2 + 270° | Window 2 + W5 + R5 + 90°  | Window 2 + W1 + R2 + 180° |
|         | 2    | Window 2 + W1 + R2 + 180° | Window 2 + W5 + R5 + 180° | Window 2 + W1 + R2 + 90°  |
|         | 3    | Window 2 + W1 + R2 + 90°  | Window 2 + W5 + R5 + 270° | Window 2 + W1 + R2 + 270° |
|         | 4    | Window 2 + W1 + R2 + 0°   | Window 2 + W5 + R5 + 0°   | Window 2 + W1 + R2 + 0°   |
|         | 5    | Window 2 + W5 + R2 + 270° | Window 2 + W1 + R5 + 180° | Window 2 + W5 + R2 + 90°  |
| 24      | 1    | Window 2 + W5 + R5 + 270° | Window 2 + W5 + R5 + 180° | Window 2 + W5 + R5 + 270° |
|         | 2    | Window 2 + W5 + R5 + 180° | Window 2 + W5 + R5 + 270° | Window 2 + W5 + R5 + 90°  |
|         | 3    | Window 2 + W5 + R5 + 90°  | Window 2 + W5 + R5 + 90°  | Window 2 + W5 + R5 + 180° |
|         | 4    | Window 2 + W5 + R5 + 0°   | Window 2 + W5 + R5 + 0°   | Window 2 + W5 + R5 + 0°   |
|         | 5    | Window 2 + W6 + R5 + 270° | Window 2 + W6 + R5 + 180° | Window 2 + W6 + R5 + 270° |

**Figura C2: Impactos ambientais acumulados para diferentes cenários políticos para as casas padrão com forro e solução ótima.**



## APÊNDICE D: SOBRE A AUTORA

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/0005799199227330>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4048-2668>

### Graduação (2009-2013):

Graduação em Engenharia Civil

Universidade Federal do Piauí, UFPI, Teresina, Brasil

Título: Análise bioclimática de habitações populares em Teresina

Orientadora: Ana Lúcia Ribeiro Camillo da Silveira

### Mestrado (2015-2017):

Mestrado em Estruturas e Construção Civil

Universidade de Brasília, UnB, Brasília, Brasil

Título: Depleção abiótica e potencial de aquecimento global no ciclo de vida de telhado verde comparativamente a um telhado convencional

Orientadora: Rosa Maria Spoto

Co-orientador: Thiago Oliveira Rodrigues

### Produções oriundas da tese:

1. LIRA, Júlia Santiago de Matos Monteiro; DE SOUZA, Calebe Paiva Gomes; DA SILVA, Elaine Aparecida. A novel approach to dynamic life cycle assessment: Integrating climate change and cooling operation patterns in building energy consumption forecasting. **Energy and Buildings**, v. 337, p. 115656, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115656>
2. LIRA, Julia Santiago; DA SILVA, Elaine Aparecida. A systematic literature review of dynamic life cycle assessment in Buildings: Challenges and guidelines. **Journal of Building Engineering**, p. 113503, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.113503>

### Produções pendentes de submissão:

- i. Estrutura de Tomada de Decisão Multicritério para melhorar o desempenho térmico e energético de habitações sociais em climas tropicais
- ii. Impactos ambientais de longo prazo do resfriamento em Habitações de Interesse Social: Integrando ADCV prospectiva e projeções de matriz elétrica brasileira
- iii. Manual de soluções construtivas para Habitações de Interesse Social resiliente ao clima tropical quente