



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DOUTORADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANA CAROLINA DIAS BARRETO DE SOUZA

**METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DA
INTEGRAÇÃO DE CARROS ELÉTRICOS EM EDIFICAÇÕES**

TD: 17 / 2024

Belém-PA

2024

ANA CAROLINA DIAS BARRETO DE SOUZA

**METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DA INTEGRAÇÃO
DE CARROS ELÉTRICOS EM EDIFICAÇÕES**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Instituto de Tecnologia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica.

Area de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Emília de Lima Tostes

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Carminda Célia Moura de Moura Carvalho

Belém-PA

2024

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

- D541m Dias Barreto de Souza, Ana Carolina.
Metodologia de Avaliação do Desempenho Energético da Integração
de Carros Elétricos em Edificações / Ana Carolina Dias Barreto de Souza.
— 2024.
160 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof^ª. Dra. Maria Emília de Lima Tostes
Coorientação:
Prof^ª. Dra. Carminda Célia Moura de Moura
Carvalho
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2024.
1. Etiquetagem. 2. Monte Carlo. 3. Sistemas Energéticos Prediais. 4.
Simulação de Desempenho Energético. 5. Retrofit.
I. Título.

CDD 621.042

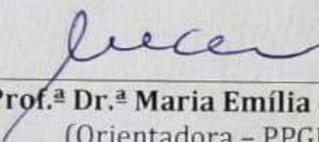
**"METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE
INTEGRAÇÃO DE CARROS ELÉTRICOS EM EDIFICAÇÕES"**

AUTORA: ANA CAROLINA DIAS BARRETO DE SOUZA

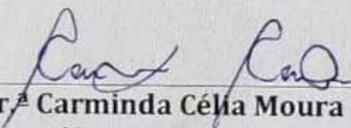
TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: 06/09/2024

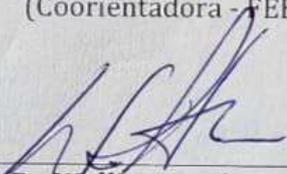
BANCA EXAMINADORA:



Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes
(Orientadora - PPGEE/UFPA)

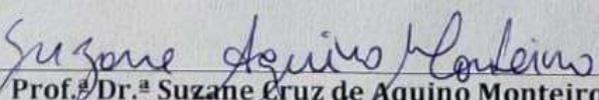


Prof.ª Dr.ª Carminda Célia Moura de Moura Carvalho
(Coorientadora - FEEB/UFPA)



Prof. Dr. Wellington da Silva Fonseca
(Avaliador Interno - PPGEE/UFPA)

Prof.ª Dr.ª Flávia Luciane Consoni de Mello
(Avaliadora Externa - UNICAMP)



Prof.ª Dr.ª Suzane Cruz de Aquino Monteiro
(Avaliadora Externa - UFRA)

VISTO:

Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

ANA CAROLINA DIAS BARRETO DE SOUZA

**METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DA
INTEGRAÇÃO DE CARROS ELÉTRICOS A EDIFICAÇÕES**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Instituto de Tecnologia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Emília de Lima Tostes.

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Carminda Célia Moura de Moura Carvalho.

Aprovada em 06 de setembro de 2024

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Maria Emília de Lima Tostes (ORIENTADORA – PPGEE/UFPA)

Prof.^a Dr.^a Carminda Célia Moura de Moura Carvalho (CO-ORIENTADOR – PPGAU/UFPA)

Prof.^a Dr.^a Flávia Luciane Consoni Melo (MEMBRO EXTERNO – UNICAMP)

Prof.^a Dr.^a Suzane Cruz de Aquino Monteiro (MEMBRO EXTERNO – UFOPA)

Prof. Dr. Wellington da Silva Fonseca (MEMBRO INTERNO – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso (PPGEE/ITEC/UFPA COORDENADOR)

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha família, em especial a alma da minha mãe Maria Antônia e da minha avó Ernandina que hoje me acompanham com a luz divina do céu"

Agradecimentos

Agradeço imensamente a Deus de infinita misericórdia, pelas grandes bênçãos já concedidas a mim e por essa conquista em especial. A Nossa Senhora de Nazaré por passar na frente e abrir meus caminhos nos momentos mais difíceis que enfrentei na vida, me acolhendo com seu colo de mãe quando perdi a minha.

Minha gratidão eterna ao amor incondicional da minha mãe Maria Antônia e da minha avó Ernandina, que hoje disfrutam da paz no reino dos céus. A todos os meus familiares pelo apoio e pelas orações, em especial à minha irmã Ana Paula e minha tia Edna que sempre são incansáveis em me ajudar. Ao meu cachorrinho Jimmy, por ser minha companhia e amor.

Aos amigos que acompanham, de perto ou de longe, a minha caminhada torcendo sempre pelo meu sucesso, em especial pelos que ajudaram na realização dessa pesquisa: Larissa Paredes, Aline Cardoso, Jonathan Munoz, Filipe Vasconcelos, Ana Beatriz Souza, Laisa Brianti, Vitória Elisa, Milena Marques, Gabriela Sardinha, Jackqueline Azevedo, Gabriel Abel, João Victor Reis, Allan Manito, Oscar M. Hernandez, Camila Alves, Carlos Eduardo Sobral, Dayane Terto, Josivan Rodrigues, Carlos E. Dias, Suzane Aquino, João Gabriel e João Rodrigo Muniz.

Sou grata aos professores do PPGAU e do PPGEE, em especial a minha orientadora Prof^a. Dr^a M^a Emília de Lima que me acolheu no CEAMAZON e me fez membro dessa família de excelentes pesquisadores e a minha coorientadora Prof^a. Dr^a Carminda Célia M. de M. Carvalho com suas excelentes contribuições. Obrigada pelos ensinamentos e todo o incentivo nessa caminhada. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará pela oportunidade de enriquecer meus conhecimentos. Aos membros da banca por terem aceitado o convite e por suas contribuições a este trabalho.

Ao Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON), pela disponibilização do espaço físico para a realização do estudo e pela colaboração com o trabalho.

A Mitsidi, em especial ao Alexandre Schinazi, Rosane Fukuoka, Gabriel Frasson, por todo o apoio e suporte para que essa jornada pudesse estar acontecendo.

Ao suporte da Nissan Tropical, por ter cedido gentilmente os carros elétricos e disponibilizado sua equipe técnica para as medições do carregamento dos veículos, em especial ao Raylson Silva, Hdnes, Ney e ao Izaac Nunes, a quem eu devo gratidão por ter articulado com essa equipe de suporte.

A minha psicóloga Gabriela Neuber e todos os profissionais da área da saúde que cuidaram da minha saúde mental, física e emocional.

SOUZA, Ana Carolina Dias Barreto de. **Metodologia de Avaliação do Desempenho Energético da Integração de Carros Elétricos a Edificações**. 2024. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2023.

Resumo

As metodologias de diagnóstico energético vêm incorporando nas análises não só sistemas de consumo, mas também de geração de energia, possibilitando a classificação de Edificações autossuficientes de energia, como *Near Zero Energy Building* (NZEB) ou *Positive Energy Building* (PEB). No âmbito da mobilidade elétrica, a maior adesão de veículos elétricos (VE's) traz desafios e oportunidades na área de consumo, gestão e efficientização de energia elétrica. O impacto que essa carga robusta e crescente pode acarretar ao ser integrada nos edifícios, novos e existentes, ainda não é contemplada nas avaliações de desempenho. Consequentemente as metodologias de obtenção das certificações e etiquetagens não levam em consideração a carga desse sistema como uso final individual. Para edifícios com uma etiqueta de eficiência energética (EE) e autossuficiência, a introdução de VE's pode resultar na desclassificação da classificação devido ao aumento do consumo energético. Portanto, analisar o impacto da integração de VE's em edificações, visa subsidiar a formulação ou revisão de metodologias de diagnósticos energéticos, que passem a contemplar o sistema de carregamento de VE integrado às edificações. Esta tese avalia a influência do carregamento de VE's em edifícios com etiqueta NZEB/PEB do Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edifícios (PBE Edifica). Utilizando levantamentos *in loco*, modelagem computacional e análise termoenergética com *software* como *OpenStudio* e *EnergyPlus*, foi realizada uma classificação energética em um edifício na cidade de Belém, Estado do Pará, Brasil. Posteriormente, simulações de fluxo de energia empregando modelos probabilísticos com método de Monte Carlo foram executadas no *software OpenDSS* para examinar o impacto da integração de VEs, sem (cenário 01) e com (cenário 02) a implementação de técnicas de gerenciamento do lado da demanda. As análises usando a metodologia de etiquetagem demonstraram que o edifício tem classificação de EE nível C e autossuficiência NZEB. O cenário 01 gerou um aumento de 69,28% no consumo de energia, reduzindo o nível de EE para D e resultando na perda da classe NZEB. O cenário 02 aumentou em 40,50% o consumo, percentual menor que o cenário 01 e garantiu o retorno da classe NZEB perdida no cenário 1, mas não retornou o nível de EE para a classe C. Os resultados destacam a necessidade de estratégias imediatas e abrangentes de gerenciamento de energia. No

entanto, essas estratégias não são suficientes se outras restrições de consumo ou medidas de EE não forem aplicadas a outros sistemas do edifício. Para isso, as medidas de EE foram propostas e avaliadas, nos sistemas de ar-condicionado e iluminação. Posteriormente, foi elaborada uma equação para indicar o nível máximo de consumo de energia que poderia ser aumentado sem comprometer o desempenho energético do edifício e a classificação NZEB. Por fim, o *software OpenDSS* foi usado para simular a maior disponibilidade de carregamento de VEs após o *retrofit*. Com o *retrofit* proposto, o edifício melhorou as classificações de EE em três níveis, e a porcentagem da classificação NZEB aumentou em 33,28%. Essas medidas também aumentaram a carga de carregamento de VEs em 20%, mantendo o nível máximo de EE e a classificação NZEB.

Palavras-chaves: Etiquetagem; Monte Carlo; Sistemas Energéticos Prediais; Simulação de Desempenho Energético; *Retrofit*.

SOUZA, Ana Carolina Dias Barreto de. **Metodologia de Avaliação do Desempenho Energético da Integração de Carros Elétricos a Edificações**. 2024. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2023.

Abstract

Energy diagnosis methodologies have been incorporating energy consumption and energy generation systems into their analysis, making it possible to classify energy-self-sufficient buildings as Near Zero Energy Buildings (NZEB) or Positive Energy Buildings (PEB). In electric mobility, the increased use of electric vehicles (EVs) brings challenges and opportunities in electricity consumption, management and efficiency. The impact of this robust and growing load when integrated into new and existing buildings is not yet considered in performance assessments. Consequently, the methodologies for obtaining certifications and labels do not consider the load of this system as an individual end-use. For buildings with energy efficiency (EE) and self-sufficiency labels, introducing EVs can result in the rating being downgraded due to increased energy consumption. Therefore, analyzing the impact of integrating EVs into buildings aims to support the formulation or revision of energy diagnosis methodologies that include EV charging systems integrated into buildings. This thesis evaluates the influence of EV charging in buildings with the NZEB/PEB label from the Brazilian Building Labeling Program (PBE Edifica). Using on-site surveys, computer modelling and thermo-energetic analysis with software such as OpenStudio and EnergyPlus, an energy rating was carried out on a building in Belém, State of Pará, Brazil. Subsequently, energy flow simulations using probabilistic models with the Monte Carlo method were run in OpenDSS software to examine the impact of integrating EVs without (scenario 01) and with (scenario 02) the implementation of demand-side management techniques. Analysis using the labelling methodology showed that the building has an EE level C rating and NZEB self-sufficiency. Scenario 01 generated a 69.28% increase in energy consumption, reducing the EE level to D and resulting in the loss of the NZEB class. Scenario 02 increased consumption by 40.50%, a lower percentage than scenario 01 and guaranteed the return of the NZEB class lost in scenario 1, but did not return the EE level to class C. The results highlight the need for immediate and comprehensive energy management strategies. However, these strategies are not sufficient if other consumption restrictions or EE measures are not applied to other systems in the building. To this end, EE measures were proposed and evaluated in the air conditioning and lighting systems. Subsequently, an equation was drawn up to indicate the maximum level of energy

consumption that could be increased without compromising the building's energy performance and NZEB rating. Finally, OpenDSS software was used to simulate the increased availability of EV charging after the retrofit. With the proposed retrofit, the building improved its EE ratings by three levels, and the NZEB rating percentage increased by 33.28%. These measures also increased the EV charging load by 20% while maintaining the maximum EE level and NZEB rating.

Keywords: Labeling; Monte Carlo; Building Energy Systems; Energy Performance Simulation; Retrofit.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Definição da questão de pesquisa e suas motivações.....	5
1.3. Objetivos.....	6
1.4. Hipóteses de Pesquisa.....	7
1.5. Justificativa da Pesquisa.....	8
1.6. Estado da Arte.....	12
1.7. Originalidade e Contribuição científica.....	23
1.8. Contribuição científica.....	24
1.9. Organização da tese.....	25
2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES E A MOBILIDADE ELÉTRICA.....	27
Capítulo 2.....	27
2.1. Eficiência Energética em Edificações.....	27
2.1.1. Diagnóstico energético em edificações – o conceito, a importância, as principais metodologias consolidadas.....	29
2.1.2. Principais usos finais (sistemas prediais) e seus impactos no consumo energético em edificações.....	30
2.2. Sistemas de monitoramento energético em edificações - <i>Smart metering</i>	31
2.3. Energia solar em edificações.....	33
2.3.1. Integração do sistema fotovoltaico com a arquitetura.....	34
2.4. <i>Near Zero Energy Building</i> – NZEB.....	35
2.4.1. O panorama do <i>Near Zero Energy Building</i> no Brasil e no mundo.....	37
2.4.1.1. Legislações e certificações.....	37
2.4.1.2. Certificação GBC Brasil <i>Zero Energy</i> , do <i>GreenBuilding Council</i> Brasil.....	38
2.4.1.3. Selo LEED <i>Zero Energy</i>	39
2.4.1.4. Certificação EDGE (<i>Excellence in Design for Greater Efficiencies</i>).....	40

2.4.1.5.	Certificação PBE Edifica, do PROCEL Edifica	41
2.5.	Mobilidade elétrica	46
2.5.1.	O mercado de Veículos elétricos	47
2.5.2.	Políticas Públicas	52
2.5.3.	Incentivos nacionais	55
2.5.3.1.	Política Nacional de Mobilidade Urbana (Lei nº 12.587/2012)	56
2.5.4.	Veículos Elétricos no Brasil e no mundo	56
2.5.4.1.	Veículo Elétrico Híbrido e sua variável <i>plug-in</i>	57
2.5.4.2.	Veículo Elétrico a Bateria (VEB)	57
2.5.4.3.	Veículo Elétrico a Células a Combustível (VECC)	58
2.5.5.	Principais elementos da infraestrutura de mobilidade elétrica	58
2.5.5.1.	Carregamento de veículos elétricos.....	59
2.5.5.2.	Estágio de carregamento	60
2.5.5.3.	Tipos de comunicação	60
2.5.6.	Infraestrutura de mobilidade elétrica nas edificações	61
2.5.6.1.	Benefícios da inserção de estações de recarga nas edificações.....	64
2.5.6.2.	Impactos das cargas de consumo de VE nas edificações	66
3.	METODOLOGIA.....	68
	Capítulo 3.....	68
3.1.	Considerações iniciais	68
3.2.	Metodologia da Pesquisa	68
3.3.	Etapa 1: Metodologia de Avaliação de Eficiência e Autossuficiência Energética em Edificações, sem considerar o sistema de abastecimento de VE.....	70
3.3.1.	Levantamento de dados	72
3.3.2.	Modelagem Computacional	72
3.3.3.	Simulação Termoenergética	73
3.3.4.	Determinação da Classificação de Eficiência Energética de Edificações não residenciais..	76
3.3.4.1.	Determinação da Classificação Individual de Eficiência Energética da Envoltória	76

3.3.4.2.	Determinação da Classificação Individual de Eficiência Energética do Sistema de Ar-condicionado	77
3.3.4.3.	Determinação da Classificação Individual de Eficiência Energética do Sistema de iluminação	78
3.3.4.4.	Determinação da Classificação Geral de Eficiência Energética da Edificação	79
3.3.5.	Determinação da Classificação de Autossuficiência Energética de Edificações	82
3.4.	Etapa 2: Metodologia de Previsibilidade da Integração do Sistema de Abastecimento de Carros Elétricos em Edificações	83
3.4.1.	Técnicas de resposta do lado da demanda e explicação do algoritmo	85
3.4.1.1.	Modelos probabilísticos e simulação de Monte Carlo	85
3.4.1.2.	Fundamentação Matemática	85
3.4.1.3.	Estratégia de Gerenciamento do Lado da Demanda (DMS)	86
3.4.1.4.	Implementações com uso de <i>Python</i>	87
3.5.	Etapa 3: Metodologia de Avaliação de Eficiência e Autossuficiência Energética de Edificações não residenciais, considerando o sistema de abastecimento de VE	88
3.6.	Etapa 4: Metodologia de Proposição de Medidas de Eficiência Energética para <i>Retrofit</i> de Sistemas Construtivos	89
3.7.	Etapa 5: Indicador de consumo de energia elétrica para nível de eficiência energética A....	90
3.8.	Etapa 6: Metodologia de Previsibilidade de Incremento da Integração do Sistema de Abastecimento de VE em Edificações	91
4.	ESTUDO DE CASO	94
	Capítulo 4.....	94
4.1.	Considerações Iniciais	94
4.2.	Descrição da edificação	94
4.3.	Caracterização dos Sistemas prediais	94
4.3.1.	Sistema construtivo – envoltória	94
4.3.2.	Sistemas de Iluminação e Ar-Condicionado	95
4.3.3.	Sistema de Monitoramento Energético (curva de carga e histórico de consumo).....	95
4.3.4.	Sistema de Geração de Energia Renovável (Fotovoltaico)	96

4.3.5. Sistema de Abastecimento de veículos elétricos	97
5. RESULTADO E DISCUSSÃO.....	98
Capítulo 5.....	98
5.1. Considerações Iniciais	98
5.2. Resultados da Classificação do Nível de Eficiência Energética do CEAMAZON.....	98
5.2.1. Classificação de Eficiência Energética da Envoltória do CEAMAZON	98
5.2.2. Classificação de Eficiência Energética do Sistema de Ar-Condicionado do CEAMAZON	99
5.2.3. Classificação de Eficiência Energética do Sistema de Iluminação do CEAMAZON	100
5.2.4. Classificação Geral de Eficiência Energética do CEAMAZON	101
5.2.5. Classificação de Autossuficiência Energética do CEAMAZON.....	102
5.3. Classificação de Eficiência Energética do CEAMAZON, considerando o consumo de Carros Elétricos: Cenário 01, sem Otimização	102
5.4. Classificação de Autossuficiência Energética do CEAMAZON, considerando o consumo de Carros Elétricos: Cenário 01, VE sem Otimização.....	103
5.5. Classificação de Eficiência Energética do CEAMAZON, considerando o consumo de Carros Elétricos: Cenário 02, VE com Otimização	104
5.6. Classificação de Autossuficiência Energética do CEAMAZON, considerando o consumo de Carros Elétricos: Cenário 02, VE com otimização e geração renovável	105
5.7. Proposição de Medidas de Eficiência Energética: Cenário 03, <i>Retrofit</i> de Sistemas Prediais do CEAMAZON	105
5.7.1. Proposta de <i>Retrofit</i> do Sistema de Ar-condicionado do CEAMAZON.....	105
5.7.2. Proposta de <i>Retrofit</i> do Sistema de Iluminação do CEAMAZON	106
5.8. Classificação da Eficiência e Autossuficiência Energética do Cenário 03: <i>Retrofit</i> do CEAMAZON	107
5.8.1. Classificação da Eficiência Energética do Sistema de Ar-condicionado Proposto para o <i>Retrofit</i> do CEAMAZON	107
5.8.2. Classificação da Eficiência Energética do Sistema de Iluminação Proposto para o <i>Retrofit</i> do CEAMAZON	107
5.8.3. Classificação da Eficiência Energética Geral do Cenário 03: <i>Retrofit</i> do CEAMAZON.....	108

5.8.4. Classificação de Autossuficiência Energética do Cenário 03: <i>Retrofit</i> do CEAMAZON	109
5.9. Indicador de Consumo de Energia Elétrica para o Nível A de Eficiência Energética.....	109
5.10. Previsibilidade de Incremento da Integração do Sistema de Abastecimento de VE em Edificações: Cenário 04	110
5.11. Classificação da Eficiência Energética Geral do CEAMAZON: Cenário 04, com aumento da integração de VE	111
5.11.1. Classificação de Autossuficiência Energética do CEAMAZON: Cenário 04, com aumento da integração de VE	112
5.12. Discussão.....	112
5.0. Conclusões do capítulo.....	117
6. CONCLUSÕES	118
Capítulo 6.....	118
6.1. Considerações Iniciais	118
6.2. Conclusões gerais	118
6.3. Limitações e recomendações para trabalhos futuros	121
7. APÊNDICES	122
APÊNDICE A	122
APÊNDICE B	124
APÊNDICE C	125
8. REFERÊNCIAS	127

Lista de Figuras

Figura 1 – Porcentagem de consumo energético mensal por classe.....	27
Figura 2 – Arquitetura de um sistema de monitoramento inteligente.	32
Figura 3 – Evolução da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia em Edifícios - ENCE.....	41
Figura 4 – Nova ENCE, página principal.	42
Figura 5 – Nova ENCE, página dois.....	43
Figura 6 – Nova ENCE, página final.	44
Figura 7 – Crescimento dos veículos elétricos no mundo.	49
Figura 8 – Expansão anual da frota de carros elétricos no Brasil por tipo.	50
Figura 9 – Evolução das vendas de BEVs no Brasil.....	50
Figura 10 – Expansão anual da frota de carros elétricos no Pará por tipo.	51
Figura 11 – Ranking dos carros elétricos por cidade do estado do Pará em 2023.	52
Figura 12 – Representação da arquitetura dos VEH/VEHPL.....	57
Figura 13 – Representação da arquitetura dos VEBs.....	58
Figura 14 – Funcionamento dos tipos de carregamentos condutivos.....	59
Figura 15 – Efeitos do carregamento de VE's.	67
Figura 16 – Etapas da avaliação de eficiência energética de edificações.....	71
Figura 17 – Imagem comparativa do modelo real (a) com o modelo de referência (b).....	74
Figura 18 – Tipologias de edificações e sua tabela de referência correspondente.....	75
Figura 19 – Fluxograma metodológico para previsibilidade de integração de VE no edifício.....	84
Figura 20 - Fluxograma metodológico das simulações OpenDSS e Monte Carlo.	88
Figura 21 – Fluxograma metodológico das simulações OpenDSS e Monte Carlo.	93
Figura 22 - Foto em perspectiva do edifício CEAMAZON.	94
Figura 23 – Consumo e geração anual de energia elétrica do CEAMAZON, em 2022.....	96
Figura 24 - Geração mensal de energia solar fotovoltaica do CEAMAZON em 2022 (kWh). Erro! Indicador não definido.	
Figura 25 – Geração fotovoltaica e consumo de energia elétrica do CEAMAZON, considerando recarga de carros elétricos, sem otimização.....	102
Figura 26 – Geração fotovoltaica e consumo de energia elétrica do CEAMAZON, considerando recarga de carros elétricos, com otimização.....	104
Figura 27 – Comparação da geração fotovoltaica e consumo de energia do CEAMAZON, para os cenários base, 01 e 02, em relação ao limite da classificação NZEB da INI-C.....	114
Figura 28 – Comparação do consumo de energia elétrica dos cenários base, 03 e 04, em relação ao limite máximo de consumo de energia necessário para manter o nível A do INI-C.....	115
Figura 29 – O impacto de cada cenário no potencial de geração de energia renovável (PG) da CEAMAZON com base na classificação de autossuficiência energética INI-C.....	116

Lista de Tabelas

Tabela 1. Matriz de correlação de indicadores de uso de energia (EUI), em edificações não residenciais.	31
Tabela 2. Características das estações de recarga.	60
Tabela 3. Síntese de informações de carregamento de veículos elétricos.	60
Tabela 4. Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética de acordo com a classificação climática aplicada para as zonas 7 e 8.	77
Tabela 5. Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética para o sistema de iluminação, de acordo com a INI-C.	78
Tabela 6. Limites de Intervalo para Classificação Geral de Eficiência Energética da Edificação, de acordo com a INI-C.	81
Tabela 7. Limites das faixas de classificações de eficiência energética do envelope CEAMAZON existente.	99
Tabela 8. Limites das faixas de eficiência energética do sistema de ar-condicionado CEAMAZON existente, adaptado da INI-C.	99
Tabela 9. Limites das classificações de eficiência energética do sistema de iluminação existente no edifício CEAMAZON.	100
Tabela 10. Limites das faixas da classificação geral de eficiência energética do edifício do CEAMAZON.	101
Tabela 11. Modelos de HVAC para proposta de retrofit do sistema de ar-condicionado do CEA-MAZON.	106
Tabela 12. Informações do sistema de iluminação proposto para o retrofit do edifício CEAMAZON.	106
Tabela 13. Valores de RedCEP e CEP utilizados para calcular o limite de consumo de energia primária do edifício CEAMAZON.	110
Tabela 14. Percentual de redução no consumo de energia e classificação de EE dos novos sistemas prediais propostos no <i>retrofit</i> de cada bloco do CEAMAZON, com integração de VE antes e depois do aumento no consumo de abastecimento.	111
Tabela 15. Síntese comparativa dos resultados de consumo e níveis de EE e NZEB/EEP dos cenários analisados para o edifício CEAMAZON.	112

Lista de Abreviações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABVE	Associação Brasileira do Veículo Elétrico
AFIR	Regulamento do Parlamento sobre Infraestruturas para Combustíveis Alternativos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AVAC	Aquecimento, ventilação e ar-condicionado
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i> / veículos 100% elétricos a bateria
BORDA	Excelência em Design para Maior Eficiência
CAAE, real ou refD	Consumo de energia elétrica do sistema de aquecimento de água do edifício real
CEP, real	Consumo de energia primária do estado real do edifício
CEP,refDA ,B ou C	Consumo de energia primária da condição de referência (nível D) para todos os blocos
CEP,refDA, B ou C	Consumo de energia primária da condição de referência (nível D) para todos os blocos
CEPrealA,B ou C	Consumo de energia primária do edifício real para todos os blocos
CgTT,refDA ,B ou C	Térmica anual total da condição do edifício de referência (nível D) para todos os blocos
CgTT,refDA, B ou C	Térmica anual total da condição do edifício de referência (nível D) para todos os blocos
CgTTrealA,B ou C	Carga térmica anual total do edifício real para todos os blocos
CILrealA,B ou C	Consumo de iluminação do edifício real para todos os blocos
CR,refDA ,B ou C	Consumo de refrigeração da condição de referência (nível D) do edifício para todos os blocos
CR,refDA,B ou C	Consumo de refrigeração da condição de referência (nível D) do edifício para todos os blocos
CRrealA,B ou C	Consumo de refrigeração do edifício real para todos os blocos
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CEAMAZO N	Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia
CEAMAZO N	Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia
CEE,real	Consumo total de energia elétrica do edifício real
CEP,ref.	O consumo de energia primária da condição de referência do edifício
CEPn	Consumo de energia primária de um bloco n
CEQ	Consumo de equipamentos
CET,real	Consumo total de energia térmica do edifício real
CIL,refDA, B ou C	Consumo de iluminação do edifício de referência (nível D) condiciona todos os blocos
CIL,refDA,B ou C	Consumo de iluminação do edifício de referência (nível D) condiciona todos os blocos

CO ²	Dióxido de carbono
CRCEPD-A	Coefficiente de redução do consumo de energia primária da classificação D para A
CRCgTTD-A	Coefficiente total anual de redução da carga térmica para classificações de D a A
CVE	Consumo de veículos elétricos
DPI	Densidade de potência de iluminação
DSM	<i>Demand-side management</i>
EE	Eficiência Energética
EEP	Edificação de energia positiva
e-mobilidade	Eletro-mobilidade
EMS	Sistemas de gestão de energia
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
ENCE	Selo Nacional Brasileiro de Conservação de Energia
EPBD	Energy performance of buildings directive
EPBD	Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios
EPE	Projeto Meta da Empresa de Pesquisas Energéticas
ESG	<i>Environmental, Social and Corporate Governance</i>
ESG	Ambiental, Social e Governança
EUA	Estados Unidos da América
EUI	<i>Energy Use Intensity</i>
EVSE	Estações de carregamento ou equipamentos de fornecimento de veículos elétricos
FF	Fator de forma
FGV	Fundação Getúlio Vargas
FV	Fotovoltaico Fotovoltaico
GBC	<i>Green Building Council</i>
GD	geração distribuída
GEE	gases de efeito estufa
GEE	Energia gerada por fontes de energia renováveis locais
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
INI's	Instruções Normativas INMETRO para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações
INI-C	Instruções Normativas do INMETRO para Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais de Serviços e Públicas
INI-C	Instrução Normativa do Inmetro para Classificação de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
INI-R	Instruções Normativas do INMETRO para Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
INI-R	Instrução Normativa do Inmetro para Classificação de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
ITEC	Instituto de Tecnologia
NBR	Norma Brasileira
NZEB	<i>Near Zero Energy Building</i>
NZEB	Edifício com energia quase zero
O&M	Operação e Manutenção
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PAFT	Porcentagem total da área de abertura da fachada
PAFT	Relação janela-parede
PBE Edifica	Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações
PBE-Edifica	Edifício Brasileiro
PCT Guamá	Parque de Ciência e Tecnologia do Guamá
PDE	Densidade de potência do equipamento
PEB	Edifício de Energia Positiva
PECADO	Sistema Interligado Nacional do Brasil
PEDs	Distritos de Energia Positiva
EEP	Edifício de Energia Positiva
PEV	Veículo elétrico plug-in / <i>Plug-in electric vehicle</i>
PG	Potencial de geração de energia
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>
PILA	Valores limite de potência de iluminação para classificação A
PILD	Valores limite de potência de iluminação para classificação D
PNME	Plataforma Nacional e Mobilidade Elétrica
PNME	Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica Brasileira
POÇO	Potência total de iluminação instalada
POLICIAL	Coeficiente de desempenho
PPGEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PROMOB-e	Projeto de Cooperação de Sistemas de Propulsão Eficiente
pu	Tensão por unidade
RAC	Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações
RedCEP ponderado	Redução ponderada do consumo de energia primária
RedCEPA, B OU C	Redução do consumo de energia primária para os blocos A, B ou C
RedCEPn	Redução do consumo de energia primária de um bloco n
RedCgTTA, B ou C	Redução das cargas térmicas anuais totais para todos os blocos

RTQ-C	Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
RTQ-R	Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SC	Autoconsumo
SCSB	Balço autoconsumo-suficiência
SISGEE	Sistema de Gestão de Energia Elétrica
SISGEE	Sistema de Gestão do Consumo de Energia Elétrica
SS	Autossuficiência
UC	Unidade consumidora
UE	União Europeia
UFPA	Universidade Federal do Pará
V2B	<i>Vehicle to building</i>
V2G	Veículo para Rede Elétrica
V2G	Veículo para rede
VE	Veículos elétricos
VEB	Veículos Elétricos a Bateria
VECC	Veículos Elétricos a Células de Combustível
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
RedCIL A,B ou C	Redução no consumo de iluminação para todos os blocos
RedCR A,B ou C	Redução no consumo de ar-condicionado dos blocos
VEs	Veículos elétricos
VP	Fotovoltaico
ZB	Zona Bioclimática
ZEB	<i>Zero Energy Building</i>
ZEB	Edifícios com emissão zero
f_{CE}	O fator de conversão de energia elétrica em energia primária
f_{CE}	Fator de conversão de energia elétrica em energia primária
f_{CT}	Fator de conversão de energia térmica em energia primária
f_{CT}	O fator de conversão de energia térmica em energia primária

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

No âmbito do consumo de energia elétrica, um dos agentes que mais impactam a demanda de energia do Brasil são as edificações. Apresentando um percentual de consumo energético de aproximadamente 50% de toda a energia produzida nacionalmente (EPE, 2023a), as edificações são consideradas alvos estratégicos e prioritários na busca da diminuição do crescente aumento da demanda energética. Atrelada a essa questão, tem-se a mitigação de impactos ambientais, advindos do uso de fontes não renováveis ainda presentes na matriz energética do país.

Segundo (EPE, 2023b), a matriz brasileira apresenta mais de 47% de geração de energia proveniente de fontes renováveis de médio (usinas hidrelétricas) e baixo (usinas fotovoltaicas, eólica e de biomassa e outras) impacto ambiental. Apesar dessas características, faz-se necessário o processo de expansão dessa matriz para atender a demanda energética crescente, bem como os resultados das mudanças climáticas (crise hídrica, por exemplo). Porém, ressalta-se que essa expansão é demorada e onerosa, principalmente por se tratar de um país de grandes dimensões continentais.

É importante salientar que, devido ao demorado e caro processo de expansão da matriz energética com a crise climática (que tem efeitos negativos e imprevisíveis), a alternativa para manter o suprimento de energia estável tem sido o acionamento das fontes de alto impacto ambiental (usinas termelétricas). Essa alternativa resulta no aumento do preço da tarifa de energia elétrica, corroborando com o agravamento da crise financeira e social do Brasil.

Visando mitigar essas questões, a adoção de medidas para efficientizar o consumo energético em diversos setores vem se mostrando a solução mais factível, tanto do ponto de vista energético-financeiro, quanto ambiental. Isso se deve ao fato de que a efficientização dos usos finais de energia tem apresentado uma redução significativa do consumo energético, como ocorre em edificações, que segundo o (PROCEL, 2022) quando levam em consideração as diretrizes de regulamentos, normas e instruções normativas de eficiência energética, alcançam redução de consumo de 50% e 30% nas edificações novas e nas existentes que sofrem reforma, respectivamente.

Do ponto de vista financeiro, o *payback* das ações de eficiência energética é curto, por conta da possibilidade de economia de energia elétrica, tanto na fase inicial de implementação dos sistemas prediais, quanto na de operação e manutenção (O&M), ao longo da vida útil. Essas economias de consumo multiplicadas por valores altos de tarifa de energia, principalmente em

Estados como o Pará, que figura no primeiro lugar do *ranking* dos valores mais caros do país (ANEEL, 2024), geram um montante elevado, ultrapassando rapidamente o capital inicial investido. Além disso acarretam um fluxo de caixa acumulativo, ao longo do tempo de vida útil de equipamentos, com a economia obtida anualmente após o *payback* ser alcançado (SOUZA, 2017).

No que se refere às questões ambientais, a eficiência energética tem seus múltiplos benefícios (IEA, 2015), percebidos na conversão da quantidade de energia elétrica que deixa de ser consumida, resultando em menores quantidades de emissões de gases como o dióxido de carbono (CO₂), contribuindo para a mitigação das alterações climáticas (ROAF; CRICHTON; NICOL, 2009). Esse resultado pode ser analisado pela equivalência a toneladas de gases que deixam de ir à atmosfera, ao evitar o uso de fontes de combustíveis fósseis, ou a quantidade de hectares de reflorestamento, ou até mesmo a quantidade de litros de gasolina que deixam de ser consumidos.

Visando obter esses benefícios, a eficiência energética nas edificações é aplicada aos sistemas prediais como envoltória, iluminação, condicionamento de ar (arrefecimento ou calefação), e aquecimento de água, como indicam as metodologias do Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBE Edifica), descritas nos Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios (RTQ's) e nas Instruções Normativas INMETRO para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações (INI's), do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) Portaria nº. 309 (06/09/2022) (BRASIL; ME; INMETRO, 2022). Esses sistemas são avaliados pois acarretam significativos custos decorrentes do consumo de energia elétrica ao longo da vida útil das edificações, que podem chegar a 80 anos em operação (INMETRO, 2022a).

Atrelada à redução de consumo de eletricidade, tem-se a gestão do consumo energético através do monitoramento das cargas, com uso de medidores, principalmente em horários prioritários como o horário de ponta: período do dia com mais pico de consumo, conseqüentemente o mais caro para consumir energia elétrica. O encarecimento tarifário nesse horário é uma das medidas para tentar frear o aumento descomedido da demanda de energia, além de ser uma forma de repassar ao consumidor o preço alto dos custos de acionamento de fontes não renováveis para suprir essa demanda. Portanto, diagnosticar e gerenciar o consumo de energia se torna uma estratégia importante nesse contexto.

Já o uso da geração de energia renovável figura como outra forma de minimizar a necessidade de expansão da matriz energética com fontes de maior impacto financeiro e ambiental, maximizando o uso de fontes de menor impulsão. Aliado a isso, o sistema de fontes

“limpas” tem ganhado significativa adesão nas edificações e, como esse avanço vem se fazendo de forma notória, esse sistema tem sido incorporado nas metodologias de análise do desempenho energético de edificações como das certificações GBC Brasil *Zero Energy*, EDGE *Zero Carbon* e do PBE Edifica (GBC BRASIL, 2022), (EDGE BUILDINGS, 2024) e (INMETRO, 2022a).

A integração do sistema renovável às metodologias desempenho energético possibilitou o aparecimento de novos conceitos e classificações de edificações, as chamadas *Near Zero Energy Building* (NZEB), *Zero Energy Building* (ZEB) ou edificação de energia positiva (EEP). Essas são edificações que “como o próprio nome indica, têm seu consumo de energia zerado ou ultrapassado por uma combinação de alta eficiência energética e geração de energia por fontes renováveis” (CTE, 2021).

Os conceitos de ZEB, NZEB e EEP não são mais percebidos como aspectos de um futuro remoto, mas sim como uma solução realista para a mitigação de emissões de CO₂ e para a redução do uso de energia elétrica. No Brasil, a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) do PBE Edifica, que já utilizava informações dos sistemas de energia renováveis como bonificações, para possibilitar um incremento na pontuação final de avaliação nos RTQ's (PBE EDIFICA, 2013), no momento de revisões de aperfeiçoamento, passou a incorporar esses elementos nas equações finais, compondo assim a avaliação de balanço energético nas INI's (BRASIL; ME; INMETRO, 2022).

Essa mudança significativa possibilitou a comprovação que o consumo de energia local anual é ou pode ser zerado por uma “combinação de alta eficiência energética e geração de energia por fontes renováveis” segundo (BRASIL, 2020), possibilitando a classificação das edificações nível A também como ZEB, NZEB e até mesmo EEP.

Outro mecanismo de avaliação que garante um atestado de desempenho é a Certificação *Zero Energy Building* (ZEB), ferramenta de avaliação desenvolvida pelo comitê técnico do *World Green Building Council*. Ela é fornecida para as edificações que comprovarem que o consumo de energia local de sua operação anual é zerado pela junção dos benefícios das ações de efficientização do uso de energia elétrica e da geração de energia produzida *in loco* proveniente de fontes renováveis (GBC BRASIL, 2022).

De acordo com (GBC BRASIL, 2022), a iniciativa tem por objetivo cumprir as metas de redução de emissões estipuladas na Conferência das Nações Unidas (COP) de Paris, de promover uma transformação mercadológica na área de eficiência energética, de alavancar a geração de energias renováveis de forma acelerada, de impulsionar a geração de emprego e o

desenvolvimento da inovação tecnológica, além de promover conforto ambiental aos ocupantes.

Na Europa, o contexto dos NZEB já está consolidado, e a Comissão Europeia já estipulou na Diretiva Desempenho Energético dos Edifícios a transição dos edifícios existentes com energia quase nula (NZEB), para edifícios com emissões zero (ZEB) até 2030 (COMISSÃO EUROPEIA; PARLAMENTO EUROPEU, 2024). De acordo com a Diretiva de Desempenho Energético de Edifícios, “Além de apoiar a neutralidade climática de longo prazo, os edifícios ZEB também trazem outros benefícios, como a melhoria da qualidade do ar, a digitalização de sistemas de energia para edifícios e a implantação de infraestrutura para mobilidade sustentável” (COMISSÃO EUROPEIA; PARLAMENTO EUROPEU, 2023).

A inovação e as novas tecnologias também permitem que os edifícios apoiem a descarbonização geral da economia, incluindo o setor dos transportes. Por exemplo, os edifícios podem ser aproveitados para desenvolver a infraestrutura de carregamento de veículos eléctricos (VE).

De acordo com a Comissão Europeia, os edifícios são cruciais para mudar o panorama da mobilidade. Eles fornecem as opções e recursos necessários para fornecer os modos eléctricos incorporados à infraestrutura eléctrica de seus edifícios privados e aos eletropostos externos nas estradas e em locais públicos (MILIEU; PANTEIA; TRINOMICS, 2022). Neste sentido, o Regulamento da Infraestrutura para Combustíveis Alternativos (AFIR) do Parlamento Europeu já prevê que cerca de 60% das recargas ocorrerão em edifícios privados (COMISSÃO EUROPEIA; PARLAMENTO EUROPEU, 2021).

Visando fomentar o debate sobre as possíveis trajetórias evolutivas dos aspectos e elementos que aumentam o consumo de energia eléctrica nas edificações, surgem novas formas de contribuição e participação ativa nos mercados de eletricidade por meio da resposta à demanda, do autoconsumo e armazenamento de energia gerenciável, e da adoção do transporte de baixa emissão de carbono, através da eletromobilidade (e-mobilidade) (CAVALCANTE et al., 2023; SILVA et al., 2023). Essas soluções estão alinhadas à descarbonização do sistema energético mundial, pois aumentam a eficiência dele e oferecem uma boa relação custo-benefício para usuários finais e gestores reduzirem suas emissões.

Em relação à eletromobilidade, há um movimento muito forte no mundo todo em direção aos carros eléctricos. Uma excelente adesão aos veículos eléctricos traz desafios e oportunidades de consumo, gestão e eficiência. O número crescente faz com que aumente a atenção com a promoção de infraestrutura urbana (nas vias públicas ou nas edificações), necessária para carregar os automóveis, e com o rápido desenvolvimento de tecnologia para a

eletromobilidade, com isso “uma visão sistemática das integrações energéticas e as interações entre edifícios e veículos é altamente necessária para apresentar a situação atual e os desafios” (ZHOU et al., 2019).

Segundo a Comissão Europeia (2022), a segunda preferência dos utilizadores de VE é recarregar no local de trabalho, representando 15% de toda a energia cobrada na União Europeia (UE). No entanto, a Comissão prevê que esta procura aumente para cerca de 25% até 2030, especialmente entre aqueles que não têm acesso ao carregamento doméstico. Perante isto, algumas empresas investem nas suas redes de carregamento para promover a mobilidade elétrica entre os seus colaboradores, oferecendo reembolso de custos de carregamento ou carregamento gratuito no local de trabalho (MILIEU; PANTEIA; TRINOMICS, 2022).

Isto pode fazer com que os proprietários de veículos elétricos prefiram não carregar em casa devido ao custo, à falta de carregamento doméstico ou à distância que exige outra recarga. Isto reforça a necessidade de examinar mais de perto os locais de trabalho no que diz respeito à crescente demanda de carregamento de VE e ao aumento do consumo de energia em edifícios comerciais, de serviços e públicos (MILIEU; PANTEIA; TRINOMICS, 2022).

Além disso, a introdução de energias renováveis e de veículos elétricos coloca novos desafios aos planeadores devido à sua intermitência. Estes fatores afetam a demanda de energia ativa de um edifício com base na capacidade da bateria do VE, no seu estado de carga, no tempo de chegada à estação de carregamento e no carregamento selecionado (MOREIRA et al., 2023).

1.2. Definição da questão de pesquisa e suas motivações

O setor energético enfrenta uma variedade de desafios do ponto de vista do desenvolvimento sustentável. No âmbito da mobilidade elétrica, uma maior adesão de veículos elétricos traz desafios e oportunidades na área de consumo, gestão e efficientização de energia elétrica. Segundo o Mapeamento e Diagnóstico das iniciativas sobre Mobilidade Elétrica no Brasil, de 2018 até 2021, a literatura tem mostrado que as análises realizadas no âmbito da eletromobilidade focam no impacto na rede elétrica, na geração e no armazenamento de energia, nas células de combustíveis, nos veículos elétricos, recarga de veículos, eletropostos e a influência de todos os elementos da mobilidade elétrica na rede de abastecimento de energia (PNME, 2022a).

Os efeitos da integração de abastecimento dos carros elétricos no desempenho de edificações ainda precisam ser mais explorados a fim de nortear as decisões de gerenciamento de consumo

energético e ações de eficiência energética. Portanto, analisar o impacto da mobilidade elétrica no segmento de edificações, no curto, médio e longo prazo, visa subsidiar a formulação ou revisão de metodologias de diagnósticos energéticos, que passem a contemplar o sistema de carregamento de VE integrado às edificações.

Além disso, a geração distribuída de energia renovável, em especial a solar fotovoltaica, integrada nas edificações vem promovendo uma maior autonomia energética, bem como o surgimento de novas classificações de edificações energeticamente eficientes que, através do balanço energético, onde se compara a geração e o consumo de energia, permite estabelecer o nível de autonomia energética da rede elétrica.

Portanto, levanta-se o questionamento acerca do quanto a implementação de carregamento de veículos pode comprometer o desempenho energético das edificações, já que o abastecimento de veículos, que até então não é considerado nas metodologias de diagnóstico energético e de classificação de NZEB (*Near Zero Energy Building*) e EEP (Edificações de Energia Positiva), pode apresentar uma carga de consumo significativa.

E considerando que a integração do fornecimento de carros elétricos nos edifícios é uma solução que impacta o seu desempenho, se torna essencial a busca por conhecimentos técnicos mais aprofundados para orientar as decisões de gestão do consumo de energia e as ações de eficiência energética em edificações, especialmente naquelas com baixo desempenho energético ou com desempenho ainda não medido, que desfavorece a integração sustentável do ponto de vista energético.

Em busca da solução dessa problemática, propõe-se os seguintes objetivos, descritos nos itens a seguir.

1.3. Objetivos

Como objetivo geral a pesquisa propõe a elaboração de uma metodologia de diagnóstico energético de edificações brasileiras, que analise o impacto do carregamento de veículos elétricos.

O edifício do Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON), localizado na cidade de Belém, Estado do Pará, Brasil, que já conta com infraestrutura para medição, geração fotovoltaica e carregamento de veículos elétricos, foi selecionado como objeto de estudo para a análise.

Com base neste objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

1. Classificar o desempenho de eficiência e autossuficiência energética dos sistemas prediais (envoltória, iluminação, ar-condicionado, fotovoltaico) do CEAMAZON, usando a metodologia de simulação da INI-C PBE Edifica, com uso dos *software's Energy Plus e OpenStudio*, para obter a classificação de eficiência energética (EE) nas condições existentes;
2. Elaborar uma metodologia para avaliar o impacto da integração de VE em edificações no balanço energético de classificação de NZEB e EEP, analisado em dois cenários: um sem gestão e outro com técnicas de gestão do lado da demanda para carregamento de VE;
3. Propor ações para melhoria dos sistemas prediais (*retrofit*), sempre que houver possibilidade de potencializar os ganhos energéticos, reavaliando a classificação de eficiência e autossuficiência energética da edificação para mensurar o impacto das ações;
4. Analisar o potencial para um aumento no consumo de eletricidade do edifício pós *retrofit*, visando gerar um indicador para o limite de aumento de consumo que o edifício pode sofrer, resultante da expansão dos sistemas construtivos e das cargas, sem prejudicar o desempenho energético do edifício, auxiliando o gestor do edifício nas tomadas de decisão na operação e manutenção (O&M);
5. Simular o incremento de carga do sistema de abastecimento de VE, dentro do indicador limite pré-estabelecido para a classificação nível A de EE;
6. Fomentar a integração de VE em edificações alinhada com as diretrizes de eficiência e autossuficiência energéticas estipuladas na Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) do PBE Edifica; e
7. Contribuir com a formulação de políticas públicas com a proposição de ações que incentivem a maior eficiência energética em edificações públicas.
- 8.

1.4. Hipóteses de Pesquisa

A partir do questionamento principal, para as edificações que forem classificadas como NZEB ou EEP, e passarem a receber uma carga que influencia a relação do balanço energético, aumentando a parcela de consumo, sugerem-se algumas hipóteses:

1. Dependendo do número de carros elétricos abastecidos simultaneamente no edifício, a integração de VEs pode ou não impactar o desempenho energético do edifício e a sua classificação NZEB/PEB, a menos que seja implementada uma gestão/estratégia de carregamento adequada.
2. Com base numa série de restrições/limitações, uma estratégia de carregamento adequada pode integrar com sucesso os VE nos edifícios, independentemente do número de carros elétricos abastecidos simultaneamente, sem o risco de perder a classificação NZEB/PEB ou de reduzir o desempenho energético.
3. Associadas as estratégias de gestão e otimização de carregamento de VE, as medidas de eficiência energética visando o *retrofit* de sistemas prediais são suficientes para prover a obtenção das mais altas classificações de eficiência e autossuficiência energética em edificações com integração de VEs.
4. As estratégias de gestão e otimização de carregamento de VE, podem contribuir com uma maior e melhor integração de VEs, quando combinadas com as medidas de eficiência energética visando o *retrofit* de sistemas prediais, sem impactar o desempenho de eficiência e autossuficiência energética das edificações.

1.5. Justificativa da Pesquisa

Constantemente são desenvolvidos meios de reduzir gastos energéticos e formas menos poluentes de gerar energia. No setor de edificações a arquitetura e a engenharia juntas são áreas muito eficientes para planejar edifícios que tenham baixo consumo energético, ou até que sejam autossuficientes energeticamente. Elaborados de forma multidisciplinar, os projetos energeticamente eficientes são capazes de reduzir o consumo de energia nos sistemas de maior demanda predial, visando eficientizar a envoltória, a iluminação, o condicionamento de ar e o sistema de aquecimento de água, e ainda mantendo a qualidade ao atender normas e regulamentações técnicas.

O surgimento e consolidação de projetos energeticamente eficientes são viabilizados através da criação de metodologias avaliativas, que norteiam os projetistas à aplicação de boas práticas projetuais e construtivas. Elas comprovam através de etiquetas, selos e certificações o nível de desempenho energético dos principais sistemas consumidores de energia elétrica das edificações, como a envoltória, o condicionamento de ar e a iluminação.

O avanço das discussões sobre a temática climática e ambiental, atrelada às questões energéticas, fomentam mudanças nas metodologias de diagnóstico, que vêm incorporando em

suas análises não só sistemas de consumo, mas também de geração de energia. Conforme citado anteriormente, essas incorporações possibilitaram a classificação de Edificações ZEB, NZEB e EEP, que são caracterizadas por possuírem um sistema de geração de energia renovável que supra por completo ou parcialmente a demanda de consumo da edificação.

Outro ponto de avanço, e que necessita de um olhar mais atento, é o abastecimento de veículos nas edificações que, por ser uma atividade com uma adesão progressiva mundialmente, apresenta um aquecimento significativo do mercado de eletromobilidade (e-mobilidade) nos últimos anos. Segundo a Associação Brasileira do Veículo Elétrico - ABVE (2022), as vendas veículos 100% elétricos a bateria e híbridos leves no Brasil tiveram aumento de 2022 a 2023, crescendo 50%, somente no primeiro semestre, com destaque para os veículos 100% elétricos a bateria (BEV) (ABVE, 2022b).

O país atingiu uma venda de 93.927 unidades de veículos leves eletrificados somente em 2023, incluindo *Hybrid Electric Vehicle* (HEV), *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* (PHEV) e *Battery Electric Vehicle* (BEV). A associação afirma que, só em dezembro de 2023, as vendas chegaram a 16.279 veículos, quase três vezes mais que no mesmo período de 2020, com isso, evidenciando a tendência de crescimento para os próximos anos (ABVE, 2022b).

Agora em 2024 reforça esse crescimento, pois, de janeiro a setembro, o mercado nacional emplacou 97.255 veículos leves eletrificados, número maior que todo ano de 2023 – que já tinha sido o melhor ano da história da eletromobilidade no Brasil (ABVE, 2024a).

Esses números mostram que a frota de veículos leves terá participação expressiva e crescente na transição energética da mobilidade no Brasil, onde o mercado tende a adotar cada vez mais o transporte sustentável, visando a Agenda ESG (*Environmental, Social and Corporate Governance*), como aponta a ABVE (2024).

Conforme explica Cao (2016), a infraestrutura da eletromobilidade possui alto potencial para influenciar o sistema de energia do edifício, pois o carregamento desses veículos é realizado nas próprias casas ou locais de trabalho dos usuários, que são locais que podem ser acessados de maneira mais conveniente do que as estações de recarga públicas. Porém a integração do carregamento de VEs com as edificações acarreta desafios.

Estes possuem seu sistema de abastecimento desatrelado fisicamente das edificações, por serem reabastecidos nos postos de gasolina, haja vista que majoritariamente o sistema de transporte de veículos leves é composto por veículos a gasolina ou diesel. Portanto, convencionalmente, a análise do balanço energético dos prédios não leva em consideração o consumo de energia do veículo. O que esclarece também a divulgação de dados de consumo de energia do setor de transporte e construção de forma desvinculada, seja no âmbito nacional

quanto internacional, denotando que convencionalmente o veículo está fisicamente separado do edifício (CAO, 2016).

Internacionalmente a Diretiva da União Europeia (UE) 2010/31/EU (UNIÃO EUROPEIA, 2021b), que é um instrumento legislativo criado para alcançar os objetivos de descarbonização estabelecidos para 2030 e 2050, não definiu claramente se o veículo deve ser considerado para a análise do balanço energético do edifício.

Porém, segundo Cao (2016), o abastecimento do veículo elétrico, integrado no sistema predial, pode influenciar definitivamente as curvas de carga do edifício e as interações da rede, o que eventualmente se refletirá em mais demanda de energia da rede elétrica fora do local ou em mais utilização da energia no local, proveniente da geração de energia renovável. Com isso, o equilíbrio de energia zero do edifício pode ser mais desafiador levando em consideração o consumo de energia do veículo.

Para o autor, outro ponto de atenção é que os veículos são uma carga dinâmica e móvel, e possuem mais liberdade de carregamento em diferentes locais, seja em eletropostos ou edifícios, o que deixa mais desafiadora a elaboração de uma metodologia de análise do balanço energético de edifícios (CAO, 2016).

O impacto que essa carga veicular robusta e crescente pode acarretar aos edifícios, novos e existentes, ainda não é contemplada nas avaliações de desempenho predial. Consequentemente as metodologias de obtenção das certificações e etiquetas não levam em consideração a carga desse sistema como uso final. A fim de garantir que os Edifícios de Energia Zero também sejam edifícios com eficiência energética, foi escolhida a metodologia da Etiquetagem PBE Edifica, que é caracterizada como uma ferramenta que se aplica em todo o território brasileiro, podendo ser um instrumento de grande relevância para o fomento da integração da mobilidade elétrica com as edificações.

Desse modo, esse trabalho visa ajustar/melhorar/complementar a metodologia de diagnóstico energético de edificações do Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBE Edifica), apresentada por meio da Instrução Normativa Inmetro para edificações comerciais, de serviços e públicas (INI-C), que avalia atualmente sistemas que possuem alta contribuição para o consumo de energia elétrica como: envoltória, iluminação, condicionamento de ar (calefação e/ou arrefecimento) e aquecimento de água. Através da incorporação do sistema de abastecimento de veículo elétrico na metodologia de avaliação energética de edificações, esse estudo prospecta uma contribuição positiva para a sociedade ao abranger mais um sistema de consumo elétrico predial.

Esta lacuna de informação deixa em aberto a possibilidade de questionamento da validade do resultado do diagnóstico das edificações que possuem a classificação de eficiência energética nível A. Pois a metodologia que leve em consideração a implantação de um sistema de consumo de energia elétrica, voltado para veículos, pode demandar que o solicitante da ENCE ateste que o excelente desempenho energético da sua edificação se mantém ou não.

Outro aspecto importante levantado pelos autores Munkhammar, Grahn e Widpen (2013), é que pelo fato da geração de energia fotovoltaica (PV) e a demanda de energia serem negativamente correlacionadas, em bases anuais e diurnas, existe a necessidade da gestão da superprodução de energia, nas redes de distribuição locais, para evitar reforços de rede dispendiosos, caso os níveis de penetração fotovoltaica aumentem (MUNKHAMMAR; GRAHN; WIDÉN, 2013).

Os autores afirmam que o aumento do consumo local é uma dessas opções. A introdução de um veículo elétrico plug-in carregado em casa (PEV) tem um impacto significativo na carga doméstica e potencialmente altera a coincidência entre a carga doméstica e a produção de energia fotovoltaica (MUNKHAMMAR; GRAHN; WIDÉN, 2013).

Edificações ZEB, NZEB e EEP, que são caracterizadas por possuírem um sistema de geração de energia renovável, que supre por completo ou parcialmente a sua demanda de consumo, precisaria ser reavaliada após a integração do carregamento de VE. Essa avaliação visa conhecer o impacto dessa nova carga no balanço energético da edificação e, consequentemente, na análise da necessidade de expandir ou não o sistema de geração a fim suprir o novo perfil de carga, além de ajustar o balanço para manter a classificação. Porém, sabe-se que as edificações possuem limitações físicas que podem impedir o aumento da geração *in loco*, como o caso da limitação de área de telhado, da orientação solar e até mesmo do sombreamento que a edificação pode sofrer do seu entorno imediato.

Com tudo que foi explanado, a escolha do objeto de estudo o Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON), teve embasamento no fato de que o “protagonismo do setor público para a redução do desperdício de energia em edificações é de grande importância, através de mais de 22 mil edificações próprias e de 1.400 imóveis alugados, representa uma parcela significativa do consumo total de eletricidade no país” (ELETROBRAS, 2019).

Além disso, segundo a Comissão Europeia (2022), a segunda preferência dos utilizadores de VE é recarregar no local de trabalho, representando 15% de toda a energia cobrada na União Europeia. No entanto, a Comissão prevê que esta procura aumente para cerca de 25% até 2030, especialmente entre aqueles que não têm acesso ao carregamento doméstico. Perante isto,

algumas empresas investem nas suas redes de carregamento para promover a mobilidade elétrica entre os seus colaboradores, oferecendo reembolso de custos de carregamento ou carregamento gratuito no local de trabalho (MILIEU; PANTEIA; TRINOMICS, 2022).

Isto pode fazer com que os proprietários de veículos elétricos prefiram não carregar em casa devido ao custo, à falta de carregamento doméstico ou à distância que exige outra recarga. Isto reforça a necessidade de examinar mais de perto os locais de trabalho no que diz respeito à crescente demanda de carregamento de VE e ao aumento do consumo de energia em edifícios comerciais, de serviços e públicos (MILIEU; PANTEIA; TRINOMICS, 2022).

A recarga no local de trabalho oferece opções flexíveis, pois os veículos elétricos (VEs) permanecem estacionados por longos períodos, até oito ou nove horas em dias úteis. Além disso, os VEs geralmente ficam estacionados próximos ao local de trabalho. Quando o local está conectado a um parque solar e utiliza recarga inteligente, há oportunidades de aproveitar os momentos de pico na geração de energia renovável, que são mais econômicos (FACHRIZAL et al., 2022).

O CEAMAZON é um renomado centro de pesquisa, ensino e inovação que atua nas áreas de eficiência energética, qualidade de energia, energia renovável, mobilidade elétrica, entre outros. Além dos temas de atuação citados, estão alinhados com o foco do presente trabalho os pesquisadores (docentes, discentes e funcionários) que atuam na gestão de consumo de energia elétrica do Campus universitário, utilizando uma ferramenta de monitoramento de consumo de edificações o *software* SISGEE, produto de desenvolvimento próprio e no projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) estratégico de mobilidade elétrica, chamado Sistema Inteligente de Mobilidade Elétrica Multimodal (SIMA).

Este último resultou da chamada estratégica de mobilidade elétrica eficiente nº 22/2018 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com financiamento da concessionária Norte Energia, que propiciou a aquisição de uma infraestrutura ímpar, com rede híbrida de geração distribuída renovável, infraestrutura de abastecimento de modais elétricos e os modais (ônibus e barco elétrico), sistema de armazenamento de energia elétrica, e sistema de gestão de energia de toda essa cadeia.

1.6. Estado da Arte

Visando oferecer um panorama geral sobre o tema, realizou-se uma pesquisa bibliográfica acerca dos estudos nas áreas de mobilidade elétrica, diagnóstico energético de edificações e

edificações energeticamente autossuficientes, mais precisamente na identificação de pesquisas que correlacionem os três assuntos.

Wang *et al.* (2012) avaliaram a integração dos VEs sob a ótica do gerenciamento de energia predial, mas em prédios comerciais. Os primeiros analisaram um prédio de escritórios equipado com dois tipos de energia renovável no local (solar e eólica), onde trataram os VEs como opção de armazenamentos de energia distribuídos. Nessa pesquisa, constatou-se que a integração de VEs no sistema energético predial pode melhorar a confiabilidade do fornecimento de energia, a eficiência energética e o conforto dos ocupantes.

Munkhammar *et al.* (2015) conduziram um estudo de caso para um sistema híbrido em um edifício residencial contendo um VE e um PV *in loco* em Westminster, no Reino Unido. Eles mostraram que na integração do VE com a edificação o aumento do consumo fica entre 14% e 61%. Também demonstraram que a coincidência entre a geração fotovoltaica e consumo de energia elétrica são ainda mais distintos em edifício residencial com o VE comparado ao sem o VE, porque o VE aumenta a demanda de energia principalmente no período noturno, quando não tem geração fotovoltaica.

Para os autores Munkhammar *et al.* (2015), a integração do abastecimento do VE aumenta a carga total do edifício e altera a capacidade de correspondência entre a carga do edifício e a produção fotovoltaica. Em estudo aplicado na Suécia, eles afirmam que o envio de energia renovável excedente na rede fica reduzida, enquanto aumenta o autoconsumo da geração fotovoltaica. Porém descobriram que tanto a energia renovável excedida quanto o autoconsumo da geração fotovoltaica são menores no ZEB, com o VE, em comparação com o cenário sem o VE, indicando uma capacidade de correspondência menor para o ZEB integrando o VE.

Analisando o carregamento de VE, o estudo de Quddus *et al.* (2018) demonstrou que o não gerenciamento de abastecimento pode desencadear um aumento extremo na demanda de eletricidade nos horários de pico e, conseqüentemente, prejudicar a estabilidade e a segurança da rede elétrica (Wang *et al.*, 2012). Concluindo que há uma necessidade urgente de gerenciar a atividade de carregamento de VEs para fomentar a escalabilidade de adesão de VEs de forma eficiente na rede elétrica. Porém, não analisou o impacto no desempenho da edificação, seja de maneira unitária ou em quantidade.

Para edificações com sistemas de abastecimento de VE a bateria integrados, Zhou *et al.* (2019) focaram na investigação e otimização multiobjetivos, incluindo consumo de energia, emissão de gases de efeito estufa (GEE), capacidade de correspondência anual e custo operacional anual. Segundo Zhou *et al.* (2019), vários estudos que tratam da integração de VEs

com edifícios focam na otimização do compartilhamento de energia e na utilização da energia renovável.

Em seu estudo, Li *et al.* (2019) afirmam que o desenvolvimento de esquemas de metodologias de desempenho energético é uma poderosa ferramenta de informação para mensurar a demanda anual de energia das edificações de forma abrangente. O que possibilita a criação de uma sociedade e um mercado mais consciente na busca de edificações energeticamente eficientes.

Abordando a gestão cooperativa de energia para sistemas multi energéticos, Li *et al.* (2019a) propõem um algoritmo projetado para melhorar a colaboração entre corpos de energia. O algoritmo é formulado como um problema de otimização distribuída, onde cada corpo de energia pode determinar suas operações ótimas com base em informações locais. Visa não apenas a programação para o dia seguinte, mas também a gestão de variações em tempo real nas cargas de energia e nos recursos renováveis (Li *et al.*, 2019a).

No artigo de Huang *et al.* (2020), é apresentada uma metodologia eficiente de coordenação de carregamento de VE, onde o sistema otimiza o carregamento de veículos elétricos, deslocando a carga de carregamento para períodos de alta geração de energia renovável, o que maximiza o uso da energia gerada localmente. Com isto, o controle coordenado melhora as taxas diárias de autoconsumo de energia renovável em até 19% em comparação com os controles convencionais, e ao coordenar o carregamento de VE com a geração de energia renovável, consegue-se uma redução de até 36% nos custos diários de eletricidade em comparação com os cenários sem controle VE.

O tempo de chegada e a porcentagem de carga do VE podem ser representados por modelos probabilísticos, como a distribuição de Poisson, conforme discutido em (Abdelsamad; Morsi; Sidhu, 2015), (Affonso; Kezunovic, 2018), e (Palomino; Parvania, 2020). O aumento do consumo de energia dos veículos elétricos (VE) pode resultar em contas de eletricidade mais elevadas para os proprietários ou ocupantes dos edifícios. Jang *et al.* (2020) destacam os problemas técnicos na adoção do carregamento de VE em casos de alta penetração, que aumentam anualmente na Coreia, onde a maioria dos habitantes vive em complexos de apartamentos e espera-se que partilhem lugares de estacionamento e carregadores. Tal configuração pode acarretar muitas extras para os complexos que enfrentam esse problema.

Em relação à infraestrutura elétrica do local, a Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica (PNME) destaca a importância da verificação do número de fases, capacidade do disjuntor e ramal de entrada, pois, dependendo do tamanho do sistema de potência, a instalação pode exigir ajustes relacionados ao aumento de carga ou alterações no nível de tensão de alimentação.

Além de garantir facilidade na instalação de eletrodutos com diâmetros adequados ou eletrocalhas para condutores elétricos, a publicação também destaca a necessidade de analisar a capacidade ociosa do alimentador em baixa tensão em relação à demanda horária sazonal de energia no ponto de recarga (PNME, 2020).

Devem ser instaladas infraestruturas elétricas adequadas e um sistema de carregamento inteligente para gerir e distribuir a carga de carregamento nos edifícios, a fim de minimizar o impacto do consumo de energia dos veículos elétricos. Os sistemas de carregamento inteligentes também podem otimizar os tempos de carregamento para evitar picos de demanda de eletricidade e reduzir o consumo global de eletricidade (Gillera *et al.*, 2021).

Os efeitos do carregamento de VEs em uma loja de varejo foram avaliados por Gillera *et al.* (2021), que propuseram vários cenários com tamanhos de estações, níveis de energia de carregamento (50 kW, 150 kW e 350 kW) e fatores de utilização, em várias zonas climáticas, e períodos do ano. Observaram as mudanças na demanda nos horários de pico mensais, no uso de eletricidade e na conta anual de energia, ressaltando que o uso de cargas flexíveis, energia solar fotovoltaica, armazenamento de energia e carregamento controlado de VEs podem mitigar as altas demandas de eletricidade causadas pelo carregamento rápido em corrente contínua (DC).

Outro ponto analisado foi a possibilidade de deslocar cargas de refrigeração e resfriamento durante o carregamento de VE, eliminando a carga de um resfriador ou ar-condicionado, por um curto período. Se essas cargas puderem ser desligadas enquanto o carregamento rápido do VE estiver ocorrendo, todas as cargas de carregamento do veículo para os cenários de 50 kW e 150 kW podem ser deslocadas. No entanto, para 350 kW isso não é possível porque as demandas de energia das estações de VE são ainda maiores do que todas as cargas de resfriamento e refrigeração (Gillera *et al.*, 2021).

Nesses casos, para Gillera *et al.* (2021), a estratégia proposta seria o uso simultâneo de armazenamento de energia térmica de bateria, que podem ser descarregados para equilibrar a alta demanda de energia por carregamento veicular. Por fim, eles concluíram que uma estação de carregamento em edificações pode fornecer a demanda diária de energia com capacidade suficiente, se controlado adequadamente.

Em (Gillera *et al.*, 2021), o objetivo do estudo foi avaliar como as estações de carregamento de veículos elétricos afetariam uma loja de varejo nos Estados Unidos, explorando o tamanho da estação, o nível de energia de carregamento e os modos de uso em diversas zonas climáticas e estações. Os autores mediram o impacto da tarifa anual de energia elétrica com as alterações geradas na demanda do edifício, por meio de simulações realizadas

com o *software EnergyPlus* e dados de medições realizadas no local. Eles concluíram que levar em conta as cargas flexíveis, a implantação de energia solar fotovoltaica no local, o armazenamento de energia e o carregamento controlado de veículos elétricos podem mitigar as altas demandas de eletricidade e as contas anuais de eletricidade causadas pelo carregamento rápido.

O impacto do consumo de energia dos VE nos edifícios depende de vários fatores, incluindo o número de VEs carregados, a taxa de carregamento e a capacidade da infraestrutura elétrica do edifício. Se um edifício tiver uma capacidade eléctrica limitada e muitos veículos eléctricos estiverem carregando de forma simultânea, o sistema eléctrico pode sobrecarregar, causando cortes de energia e danos nos equipamentos eléctricos. Fatores como capacidade da bateria do VE, estado de carga, tempo de chegada à estação de carregamento e método de carregamento selecionado afetam significativamente a demanda de energia ativa (Tabora *et al.*, 2021) (Moreira *et al.*, 2023).

No estudo, Gilleran *et al.* (2021) utilizaram perfis de carga de estação de veículos eléctricos sintéticos, para suprir a carência de dados de demanda de estações reais disponíveis. Eles usaram um modelo de estação de veículo eléctrico chamado EVI-EnSite, e adotaram algumas características como os níveis de estado de carga (relativamente baixo) quando o VE chega, e nível de carregamento da bateria a 90% do estado de carga quando o VE sai da estação.

Descobriram que o carregamento rápido pode ter um impacto significativo na demanda de energia nos horários pico, causando um aumento de mais de 250%, em alguns casos. Porém, comparativamente, pouca diferença no uso mensal de eletricidade. Perceberam que o aumento da demanda de pico intensifica à medida que os níveis de potência por porta aumentam. Para os autores, os problemas de capacidade são mais prováveis de ocorrer se os carregamentos de VEs se sobrepuserem às demandas da edificação (Gilleran *et al.*, 2021).

Shankar *et al.* (2021) abordaram a utilização de iluminação LED integrada com módulos fotovoltaicos em edifícios inteligentes, confirmando que a implementação desta estratégia pode ajudar a alcançar a classificação NZEB em edifícios. Este artigo apresenta referências para o consumo de sistemas de iluminação artificial em algumas tipologias, como edifícios acadêmicos que funcionam das 8h30 às 17h30, onde o consumo de iluminação representa entre 4-8% do consumo de energia renovável gerada no edifício (Shankar; Vijayakumar; Babu, 2021).

No estudo de caso, Qu (2021) analisou 12 medidas de *retrofit*, incluindo tecnologias passivas e ativas, usando o *software* eQUEST-3.64. As tecnologias ativas incluem um sistema de aquecimento e resfriamento de alta eficiência; lâmpadas de alta eficiência; sistema

fotovoltaico; e ventiladores ou bombas de frequência variável. Os resultados indicaram que o edifício reformado poderia economizar 37,1% de energia em comparação com edifícios de referência. Com relação ao sistema de iluminação artificial, o estudo mostrou uma redução no consumo de energia de até 72,67%, redução no consumo de energia para resfriamento durante os meses de verão de 37,15%, e a energia fotovoltaica de 66,7 MWh (Qu, 2021).

Em (Pinto Oliveira; Chianca Pimentel Filho; Alencar Freitas, 2021), embora a análise tenha sido realizada utilizando a metodologia de etiquetagem do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C), que já foi atualizada para a metodologia INI-C, o artigo mostra a relevância da rotulagem para avaliação dos sistemas existentes de edifícios públicos no Brasil. Foi possível estimar a eficiência dos sistemas de iluminação e ar-condicionado e obter a classificação de eficiência energética total deste edifício, considerando a contribuição da geração solar.

No estudo eles previram que a sobreposição ocorre quando as cargas de corrente alternada (CA) do edifício são as mais altas, no final da tarde (entre 12:00h e 18:00h). E explicam que essa coincidência ocorre devido a duas variáveis, o horário de funcionamento da edificação e o clima, por serem as principais variáveis que contribuem para o incremento da carga elétrica predial. Como solução sugerem que os veículos carreguem quando as cargas do edifício são mais baixas (a noite entre 20:00h e 6:00h), evitando assim que haja um grande impacto no pico mensal de demanda de eletricidade e na necessidade de expansão no sistema de distribuição (Gillera *et al.*, 2021).

Ao analisar questões relacionadas à instalação de equipamentos de carregamento, a PNME (2020) abordou a importância da verificação do contrato de demanda, em função do dimensionamento previsto no projeto do sistema de abastecimento de VE, visando ajustes que evitem multas por excesso de demanda.

Porém, se o edifício possuir uma fonte de energia renovável, como a geração de energia fotovoltaica (PV) ou eólica, pode compensar esse aumento no consumo de energia (Rohloff; Roberts; Goldstein, 2010; Sehar; Pipattanasomporn; Rahman, 2017). Entretanto, é importante considerar as limitações dos sistemas fotovoltaicos, como a baixa disponibilidade de áreas de cobertura suficientes ou restrições contratuais que impossibilitam o atendimento de 100% das demandas energéticas (Castillo-Calzadilla *et al.*, 2022).

Outro artigo que aborda o carregamento de veículos em edifícios é (Fachrizal *et al.*, 2022), que apresenta uma estrutura de dimensionamento PV-VE para estações de carregamento alimentadas por geração local de energia solar em edifícios comerciais. A estrutura considera o

desempenho de correspondência de carga e o equilíbrio de autoconsumo-suficiência (SCSB), que reflete o equilíbrio entre autoconsumo (SC) e autossuficiência (SS). Com base nos resultados apresentados, os autores concluíram que os esquemas de carregamento inteligente podem melhorar significativamente o desempenho de correspondência de carga em até 42,6 e 40,8 pontos percentuais para SC e SS, respectivamente, neste tipo de edifício.

Os autores ressaltam a importância do uso de um quadro de dimensionamento PV-VE para estações de carregamento, alimentadas por geração local de energia solar em edifícios. Segundo eles, este quadro deve considerar o desempenho de correspondência de carga e o equilíbrio autoconsumo-autossuficiência (SCSB), refletindo o equilíbrio entre autoconsumo (SC) e autossuficiência (SS) (Fachrizal *et al.*, 2022).

Considerando edifícios com energia líquida zero (ZEB), Keteng *et al.* avaliaram a eficiência energética de sistemas híbridos fotovoltaico-térmicos em edifícios com um estudo de caso de um edifício de escritórios em Pequim. Os autores desenvolveram um algoritmo de cálculo de eficiência energética de todo o processo (WPEEC, do inglês *whole-process energy efficiency calculation*), para analisar os fatores que influenciam a eficiência energética do edifício e calcularam o impacto desses fatores na área de instalação dos sistemas híbridos e na proporção de fornecimento e armazenamento de energia (Keteng *et al.*, 2022).

O estudo (Chang *et al.*, 2022) sugere que a integração de VEs com sistemas de energia solar (PV) pode aumentar significativamente a taxa de autoconsumo e autossuficiência dos edifícios. Isto implica que parte do consumo de energia dos VE pode ser satisfeita por energia gerada localmente, reduzindo a dependência de fontes externas. Embora o estudo não forneça uma percentagem exata do consumo de energia dos VE, em termos do consumo total do edifício, menciona que a taxa de autoconsumo pode aumentar até 94% devido à grande capacidade de armazenamento das baterias dos VE. Isto sugere que uma parte significativa da energia consumida pelos VE pode provir de sistemas fotovoltaicos instalados em edifícios.

Com foco na programação ideal de sistemas de energia, Zand *et al.* (2022) abordam a programação ótima de sistemas energéticos em edifícios, principalmente no contexto de hubs energéticos (EHs) e sistemas integrados de energia (IES). O artigo refere-se a estudos que propuseram modelos abrangentes para EHs, que são considerados modelos essenciais para compreender como programar de forma otimizada a produção e o consumo de energia para atender às demandas de carga do edifício. Segundo os autores, estas estratégias garantem que os sistemas energéticos possam adaptar-se às condições em mudança, mantendo ao mesmo tempo a eficiência (Zhang *et al.*, 2022).

Castillo-Calzadilla et al. (2022) comentam sobre o pequeno número de estudos que analisam o balanço de energia em edifícios. Eles investigam o carregamento de VEs em Distritos de Energia Positiva (PEDs) por meio de uma análise baseada em simulação em seis edifícios no norte da Espanha. O estudo avalia os balanços de energia com 405 VEs usando a lei de Ohm e discute os centros de carregamento de VEs inteligentes para reduzir os custos de reforço da rede. Os autores provam que os balanços de energia são limitados pelo desempenho energético dos edifícios, que, por sua vez, depende do nível de eficiência da envoltória e dos equipamentos que compõem os sistemas prediais.

Eles também comentam sobre os altos requisitos que os edifícios devem atender para obter uma classificação EE A ou B como bom desempenho térmico e sistemas de construção, e a dificuldade que os edifícios existentes, especialmente os muito antigos, têm em cumprir os padrões de EE (Castillo-Calzadilla *et al.*, 2022).

Castillo-Calzadilla *et al.* (2022) concluíram que quanto mais ineficiente o edifício é relativamente à sua etiqueta, mais negativo se torna o balanço energético anual com a integração de veículos elétricos, uma vez que este (balanço energético) é diretamente proporcional à classificação energética do edifício.

Na revisão sistemática da previsão e otimização baseadas em dados para alcançar edifícios com energia positiva e zero líquida, Mousavi *et al.* (2023) revisaram um total de 177 estudos, com 60% focados na eficiência energética, e sugere que a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina, *Internet of Things* (IoT) e otimização pode levar a melhorias substanciais na eficiência energética. Embora não quantifique uma redução total específica, o estudo observou uma redução de 26% no consumo de energia nas residências e de 17% nos ambientes comerciais devido à implementação de tecnologias de controle inteligente e otimização, como sensores de presença e controle de intensidade luminosa em sistemas de iluminação (Mousavi *et al.*, 2023).

Park *et al.* (2023), desenvolveram um estudo que inclui veículo-rede (V2G), sistemas de armazenamento de energia e sistemas fotovoltaicos, e compararam os benefícios da integração de VEs em edifícios considerando as diferentes estações do ano. Eles concluem que em dias nublados, os VEs podem ser mais importantes no consumo de energia excedente no edifício.

ZHU *et al.* (2023) propõem um método de configuração ideal para estações de carregamento para atender à crescente demanda e aborda os desafios do carregamento de VE em edifícios de escritórios. A estrutura inclui a previsão da carga de carregamento do VE e o uso de algoritmos genéticos para otimização, o que melhora significativamente as taxas de utilização e satisfação. As taxas de satisfação podem chegar a 96,54% e 97,48% para períodos

de projeto de 5 e 10 anos, respectivamente, com melhorias significativas de desempenho. O estudo destaca a eficácia deste método e apela a mais investigação à medida que aumenta a utilização de VE.

Nessa linha, Park *et al.* (2023a) analisaram a otimização de sistemas de energia em edifícios, com foco na infraestrutura de Veículos Elétricos (VE) e nas classificações de Edifícios com Energia Zero (ZEB). Como metodologia, os autores utilizaram um modelo de aprendizagem automática para prever a demanda de carregamento de VE e simulações computacionais com o software EnergyPlus para estimar a demanda de energia do edifício.

Neste artigo, a demanda de carregamento de VE é considerada na equação do balanço de energia elétrica do edifício, onde a demanda de carregamento de VE é combinada com a demanda elétrica global do edifício, medindo o impacto na capacidade total exigida pelo sistema energético. A demanda de VE representou 2,8% (222,88 kWh) da demanda total de eletricidade na tipologia escritório (7.930,5 kWh) e 1,5% (14,36 kWh) na tipologia residencial (4.800,00 kWh) (Park *et al.*, 2023a).

Ao analisar o uso racional de energia em centros esportivos, por meio de simulações computacionais com o *software* TRNSYS (do inglês, *Transient System Simulation Tool*), Katsaprakakis *et al.* (2023) combinaram medidas de economia de energia ativa e passiva, bem como geração de energia fotovoltaica, resultando em uma redução total de 5.026.869 kWh no consumo energético do edifício, o que representa uma poupança de 100,9% na energia primária consumida, transformando o centro desportivo numa instalação ZEB com energia zero.

Após a implementação das medidas de eficiência energética, a análise revelou um consumo total anual de energia primária de 4.981.197 kWh, enquanto a produção de energia primária pela central fotovoltaica foi de 1.275.969 kWh. Entre as medidas de EE estava a substituição de sistemas de iluminação ineficientes pela tecnologia LED, que proporcionou economia ecológica de mais de 70% no consumo de energia para iluminação, totalizando uma redução de 187.890 kWh (Katsaprakakis *et al.*, 2023).

A introdução de energias renováveis e de veículos elétricos (VE) coloca novos desafios aos planejadores devido à sua intermitência. Como precaução, devem ser instaladas infraestruturas elétricas adequadas e sistemas de carregamento inteligentes para gerir e distribuir a carga de carregamento nos edifícios, minimizando o impacto do consumo de energia dos VE. Estes sistemas podem otimizar os tempos de carregamento para evitar picos de demanda de energia e reduzir o consumo global de eletricidade (Dos Santos Junior *et al.*, 2024).

Sørensen *et al.* (2024) conduziram uma extensa pesquisa sobre carregamento de veículos elétricos e a relação entre ele e os edifícios. Os dados recolhidos dos pontos de carregamento e dos veículos são frequentemente utilizados para estudos de VE.

Ao analisar os efeitos interativos das cargas de abastecimento de VE no consumo de energia dos edifícios, Liao *et al.* (2024) investigaram o gerenciamento de energia de sistemas fotovoltaicos e sistemas de baterias em quatro comunidades de edifícios universitários, comerciais, residenciais e escritórios. Foram realizadas simulações com o *software EnergyPlus* para calcular o consumo de energia dos edifícios e a geração de energia dos sistemas fotovoltaicos e *Python*, para simular o modelo de carregamento de veículos elétricos (VEs) pelo método Monte Carlo (Liao *et al.*, 2024).

A pesquisa revela que a carga de carregamento de VE varia significativamente entre diferentes comunidades de edifícios. As comunidades residenciais e comerciais recebem uma grande carga de carregamento, representando aproximadamente 40% e 30% da carga total, respectivamente, enquanto as comunidades de escritórios e campus têm uma carga de cerca de 5 a 10% (Liao *et al.*, 2024).

No artigo de revisão *Performance of Zero Energy Building and Energy Efficiency Solutions*, Belussi *et al.* (2019) discutem a modernização de edifícios com sistemas de iluminação artificial e ar condicionado. Eles afirmam que, em geral, os esforços de modernização visam melhorar o desempenho energético e, ao mesmo tempo, garantir o conforto e a usabilidade dos edifícios. Entre as várias ações de EE levantadas, os autores mencionam o uso de lâmpadas LED, sua integração com sistemas de iluminação natural e o uso de sistemas de controle de iluminação artificial para minimizar o consumo de eletricidade e maximizar o conforto visual, mas não fornecem números de redução de consumo. Em relação aos sistemas de ar-condicionado, além do uso de ventilação natural e do *retrofit* do sistema, o artigo também menciona que a implementação de algoritmos de controle avançados em sistemas de ar-condicionado pode levar a economias de energia que variam de 17% a 38% em comparação com os sistemas tradicionais de volume de ar constante.

Os autores Bjelland; Brozovsky; e Hrynyszyn (2024) apresentam várias medidas de eficiência energética em projetos de *retrofit*. Com relação aos sistemas de ar-condicionado e iluminação artificial, o estudo que analisou 87 artigos quantifica que aproximadamente 63% dos estudos trataram da instalação de novos sistemas HVA e que aproximadamente 26% dos estudos analisados incorporaram melhorias na iluminação, mas não há dados detalhados sobre a magnitude da redução no consumo de energia resultante apenas das medidas desses sistemas.

Entretanto, menciona que, em geral, a maioria dos projetos de *retrofit* analisados alcançou uma redução média no consumo de energia de aproximadamente 51,2%, com variações entre 39,4% e 63,1% em um intervalo de confiança de 95%. Isso indica que, em muitos casos, os projetos de eficiência energética foram eficazes na redução significativa do consumo de energia (Bjelland; Brozovsky; Hrynyszyn, 2024).

Analisando medidas de eficiência energética via simulação computacional com os *softwares DesignBuilder e EnergyPlus*, incluindo o uso de tecnologias de ar condicionado ativo e iluminação de alta eficiência para reduzir o consumo de energia, Park *et al.* (2024) mensuraram uma redução de 11,6% no consumo de energia com a implantação da iluminação LED, reduzindo o consumo de 75,8 kWh/m² para 67,0 kWh/m². Quanto ao sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (HVAC, do inglês *Heating, Ventilating and Air Conditioning*), a melhoria da estanqueidade do edifício, uma das medidas implementadas, resultou na redução do consumo de energia para aquecimento.

O consumo de energia para aquecimento foi reduzido em 45,2% para 33,5 kWh/m², mas houve um aumento no consumo de energia para refrigeração, que passou de 29,3 kWh/m² para 34,0 kWh/m². Ainda assim, a eficiência global do sistema HVAC foi melhorada devido à redução da carga térmica externa, resultando numa utilização mais eficiente da energia. Nesse estudo, o valor total da redução do consumo de energia do edifício após a implementação de um conjunto abrangente de *retrofit*, que incluiu a instalação de sistemas de iluminação LED, sistemas HVAC de alta eficiência e outras medidas de eficiência energética, foi de 41,4% (Park *et al.*, 2024).

Etemad *et al.* (2024), aplicaram a tecnologia BIM (do inglês, *Building Information Modeling*) como recurso para análise de medidas de eficiência energética em sistemas HVAC utilizando os *softwares Revit e EnergyPlus*. O estudo indicou uma redução de 104.302 kWh na energia elétrica consumida anualmente pelo edifício após a instalação do novo sistema de refrigeração com a implantação do sistema de fluxo variável de refrigerante (VRF), representando uma redução de 50% no consumo de energia de refrigeração do edifício em comparação com o sistema anterior (Etemad *et al.*, 2024).

Em conclusão, os estudos analisam várias abordagens para melhorar a eficiência energética e integrar veículos elétricos em edifícios, destacando tecnologias avançadas e gestão inteligente de energia. A investigação mostra que é possível obter reduções significativas no consumo de energia e otimizar a infraestrutura de carregamento de VE através de algoritmos de controle, simulações computacionais e integração de sistemas fotovoltaicos.

No entanto, existe uma baixa quantidade de análises do impacto da integração dos VE na manutenção do elevado nível de desempenho das classificações de eficiência energética dos edifícios. Esta baixa quantidade de análises limita uma compreensão completa de como a mobilidade eléctrica afeta a eficiência energética global de edifícios sustentáveis e energeticamente eficientes. Assim, este estudo visa promover a formulação ou revisão de metodologias de diagnóstico energético, incluindo o sistema de carregamento de VE integrado em edifícios.

1.7. Originalidade e Contribuição científica

A literatura tem mostrado que as altas demandas de uso de energia eléctrica das edificações já estão sobrecarregando os sistemas de eletricidade, portanto, adicionar novas demandas como as de carregamento de VE representa um desafio ainda maior.

Além de que, se o abastecimento de VE for considerado como um sistema predial, deve-se levar em consideração que ele possui uma particularidade diferente dos outros sistemas existentes (envoltória, iluminação, condicionamento de ar e aquecimento de água) já analisados nas metodologias consolidadas – os VEs não são elementos fixos à edificação, diferente de equipamentos de ar-condicionado e iluminação que continuam instalados de forma fixa e prontos para o acionamento, seja manual ou programado. Porém os veículos são equipamentos dinâmicos, que possuem cargas imprevisíveis.

Eles são dinâmicos pois o condutor pode sair e voltar, ou não, com o VE quando quiser e imprevisíveis pois, não se sabe com qual nível de carregamento a bateria vai chegar e demandar energia da edificação. Além de que o número de VE abastecendo simultaneamente em uma edificação pode afetar muito o de pico demanda de energia.

Gilleran *et al.* (2021) demonstram que o pico de demanda de uma estação de abastecimento de 350 kW (por ponto), com capacidade para seis VEs, depende de quando os veículos chegam para carregar. Ou seja, se todos os veículos carregassem ao mesmo tempo, precisariam de até 2,1 MW de eletricidade apenas para a estação de VE, sem contar as demais cargas da edificação.

Em relação a outro aspecto relacionado com as edificações NZEB e EEP, que são tipologias que possuem geração de energia renovável própria, segundo Cunha (2021) “as afinidades entre a tecnologia dos VEs e da geração solar fotovoltaica (FV), são pilares emergentes da transição energética mundial” (Cunha, 2021). Para ele, a sinergia entre VE e FV possui um grande potencial no aprimoramento do desempenho energético das edificações, e

precisa ser mais bem explorada por meio de metodologias de diagnósticos que contemplem indicadores e diretrizes que norteiem a avaliação dessa associação.

Saber quantificar o consumo de energia por tipo de edificação e de sistema, e qual a energia foi usada, para (Li *et al.*, 2019b) “é a chave para alcançar estratégias eficazes de eficiência energética”. Tendo isso em vista, incluir em metodologias de diagnóstico o abastecimento de VE está alinhado com esse pensamento, com potencial de tornar o consumo futuro de energia dessa atividade mais fácil de prever e administrar.

Portanto, o resultado deste estudo busca suprir a necessidade da elaboração de uma metodologia de diagnósticos que apresente a contribuição do abastecimento de VE no desempenho e balanço energético de edificações, alinhada com as diretrizes de EE. Visa-se com esse estudo cobrir as lacunas científicas anteriormente mencionadas e fomentar o desenvolvimento de estratégias de eficiência energética em edificações, direcionadas e assertivas para mitigar e/ou gerenciar os impactos do carregamento de veículos elétricos.

O resultado pode levar a atualização de normativas exigindo a determinação de limites mínimos e máximos de carregamento de VE em edificações, bem como da definição da quantidade de VE abastecendo simultaneamente, de forma a não comprometer o desempenho energético da edificação. Tudo isso aplicado a cada tipologia de edificação e zona bioclimática onde a edificação está inserida, seguindo o que já vem sendo praticado pelas diretrizes das regulamentações consolidadas.

1.8. Contribuição científica

Como contribuição, esse trabalho busca responder de que forma o carregamento de veículos elétricos integrado às edificações pode ser gerenciado, alinhado com as diretrizes de eficiência e autossuficiência energética estipuladas no contexto brasileiro. Portanto, considerando o que foi exposto até aqui, e com um estudo de caso no Brasil, o trabalho pretende contribuir com:

1. Uma metodologia que visa inserir o sistema de fornecimento de VE como sistema de uso final em edifícios, quantificando os impactos que a integração de VE tem no nível de eficiência e autossuficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos, considerando as diretrizes da metodologia brasileira de avaliação de EE e NZEB/EEP determinadas pela metodologia de Etiquetagem do PBE Edifica;
2. A simulação de cenários de nível de carga para chegadas e saídas de VE, com base em análises estocásticas, como o método de Monte Carlo, com abordagem realista baseada

em valores de medição in loco, e gerando resultados com boas aproximações do que aconteceria na prática com a integração de VEs em edifícios;

3. Uma metodologia de sistema de gestão de energia (EMS, do inglês *Energy Management Systems*) com técnicas de otimização, visando mitigar os impactos do consumo de VE na procura, no consumo e nos níveis de EE e NZEB nos edifícios;
4. A verificação dos impactos que as medidas de eficiência energética para apoiar a inserção de novos usos energéticos, decorrentes de sistemas e equipamentos que surgiram ao longo dos anos, com a evolução tecnológica ou mesmo a expansão de usos existentes que estão desatualizados;
5. O estabelecimento de um indicador limite para a expansão do consumo de energia dos sistemas prediais, visando garantir o bom desempenho energético dos edifícios;
6. A determinação de uma premissa de gestão dos consumos do sistema de abastecimento de VE integrados nos edifícios, promovendo uma melhor gestão dos recursos energéticos e mantendo o alinhamento com as orientações da metodologia de desempenho energético do edifício; e
7. A avaliação da possibilidade de aumentar a integração dos VE, acompanhando a tendência do mercado, mas sem comprometer a eficiência energética e a classificação de autossuficiência dos edifícios.

É importante destacar que a metodologia proposta nesta tese pode ser replicada nacionalmente para todas as regiões do Brasil, pois está alinhada à Instrução Normativa do Inmetro para Classificação de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (INI-C), que está estruturada com base na NBR15220-3, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2005, 2024), o padrão brasileiro de zoneamento bioclimático.

Além disso, permite escalabilidades para todos os edifícios não residenciais, ou seja, edifícios comerciais, de serviços e públicos. Portanto, para avaliar imóveis residenciais é necessário alinhar a metodologia com a Instrução Normativa do Inmetro para Classificação de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais - INI-R (INMETRO, 2022b).

1.9. Organização da tese

Capítulo 1. INTRODUÇÃO, inicia com uma breve apresentação da temática escolhida na pesquisa, a fim de contextualizar o tema da tese. Nesse capítulo constam as motivações do estudo e sua problematização que culminaram na formulação dos objetivos gerais e específicos que se pretende alcançar, justificados pela relevância do estudo proposto. Finaliza-se com a

distribuição dos tópicos abordados durante o decorrer da pesquisa como embasamento teórico e técnico para desenvolvê-la.

Capítulo 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA, que apresenta os principais conceitos obtidos por meio de revisão bibliográfica e documental sobre a eficiência energética voltada para edificações, que norteiam este estudo como, diagnóstico energético, principais usos finais de energia elétrica em edificações, sistemas de monitoramento de consumo energético, geração de energia renovável e armazenamento de energia integradas as edificações, assim como as principais certificações ambientais e energéticas mundiais, com destaque para a certificação Procel Edifica do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica de Edificações, que é ferramenta crucial neste trabalho. Apresenta ainda uma abordagem a respeito da mobilidade elétrica, com enfoque nos veículos leves, nos principais elementos de infraestrutura e sua interoperabilidade nas edificações.

Capítulo 3. METODOLOGIA DE PESQUISA, expõe todas as etapas que conduzem a elaboração e aplicação da metodologia proposta para uma análise mais completa a respeito da *performance* energética de edificações não residenciais, acrescentando a mobilidade elétrica à metodologia atualmente empregada nos regulamentos das certificações.

Capítulo 4. ESTUDO DE CASO, a apresentação da edificação que servirá como estudo de caso ocorre nesse capítulo, possibilitando a aplicação da metodologia.

Capítulo 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO, nesse capítulo os resultados das 6 etapas propostas no capítulo 3 são avaliados, juntamente com a análise de cenários que respondem as hipóteses da questão de pesquisa, além da seção de discussões onde são realizadas comparações de cada resultado.

Capítulo 6. CONCLUSÕES, são documentadas as conclusões observadas de acordo com os objetivos do trabalho, apresentam-se as considerações finais acerca da mobilidade elétrica no desempenho energético das edificações, as limitações presentes na pesquisa e algumas recomendações para pesquisas futuras.

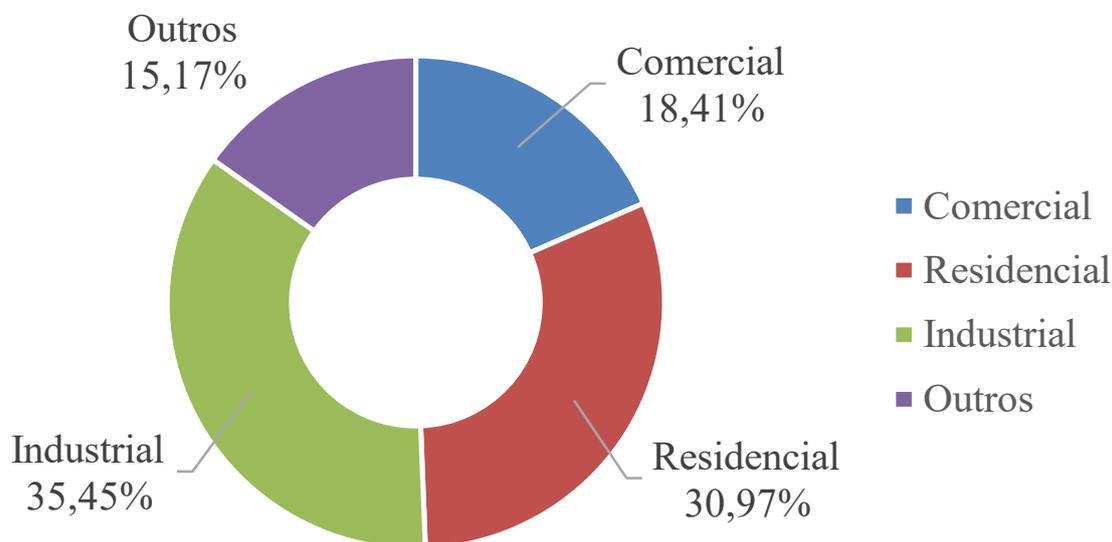
2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES E A MOBILIDADE ELÉTRICA

2.1. Eficiência Energética em Edificações

Mundialmente os edifícios são responsáveis por 40% do consumo de energia e 36% das emissões diretas e indiretas de gases com efeito de estufa relacionadas com a energia, conforme dados da Diretiva da União Europeia, que trata sobre desempenho energético em edificações. Segundo o documento a busca pela resiliência na Europa está atrelada às ações que visam tornar as edificações mais eficientes, do ponto de vista energético, e menos dependentes dos combustíveis fósseis. O que vem impulsionando a proposição de novos padrões mínimos de desempenho energético obrigatórios (*European Union, 2021b*).

Como o setor da construção civil permanece impactando no aumento do consumo energético **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Figura 1, devido a disparidade entre a execução de novas edificações e a reforma dos edifícios antigos, no Brasil também é notado um aumento do consumo de eletricidade pelo setor de edifícios comerciais (EPE, 2023c). A previsão é de aumento até 2025. Esse consumo progressivo só poderá ser reduzido a partir da compensação gradativa da demanda produzida pelas edificações (Torcellini *et al.*, 2006).

Figura 1 – Porcentagem de consumo energético mensal por classe.



Fonte: (EPE, 2023c).

Consequentemente, para que haja a estabilidade e continuidade do fornecimento de energia elétrica nas cidades, combinado com a redução de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE),

torna-se imprescindível a reformulação da mentalidade da concepção até o uso de novas edificações, assim sendo capaz de reduzir a demanda de grandes projetos de geração.

Conforme demonstrado no *Energy Performance Of Buildings Directive* (EPBD), edifícios projetados visando a eficiência energética (EE), além de contribuírem para a diminuição da pobreza energética, também atuam diretamente na melhoria da qualidade de vida dos habitantes. Na escala do indivíduo, através da promoção de conforto, saúde e bem-estar e na escala da sociedade mediante o incentivo de empregos verdes, com serviços que ajudam no combate ao aquecimento global e na preservação do meio ambiente (European Union, 2021a).

No cenário apresentado pela Diretiva 2010/31/UE, o setor imobiliário da União Europeia se configura como o maior consumidor energético da Europa, representando 40% do total, enquanto 75% das edificações não são qualificadas como eficientes. Nesse sentido, a substituição de combustíveis fósseis por fontes de energia renovável pelo setor demonstra-se como um objetivo à longo prazo, apoiado pela Diretiva (União Europeia, 2010b).

É salutar destacar que a mudança desse cenário é obtida pela EE em Edificações. Onde a efficientização de sistemas prediais é uma combinação de técnicas e estratégias estipuladas pela arquitetura bioclimática, aplicadas desde a etapa de projeto arquitetônico, a fim de aproveitar ao máximo as características climáticas e recursos naturais, para possibilitar o conforto ambiental da edificação, aliada a utilização de equipamentos e sistemas eficientes que minimizam a utilização de energia elétrica.

Segundo consta no Guia Prático Para Preparação de Investimentos Urbanos em Eficiência Energética e Energia Solar Fotovoltaica nos Prédios Públicos (2022), o primeiro passo para a elaboração de projetos que contemplem boas diretrizes de Eficiência Energética é a avaliação da demanda de consumo da edificação. Isso se dá através da identificação das possíveis decisões projetuais a serem tomadas, em concomitância com a análise dos seus reais potenciais técnicos, financeiros e ou ambientais para a serem realizados de forma viável (GIZ, 2022).

Já em edificações existentes é imprescindível fazer uma análise prévia do desempenho energético da edificação, avaliando seus principais sistemas de uso final de energia elétrica, antes de definir um plano de implementação de ações de eficiência energética. Essa análise deve ser feita através de avaliações de busquem diagnosticar as demandas energéticas das edificações.

2.2. Diagnóstico energético em edificações – o conceito, a importância, as principais metodologias consolidadas

Com o crescente incentivo de ações governamentais e iniciativas de empresas de energia, novas metodologias para avaliar e classificar o nível de eficiência das edificações estão sendo elaboradas e aperfeiçoadas. Demonstrando essa tendência global, já em 2015, cerca de 50 países, cidades e estados adotaram a certificação energética de imóveis como comprovação de desempenho (*Institute For Market Transformation, 2015*).

A primeira etapa para a elaboração do projeto de Eficiência Energética e/ou de Energia Solar Fotovoltaica (FV) corresponde a fase de pré-diagnóstico, que consiste na reunião de informações preliminares da operação da edificação e dos sistemas consumidores de energia existentes, através da aplicação de formulários juntamente com a participação dos agentes de gestão e operação do edifício, indispensáveis para obtenção das informações. Assim, é possível analisar previamente as ações que possuem ou não aplicabilidade e as possíveis barreiras de implantação, e então, nortear a escolha de projetos que serão estruturados para cada caso (GIZ, 2022).

Como produto do pré-diagnóstico, serão identificadas possíveis oportunidades de redução do consumo de energia, seja por meio de mudança de hábitos de consumo, alterações em horários de funcionamento de equipamentos, manutenção preventiva ou realização de projetos mais robustos (GIZ, 2022). Assim, tem-se uma boa noção de quais projetos se quer desenvolver dentro da edificação, dando embasamento a fase de diagnóstico energético, através da contratação de um especialista ou empresa ESCO¹.

Com a finalização do pré-diagnóstico, é iniciada a segunda etapa relativa ao diagnóstico energético, onde é realizada a análise minuciosa das soluções de economia de energia para os sistemas consumidores, através de Ações de Eficiência Energética (AEE) e da geração de energia descentralizada, estudo de viabilidade econômica e escolha do método de Medição e Verificação (M&V).

Para a realização de um diagnóstico satisfatório, é fundamental que ocorra a visita técnica ao local, havendo avaliação do consumo, por meio das faturas de energia ou medições de consumo; indicação e quantificação de custos dos consumos e usos finais de energia do edifício; e caracterização das linhas de base dos perfis de carga (consumo). A GIZ (2022) aborda também a necessidade de especificação e estimativa de efficientização do desempenho

¹ ESCOs “são empresas de engenharia, especializada em serviços de conservação de energia (em inglês, *Energy Services Company*)” (ABESCO, 2022)

energético, baseado na verificação da realidade atual de gestão energética, e em comparação com *benchmarks* energéticos; bem como análise financeira e ambiental e orientações das etapas subsequentes (Guia FELICITY, 2020).

A NBR ISO-50.002/2014, descreve os preceitos e condições para execução de diagnósticos energéticos, contemplando todas as categorias de empreendimentos, formas e usos de energia, além de definir previsão de produtos a serem obtidos através da análise apurada por meio da mensuração e investigação dos usos e consumos presentes.

Os resultados do diagnóstico incluem informações sobre a atuação dos principais usos finais que compõem a infraestrutura elétrica predial, e listam as recomendações por prioridade para melhorias em termos do impacto no consumo. Assim, a identificação e priorização das oportunidades de melhoria possibilita que os resultados apresentados atuem diretamente no aprimoramento da eficiência de maneira direcionada e assertiva, promovendo de forma eficaz a diminuição do desperdício de energia, os benefícios ambientais atrelados e, equilibrando com o investimento econômico.

Segundo a Comissão de Recomendação da União Europeia, em sua Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios (Diretiva DDE), “o objetivo final do cálculo do desempenho energético é determinar a utilização global anual de energia primária líquida. No entanto, há estudos que sugerem que poderia haver vantagens em calcular os balanços energéticos a nível diário e sazonal” (*European Union*, 2016).

2.3. Principais usos finais (sistemas prediais) e seus impactos no consumo energético em edificações

Os sistemas prediais são caracterizados por elementos técnicos (equipamentos e suas instalações), voltados para atender as necessidades de uso dos usuários das edificações e compõem as estratégias ativas, que requerem o uso de energia elétrica, para promover conforto e bem-estar no ambiente interno. Esses sistemas incluem o aquecimento e/ou resfriamento de espaços; o aquecimento de água; a iluminação e a ventilação artificiais; a automatização e o controle do edifício; e a geração de energia elétrica no local (União Europeia, 2010b).

Os usos finais, no consumo de energia nas edificações não residenciais no Brasil, são apresentados na Tabela 1, onde nota-se que o indicador de uso de energia (EUI, do inglês *Energy Use Intensity*) tem uma forte correlação positiva com a densidade de potência de iluminação (0,82) e a capacidade de refrigeração (0,84), já que quanto mais próximo de +1 o resultado estiver, maior a sua correlação positiva.

Tabela 1. Matriz de correlação de indicadores de uso de energia (EUI), em edificações não residenciais.

	Intensidade do uso de energia	Densidade de potência de iluminação	Densidade de potência do equipamento	Capacidade de refrigeração	Ano de construção	Densidade de pessoas	Horário de operação
Intensidade do uso de energia	1						
Densidade de potência de iluminação	0,82	1					
Densidade de potência do equipamento	0,64	0,71	1				
Capacidade de refrigeração	0,65	0,84	0,74	1			
Ano de construção	-0,02	-0,03	-0,01	-0,03	1		
Densidade de pessoas	0,34	0,22	0,24	0,19	0,01	1	
Horário de operação	0,2	0,05	0,08	0	-0,05	0,16	1

Fonte: (Soares Geraldi *et al.*, 2022).

Essa tabela foi desenvolvida por Soares Geraldi *et al.*, (2022), com base no banco de dados do Projeto Meta da Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), onde foram avaliados em 10.000 edifícios divididos em 12 tipologias. Os indicadores-chave dessa pesquisa incluem área de piso, intensidade de uso de energia e padrões de operação, características construtivas das paredes predominantes, características dos sistemas prediais e demais consumos energéticos, incluindo potência e densidade média para iluminação, equipamentos, aquecimento de água e sistema de climatização, para cada tipologia predial.

Segundo os autores, as informações desse estudo podem servir de base para a construção de características e desempenho energético de edificações brasileiras, haja vista que “esclarecer a quantidade de energia e qual energia foi usada é a chave para alcançar estratégias eficazes de eficiência energética” (Soares Geraldi *et al.*, 2022, p. 1). Portanto, o seu uso aqui nessa tese se mostra ainda mais essencial para servir de referência nas contribuições propostas.

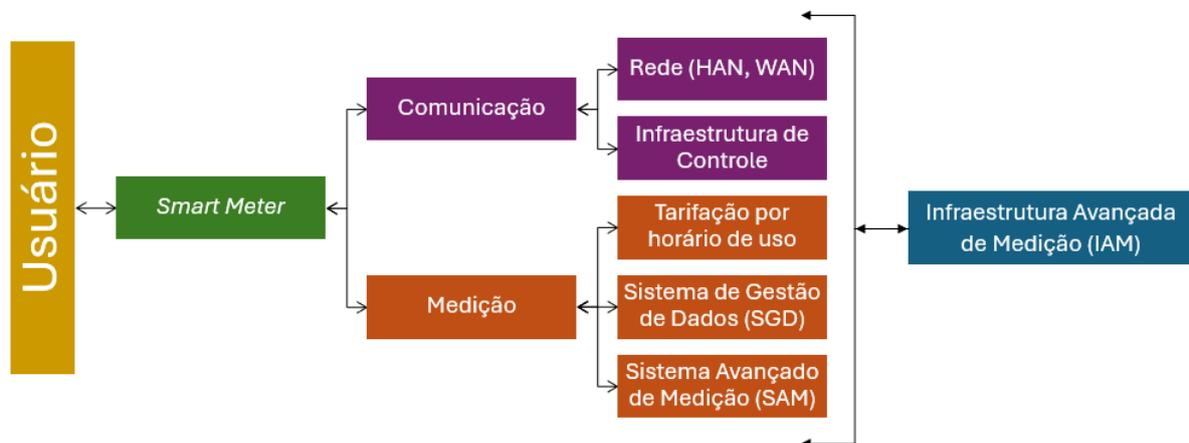
2.4. Sistemas de monitoramento energético em edificações - *Smart metering*

Smart metering, ou sistema inteligente de monitoramento energético, é uma tecnologia digital que mede e registra o consumo de eletricidade, gás ou água em tempo real, transmitindo essas informações para edificações (Barai; Krishnan; Venkatesh, 2015; Gerwen; Jaarsma; Wilhite, 2006).

Conforme descrito por Gerwen, Jaarsma e Wilhite, (2006), os medidores de eletricidade utilizam sensores para medir a tensão e a corrente nos circuitos elétricos. Esses valores são multiplicados para calcular a potência utilizada. Integrando a potência em Watts ao longo do tempo, o medidor determina o consumo total de eletricidade em quilowatt-hora. Os dados coletados são então modulados de acordo com o protocolo de comunicação e transmitidos para o sistema de gestão por meio de redes com ou sem fio.

Kabalci (2016) e Uribe-Pérez *et al.* (2016) delineiam a arquitetura do sistema de monitoramento inteligente, que consiste em uma série de componentes interconectados (Figura 2).

Figura 2 – Arquitetura de um sistema de monitoramento inteligente.



Fonte: Adaptado de (Kabalci, 2016).

O *Smart Meter*, ou medidor inteligente, mede o consumo de energia e permite comunicação bidirecional com o centro de controle, ou seja, realiza a medição, o envio de dados e o recebimento de comandos. O sistema de comunicação transmite dados dos *smart meters* ao centro de controle, utilizando redes com ou sem fio (Kabalci, 2016). Na medição, destacam-se três aspectos, que são:

- Tarifação por horário de uso: ajusta as tarifas de energia conforme o horário de consumo, incentivando o uso em períodos de menor demanda;
- Sistema de Gestão de Dados (SGD): armazena, processa e valida os dados dos *smart meters*; e
- Sistema Avançado de Medição (SAM): utiliza a infraestrutura dos *smart meters* para realizar medições e integrar os dados com os sistemas de gerenciamento da rede elétrica.

A Infraestrutura Avançada de Medição (IAM) refere-se a uma evolução em relação à automação de medição, que se iniciou com o SAM. Enquanto o SAM permite a leitura remota dos registros de consumo e informações básicas do status dos clientes por meio de um sistema de comunicação unidirecional, a IAM vai além ao fornecer uma comunicação bidirecional entre o medidor e a central de controle das empresas de energia (Uribe-Pérez *et al.*, 2016).

Esses sistemas inteligentes são essenciais para a eficiência energética das edificações, fornecendo dados em tempo real que permitem um gerenciamento mais eficaz dos recursos. Além disso, os sistemas de monitoramento inteligente tornam-se fundamentais para gerenciar a demanda de energia associada às estações de recarga de veículos elétricos, garantindo a estabilidade da rede elétrica e uma integração eficiente desses veículos (Leiva; Palacios; Aguado, 2016).

2.5. Energia solar em edificações

A energia elétrica proveniente de fontes renováveis, principalmente a solar, possui dois tipos de configurações de interligação com a rede pública que abastece as edificações. Uma acontecendo na configuração de uma usina convencional, que possui a geração centralizada longe do local de consumo, e outra se configurando, de forma descentralizada, porém no ponto de consumo ou próxima a ele. Essa última caracteriza a interligação direta com as edificações ao ser instalada no telhado, na fachada ou no terreno da edificação (Rüther, 2004).

Segundo Rüther (2004), sob o ponto de vista elétrico, a instalação conectada diretamente ao edifício, apresenta a logística como vantagem. Por conta da geração possuir coincidência espacial com o consumo de energia, ela mitiga perdas provenientes da transmissão e distribuição da energia elétrica, como ocorre com usinas geradoras centralizadas. E por estar inserida diretamente no meio urbano, próximo ao ponto de consumo, não requerem instalações de infraestrutura de grande porte, sendo essa uma outra vantagem.

Na perspectiva arquitetônica, os painéis fotovoltaicos podem ser também considerados como um material de revestimento. Essa dupla função (gerar eletricidade e funcionar como elemento arquitetônico nos telhados, paredes, fachadas ou janelas), pode trazer vários benefícios como a redução de custos com materiais, possibilitando o surgimento de novas concepções estéticas, além de atrelar ao projeto ou construção a ideia de sustentabilidade (Rüther, 2004).

Já no enfoque da eficiência energética, para Rüther (2004), o fato do perfil de consumo da energia proveniente da geração solar também possibilitar uma coincidência temporal, como no

caso da demanda por ar-condicionado que é máxima (elevada carga térmica) quando a insolação é máxima (elevada incidência solar), é mais uma vantagem.

São inúmeros os benefícios que acarretam não somente uma economia de energia, mas também o aumento da vida útil de transformadores e outros elementos do sistema de distribuição; a diminuição do risco de *blackouts* energéticos como os ocorridos muitas vezes em função das crises hídricas, da sobrecarga do sistema energético nacional; dentre outros (Rüther, 2004).

O incentivo ao uso de fontes de energia renováveis, principalmente aquela produzida no local, é um dos pontos abordados nas disposições da Diretiva Desempenho Energético dos Edifícios (DEE) da União Europeia (EU), que afirma que as energias renováveis produzidas no local devem sempre compor o cálculo do desempenho energético dos edifícios (*European Union*, 2016).

No cenário internacional, a Comissão do Parlamento Europeu aproveitou o plano *REPowerEU*, que visa diminuir rapidamente a grande dependência da EU em relação às importações de gás, carvão e petróleo da Rússia, para realizar uma alteração à Diretiva Energética de Edificações tornando obrigatório que os novos edifícios dos Estados-Membros sejam projetados prevendo a geração de energia renovável e, sempre que possível, efetivem a instalações de energia solar (Milieu; Panteia; Trinomics, 2022).

Essa obrigatoriedade deve entrar em vigor a partir de 2027, para edificações grandes, novas ou existentes, com metragem acima de 250m² e a partir de 2030 para as demais edificações novas (Milieu; Panteia; Trinomics, 2022).

2.6. Integração do sistema fotovoltaico com a arquitetura

O alcance de todos esses e outros benefícios atrelados a integração dos sistemas de geração de energia renovável fotovoltaica com as edificações só é possível a partir do bom atendimento de algumas recomendações chave. É importante que os arquitetos, engenheiros e projetistas sempre façam estudos prévios levando em consideração os seguintes aspectos da edificação: a localização geográfica, pois o posicionamento geográfico do edifício impacta no aproveitamento da energia solar; a orientação solar, já que a orientação do telhado também tem forte relação no aproveitamento da energia solar; e a área de telhado, tendo em vista que o número de módulos fotovoltaicos que poderão ser instalados tem dependência direta com essa informação.

Os aspectos que não estão relacionados com as características arquitetônicas também devem ser avaliados, como: o entorno imediato da edificação, onde o sombreamento (vegetação, prédios vizinhos) pode influenciar muito, impactando negativamente a produção de energia; a tarifa de energia, que compõe as análises do tempo de retorno do investimento, haja vista que quanto maior a tarifa de energia em (R\$/kWh), mais interessante é o *payback*; a complexidade do sistema e adaptação do projeto, no caso de retrofits; a segurança estrutural, onde se deve garantir que o local que receberá os módulos fotovoltaicos (lajes, telhados ou coberturas), sejam resistentes ao peso do sistema, permitindo também a realização da manutenção.

2.7. Near Zero Energy Building – NZEB

Ao analisar a eficiência energética nas edificações, que é alcançada por ações norteadas através dos mecanismos de diagnóstico aplicados nos principais sistemas prediais, sendo promovida de forma gerencial, com base em medições de consumo em tempo real, e aliada a integração do recurso energético renovável advindo da geração de energia, percebe-se o delinear do surgimento de novas formas de edificar. Com isso, as construções adquirem a possibilidade de neutralizar seus impactos energéticos ao suprir seu consumo e até a contribuir com a matriz elétrica nacional, ao compartilhar o que produz de excedente de energia.

Essa é uma síntese para introduzir como alcançou-se os conceitos de edificações eficientes e autossuficientes de energia. Os edifícios de energia zero, do inglês *zero energy building* (ZEB), são edifícios com “consumo zero” de energia, ou seja, a quantidade total de energia utilizada, em uma base anual, é aproximadamente igual à quantidade de energia renovável gerada no local (*on-site*) ou adquirida de outras fontes de energia renováveis (*off-site*), por meio de compensação (*net meeting*). Dentro do conceito, os edifícios podem se enquadrar em duas classificações: *net zero site energy* e *net zero source energy*. Na primeira, a edificação é completamente autônoma energeticamente, já na segunda, o edifício não consegue gerar tudo o que consome, mas cobre o *déficit* com energia de fontes renováveis externas.

Edifícios com necessidades quase nulas de energia, do inglês *Near zero energy buildings* (NZEB), para o *GreenBuilding Council* (2022), são os “edifícios que comprovam que o consumo de energia local, da operação anual, é zerado por uma combinação de alta eficiência energética e geração de energia por fontes renováveis.

O terceiro e último desses conceitos são os edifícios de energia positiva (EEP), que criam um excedente de energia renovável que pode ser devolvida para a própria rede elétrica ou

vendida para os serviços públicos de energia, dependendo da legislação do país onde o prédio está inserido (CTE, 2021).

A fim alcançar na prática esses conceitos, torna-se necessário a combinação de projetos com princípios de arquitetura bioclimática e com simulações, para averiguar fatores como incidência solar e orientação da construção. Além disso, alguns outros fatores podem ser considerados para garantir a redução do consumo elétrico e então enquadrar um edifício nos requisitos mencionados, como por exemplo: tratamento da envoltória e dimensionamento de aberturas; iluminação eficiente com controle por zona e aplicação; aproveitamento da inércia térmica das paredes para redução do ganho de calor; previsão de dispositivos de sombreamento em fachadas envidraçadas etc. (CTE, 2021).

Após a concepção do edifício, o principal fator que influencia no consumo energético é proveniente da utilização de equipamentos elétricos e eletrônicos, sendo assim necessário o estabelecimento de sistemas de controle e gerenciamento do consumo destes equipamentos de maneira inteligente e automatizada a fim de garantir que o edifício se enquadre do requisito de consumo zero, além da conscientização dos usuários para com o consumo da edificação. Sendo assim, alguns edifícios se valem de estratégias que monitoram o consumo e realizam ações de maneira independente, sem comprometer a experiência dos usuários, baseadas em Inteligência Artificial e Internet das Coisas, como os *smart buildings* (CTE, 2021).

Contudo, o *zero energy* não pode ser atingido somente com estratégias de eficiência. Ao longo da vida útil do prédio também são necessárias boas práticas de uso e manutenção e a instalação dos sistemas de geração de energia renovável (por meio dos raios solares, dos ventos ou da biomassa, entre outras tecnologias) integrada (CTE, 2021).

No cenário internacional, a União Europeia (UE) propôs a transição de edifícios de quase zero energia para edifícios de zero emissão até 2030. A exigência de Edifícios de Emissão Zero (ZEB) deve ser aplicada a partir de 1º de janeiro de 2030 para todos os novos edifícios e, a partir de 1º de janeiro de 2027, para todos os novos edifícios ocupados ou de propriedade de autoridades públicas. A proposta de revisão da Diretiva de Desempenho Energético de Edifícios visa fortalecer as estratégias de renovação de longo prazo nos planos nacionais, com o objetivo de transformar todo o parque de edifícios em edifícios de zero emissão até 2050 (UNIÃO EUROPEIA, 2024).

A proposta da Comissão para revisar a diretiva (dezembro de 2021) representa um avanço do atual padrão de edifícios de quase zero energia (NZEB) para edifícios de emissões zero (ZEB). Essa mudança alinha os requisitos de desempenho energético para novos edifícios com

a meta de neutralidade climática de longo prazo e com o "princípio da eficiência energética em primeiro lugar" (União Europeia, 2024).

2.8. O panorama do *Near Zero Energy Building* no Brasil e no mundo

2.8.1. Legislações e certificações

No contexto internacional, a mudança de paradigmas em relação ao mercado da construção e de transporte está atrelado ao expressivo consumo de energia nesses setores, conforme mostram os dados apurados pela (*European Environment Agency*, 2018), onde eles aparecem representando aproximadamente 60% do consumo final de energia. Esse fato tem fomentado o surgimento de metas mais exigentes na União Europeia, norteando o aparecimento de legislações mais rígidas como é o caso da Diretiva da UE 2010/31/EU que sofreu alteração para tornar obrigatório que as novas edificações sejam classificadas como NZEB, a partir de 2021 (*European Commission*, 2021).

Em relação aos transportes, os direcionamentos visam a promoção e dinamização de um mercado de veículos limpos e energeticamente eficientes, levando em consideração os impactos energéticos e ambientais conforme estipula a Diretiva da UE 2009/33/EC (*European Commission*, 2009).

A Diretiva 2018/844/EU, da União Europeia, aplica-se a todos os tipos de edificação. Sobre o aspecto técnico ela considera o setor público como indutor de boas práticas de eficiência energética, dispõe sobre a obrigatoriedade de certificação de desempenho energético e exibição pública dos certificados, prevê que cada Estado-membro estabeleça estratégias para que suas edificações tenham necessidade quase nula de energia até 2050. Revisa as Diretivas 2010/31/EC e a Diretiva 2012/27/UE. É mandatória quando transposta para a legislação de cada país.

O principal instrumento legislativo e político da União Europeia, com foco em edifícios existentes e novos, a Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD), exige a transformação dos edifícios existentes em Edifícios de Energia Quase Zero (NZEBs) até 2050. Além desse instrumento, a UE sugeriu a eliminação gradual dos edifícios ineficientes, em um conjunto de diretivas (Li *et al.*, 2019b).

No Estado da Califórnia, Estados Unidos, o *Building Energy Efficiency Standards - Title 24/2019*, é aplicado a edifícios residenciais e não-residenciais. Em relação ao seu aspecto técnico, é um dos códigos mais restritivos atualmente, englobando diversos requerimentos de energia e água. Na versão de 2019, por exemplo, para edificações não residenciais, o código se

alinhou com a norma ASHRAE 90.1 2017. Seus parâmetros e requisitos consideram as metas estabelecidas pelo estado para novas construções do setor residencial se tornarem *net zero* energia até 2020 e do setor não residencial até 2030. Ela aplica-se a prédios públicos e é mandatória, sem penalidade associada.

Nacionalmente, as exigências são mais brandas e a obrigatoriedade de atendimento aos regulamentos de eficiência energética se limitam às edificações públicas de nível federal, sem considerar a exigência que as construções sejam NZEB, apesar de que a metodologia compulsória de avaliação da classificação do nível de eficiência energética é a mesma que avalia a classificação de edificações NZEB.

No Brasil existem três regulamentações de avaliação das edificações energeticamente autossuficientes, a certificação GBC Brasil *Zero Energy* e o Selo LEED *Zero Energy*, ambas desenvolvidas pelo *GreenBuilding Council* Brasil; e a Etiqueta PBE Edifica, do PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica).

Além dos instrumentos que avaliam e atestam essas classificações, existem as iniciativas públicas a nível municipal e estadual, como por exemplo a iniciativa do Paraná, que está elaborando um programa, voltado a transformar as edificações públicas estaduais em energeticamente autossuficientes. O plano é tentar abranger 7 cidades e 246 edificações.

Porém, independente das ações locais, as metodologias empregadas em certificações, selos e etiquetas estão se consolidando e ganhando abrangência. Com base nisso, os próximos tópicos abordarão as três principais regulamentações de avaliação das edificações.

2.8.2. Certificação GBC Brasil *Zero Energy*, do *GreenBuilding Council* Brasil

A certificação GBC Brasil *Zero Energy*, foi desenvolvida pelo *GreenBuilding Council* e tropicalizada para se adequar as especificidades brasileiras, como o clima. Foi desenvolvida para ser um mecanismo de simples aplicação, porém de modo eficiente na busca do equilíbrio entre o consumo e geração de energia elétrica por fontes não poluentes (GBC BRASIL, 2022).

A certificação pode ser aplicada nacionalmente, de forma voluntária. Ela possibilita uma análise de viabilidade técnica e financeira, aplicada de forma prática e transparente. Através dela é possível analisar os seguintes créditos: tempo de operação; taxa de ocupação mínima; metragem mínima das áreas construídas; tipologia; atendimento a legislações; empreendimentos *Off Grid*; eficiência energética mínima para geração *on site*; eficiência energética mínima para geração *off site*; geração de energia renovável *on site*; geração de

energia renovável *off site*; compra de créditos de energia renovável; uso de energia não renovável; e balanço energético anual do empreendimento (GBC BRASIL 2022).

Sua aplicação se dá nas tipologias residências unifamiliares, nos condomínios residenciais, prédios comerciais, lajes corporativas, centros de distribuição, *data center* etc. E, segundo seus critérios, para a obtenção da certificação de maneira definitiva, todos os empreendimentos deverão ter pelo menos 1 ano de operação (monitorado de forma contínua), com o seu balanço energético anual zerado. Edifícios novos, em fase de projeto, construção, ou com menos de 1 ano de operação só poderão receber uma pré certificação (GBC BRASIL 2022).

Como objetivos macro, o programa visa garantir o cumprimento das metas da Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP) 21 e o Acordo de Paris; acelerar a transformação do mercado nacional de eficiência energética e a geração de fontes de energia renováveis; gerar novos empregos; desenvolver novas tecnologias; reconhecer a iniciativa dos empreendedores; e promover ambientes mais saudáveis, capazes de propiciar a melhora do bem-estar dos ocupantes.

Projetos-Pilotos GBC Brasil Zero Energy

- Projeto CICS – Centro de Inovação em Construção Sustentável – USP São Paulo – SP
- Projeto Sede SINDUSCON PR – Curitiba – PR
- Projeto Casa do Futuro – Atibaia - SP

2.8.3. Selo LEED Zero Energy

A certificação LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) é um selo criado nos Estados Unidos em 1993, e se espalhou por mais de 160 países. A certificação funciona com base em um sistema de pontos, onde a edificação é avaliada em nove (9) categorias diferentes (Processo Integrativo, Localização e Transporte, Espaço Sustentável, Uso racional da Água, Energia e Atmosfera, Materiais e Recursos, Qualidade do Ambiente Construído, Inovação e Créditos de Prioridade Regional). Para cada categoria são atribuídos pontos que permitem que a edificação suba no *ranking* de resultados, podendo atingir a pontuação máxima de 110 pontos e receber o selo de LEED *Gold* (GBC Zero Energy, 2024).

Existem diversos tipos de LEED *Zero*, como LEED *Zero Carbon* e LEED *Zero Water*. Para ser certificado pelo LEED *Zero Energy*, é necessário que a edificação implemente medidas de eficiência energética e geração de energia renovável, alcançando a autossuficiência em relação ao consumo de energia, ou seja, não é necessário a utilização da energia da rede de

distribuição das concessionárias de energia para que a edificação funcione normalmente (GBC *Zero Energy*, 2024).

Para ser certificado basta entrar em contato com empresas certificadoras, a fim de apresentar as medidas implementadas e as economias obtidas e atingir os objetivos do selo LEED *Zero Energy*, como garantir o cumprimento das metas da COP Paris, acelerar a transformação do mercado nacional e promover ambientes saudáveis, capazes de propiciar a melhoria do bem-estar dos ocupantes (GBC *Zero Energy*, 2024).

2.8.4. Certificação EDGE (*Excellence in Design for Greater Efficiencies*)

A certificação EDGE (*Excellence in Design for Greater Efficiencies*) é uma certificação para edificações sustentáveis que está presente em mais de 140 países. Ela é aplicada para novas construções e retrofits em 6 tipologias: varejo, educacional, habitacional, edifícios corporativos, hotéis e hospitalar (IFC; Banco Mundial, 2024).

O EDGE permite que construtores identifiquem estratégias e medidas para economizar energia, água e reduzir o carbono incorporado em materiais - através de um aplicativo gratuito. Após a integração das medidas no projeto, um auditor EDGE verifica e o GBCI (*Green Buildings Certification Inc.*) emite a certificação. A certificação já contribuiu para definição de normas locais em diversos países, como Colômbia, Costa Rica e Indonésia (Ifc; Banco Mundial, 2024).

Ela possui 3 níveis que dependem do percentual de economia de energia:

- Nível 1: Certificado EDGE – Economia de 20% em água, materiais e energia;
- Nível 2: EDGE Advanced – Economia de 20% em água e materiais e 40% em energia;
- Nível 3: Carbono Zero – Economia de 20% em água e materiais e 100% de energia renovável ou compra de créditos de carbono.

A certificação EDGE *Zero Carbon* é concedida a projetos que comprovem ter emissões de carbono zero em suas operações, permitindo que as equipes de projeto certifiquem seus empreendimentos como neutros em carbono. Para obtê-la, é necessário alcançar pelo menos 20% de economia em água e energia incorporada, 40% de economia de energia no local (*status EDGE Advanced*), e neutralizar 100% das emissões de energia por meio de energias renováveis ou compensações de carbono (EDGE *Buildings*, 2024).

2.8.5. Certificação PBE Edifica, do PROCEL Edifica

Criada em 2009, a etiquetagem de edifício no Brasil, voltada para classificar o nível de desempenho energético de projetos e/ou edificações construídas dos edifícios residenciais, comerciais, de serviços e públicos, este último com obrigatoriedade de emissão de etiqueta no âmbito federal (Instrução Normativa SLTI nº 2/2014) tem apresentado uma evolução ao longo dos anos, como é possível ver na Figura 3, atingindo uma marca de 4.898 edificações certificadas até 2022.

Figura 3 – Evolução da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia em Edifícios - ENCE.



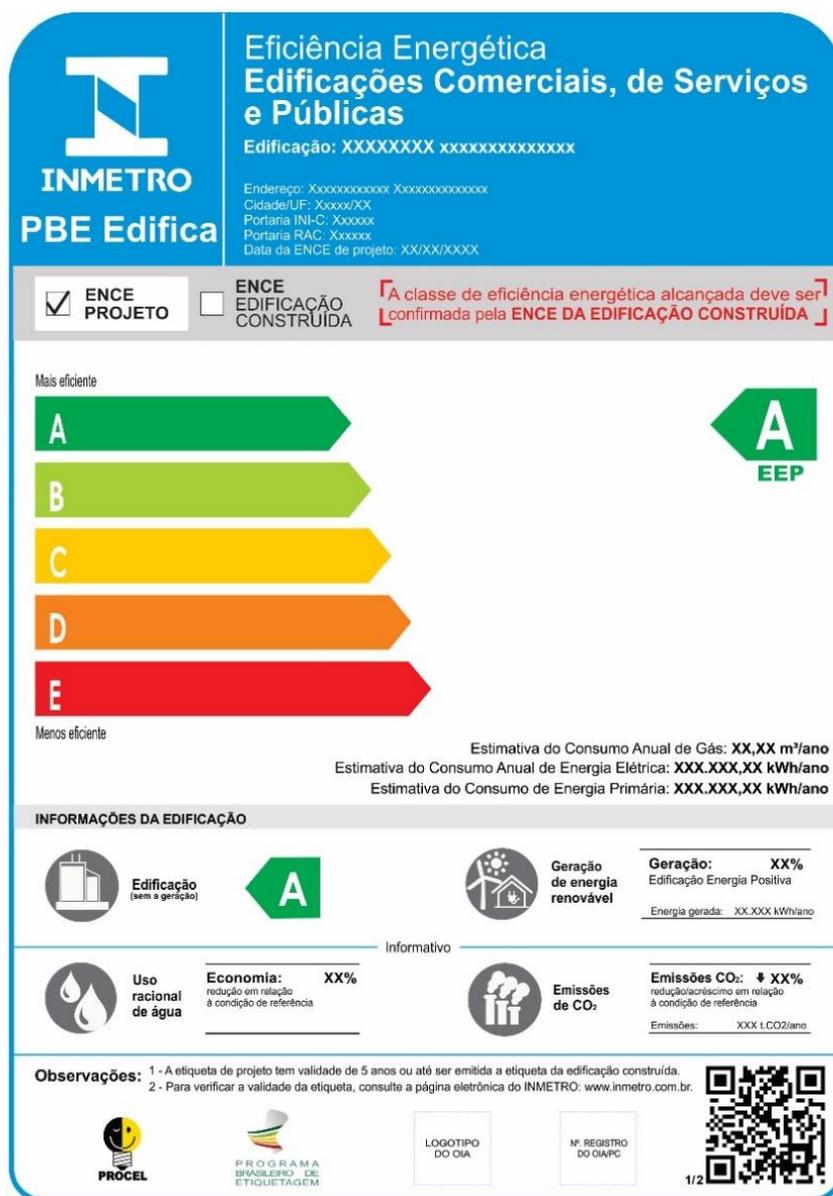
Fonte: Atlas da Eficiência Energética, (EPE, 2023b, p.29).

As Instruções Normativas do INMETRO para Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais de Serviços e Públicas (INI-C); e Residenciais (INI-R), especificam os critérios e os métodos para a avaliação do desempenho de edificações, visando à etiquetagem. Elas vieram para substituir os procedimentos publicados nos Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C); e Residenciais (RTQ-R).

As reformulações que originaram a novas metodologias foram embasadas nas limitações relacionadas ao método prescritivo dos RTQ's, constatadas por profissionais e pesquisadores da área. Foi avaliado por (MELO, 2012), que as limitações poderiam ser sanadas a partir da utilização de dados provenientes de um metamodelo e treinamento de redes neurais artificiais.

O produto da avaliação é a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), que é obtida mediante a avaliação da edificação a partir dos métodos contidos nas Instruções Normativas INMETRO (INI's) e segundo as regras estabelecidas no Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações (RAC). Nas INI's a avaliação da edificação é feita a partir do consumo de energia, e estas informações são apresentadas em um novo modelo de etiqueta, como pode ser visto na Fonte: Figura 4:

Figura 4 – Nova ENCE, página principal.



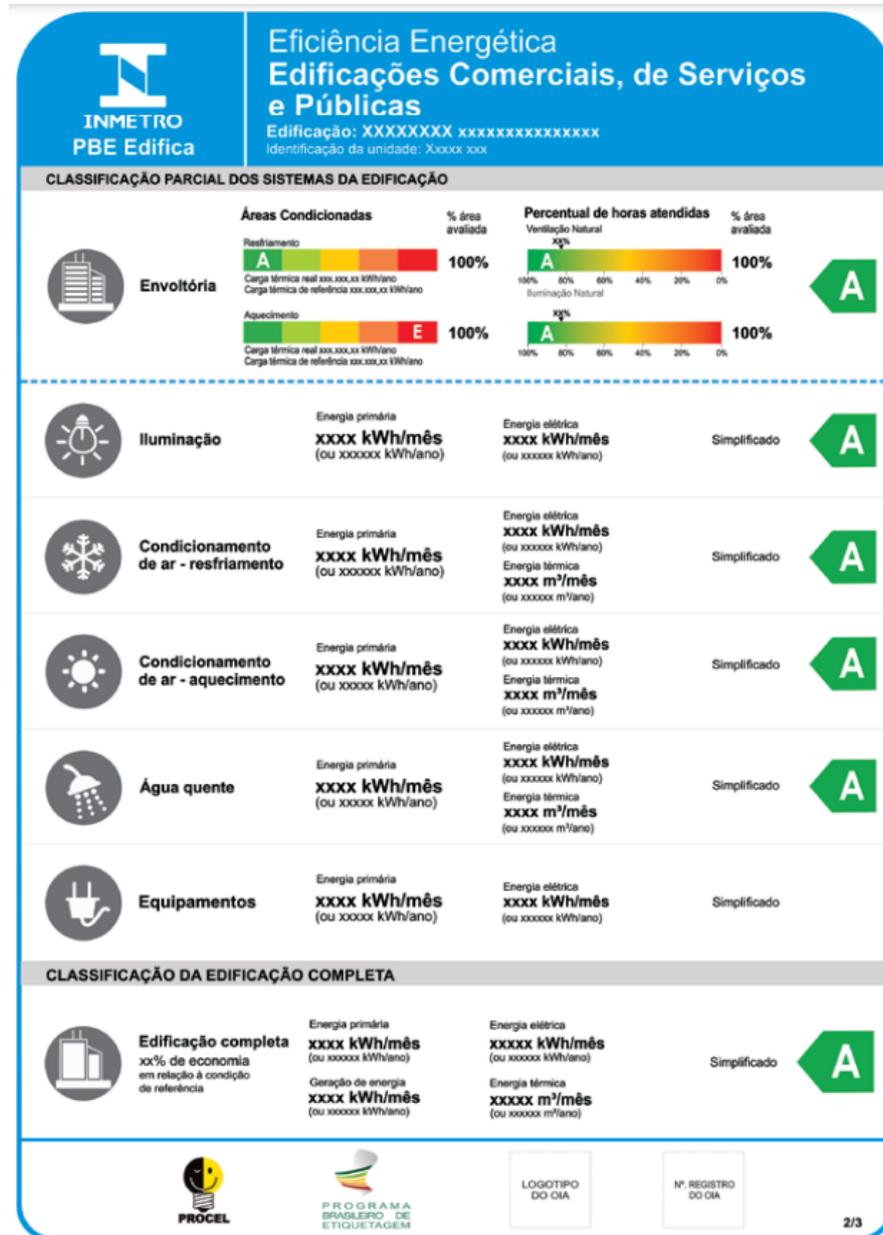
Fonte: PBE Edifica, 2022.

A nova ENCE está mais completa e apresenta informações de maneira didática e de fácil entendimento. Ela está dividida em três páginas, uma principal onde foi mantida a escala de classificação de A a E, porém agora com base em consumo de energia primária (kWh/ano). Ela apresenta também a avaliação da edificação, sem considerar a geração; os dados de caráter informativo sobre o uso racional de água e emissões de dióxido de carbono CO₂; o valor estimado do consumo final de energia térmica e/ou elétrica; e a energia gerada, caso exista.

Além desses aspectos a ENCE traz a classificação de Edificação de Energia Quase Zero (NZEB) e Edificações de Energia Positiva (EEP), considerando relação da eficiência energética com o percentual de energia atendido pela geração local da edificação. Já as duas páginas

complementares (Figura 5 e Figura 6), apresentam informações referentes às classificações parciais dos sistemas individuais (consumos por uso final) e as condições de avaliação.

Figura 5 – Nova ENCE, página dois.



Fonte: PBE Edifica, 2022.

Figura 6 – Nova ENCE, página final.

 Eficiência Energética Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas Edificação: XXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXXX Identificação da unidade: XXXXX XXX	
CONDIÇÃO DE AVALIAÇÃO	
ENVOLTÓRIA	
 <ul style="list-style-type: none"> - Explicação da carga térmica. - Explicação do percentual de horas de conforto térmico (POCI). - Explicação do percentual de horas de conforto luminoso (POCI). <p>Condição real</p> <ul style="list-style-type: none"> - Propriedades térmicas dos materiais construtivos de acordo com o projeto. - Densidade de potência em iluminação conforme projeto. 	<p>Condição de referência</p> <ul style="list-style-type: none"> - Propriedades térmicas dos materiais construtivos de acordo com os valores da tabela X (condições de referência) do RTQ-C. - Densidade de potência em iluminação conforme tabela X (condições de referência para xxxxx tipologia) do RTQ-C. <p>Em ambos modelos</p> <ul style="list-style-type: none"> - Geometria (dimensões, orientação solar) e percentual de abertura na fachada conforme condição real do projeto. - Densidade de ocupação e densidade de equipamentos conforme tabela X (condição de referência) do RTQ-C.
ILUMINAÇÃO	
 <p>Condição real</p> <ul style="list-style-type: none"> - Densidade de potência de iluminação conforme projeto. - Densidade de potência em iluminação em uso (quando aplicável), conforme projeto. 	<p>Condição de referência</p> <ul style="list-style-type: none"> - Densidade de potência em iluminação conforme tabela X (condições de referência) do RTQ-C.
CONDICIONAMENTO DE AR	
 <p>Condição real</p> <ul style="list-style-type: none"> - Coeficiente de desempenho (COP) de resfriamento e de aquecimento conforme projeto. - Carga térmica determinada conforme resultados da aplicação do método relativo a envoltória para o projeto edificação. 	<p>Condição de referência</p> <ul style="list-style-type: none"> - Coeficiente de desempenho (COP) de resfriamento e de aquecimento conforme tabela X (condições de referência) para xxxxx tipologia). - Carga térmica determinada conforme resultados da aplicação do método da relativo a envoltória para condições de referência. <p>Em ambos modelos</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tipo e capacidade do sistema de ar-condicionado de acordo com o projeto do modelo real. - Temperatura de setpoint para resfriamento: 24°C. - Temperatura de setpoint para aquecimento: 20°C.
ÁGUA QUENTE	
 <ul style="list-style-type: none"> - Tipo e capacidade do sistema de aquecimento de água de acordo com projeto do modelo real. 	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura de uso de água quente conforme tabela A (condições de referência para tipologia xxx) do RTQ-C.
GERAÇÃO	
 <ul style="list-style-type: none"> - Tipo de energia renovável utilizada: ex. fotovoltaica. - Características e quantidade de painéis fotovoltaicos instalados na cobertura, segundo projeto do sistema fotovoltaico. 	<ul style="list-style-type: none"> - Estimativa da geração local de energia segundo laudo técnico do projetista.
USO RACIONAL DA ÁGUA	
 <p>Condição real</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vazão de dispositivos considerando eventuais equipamentos economizadores conforme projeto. - Estimativa da oferta de água pluvial conforme laudo técnico do projetista. 	<p>Condição de referência</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vazão de dispositivos conforme tabela X (condições de - Vazão de dispositivos conforme tabela X (condições de <p>Em ambos modelos</p> <ul style="list-style-type: none"> - Número de dispositivos conforme projeto da edificação real. - Padrão de uso de dispositivos de acordo com a tabela X e Y (condições de referência para tipologia xxx) do RTQ-C. - Densidade de ocupação conforme tabela X (condições de referência para tipologia xxx) do RTQ-C.
 	LOGOTIPO DO OIA Nº. REGISTRO DO OIA
3/3	

Fonte: PBE Edifica, 2022.

A INI-C está estruturada em oito capítulos referentes às definições, requisitos e à classificação de eficiência energética, além de sete anexos referentes aos métodos e procedimentos de avaliação, assim como outras informações importantes. A avaliação pode ser feita de forma geral, englobando toda a edificação, ou parcial para os seguintes sistemas: somente a envoltória completa (obrigatória em todas as avaliações); envoltória completa e sistema de condicionamento de ar; e/ou sistema de iluminação; e/ou sistema de aquecimento de água; e e/ou parcelas dos outros dois sistemas citados anteriormente.

A classificação é realizada com base no consumo de energia primária, comparando-se o consumo da edificação que está sendo avaliada (chamada de edificação real) com a mesma

edificação em uma condição de referência, equivalente à classificação D. Os valores de referência estão definidos de acordo com as diversas tipologias disponíveis. Além das características técnicas correspondentes a cada tipologia, o fator de forma (relação entre a área de envoltória e o volume total do edifício) e o clima, da região onde a edificação se encontra, influenciam nos percentuais de economia de uma classificação.

A INI-C avalia as edificações totalmente condicionadas artificialmente, totalmente ventiladas naturalmente ou híbridas (ventilação natural + condicionamento de ar). Para estimar o percentual de economia da edificação em análise, a instrução normativa apresenta dois métodos: o simplificado e o de simulação computacional. O método simplificado foi desenvolvido com base em um metamodelo, gerado a partir de dados obtidos por simulações computacionais. Nesse método o processo de cálculo é realizado usando uma interface web, disponível no endereço: <https://pbeedifica.com.br/redes/comercial/>.

Apesar de ser aplicado a todos os sistemas, ele é menos flexível que o método de simulação, e só pode ser aplicado nas seguintes condições, para as edificações ventiladas naturalmente ou híbridas: em edificações escolares e de escritórios; que possuam configuração arquitetônica de geometria quadrada ou retangular; que seguem os horários de ocupação em concordância com a referida tipologia, conforme as Tabelas do Anexo A disponibilizadas na instrução normativa (IN); entre outras exigências.

Para outras tipologias, como hospedagens, mercados, comércios e outros, o método simplificado avalia zonas térmicas condicionadas artificialmente ou parcelas da edificação condicionadas artificialmente, desde que tenham os seus parâmetros construtivos compreendidos entre os intervalos da tabela 6.1 da INI-C. O método de simulação computacional é mais completo e não possui restrições para a sua aplicação.

A envoltória deve ser classificada de acordo com o percentual de redução da carga térmica total anual da edificação real ($RedC_{gTT_{real}}$). A classificação de eficiência energética do sistema de condicionamento de ar baseia-se no percentual de redução de consumo para refrigeração ($RedC_R$). O sistema de iluminação é classificado através do percentual de redução do Consumo de iluminação ($RedC_{IL}$). Já a eficiência energética do sistema de aquecimento de água é classificada de acordo com o valor do percentual de redução de consumo de energia primária destinada a demanda de água quente ($RedC_{AA}$) da edificação.

Além dos sistemas avaliados, o novo método trouxe a possibilidade de avaliar as edificações que são energeticamente eficientes, e que tenham sistemas de geração de energia renovável instalados localmente, na edificação avaliada ou no mesmo lote em que ela se

encontra. Com isso, a instrução normativa as classifica como Edificações de Energia Quase Zero (NZEBs) ou Edificações de Energia Positiva (EEPs).

2.9. Mobilidade elétrica

Em termos de consumo de energia, a transição dos veículos tradicionais - baseados em combustíveis fósseis - para os veículos movidos a energia renovável, pode contribuir para a mitigação da crise energética e, como consequência, a redução da poluição ambiental. As fontes de energia renovável - como energias eólica, solar, geotérmica, biocombustíveis, dentre outros, em comparação com os combustíveis fósseis tradicionais, são mais diversificadas (Zhou *et al.*, 2019). Dessa forma a mobilidade elétrica apresenta-se como um termo relacionado a viabilização do transporte movido a energia renovável, como carros elétricos.

Dentro desse contexto, no Caderno Técnico de Referência: Eficiência Energética na Mobilidade Urbana (2020), são apresentados alguns conceitos importantes para o entendimento do tema da mobilidade elétrica. Dentre essas definições, ressalta-se que a Eficiência Energética na Mobilidade Urbana é a razão entre a estimativa do momento de transporte (em t.km ou p.km) e a demanda total de energia (em unidades como Joule [J], Watt [W] ou tonelada equivalente de petróleo [tep]). Além disso, a Gestão da Eficiência na Mobilidade Urbana está associada à possibilidade de acompanhar as mudanças geradas no consumo de energia devido à aplicação de uma ação de gestão de mobilidade urbana (GIZ, 2020).

Transição energética

Os veículos elétricos (VEs) desempenharão um papel fundamental nos esforços para descarbonizar o setor de transporte e alcançar metas ambiciosas de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Eles oferecem mais benefícios que ajudam a reduzir as emissões, pois são três vezes mais eficientes do que os veículos a gasolina, convertendo de 59% a 62% da energia elétrica em movimento, enquanto os veículos a gasolina convertem apenas 17% a 21% da energia química do combustível em trabalho útil (*Energy Innovation*, 2022).

Além disso, a eletricidade pode ser gerada por tecnologias de emissão zero, como painéis solares, turbinas eólicas, barragens hidroelétricas ou centrais nucleares, o que permite que a operação de um VE tenha emissões quase nulas (*Energy Innovation*, 2022).

Idealmente, a eletricidade será gerada por tecnologias de emissão zero, como solar, eólica, hidrelétrica e nuclear. Ainda que a eletricidade para os VEs seja gerada por usinas a carvão, estas podem estar localizadas longe dos centros urbanos, entretanto, os veículos a gasolina e

diesel emitem poluentes diretamente nas cidades densamente povoadas, onde a exposição das pessoas à poluição é maior (*Energy Innovation, 2022*).

2.9.1. O mercado de Veículos elétricos

O mercado da eletromobilidade tem avançado substancialmente no século XXI e a MGM Partners (2018) cita alguns aspectos que estão ligados a esse novo cenário, tendo a bateria como o principal elemento propulsor do avanço tecnológico e mercadológico, gerando impacto positivo no custo e autonomia dos veículos. Ademais, as políticas públicas governamentais trouxeram os incentivos e subsídios fundamentais no fomento do crescimento do mercado de eletromobilidade mundialmente. Um fator que comprova isso é a introdução dos VEs na agenda de todas as montadoras tradicionais.

Em relação à infraestrutura, a publicação enfatiza que, para o mercado de veículos elétricos, os pontos de abastecimento são elementos críticos por conta da logística e da quantidade disponível. Porém, esse fato não tem demonstrado ser necessariamente uma barreira para o crescimento desse mercado (MGM Partners, 2018).

Alguns dos fatores que sustentam a estimativa se dá pelas projeções do surgimento de iniciativas adotadas pelo poder público, haja vista que a aderência de veículos elétricos tende a diminuir a emissão de gases de efeito estufa, e o Brasil possui a meta de redução em 37% dos gases de efeito estufa até o ano de 2025.

As atuações do Governo ao longo dos anos ainda são poucas, mas tendem a aumentar. Dentre essas: o programa Inovar-Auto, finalizado em 2018, que apresentou metas de eficiência que contribuíram para o aumento médio de 15% na eficiência dos VEs; as reduções de importação de veículos híbridos e elétricos; o Programa Rota 2030, agora MOVER, com metas de eficiência e consumos estratégicos; e a Redução de Imposto Sobre Produtos Industrializados (IPI) de híbridos e elétricos. Sem contar nas iniciativas locais, como a Lei Municipal 16.802/2018, que tem como meta converter os 14.400 ônibus paulistanos a diesel em veículos de baixa emissão (ABVE, 2022).

Segundo a (PNME, 2021), é possível que iniciativas como isenção de Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores (IPVA) para VEs, descontos por créditos de carbono, redução de Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços (ICMS) para consumo de energia elétrica ou obrigatoriedade de transporte por aplicativos ser baseado/migrado para VEs sejam políticas públicas estratégicas, que auxiliem na consolidação da mobilidade elétrica no país.

Adicionalmente, o avanço da mobilidade elétrica em um país depende diretamente das condições do arranjo da Hélice Tríplice (poder público, universidades e iniciativa privada) com esferas institucionais agindo a fim de promover o desenvolvimento por meio da inovação e do empreendedorismo (PNME, 2021).

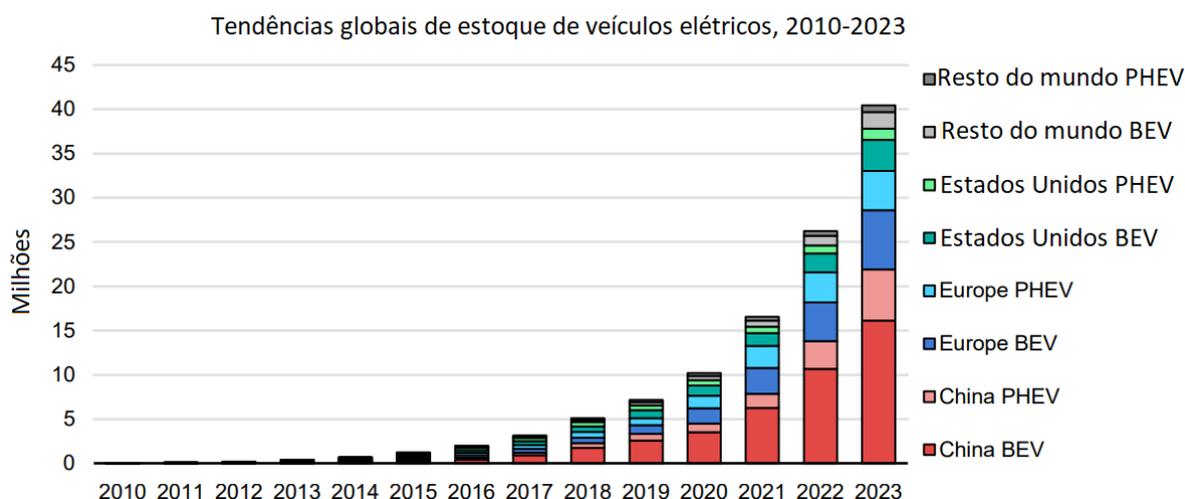
Além do fator mercadológico de fornecimento de incentivos e viabilidade econômica, analisando pelo viés do consumo energético, têm-se que a demanda por eletricidade devido aos veículos elétricos está projetada para crescer nas próximas décadas, passando de 0,5% do consumo global de eletricidade em 2023 para cerca de 6 a 8% até 2035 (IEA, 2024). Isto se dá devido à viabilização da utilização de energias renováveis e da eficiência energética para transporte em comparação com os meios de locomoção tradicionais.

A utilização de energia renovável e a melhoria da eficiência energética para uso doméstico e transporte têm atraído um interesse crescente em todo o mundo (Zhou *et al.*, 2019). Do ponto de vista do transporte, em comparação com os veículos tradicionais baseados em combustível, os veículos apoiados por novas fontes de energia, como eletricidade limpa, hidrogênio e biocombustíveis, têm sido considerados uma solução promissora para os problemas ambientais (Tie; Tan, 2013).

O sucesso global dos carros elétricos depende do crescimento das vendas em economias emergentes fora da China. Conforme o relatório sobre a perspectiva global de veículos elétricos publicado pela Agência Internacional de Energia (2024), em 2023, 60% das vendas ocorreram na China, 25% na Europa e 10% nos EUA, concentrando-se em mercados que representam 65% das vendas globais de automóveis (Figura 7).

Apesar do crescimento mais lento em economias emergentes, houve avanços significativos em países como Vietnã (15% das vendas de carros) e Tailândia (10%). Embora a participação de mercado em países como Índia (2%), Brasil (3%) e Malásia (2%) ainda seja baixa, fatores como subsídios, incentivos para fabricação e a oferta de modelos mais baratos estão impulsionando a adoção (IEA, 2024).

Figura 7 – Crescimento dos veículos elétricos no mundo.



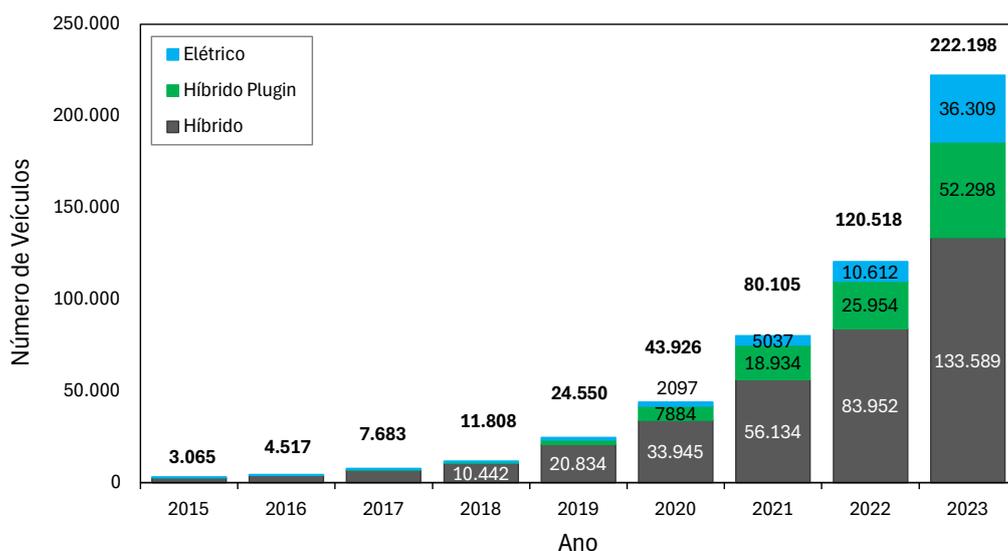
Fonte: (IEA, 2024).

Segundo Cunha (2021), esse crescimento está relacionado às novas tendências de mercado de sustentabilidade, que trazem agressivas metas de ESG (*Environmental, Social and Corporate Governance*), as quais fazem com que grandes empresas busquem a eletrificação de suas frotas como um caminho nessa temática, além da grande variabilidade de VE disponíveis (Cunha, 2021).

No Brasil, esses fatos são evidenciados nos números de vendas, onde o mercado de veículos eletrificados leves apresentou um crescimento expressivo em 2024, com 15.312 emplacamentos apenas em julho, o que marcou o melhor desempenho mensal do ano. Nos primeiros sete meses de 2024, o país já havia registrado 94.616 emplacamentos, superando o total de 93.927 veículos eletrificados vendidos ao longo de todo o ano de 2023, que até então havia sido o melhor ano da história da eletromobilidade no Brasil (NEOCHARGE, 2024).

Esse avanço significativo destaca a rápida adoção de veículos eletrificados no mercado nacional e sinaliza um futuro promissor para a mobilidade sustentável no país. A Figura 8 apresenta a expansão anual da frota de VE no Brasil nos últimos nove anos, mostrando um aumento de 7.250% (NEOCHARGE, 2024).

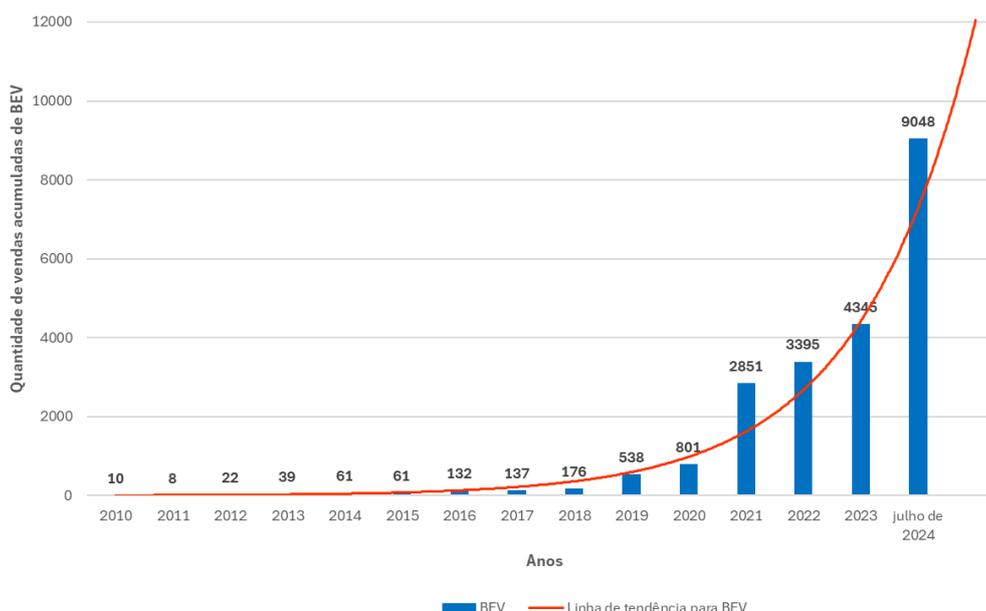
Figura 8 – Expansão anual da frota de carros elétricos no Brasil por tipo.



Fonte: Adaptado de (NEOCHARGE, 2024).

O mercado de veículos elétricos a bateria (BEV) no Brasil quase dobrou em 2024 em comparação a 2023 (Figura 9). Enquanto em 2023 foram emplacados 4.345 BEVs no país, esse número saltou para 9.048 até julho de 2024, evidenciando o crescimento acelerado da adoção de veículos totalmente elétricos no Brasil e o aumento da aceitação dessa tecnologia entre os consumidores brasileiros (ABVE, 2024b).

Figura 9 – Evolução das vendas de BEV's no Brasil.



Fonte: (ABVE, 2024b).

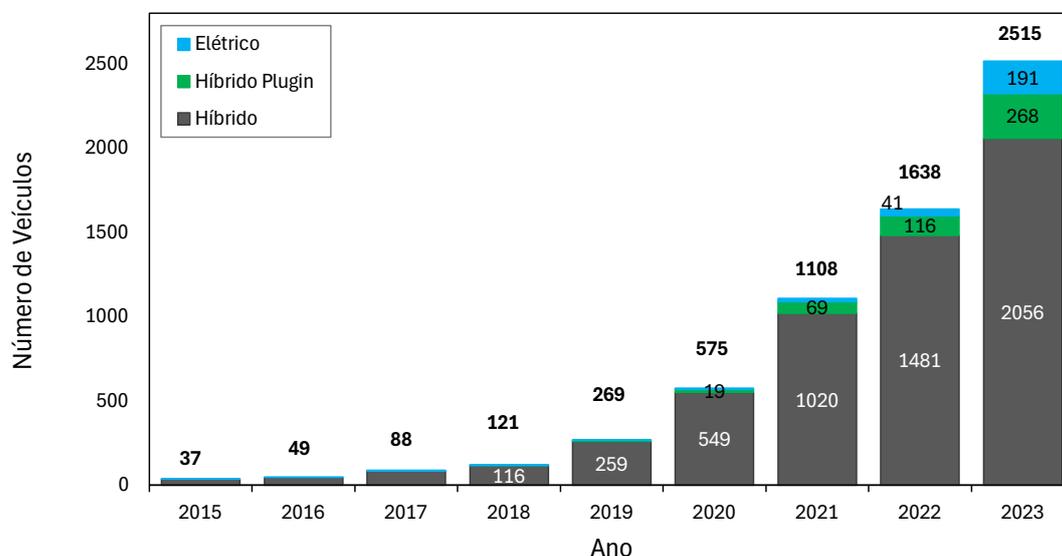
Embora o Brasil não seja um dos países que mais utilizam VEs, como China, Noruega, Coreia do Sul, Suécia, Alemanha e Estados Unidos, o crescimento da utilização de veículos de

passageiros em todo o território nacional é uma realidade cada vez mais presente (IEA, 2023). Os fatores determinantes incluem o vasto mercado consumidor de automóveis, considerações estratégicas de segurança energética e preocupações ambientais. Além disso, o alto custo do combustível, a ênfase nas práticas ambientais e sociais corporativas (ESG) e a diversidade tecnológica nacional são elementos que solidificam e estimulam esta agenda no setor do país (Chaves *et al.*, 2023).

Os cinco principais estados brasileiros em termos de veículos elétricos são São Paulo, com 72.562 unidades (32,66%); Rio de Janeiro, com 15.543 unidades (7%); Santa Catarina, com 14.959 (6,73%); Minas Gerais, com 14.586 (6,56%); e Paraná, com 13.673 (6,15%). Juntos, eles respondem por 131.323 unidades, ou cerca de 59,10% de todos os veículos do país (NEOCHARGE, 2024).

Os demais estados respondem por 90.875 unidades (40,89%), sendo o Estado do Pará responsável por 2.515 unidades (1,13%). Na Figura 10 é possível verificar a expansão anual da frota de VE no Pará nos últimos nove anos, com um aumento de 6.797% (NEOCHARGE, 2024).

Figura 10 – Expansão anual da frota de carros elétricos no Pará por tipo.

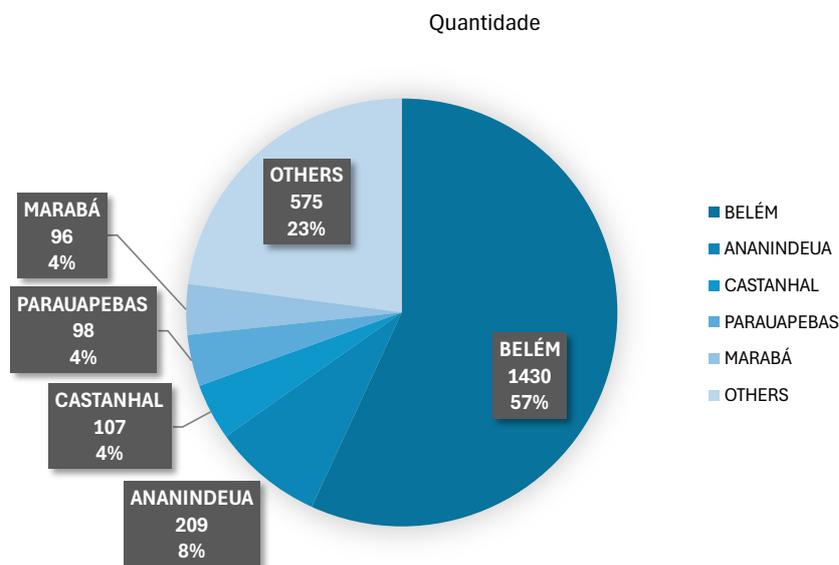


Fonte: Adaptado de (NEOCHARGE, 2024).

Os carros paraenses estão distribuídos em diversas cidades, conforme mostra a Figura 11. Ainda assim, a maioria está concentrada em Belém, capital do estado, com 1.430 unidades, correspondendo a 57% dos VEs do Pará. As cinco cidades seguintes com mais VEs são Ananindeua, com 209 unidades; Castanhal, com 107 unidades; Parauapebas, com 98

unidades; e Marabá, com 96 unidades. As demais cidades do estado juntas possuem 575 VEs (NEOCHARGE, 2024).

Figura 11 – Ranking dos carros elétricos por cidade do estado do Pará em 2023.



Fonte: Adaptado de (NEOCHARGE, 2024).

Com base nesses dados de mercado, é possível compreender o avanço da eletromobilidade nos níveis nacional, estadual e local. Isso ressalta a importância de analisar essa demanda atual e crescente de consumo de energia, que afetará a rede de distribuição e o desempenho das edificações. Este tema precisa ser mais explorado, visto que os impactos na rede são mais estudados em trabalhos acadêmicos e por consultorias de mercado, segundo (PNME, 2022a).

De acordo com as iniciativas de Mapeamento e Diagnóstico da Mobilidade Elétrica no Brasil de 2018 a 2021, a literatura tem mostrado que os estudos focam no impacto na rede elétrica, geração e armazenamento de energia, células de combustível em veículos elétricos, recarga de veículos, postos de recarga, e a influência de todos os elementos da mobilidade elétrica na rede de abastecimento de energia (PNME, 2022a). No entanto, são raros os estudos que analisam o impacto das cargas dos veículos elétricos nos edifícios (PNME, 2021). Porém, o uso de carros elétricos no Brasil ainda é pouco difundido e a infraestrutura de abastecimento é restrita, principalmente na região norte do Brasil.

2.9.2. Políticas Públicas

Segundo o Simulador de Política Energética do Brasil (*Energy Innovation*, 2024), há uma variedade de políticas que poderiam ser implementadas visando nortear a implantação do carregador de VE, tais como:

- Os códigos de construção podem exigir a instalação de carregadores (ou, pelo menos, condutos, fiação e capacidade elétrica) em uma porcentagem das vagas de estacionamento em novos empreendimentos, especialmente em grandes edifícios residenciais ou comerciais .
- O governo e as empresas de serviços públicos podem oferecer subsídios aos proprietários de residências ou empresas para cobrir parte dos custos de aquisição e instalação de carregadores para veículos elétricos.
- O governo pode utilizar recursos próprios, como os provenientes de impostos sobre carbono, padrões de combustível de baixo carbono ou impostos sobre combustíveis de veículos, para financiar diretamente a construção de estações de recarga públicas.
- reguladora agência reguladora de eletricidade, pode exigir que as empresas de eletricidade construam estações de carregamento para veículos elétricos, financiadas por subsídios governamentais, receitas de contribuintes ou uma combinação de ambos.
- Os reguladores podem estabelecer tarifas de eletricidade mais vantajosas para carregadores de veículos elétricos, reduzindo os custos operacionais e aumentando o incentivo financeiro para a construção e operação dessas estações.
- Os governos locais podem simplificar o processo de licenciamento para a instalação de carregadores de veículos elétricos e alterar as leis de zoneamento para permitir a instalação de estações de recarga nas calçadas.

Para a *Energy Innovation* (2022), a descarbonização do setor de transporte exige a ampla implantação de veículos elétricos e o apoio governamental para acelerar sua adoção no curto e médio prazos. As políticas devem ser planejadas com uma visão de longo prazo, ajustando as taxas de subsídio conforme o avanço tecnológico, mas prevendo sua eliminação gradual de acordo com um cronograma ou fórmula estabelecida com antecedência.

O governo pode estabelecer que as montadoras vendam uma porcentagem mínima de veículos com emissão zero, como os veículos elétricos (VEs). Essa política incentiva o desenvolvimento tecnológico, garantindo que as montadoras invistam em tecnologias de emissão zero e ofereçam os produtos resultantes aos consumidores (*Energy Innovation*, 2022).

No panorama internacional, a Califórnia e outros nove estados dos EUA participam de um programa que exige a venda de veículos elétricos. Cada montadora deve vender uma quantidade suficiente de VEs para cumprir suas metas de créditos de veículos com emissão zero, o que levou as vendas de VEs a aumentarem de 2% do total em 2018 para uma previsão de 8% até 2025 (*Energy Innovation*, 2022).

As políticas e regulamentações voltadas para veículos elétricos no Brasil são fundamentais para a expansão segura e eficiente dessa tecnologia no país. A NBR 17019, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), estabelece os requisitos para a instalação elétrica fixa destinada ao fornecimento de energia a veículos elétricos, determinando que as estações de recarga públicas devem ser projetadas para fácil acesso e sinalizadas adequadamente. Esta norma também permite o uso do veículo elétrico como fonte de energia reserva (ABNT, 2022a).

A ABNT NBR IEC 61851-1 - Sistema de recarga condutiva para veículos elétricos - Parte 1: Requisitos gerais, aplica-se aos sistemas de alimentação para a recarga de veículos elétricos rodoviários, com tensões nominais de até 1.000 V CA ou 1.500 V CC (ABNT, 2021a). Em complemento, a ABNT NBR IEC 61851-21 - Sistema de recarga condutiva para veículos elétricos - Parte 21, apresenta de veículos elétricos para a conexão condutiva a uma alimentação em corrente alternada ou contínua; e a NBR IEC 61851-22 fornece requisitos específicos para estações de recarga em corrente alternada, abordando a conexão condutiva ao veículo e detalhando normas de segurança que, no entanto, não cobrem a manutenção das estações de recarga (ABNT, 2021b).

A ABNT NBR IEC 62196-1:2021 trata dos plugues, tomadas e cabos de recarga utilizados em sistemas de recarga condutiva de veículos elétricos, com tensões nominais de até 690 V CA ou 1.500 V CC, garantindo a segurança e a compatibilidade desses acessórios (ABNT, 2021c).

No âmbito legislativo, a Lei Nº 17.336, de 30 de março de 2020 da cidade de São Paulo, impõe a obrigatoriedade de prever sistemas de recarga para veículos elétricos em novos projetos de edifícios residenciais e comerciais na cidade, uma medida que visa promover a infraestrutura necessária para a crescente adoção de veículos elétricos (São Paulo, 2020a).

Por fim, o Corpo de Bombeiros do Estado de Goiás (CBMGO) publicou a Norma Técnica 45/2024 que estabelece medidas de segurança contra incêndio e pânico em edificações que possuam sistemas de recarga para veículos eletrificados, sejam eles carros elétricos ou híbridos, reforçando a importância da segurança nas instalações de recarga (Goiás, 2024).

As normas técnicas estabelecidas por distribuidoras de energia no Brasil também são fundamentais para a regulamentação e segurança na instalação de estações de recarga para veículos elétricos. Estas normas asseguram que as conexões elétricas sejam realizadas conforme a legislação vigente e as diretrizes da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Em 2018, a ANEEL aprovou a Resolução Normativa nº 819/2018, que foi a primeira regulamentação sobre a recarga de veículos elétricos e foi elaborada por diversos interessados, incluindo distribuidoras e empreendedores. No entanto, essa norma foi revogada pela

Resolução Normativa nº 1.000/2021, que consolida os direitos e deveres dos consumidores de energia elétrica e estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica (ANEEL, 2022).

A Especificação Técnica nº 280 da ENEL (2019) estabelece critérios para novas ligações ou alterações de carga em unidades consumidoras com estações de recarga de veículos elétricos. Aplicável nas operações da Enel nos estados do Ceará, Goiás e Rio de Janeiro, essa norma também exige o cadastro das estações junto à ANEEL, assegurando a integração adequada dessas infraestruturas à rede elétrica.

A Norma Técnica ENERGISA/GTD-NRM/Nº 023/2021 define requisitos semelhantes para novas ligações ou alterações de carga, incluindo o cadastro das estações de recarga de acordo com a Resolução Normativa ANEEL nº 1.000/2021. Esta norma é crucial para gerenciar o aumento da demanda de energia associado à expansão da frota de veículos elétricos (ENERGISA, 2021).

No Paraná, a COPEL publicou a NTC 902210, que estabelece os requisitos mínimos para a conexão de estações de recarga à rede elétrica. Esta norma orienta construtoras, engenheiros e arquitetos sobre a instalação segura de pontos de recarga em novos projetos e reformas, atendendo à crescente demanda por infraestrutura de recarga em condomínios e estabelecimentos comerciais (COPEL, 2019).

A Norma Técnica NT.042 do Grupo Equatorial Energia define critérios, padrões e recomendações para novas conexões ou alterações de carga em unidades consumidoras com estações de recarga de veículos elétricos. Esta norma assegura que as instalações estejam em conformidade com as legislações oficiais, normas da ABNT e outros documentos técnicos aplicáveis ao grupo, promovendo uma infraestrutura de recarga segura e eficiente (Equatorial Energia, 2022).

2.9.3. Incentivos nacionais

A Lei 17.563/2021 – que desburocratiza o desconto de IPVA para veículos eletrificados previsto desde 2014, permite aos compradores de veículos elétricos e híbridos usar os créditos de IPVA a que têm direito para abater débitos de Imposto Predial e Territorial Urbano – IPTU (São Paulo, 2021). Essa iniciativa soma-se à Lei Municipal 16.802/2018, que fixou um cronograma de conversão dos ônibus a diesel em ônibus de baixa emissão de poluentes, e à Lei Municipal 17.336/2020, que prevê infraestrutura de recarga elétrica para veículos nos novos condomínios residenciais na cidade de São Paulo (São Paulo, 2020b).

2.9.3.1. Política Nacional de Mobilidade Urbana (Lei nº 12.587/2012)

A Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU) é um instrumento da política de desenvolvimento urbano, que objetiva a integração entre os diferentes modos de transporte e a melhoria da acessibilidade e mobilidade das pessoas e cargas no território do município (GIZ, 2020).

Com o objetivo de tornar os carros elétricos mais acessíveis no Brasil, onde ainda são considerados artigos de luxo, alguns projetos em tramitação propõem a redução de impostos, como: o PLS 340/2016, que prevê a isenção do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), para carros elétricos de fabricação nacional por cinco anos (BRASIL, 2016). Já o PL 403/2022 defende a isenção IPI para veículos importados (BRASIL, 2022). Simultaneamente, outros projetos buscam restringir a expansão dos carros convencionais, propondo a proibição gradual de sua comercialização, como o PLS 454/2017, e o PLS 304/2017 (BRASIL, 2017a, 2017b).

Em relação a infraestrutura para a mobilidade elétrica de veículos leves, o PL 5590/2019, dispõe sobre a implementação tarifária, visando fomentar investimentos em pontos de recarga para carros elétricos e híbridos. Assim como o PL 808/2021, que trata da instalação obrigatória de eletropostos em edifícios coletivos (BRASIL, 2019, 2021).

Dando mais um passo significativo para o avanço da mobilidade elétrica no Brasil, o Senado aprovou o Projeto de Resolução (PRS) 64/2021, que cria a Frente Parlamentar Mista pela Eletromobilidade — um grupo destinado a debater políticas públicas e medidas para incentivar o uso de veículos elétricos no país.

2.9.4. Veículos Elétricos no Brasil e no mundo

Conforme mencionado na subseção anterior, o Brasil vem aderindo progressivamente a veículos elétricos em seu território, com a projeção do nível de adoção aumentar nos próximos anos. A nível mundial, a adoção de veículos do tipo também é expressiva. Estima-se que ao longo dos próximos quatro anos a adesão de veículos passageiros e veículos comerciais elétricos aumente em torno de 54 milhões considerando entidades como China, Estados Unidos, União Europeia e Reino Unido (Hoover *et al.*, 2021).

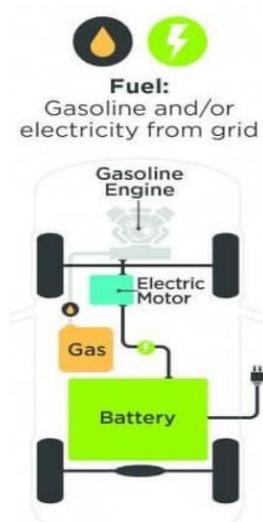
A seguir serão descritos os diferentes tipos de veículos que podem ser enquadrados parcialmente ou totalmente como veículos elétricos.

2.9.4.1. Veículo Elétrico Híbrido e sua variável *plug-in*

Os Veículos Elétricos Híbridos (VEHs) apresentam propulsão elétrica compartilhada, cuja energia é suprida por uma bateria e um motor à combustão movido por combustíveis fósseis ou biocombustíveis (Híbrido Flex). Alguns modelos de VEHs são o *Toyota Prius* e o *Mitsubishi Outlander* (Barassa; Consoni; Cruz, 2022). Devido ao aumento do preço do combustível, esses modelos de veículos têm sido cada vez mais alvo de interesse de consumidores. A

Figura 12 apresenta um diagrama simples com a composição básica de um VEH.

Figura 12 – Representação da arquitetura dos VEH/VEHPL.



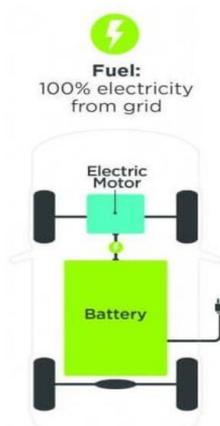
Fonte: (Barassa; Consoni; Cruz, 2022).

2.9.4.2. Veículo Elétrico a Bateria (VEB)

Os veículos elétricos a bateria (VEB) possuem propulsão exclusivamente elétrica, utilizando eletricidade como sua fonte de energia. A energia que alimenta o motor é armazenada em uma bateria e proveniente de uma fonte externa ao veículo, como a rede elétrica (Figura 13). Com o aumento dos preços dos combustíveis fósseis líquidos e os avanços nas tecnologias de baterias de íon de lítio, que oferecem maior potência e densidade energética, esses veículos estão se tornando opções cada vez mais atrativas (Barassa; Consoni; Cruz, 2022).

Em relação ao consumo típico, os veículos elétricos a bateria (VEB) leves variam entre 6 e 8 km/kWh (0,125 a 0,167 kWh/km), enquanto as vans consomem entre 4 a 6 km/kWh (0,167 a 0,25 kWh/km). Já os veículos comerciais leves (VUCs) apresentam consumo de 2 a 3 km/kWh (0,33 a 0,50 kWh/km), e os ônibus consomem entre 0,5 a 0,7 km/kWh (1,43 a 2,00 kWh/km) (Barassa; Consoni; Cruz, 2022).

Figura 13 – Representação da arquitetura dos VEBs.



Fonte: (Barassa; Consoni; Cruz, 2022).

2.9.4.3. Veículo Elétrico a Células a Combustível (VECC)

O Veículo Elétrico a Células de Combustível (VECC) possui propulsão elétrica dedicada, utilizando células de combustível, principalmente a base de hidrogênio, como fonte de energia em vez de combustíveis líquidos. Nesse sistema, a *Fuel Cell Stack* converte o hidrogênio em eletricidade para alimentar o motor elétrico do veículo (PNME, 2022b).

2.9.5. Principais elementos da infraestrutura de mobilidade elétrica

A fim de viabilizar a mobilidade elétrica ao redor do mundo, diferentes elementos padronizadores, como normas, foram elaborados para a implementação do modelo. Dentre as normas internacionais existentes, a principal e mais completa é a série da IEC 61851, que aborda a padronização dos sistemas de abastecimento mediante o estabelecimento de 4 modos de recarga definindo parâmetros elétricos relevantes como tensão, corrente e potência no carregamento.

Ademais, a IEC 61851 norteia normas que são entendidas como complementares como a SAE J1772, também denominada de *SAE Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler*. A SAE considera recomendações que dizem respeito a aspectos como a física, funcionalidades e performance de recarga de veículos em questão.

No Brasil, há uma resolução normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021, que estabelece as regras de prestação de serviço público de distribuição de energia elétrica, e em seu capítulo V aborda a instalação de recarga de veículos elétricos, dos equipamentos utilizados para a recarga, do funcionamento da estação de recarga, e da prestação de atividade de recarga de VE pela distribuidora (ANEEL, 2021). Além disso, a norma regulamentadora no território

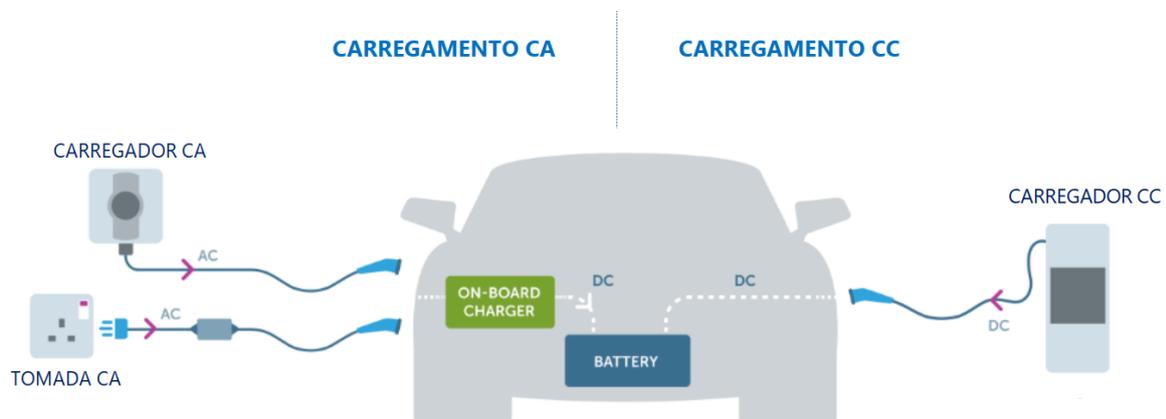
brasileiro é a NBR 17019/2022: Instalações elétricas de baixa tensão – Requisitos para instalações em locais especiais – Alimentação de veículos elétricos (ABNT, 2022b).

2.9.6. Carregamento de veículos elétricos

Dentre os tipos de tecnologias consideradas para o carregamento de veículos elétricos, é possível citar duas principais: Carregamento Condutivo e Carregamento Indutivo. O Carregamento Condutivo, dentre as soluções, é a que vem sendo amplamente utilizada e já possui padrões de infraestrutura implementados (Barassa; Consoni; Cruz, 2022). O Carregamento Indutivo é caracterizado pela recarga do veículo sem o contato físico. Ambas as soluções apresentadas se caracterizam por integrar diretamente os carros na rede de energia elétrica.

Dentre os tipos de carregamento, o tipo condutivo apresenta duas classificações: o carregamento em corrente alternada (CA) e o carregamento em corrente contínua (CC). A Figura 14 sintetiza o funcionamento dos tipos de carregamentos condutivos em tese (Barassa; Consoni; Cruz, 2022).

Figura 14 – Funcionamento dos tipos de carregamentos condutivos.



Fonte: (Barassa; Consoni; Cruz, 2022).

Dentre essas duas tipologias, este trabalho direciona o enfoque para o carregamento condutivo. O carregador CA funciona mediante a injeção de um conector com corrente alternada (CA) no carro, que posteriormente é convertida para corrente contínua (CC) mediante um conversor embarcado no veículo. Já o carregador CC funciona mediante a injeção de um conector que aplica diretamente uma corrente contínua no sistema elétrico do carro. Ademais, cada tipo de carregamento apresenta estágios referente aos parâmetros elétricos que o caracterizam, tal como os locais onde comumente são instalados.

A nota técnica 902210/2022 da Companhia Paranaense de Energia (COPEL), apresenta três tipologias de recarga, sendo elas lentas, semirrápidas e rápidas (COPEL, 2019). As características técnicas podem ser visualizadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características das estações de recarga.

Tipo de Recarga	Atendimento	Tensão	Potência
Lenta	Bifásico	220V	3,6 kW
Lenta	Bifásico	220V	7,4 kW
Semirrápida	Trifásico	220/127V	11 kW
Semirrápida	Trifásico	380/220V	22 kW
Rápida	Trifásico	380/220V	>=43 kW

Fonte: (COPEL, 2019).

A nota técnica ressalta que as estações de recarga são projetadas para operar com tensões de 380/220 V ou 400/230 V. Portanto, se a tensão disponível não for compatível com a da estação de recarga, o responsável pelas instalações deverá ajustar o nível de tensão utilizando transformadores rebaixadores/elevadores ou outra solução adequada à necessidade (COPEL, 2019).

2.9.7. Estágio de carregamento

Na Tabela 3 é possível ver uma síntese de mais algumas informações referentes aos estágios de carregamento, mencionados nas duas classificações de carregamento CA e CC (Barassa; Consoni; Cruz, 2022).

Tabela 3. Síntese de informações de carregamento de veículos elétricos.

Classificação	Carregamento condutivo CA		Carregamento condutivo CC	
	Lento ou Normal	Semirrápido	Rápido	Ultrarrápido
Potência	3,6 kW a 7,4 kW	11 kW a 22 kW	50 kW a 100 kW	150 kw em diante
Locais de instalação	Residências e condomínios	Estacionamentos e comércios	Rodovias e corredores	Rodovias e corredores
Tempo médio de recarga	12 a 6 horas	6 a 2 horas	1,5 horas a 30 min	30 min a 10 min

Fonte: (Barassa; Consoni; Cruz, 2022).

2.9.8. Tipos de comunicação

Vehicle-to-Everything (V2X)

Vehicle-to-Everything (V2X) é um sistema de comunicação entre um veículo e qualquer entidade que pode detectar, ou pode ser detectada, pelo veículo (Noor-A-Rahim *et al.*, 2022). Ele incorpora outros tipos de comunicação mais específicos como:

- Veículo para infraestrutura - V2I (do inglês *vehicle to infrastructure*);
- Veículo para veículo - V2V (do inglês *vehicle to vehicle*);
- Veículo para casa - V2H (do inglês *vehicle to home*); e
- Veículo para rede elétrica - V2G (do inglês *vehicle to grid*).

O veículo para rede elétrica (V2G), segundo (Barassa; Consoni; Cruz, 2022) é uma tecnologia que possibilita um fluxo bidirecional, onde um veículo elétrico estacionado e conectado à rede carrega e descarrega sua bateria recebendo ou fornecendo energia, introduzindo o conceito de armazenamento de energia “sob rodas”.

Internacionalmente, essa tecnologia tem fomentado novas possibilidades de mercado, com o consumidor podendo prestar serviços pela venda de energia com preço mais caro, ao ofertar no horário de ponta (o mais caro do sistema energético), sendo que ele pode recarregar seu veículo elétrico em horário fora de ponta (mais barato do sistema energético), ou até mesmo abastecer com energia renovável.

2.9.9. Infraestrutura de mobilidade elétrica nas edificações

Dentro do contexto de mobilidade elétrica, uma das possibilidades existentes trata da integração do elemento de carregamento de veículos na rede elétrica de edificações. No Brasil, o aumento da frota de veículos elétricos no Paraná, por exemplo, gerou um crescente interesse na instalação de pontos de recarga em estacionamentos de condomínios residenciais e comerciais. Para assegurar que essas instalações sejam realizadas com segurança, a Copel publicou a norma técnica NTC 902210, que define as exigências mínimas para a conexão desses equipamentos à rede elétrica.

A NTC 902210 detalha os procedimentos a serem seguidos para a solicitação de novas ligações e estabelece de forma clara e padronizada as exigências técnicas e de segurança para a instalação desses equipamentos. Ela traz as considerações específicas de atendimento em edificações individuais estipulando que, em instalações particulares, a estação de recarga de veículos elétricos deverá ser conectada diretamente à unidade consumidora existente. Não podendo ser disponibilizado um ponto de medição adicional exclusivo para a estação de recarga, diferente do que é estabelecido às estações de recarga ligadas em via pública (COPEL, 2019).

Segundo a nota técnica: É permitida a conexão em baixa tensão para unidades consumidoras com carga instalada superior a 75 kVA e até 225 kVA, desde que haja viabilidade técnica para tal atendimento (COPEL, 2019). No entanto, no Brasil é proibida a injeção de energia elétrica na rede de distribuição a partir dos veículos elétricos, bem como a participação no sistema de compensação de energia elétrica para microgeração e minigeração distribuída.

O projetista deve prever e dimensionar um circuito exclusivo para cada estação de recarga, com um disjuntor para proteção contra sobrecorrentes e um dispositivo diferencial residual (DR) tipo B (para correntes alternada e contínua) para proteção contra choques elétricos, conforme as orientações dos fornecedores e fabricantes das estações de recarga. Além disso, os quadros que alimentam as estações de recarga devem incluir dispositivos de proteção contra surtos (DPS), adequados e especificados pelo projetista de acordo com as normas ABNT NBR 5410 e 5419 (COPEL, 2019).

O sistema de aterramento das instalações elétricas com estação de recarga deve ter baixa impedância e, mais importante, assegurar a integridade completa do aterramento. Isso inclui garantir a qualidade das conexões, interligações, barramentos de equipotencialização e malha de aterramento, entre outros componentes (COPEL, 2019).

Quando a estação de recarga for conectada às instalações elétricas do condomínio, a administração do empreendimento deverá implantar um sistema para identificar e cobrar o consumo de cada usuário. Alternativamente, poderá ser aprovado em assembleia o rateio do consumo de energia elétrica dessa estação de recarga entre todos os condôminos (ENERGISA, 2021, p. 042).

Já nas estações coletivas, elas podem ser conectadas de três maneiras: na instalação elétrica ou medição do condomínio (administração do empreendimento), na unidade consumidora do responsável pela estação de recarga, mesmo que seja para uso de terceiros (como em estacionamentos), ou em uma nova unidade consumidora exclusiva para a estação de recarga no centro de medição. Não será permitido o atendimento através de um segundo ponto de conexão (ENERGISA, 2021, p. 042).

Em empreendimentos comerciais, como hipermercados, shoppings, aeroportos e postos de combustível, a estação de recarga pode ser conectada à instalação do condomínio (administração) ou a uma unidade consumidora adicional exclusiva para a estação de recarga ou uso de terceiros, sendo limitada a um único ponto de conexão (ENERGISA, 2021, p. 042).

Conforme estabelece a Resolução Normativa nº 1.000 de 7 de dezembro de 2021 da ANEEL, as distribuidoras de energia devem ser acionadas através de uma solicitação de atendimento para comunicar a instalação da estação de recarga com o pedido de ligação, nos

casos de conexão nova; aumento ou redução de carga; ou alteração do nível de tensão. Em todos os casos as estações de recarga deverão ser discriminadas na relação de cargas (ANEEL, 2021).

Em 2023 foi publicado através do relatório da Comissão ao Parlamento Europeu e ao Conselho, a política no setor dos edifícios em prol da eletromobilidade, que tem como objetivo informar o Parlamento Europeu e o Conselho sobre como a política para o setor de edifícios pode fomentar a eletromobilidade em toda a União Europeia. De acordo com o artigo 8, n.º 2, da Diretiva sobre Desempenho Energético dos Edifícios, os Estados-Membros devem apoiar a implementação da eletromobilidade (União Europeia, 2010a).

Para novos edifícios não residenciais e para edifícios não residenciais que sejam submetidos a grandes reformas e que possuam mais de dez vagas de estacionamento, é necessário instalar pelo menos um ponto de carregamento e a infraestrutura de dutos (para cabos elétricos) em pelo menos uma a cada cinco vagas de estacionamento. Isso permitirá a instalação futura de pontos de recarga para veículos elétricos (União Europeia, 2010a).

Em 2021 a Comissão Europeia reformulou a Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios e introduziu o artigo 12.º que discorre que trata da infraestrutura para mobilidade sustentável, alinhado com a ampliação das metas climáticas, reforçando os requisitos anteriores. A instalação de pré-cabeamento torna-se obrigatória para todos os novos edifícios e aqueles que passam por grandes reformas, com ênfase particular na implementação de pontos de recarga em edifícios de escritórios novos e reformados (União Europeia, 2010a).

Esses pontos de recarga devem permitir a recarga inteligente, e os Estados-Membros devem remover os obstáculos à instalação de pontos de recarga em edifícios residenciais, garantindo o "direito de conexão" conforme as disposições pertinentes da proposta de regulamento sobre infraestrutura para combustíveis alternativos (União Europeia, 2010a).

As disposições que incentivam a eletromobilidade (e-mobilidade) em edifícios foram incorporadas na Diretiva (UE) 2018/844 (EPBD), que entrou em vigor em julho de 2018, com um prazo para implementação pelos Estados-Membros até março de 2020. O artigo 8 da EPBD exige que os Estados-Membros promovam a adoção da mobilidade elétrica, instalando pontos de recarga e infraestrutura de dutos nos edifícios. Esse artigo estabelece várias obrigações para os Estados-Membros, como (Milieu; Panteia; Trinomics, 2022):

- Para novos edifícios não residenciais e aqueles que estão passando por grandes reformas, com mais de 10 vagas de estacionamento, é necessário instalar pelo menos um ponto de recarga e a infraestrutura de dutos (para possibilitar a instalação futura

de pontos de recarga) em pelo menos uma a cada cinco vagas de estacionamento (Milieu; Panteia; Trinomics, 2022):

- Para edifícios não residenciais com mais de 20 vagas de estacionamento, deve-se definir requisitos para a instalação de um número mínimo de pontos de recarga até 1º de janeiro de 2025 (Milieu; Panteia; Trinomics, 2022);
- Para novos edifícios residenciais e aqueles que estão passando por grandes reformas, com mais de 10 vagas de estacionamento, deve-se instalar infraestrutura de dutos em cada vaga de estacionamento (Milieu; Panteia; Trinomics, 2022);
- Facilitação da instalação de pontos de recarga e eliminação de possíveis barreiras regulatórias, incluindo procedimentos de autorização e aprovação (milieu; panteia; trinomics, 2022);
- Consideração da necessidade de políticas integradas para edifícios, mobilidade sustentável, e planejamento urbano ecológico. (Milieu; Panteia; Trinomics, 2022).

A Diretiva (UE) 2018/844 aborda pontos de recarga e a instalação de dutos conforme definido na Diretiva 2014/94/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, que inclui aspectos como sistemas de medição inteligente, normas técnicas (como tipos de conectores para pontos de recarga) e facilidade de uso. A proposta de Infraestrutura para Combustíveis Alternativos (AFIR) prevê disposições adicionais para garantir a facilidade de uso da infraestrutura de recarga.

Essas disposições abrangem opções de pagamento, transparência de preços e informações ao consumidor, práticas não discriminatórias, recarga inteligente e regras de sinalização para o fornecimento de eletricidade aos pontos de recarga. Além disso, a proposta estabelece especificações técnicas comuns para pontos de recarga, complementando as normas existentes (Milieu; Panteia; Trinomics, 2022).

2.9.10. Benefícios da inserção de estações de recarga nas edificações

O aprimoramento e a implementação da Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD) foram identificados pelos tomadores de decisão da UE como uma estratégia crucial para integrar a política energética de construção com a política de transporte. Isso é visto como um componente essencial para a descarbonização da economia da UE e para o cumprimento das metas de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Vários fatores influenciarão a taxa de adoção de veículos elétricos (VEs), incluindo acessibilidade, conveniência e

confiabilidade em comparação com veículos tradicionais com motor de combustão interna (ICE) (Milieu; Panteia; Trinomics, 2022).

A facilidade de acesso e as características da infraestrutura de recarga de VEs desempenham um papel importante, com consequências mais amplas. Por exemplo, a capacidade de recarga unidirecional (inteligente) e bidirecional dos VEs tem o potencial de servir como uma ferramenta eficaz de resposta à demanda (DR). Isso pode aumentar a flexibilidade e a relação custo-benefício do sistema elétrico, contribuindo para uma maior integração da geração de eletricidade renovável variável na matriz energética (Milieu; Panteia; Trinomics, 2022).

Assim, as políticas que promovem a adoção de infraestrutura de recarga para VEs impactarão diretamente a descarbonização do setor de transportes, do sistema elétrico e do parque imobiliário. Além disso, a transição para veículos elétricos beneficiará a União Europeia, reduzindo a dependência energética, estimulando a economia local e criando empregos, ao mesmo tempo em que aumentará a competitividade industrial da UE, posicionando-a na vanguarda da transição global para veículos elétricos (Milieu; Panteia; Trinomics, 2022).

Zhou *et al.* (2019) especificam que ao integrar VEs com edifícios, vários objetivos previstos podem ser alcançados, que são brevemente resumidos da seguinte forma:

- 1) redução do consumo de energia dos edifícios e transportes com uma maior participação do sistema renovável;
- 2) redução da pressão de importação/exportação na rede elétrica;
- 3) mudar as cargas de pico para períodos de sub-pico ou fora de pico e reduzir o custo operacional anual por meio da operação esquemática de redes inteligentes, veículos inteligentes e edifícios inteligentes; e
- 4) fornecer energia flexível para uso doméstico e transporte com estratégias inteligentes de carregamento de veículos elétricos e gerenciamento flexível do lado da demanda (*demand-side management* - DSM).

Ademais, as estratégias de implementação de carregadores em edificações podem apresentar fatores benéficos para ambos os setores de edificações e transportes elétricos. De acordo com Quddus *et al.* (2018), neste modo de integração, em alguns países, é possível que um edifício comercial, que tenha um sistema de gerenciamento de energia inteligente, consiga trabalhar em conjunto mediante um fornecimento de energia bidirecional, com a estação de

carregamento a fim de aumentar a eficiência energética do sistema, diminuindo os custos de consumo da rede.

Além disso, de maneira geral, a implementação de tecnologias de carregamento de veículos elétricos como a V2B não requer que o projeto elétrico da edificação seja completamente reformulado, sendo necessários ajustes para adaptar o funcionamento da edificação ao sistema de carregamento. Nesse caso, o sistema de carregamento em edificações consegue melhorar a eficiência energética.

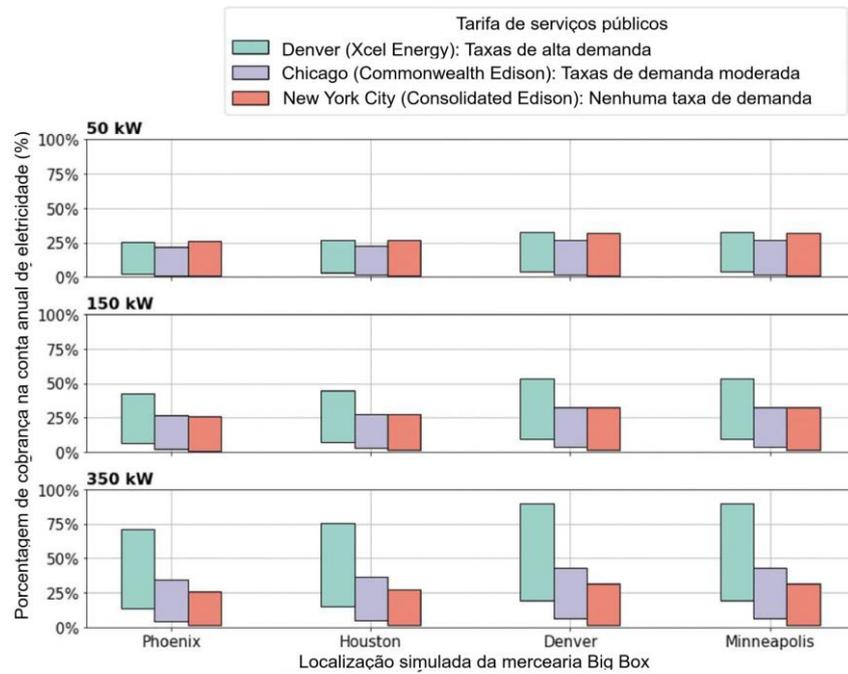
Este processo se dá através do balanço energético do sistema, formado pelo veículo elétrico, edificação e rede elétrica, na qual a rede elétrica apoia a demanda energética do edifício e da estação em momentos de *déficit* de energia renovável e, em contrapartida, recebe a injeção de energia em momentos em que há um excedente armazenado no sistema edifício + veículo elétrico (Zhou *et al*, 2019).

Em contexto internacional, além de se comportar como um armazenamento de energia elétrica para a rede, o VE traz a vantagem do gerenciamento da oferta e demanda de energia. Assim como novos nichos de atuação, essas mudanças ainda geram estudos para avaliar o desgaste das baterias e a própria formulação de instrumentos jurídicos, técnicos e mercadológicos, que regulem essas atuações. Lembrando que no Brasil essa prática ainda não é permitida pela legislação nacional.

2.9.11. Impactos das cargas de consumo de VE nas edificações

No estudo de (Gilleran *et al.*, 2021), efeitos do carregamento de VEs em uma edificação comercial foram avaliados em cenários com tamanhos de estações, em três níveis de energia de carregamento (50 kW, 150 kW e 350 kW). Como demonstrado na Figura 15, os autores comprovam que uma estação com duas portas de 50 kW pode até fazer pouca diferença para o perfil de consumo de uma grande loja, porém à medida que isso vai aumentando (seis portas de 350 kW, por exemplo), a carregamento de VE pode ter demandas elétricas maiores que o prédio.

Figura 15 – Efeitos do carregamento de VE's.



Fonte: (Gilleran *et al.*, 2021).

Conclui-se que as mudanças percentuais na fatura anual de eletricidade do cenário de consumo de eletricidade na edificação sem VE para o cenário de consumo de eletricidade na edificação com VE são significativas e, portanto, precisam de mais atenção e estudos.

3. METODOLOGIA

3.1. Considerações iniciais

O conteúdo dos capítulos anteriores, serve de embasamento teórico e empírico para a elaboração estrutural da metodologia de pesquisa posposta neste capítulo. Em virtude do que foi exposto, percebeu-se a necessidade da incorporação da avaliação de abastecimento de veículos elétricos, no que tange o consumo de energia predial, para suprir esse sistema que apresenta uma carga significativa, porém pouco avaliada quanto o seu impacto compondo o desempenho energético global de edificações.

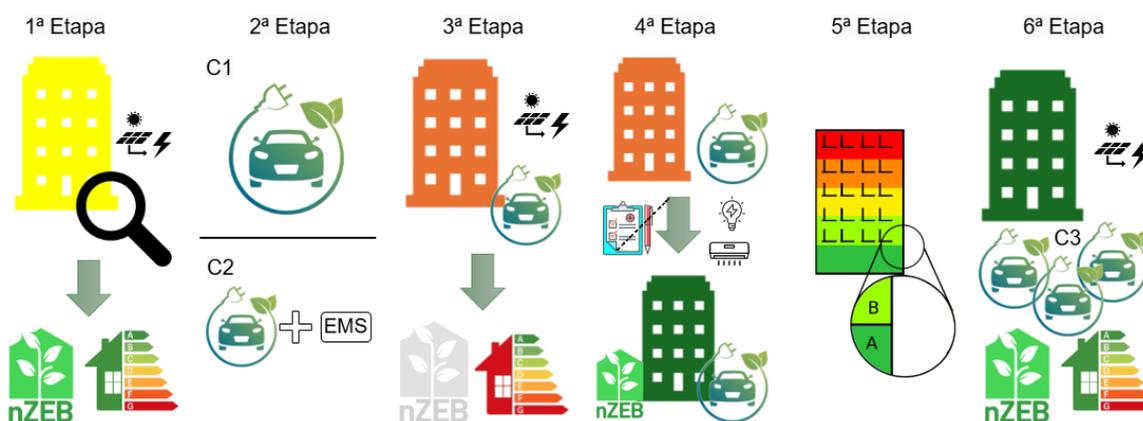
A fim de englobar esse sistema, o presente trabalho propõe a incorporação e diferenciação do valor de consumo individual do sistema de abastecimento de veículos elétricos (VE) na metodologia nacional de desempenho energético da Instrução Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C), do Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBE Edifica). A etapa sugerida na metodologia pode ser amplamente empregada em edificações nacionais, com exceção da tipologia residencial, que deve ser avaliada através da INI-R. Portanto, as tipologias de edificações comerciais de serviços e públicas, que passem a contemplar o abastecimento de veículos elétricos, serão capazes de serem analisadas.

É importante ressaltar que a sua aplicação poderá ser feita tanto em edificações existentes, que passem ou não por um processo de retrofit, com incorporação de abastecimento de VE, quanto para a etapa de projeto de uma futura edificação que pretenda fazer essa integração. Para obter perfis de demanda de construção realistas, foi escolhida a metodologia de simulação computacional da INI-C.

3.2. Metodologia da Pesquisa

Esta seção descreve as seis etapas (Figura 16) de análise do estudo de caso e as respectivas metodologias aplicadas para atingir o objetivo principal proposto na tese.

Figura 16 - Diagrama das seis etapas da metodologia da pesquisa.



Fonte: Autora.

A **Etapa 1**, consiste no diagnóstico do desempenho energético dos sistemas de edificações não residenciais, para determinar o nível de eficiência energética (EE), nas condições existentes. Além de avaliar o balanço energético para determinar a classificação NZEB ou EEP, também nas condições existentes. Na **Etapa 2**, realiza-se uma análise preditiva do aumento da carga da edificação em estudo devido à integração do carregamento de veículos elétricos, analisada em dois cenários descritos mais detalhadamente na Subsecção 3.4. O impacto do aumento da carga de carregamento de VE nas classificações EE e NZEB/PEB, no caso existente, é examinado na **Etapa 3**.

Com base no nível de desempenho do edifício e nos balanços energéticos, é realizada uma análise crítica, identificando o potencial de eficiência dos sistemas avaliados. A Etapa 4, propõe-se um *retrofit* com ações para melhoria dos sistemas prediais, sempre que houver possibilidade de potencializar os ganhos energéticos. Ainda nesta etapa, o edifício será reavaliado, para averiguar a nova classificação do nível de eficiência e autossuficiência energética alcançada com as ações de *retrofit* propostas para a eficiência do edifício.

Depois de avaliar os resultados dos casos existentes e propostos, o potencial de aumento no consumo de eletricidade do edifício será analisado na **Etapa 5** após o *retrofit*. Esta análise permite ao gestor do edifício ter um parâmetro para o limite de aumento de consumo energético que o edifício pode sofrer, resultante da expansão dos sistemas prediais e das demais cargas, sem prejudicar o desempenho energético do edifício. Na **Etapa 6**, será medido o aumento da carga dos carros elétricos, que podem ser recarregados dentro de um limite pré-estabelecido.

Lembrando que, este aumento de carregamento, possibilitado pela redução do consumo de energia elétrica decorrente do *retrofit*, será proposto dentro dos limites da infraestrutura do

edifício, atendendo às premissas para o bom funcionamento dos demais sistemas prediais e, principalmente, mantendo o nível A de desempenho energético.

3.2.1. Etapa 1: Metodologia de Avaliação de Eficiência e Autossuficiência Energética em Edificações, sem considerar o sistema de abastecimento de VE

De acordo com a Portaria do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) N° 309 (9/06/2022), que estabelece a INI-C, a classificação do nível geral de eficiência energética das edificações é baseada no consumo de energia primária, comparando o consumo da edificação atual com a mesma edificação em uma condição de referência, que corresponde à classificação D (INMETRO, 2022a).

A classificação D corresponde a um edifício sem sombreamento nas janelas externas, materiais específicos para superfícies externas (parede, cobertura e vidros), bem como percentual de abertura de fachada (PAFT) e densidade de potência de iluminação (DPI) previamente definidos, dependendo da tipologia do edifício. O isolamento do piso deve ser considerado inexistente e o coeficiente de performance (COP) para sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (HVAC) deve ser de 2,6 (INMETRO, 2022a). Todos esses valores podem ser vistos no Apêndice A.

A INI-C utiliza o zoneamento bioclimático proposto na NBR 15.220-3 pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), facilitando a replicação desta metodologia em todo o território nacional. Como alternativa internacional, outros sistemas de rotulagem podem ser utilizados se a base da certificação for uma análise de redução de energia, como pode ser visto na certificação *Excellence in Design for Greater Efficiency* (EDGE), que premia rótulos de economia de energia, de 20 % de redução até 100% de redução, dependendo de padrões de rotulagem específicos (EDGE *Buildings*, 2024).

A INI-C avalia edifícios totalmente climatizados, totalmente ventilados naturalmente ou híbridos (ventilação natural e ar-condicionado). O consumo de energia pode ser estimado utilizando os métodos simplificado ou de simulação ou uma combinação dos dois métodos. Esta pesquisa utilizou o método de simulação para os sistemas de ar-condicionado, iluminação e envoltória. Como o sistema de aquecimento de água não existe na edificação, ele não foi abordado neste estudo, apesar de poder ser analisado pela metodologia que contempla diretrizes para esse sistema. O sistema da envoltória refere-se a paredes e telhados que separam os espaços interiores e o exterior do edifício (INMETRO, 2022a).

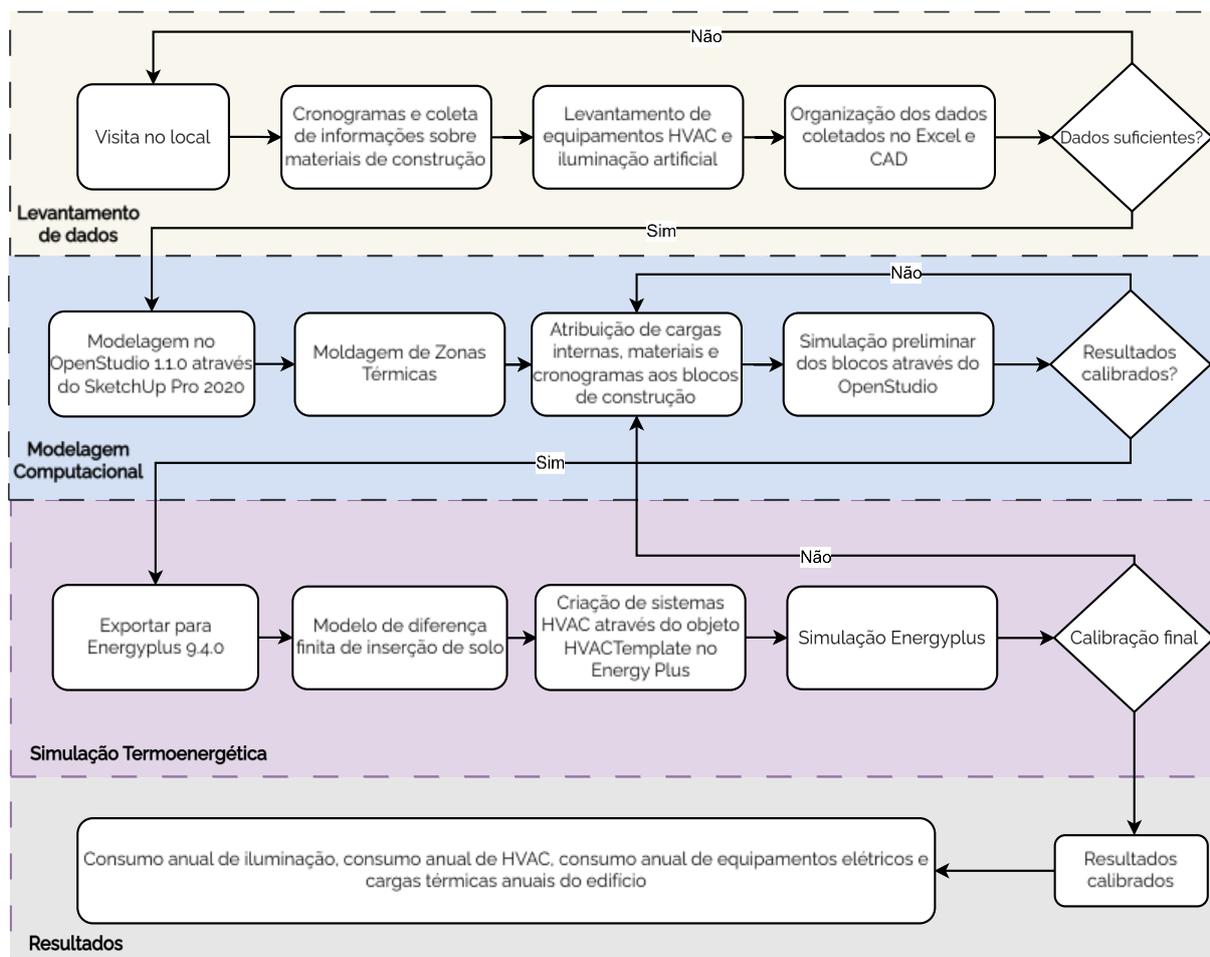
De acordo com a instrução normativa, o método de simulação termoenergética pode ser aplicado a qualquer edificação. Os requisitos para o tipo de *software* a ser usado nas simulações

estão definidos no item C.I.1 do Anexo C da INI-C. Através deste método obtém-se o consumo final correspondente a cada sistema de energia elétrica, além da estimativa da redução da carga térmica anual total do edifício, para a avaliação da envoltória; o consumo de energia do sistema de iluminação artificial; e o consumo anual de resfriamento. Os consumos de energia primária da condição real (CEP,real) e da condição de referência do edifício (CEP,ref) deverão ser calculados a partir dos dados de saída da simulação. Após isso, é possível determinar a classificação geral de eficiência energética do edifício.

Neste trabalho a avaliação do nível de eficiência energética e classificação de autossuficiência do estudo de caso foi estruturada em etapas, conforme a

Figura 17. As etapas consistem em: I. fazer a coleta de dados e informações sobre o edifício e seus sistemas; II. elaborar o modelo computacional, de acordo com as diretrizes da instrução normativa e com base nos dados coletados; III. realizar a simulação termoenergética com base nos procedimentos relacionados ao método de simulação termoenergética, descrito no Anexo C. I da INI-C.

Figura 17 – Etapas da avaliação de eficiência energética de edificações.



Fonte: Autora.

3.2.1.1. Levantamento de dados

A coleta de dados dos três sistemas prediais (envoltória, ar-condicionado e iluminação) é realizada por meio de visitas técnicas *in loco* e entrevistas com funcionários e ocupantes do espaço. As informações obtidas são apresentadas na Tabela A1 do Apêndice A.

3.2.1.2. Modelagem Computacional

O processo de modelagem consiste na criação de espaços virtuais que se assemelham aos reais. O programa computacional de simulação termoenergética escolhido deve possuir, no mínimo, as seguintes características:

- Ser um programa para a análise do consumo de energia em edifícios, validado pela ASHRAE Standard 140 e capaz de modelar 8.760 horas por ano;
- Modelar variações horárias de ocupação, potência de iluminação e equipamentos, sistemas de condicionamento de ar e ventilação natural definidos, separadamente, para cada dia da semana e feriados, além dos efeitos de inércia térmica;
- Modelar trocas de calor entre a edificação e o solo;
- Calcular cargas térmicas latente e sensível;
- Ser capaz de simular o sombreamento proveniente de elementos externos às zonas térmicas, como brises, sacadas e o entorno (quando considerado) e os efeitos da ventilação cruzada de um a quatro ambientes;
- Permitir a modelagem de multizonas térmicas, com capacidade de simular os efeitos das estratégias bioclimáticas adotadas no projeto;
- Caso a edificação seja condicionada, o programa deve permitir modelar todos os sistemas de condicionamento de ar presentes na edificação;
- Determinar a capacidade solicitada pelo sistema de condicionamento de ar;
- Calcular as horas não atendidas pelo sistema de condicionamento de ar, as curvas de desempenho de carga parcial para o sistema de condicionamento de ar e as curvas de correção de capacidade e eficiência para os sistemas de aquecimento e refrigeração;
- Caso a edificação proposta utilize ventilação natural, o programa deve modelar os dados de entrada referentes ao funcionamento dessa estratégia; e
- Produzir relatórios horários do uso final de energia.

Esses requisitos levaram à adoção da interface gráfica do *software OpenStudio* (versão 1.1.0), que utiliza o *software EnergyPlus* (versão 9.4.0) como mecanismo de cálculo para

modelagem geométrica, caracterização de horários de operação, cargas de ocupação interna, propriedades térmicas de materiais, iluminação artificial e equipamentos elétricos. No *OpenStudio*, horários de funcionamento são atribuídos aos tipos de espaços de cada bloco, de acordo com os dados do usuário.

Cada tipologia é classificada de acordo com a semelhança de horários, ocupação, presença de equipamentos e materiais elétricos. As programações são definidas e atribuídas às tipologias e aos materiais de construção com dados de espessura, condutividade térmica, calor específico, densidade e absorção térmica. Esses dados são retirados do site do *ProjetEEE*² ou da ABNT NBR 15.220-3 (ABNT, 2005, 2024).

De acordo com o Anexo C.I da INI-C, o arquivo climático deverá conter informação representativa do clima da cidade onde o edifício estará localizado. A instrução normativa adota a classificação climática ABNT NBR 15.220-3, proposta para verificar a influência do clima. O arquivo climático utilizado para a cidade de Belém³ está disponível na plataforma⁴ online PBE Edifica (INMET, 2018). Os resultados de saída a serem analisados nesta etapa são o consumo de eletricidade dos aparelhos e da iluminação artificial, a transmitância térmica, a refletância solar e a porcentagem total de abertura de fachada.

Como o estudo de caso desse trabalho é uma edificação que possui partido arquitetônico complexo (diversos formatos e elementos arquitetônicos), é importante destacar que, segundo as diretrizes da INI-C, edifícios reais com geometrias complexas devem ser divididos em blocos de formatos regulares. Cada bloco deve ser modelado em arquivos separados, sendo os demais blocos mantidos como objetos de sombreamento. Cada espaço fechado dentro do bloco deve ser marcado com uma zona térmica onde ocorrerá a transferência de calor. No exterior, seguindo orientações de modelagem da INI-C, as edificações próximas são incluídas de forma simplificada, e a vegetação não será incluída neste estudo (INMETRO, 2022a).

3.2.1.3. Simulação Termoenergética

A partir da modelagem computacional completa, os arquivos gerados no *OpenStudio* são exportados no formato .idf para configuração adicional no *EnergyPlus*, onde são incluídos os modelos de solo de cada bloco. Neste caso, o modelo de Diferenças Finitas Fundamentais é utilizado por fornecer resultados mais confiáveis ao custo de tempo computacional (Eli *et al.*, 2019). Este modelo terrestre utiliza um modelo unidimensional de transferência de calor por

² <<https://www.mme.gov.br/projeteee>>

³ BRA_PA_Belem.816800_INMET.epw

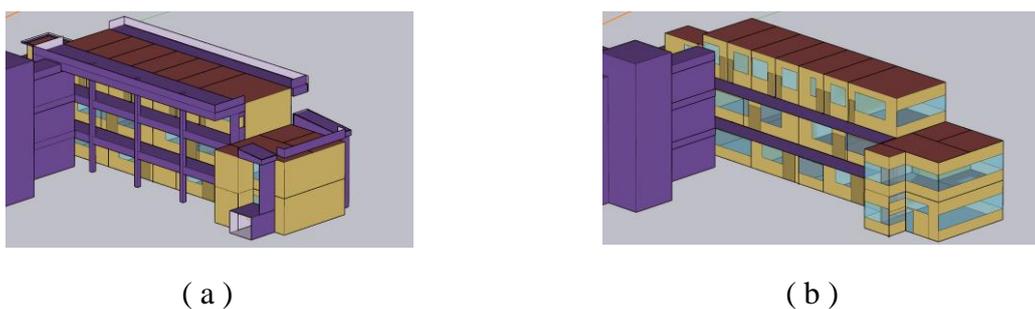
⁴ <<http://pbeedifica.com.br/arquivos-climaticos>>

diferenças finitas para executar uma simulação anual considerando o arquivo meteorológico do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (U.S. *Department Of Energy*, 2020). Uma simulação é executada antes das zonas térmicas serem definidas, para obter um perfil de temperatura do solo estável que seja utilizado na simulação com as zonas.

Após a configuração do solo, os sistemas de condicionamento artificial são criados utilizando o objeto HVAC *Template* do *EnergyPlus* para aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC), comumente utilizado para sistemas *split* (Eli *et al.*, 2019). Todos os sistemas HVAC neste estudo são do tipo *split*. Portanto, os únicos objetos *EnergyPlus* utilizados são Modelo HVAC: Sistema: Unitário e Modelo HVAC: Zona: Unitário para simular sistemas de ar-condicionado. Esses objetos requerem principalmente as variáveis de capacidade de refrigeração HVAC em W; o COP, IDRS ou CSPF, para cálculo do coeficiente de eficiência energética (CEE_R) do sistema; e a temperatura nominal. Todas as informações do sistema são apresentadas na Tabela A1 do Apêndice A. As simulações são então calibradas usando o consumo anual de refrigeração do edifício, carga térmica anual total e consumo mensal total.

Nessa metodologia simula-se a edificação em duas condições, apresentadas na Figura 18, (a) o modelo real (existente) e o (b) modelo de referência (considerando parâmetros do nível D, com baixa eficiência). Para o modelo de referência, considera-se um percentual de área de abertura da fachada de 40%, sem sombreamento do telhado e elementos de construção como brise-soleil, mantendo o sombreamento vizinho dos blocos que compõem a edificação.

Figura 18 – Imagem comparativa do modelo real (a) com o modelo de referência (b).



Fonte: Autora.

Os parâmetros nível D são pré-definidos nas tabelas de A.1 a A.7, do Anexo A da INI-C, conforme a tipologia da edificação. Sendo que a tabela A.8 da INI-C, deve ser aplicada às demais tipologias não listadas na Figura 19.

Figura 19 – Tipologias de edificações e sua tabela de referência correspondente.



Fonte: CB3E, 2022.

Ambos os modelos são simulados com o mesmo formato de espaço, horários de operação, densidade de ocupação e potência dos equipamentos elétricos. Por comparação, é possível classificar o bloco de acordo com sua zona bioclimática (ZB) e fator de forma (FF), tanto para a envoltória quanto para a iluminação artificial. O fator de forma é a relação entre a área do envelope e o volume do bloco. Para este estudo, as áreas da envoltória e do volume dos blocos são somadas para fazer esta classificação.

Os dois modelos simulados devem apresentar características em comum, que são: condição de contato com o solo do pavimento inferior; geometria, número de pavimentos e divisão de zonas térmicas; considerações de carga interna em cada zona térmica; área total de piso condicionada; padrão de uso e operação dos sistemas da edificação real; e *setpoint* de refrigeração e aquecimento para o sistema de condicionamento de ar.

Nos casos em que for considerada a influência de elementos presentes no entorno da edificação, eles devem ser simulados, tanto na condição real como na condição de referência de forma idêntica. Sendo que a INI-C considera o sombreamento proveniente do entorno opcional quando avaliado apenas o desempenho térmico, e obrigatório quando avaliada a iluminação natural.

Na modelagem da condição real, deve-se: aplicar todas as informações de caracterização da edificação, de acordo com o projeto arquitetônico ou *as-built*; considerar os elementos de sombreamento das aberturas; e adotar as características de ventilação natural. Na condição de referência, além de seguir as condições estipuladas em umas das tabelas do Anexo A, calcula-se somente a carga térmica de refrigeração anual total da edificação de referência (CgTR), adotando um sistema de carga ideal ("*ideal loads*"). Por fim, para se calcular o consumo da

edificação de referência, divide-se o valor da C_{gTR} pelo coeficiente de eficiência energética do sistema de condicionamento de ar para refrigeração (CEE_R) no valor de 2,6W/W.

3.2.1.4. Determinação da Classificação de Eficiência Energética de Edificações não residenciais

Os sistemas prediais são avaliados individualmente, sendo obtidos os níveis de classificação da eficiência energética da envoltória, do sistema de ar-condicionado e do sistema de iluminação e com base nesses resultados é possível obter o nível de classificação geral final da edificação.

3.2.1.5. Determinação da Classificação Individual de Eficiência Energética da Envoltória

A envoltória deve ser avaliada a partir do percentual de redução da carga térmica total anual da edificação real ($RedC_{gTT_{real}}$), em comparação com a mesma edificação em sua condição de referência ($RedC_{gTT_{ref}}$), aplicando a Equação (1).

$$RedC_{gTT} = ((C_{gTT,refD} - C_{gTTreal}) / C_{gTT,refD}) \times 100 \quad (1)$$

Onde: $RedC_{gTT}$ é o percentual de redução da carga térmica total anual da envoltória da edificação (%); $C_{gTT,refD}$ é a carga térmica total anual da edificação na sua condição de referência, classe nível D, (kWh/ano); e $C_{gTTreal}$ é a carga térmica total anual total da edificação real (kWh/ano). Essas variáveis são aplicadas à edificação completa ou para cada bloco que compõem a edificação avaliada.

A determinação da carga térmica total anual da edificação é calculada com base no seu desempenho térmico, que deve ser avaliado por meio da carga térmica total anual (C_{gTT}) da edificação na sua condição real ($C_{gTT_{real}}$), calculada a partir do somatório das cargas térmicas de refrigeração anual (kWh/ano), levando em consideração todas as zonas térmicas condicionadas artificialmente e na condição de referência ($C_{gTT_{refD}}$) da edificação (kWh/ano). Os valores dessas variáveis são obtidos pela simulação termoenergética pelo *software EnergyPlus*, aplicada na modelagem computacional da edificação feita no *software OpenStudio*.

A escala relativa à classificação de eficiência energética da envoltória baseia-se no coeficiente de redução da carga térmica total anual da classificação D para a A (CRC_{gTTD-A}), conforme a Equação (2):

$$i = \frac{(\text{CRCgTT}_{D-A} \cdot 100)}{3} \quad (2)$$

Onde: i é o valor calculado que representa o intervalo entre as classes, em %; e CRCgTT_{D-A} é o coeficiente de redução de carga térmica total anual da classificação D para a A.

O coeficiente de redução da carga térmica total anual da classificação D para a A de cada tipologia predial é obtido por meio das Tabelas 8.12 a 8.19 da INI-C, a partir do fator de forma da edificação (FF), que é a relação entre a área do envelope e o volume a edificação, e a classificação climática, definida no Anexo G, da INI-C, no qual a edificação está inserida.

3.2.1.6. Determinação da Classificação Individual de Eficiência Energética do Sistema de Ar-condicionado

A classificação de eficiência energética do sistema de condicionamento de ar baseia-se no percentual de redução de consumo para refrigeração (RedC_R), que é obtido comparando a condição real com a condição de referência, por meio da Equação 3.

$$\text{RedC}_R = ((C_{R,\text{refD}} - C_{R,\text{real}}) / C_{R,\text{refD}}) \times 100 \quad (3)$$

Onde: RedC_R é o percentual de redução do consumo de refrigeração da edificação (%); $C_{R,\text{refD}}$ é o consumo de refrigeração da edificação na sua condição de referência (nível D), para todos os blocos (kWh/ano); e $C_{R,\text{real A, B ou C}}$ é o consumo de refrigeração da edificação real, para todos os blocos (kWh/ano).

Na definição dos intervalos dos sistemas de ar-condicionado, apenas a zona bioclimática é considerada. Para a região amazônica, onde está situada a edificação de estudo de caso deste trabalho, a zona bioclimática é a 8. Os intervalos para o sistema de ar-condicionado situado na zona 8, estão apresentados na Tabela 4, adaptada da INI-C.

Tabela 4. Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética de acordo com a classificação climática aplicada para as zonas 7 e 8.

Classificação climática	RedC _R (%)				
	A	B	C	D	E
ZB 7 E 8	RedC _R > 43	43 ≥ RedC _R > 29	29 ≥ RedC _R > 14	14 ≥ RedC _R ≥ 0	RedC _R < 0

Fonte: Adaptado de (INMETRO, 2022a).

3.2.1.7. Determinação da Classificação Individual de Eficiência Energética do Sistema de iluminação

A classificação de eficiência energética do sistema de iluminação é determinada pelo percentual de redução de consumo de iluminação ($RedC_{IL}$), a partir dos valores do consumo de iluminação da edificação na sua condição real ($C_{IL,real}$), e condição de referência ($C_{IL,refD}$), conforme a Equação 4.

$$RedC_{IL} = ((C_{IL,refD} - C_{IL,real}) / C_{IL,refD}) \times 100 \quad (4)$$

Onde: $RedC_{IL}$ é o percentual de redução do consumo de iluminação da edificação (%); $C_{IL,refD}$ é o consumo de iluminação do edifício na sua condição nível D de referência (kWh/ano); e $C_{IL,real}$ é o consumo de iluminação do edifício real (kWh/ano). O valor do consumo de iluminação (C_{IL}) é obtido através de simulação computacional nas duas condições.

Com o valor da redução de consumo de iluminação da edificação é possível identificar a classe em que o sistema se encontra, ao comparar o valor de $RedC_{IL}$ na Tabela 5, formada através do valor do intervalo i , resultante da Equação (5):

$$i = ((C_{IL,refD} - C_{IL,refA}) / C_{IL,refD}) \times 100 / 3 \quad (5)$$

Onde: i é o valor calculado que representa o intervalo entre as classes, em %; $C_{IL,refD}$ é o consumo do sistema de iluminação com a classificação D (kWh/ano); $C_{IL,refA}$ é o consumo do sistema de iluminação com a classificação A (kWh/ano).

Tabela 5. Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética para o sistema de iluminação, de acordo com a INI-C.

RedC _{IL} (%)				
A	B	C	D	E
RedC _{IL} > 3i	3i ≥ RedC _{IL} > 2i	2i ≥ RedC _{IL} > i	i ≥ RedC _{IL} ≥ 0%	RedC _{IL} < 0%

Fonte: Adaptado de (INMETRO, 2022a).

Após a avaliação dos sistemas individuais, é possível obter a classificação do nível de eficiência energética e a definição geral da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) brasileira.

3.2.1.8. Determinação da Classificação Geral de Eficiência Energética da Edificação

Assim como os sistemas individuais a classificação de eficiência energética das edificações, deve ser realizada calculando-se o percentual de redução do consumo de energia primária ($RedC_{EP}$), por meio da Equação (6). Nela se compara o consumo de energia primária da edificação real $C_{EP,real}$ (calculado conforme a Equação (7)), com a edificação em sua condição de referência equivalente à classificação D (calculado conforme a Equação (8)).

$$RedCEP = (CEP,ref D - CEPreal) / CEP,refD) \times 100 \quad (6)$$

Onde: $RedC_{EP}$ é o percentual de redução do consumo de energia primária entre a edificação real e a condição de referência (%); $C_{EP,refD}$ é o consumo de energia primária da edificação em sua condição de referência (nível D) da edificação (kWh/ano); e $C_{EP,real}$ é o consumo de energia primária da edificação em sua condição real (kWh/ano).

$$C_{EP,real} = (C_{EE,real} \times fC_E) + (C_{ET,real} \times fC_T) - (G_{EE} \times fC_E) \quad (7)$$

Onde: $C_{EP,real}$ é o consumo de energia primária do edifício real (kWh/ano); $C_{EE,real}$ é o consumo total de energia elétrica do edifício real (kWh/ano); fC_E é o fator de conversão de energia elétrica em energia primária; $C_{ET,real}$ é o consumo total de energia térmica do edifício real (kWh/ano), se aplicável; $fC_T = 1,6$, é o fator de conversão de energia térmica em energia primária; G_{EE} é a energia gerada por fontes de energia renováveis locais (kWh/ano); C_{ET} e G_{EE} não são utilizados neste estudo.

Os fatores de conversão da energia elétrica (fC_E) e térmica (fC_T) são disponibilizados no site do PBE Edifica5. Já o consumo de energia primária da edificação em sua condição de referência ($C_{EP,refD}$) é definido pelo consumo estimado de energia elétrica ($C_{EE,refD}$), multiplicado pelo seu respectivo fator de conversão (fC_E), conforme a equação (8). Nessa condição não se deve considerar a parcela de energia primária referente à geração local de energia renovável.

$$CEP,refD = (CEE,refD \times fC_E) \quad (8)$$

⁵ <https://www.pbeedifica.com.br/fatoresconversaoINIs>

Onde: $CEP_{,refD}$ é o consumo de energia primária da condição de referência (nível D) do edifício (kWh/ano); $CEE_{,refD}$ é o consumo total de energia elétrica na condição de referência (nível D).

A soma dos consumos de refrigeração ($C_{R,real}$ e $_{ref}$), iluminação ($C_{IL,real}$ e $_{ref}$), aquecimento de água em energia elétrica ($C_{AAE,real}$ e $_{ref}$), e consumo de equipamentos (C_{EQ}), compõem a condição real do consumo total de energia elétrica da edificação $C_{EE,real}$, e condição de referência $C_{EE,ref}$.

$$CEE_{,real\ ou\ refD} = CR_{,real\ ou\ refD} + CIL_{,real\ ou\ refD} + CAAE_{,real\ ou\ refD} + CEQ \quad (9)$$

Onde: $CR_{,real}$ é o consumo de refrigeração do HVAC real do edifício ou $C_{R,refD}$ na condição de referência (nível D) da edificação (kWh/ano); $C_{IL,real}$ é o consumo de iluminação do sistema de iluminação real do edifício ou $C_{IL,refD}$ na condição de referência (nível D) da edificação (kWh/ano); $C_{AAE,real}$ consumo de energia elétrica do sistema de aquecimento de água do edifício real ou $C_{AAE,refD}$ na condição de referência (nível D) da edificação (kWh/ano); e C_{EQ} é o consumo dos equipamentos (kWh/ano). Como a edificação de estudo de caso não possui sistema de aquecimento de água, nesse trabalho $C_{AAE,real}$ ou $_{refD}$ é igual a zero.

Todos estes fatores são obtidos no final da simulação computacional dos usos finais de energia no arquivo HTML. O fator de conversão de energia elétrica em energia primária f_{CE} utilizado é de 1,6 (INMETRO, 2022a).

Tanto para a edificação real e sua condição de referência, o consumo de equipamentos é dado pela multiplicação entre a potência instalada de equipamento e o tempo de uso da edificação, conforme a Equação 10:

$$C_{EQ} = (P_{i,h} \times N_{ano}) / 1000 \quad (10)$$

Onde: C_{EQ} é o consumo de energia elétrica de equipamentos (kWh/ano); P_i é a potência instalada do equipamento (W); h são as horas de uso da edificação, conforme tipologia das Tabelas do Anexo A; e N_{ano} são os dias de ocupação ao ano, conforme tipologia da Tabela A1 do Apêndice A.

O fator de forma da edificação (Equação 11) e a classificação climática da localização da edificação (verificar lista no Anexo G da INI-C), são as variáveis que determinam os intervalos

entre uma classificação e outra, de A a E que definem a escala de eficiência energética, e classificação geral da edificação. Para isso, deve ser obtido o coeficiente de redução do consumo de energia primária da classificação D para A (CRC_{EPD-A}).

$$FF = A_{env} / V_{tot} \quad (11)$$

Onde: FF é o fator de forma da edificação (m^2/m^3); A_{env} é a área da envoltória (m^2); e V_{tot} é o volume total construído da edificação (m^3).

O coeficiente de redução do consumo de energia primária da classificação D para a classificação A (CRC_{EPD-A}) varia, ainda, de acordo com a tipologia da edificação descrita pelas Tabelas do Anexo A, para os valores estabelecidos nas Tabelas 8.3 a 8.10 da instrução normativa. Os intervalos de classificação com base no percentual de redução do consumo de energia primária são definidos a partir de uma variável “i”, determinada por meio da Equação 12.

$$i = (CRC_{EPD-A} \times 100) / 3 \quad (12)$$

Onde: i é o valor calculado representando o intervalo entre as classes (%); CRC_{EPD-A} é o coeficiente de redução do consumo de energia primária da classificação D para a A, e CRC_{gTTD-A} é o coeficiente de redução de carga térmica total anual da classificação D para a A (INMETRO, 2022a). A partir do valor calculado de i , deve-se preencher a Tabela 6, adaptada da INI-C.

O intervalo dentro do qual a edificação proposta será classificada “i” deve ser dividido em 3 partes, onde cada uma delas se refere a um dos intervalos de classificação da escala de nível de eficiência energética de A até D. Caso a edificação real apresente carga térmica total anual superior à condição de referência (nível D), sua classificação final será E (INMETRO, 2022a).

Tabela 6. Limites de Intervalo para Classificação Geral de Eficiência Energética da Edificação, de acordo com a INI-C.

Classificação de Eficiência Energética	Red C_{EP} ponderado (%)				
	A	B	C	D	E
	RedCEP > 3i	3i ≥ RedCEP > 2i	2i ≥ RedCEP > i	i ≥ RedCEP > 0	RedCEP < 0

Fonte: (INMETRO, 2022a).

O coeficiente de redução do consumo de energia primária da classificação D para a classificação A (CRC_{EPDA}) é estabelecido de acordo com a tipologia da edificação (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) descrita pelas Tabelas 8.3 a 8.10 do Anexo A da INI-C.

O regulamento segue o processo de classificação comparando o consumo e a produção de eletricidade para atingir a meta NZEB. Devido à existência de uma central fotovoltaica na edificação do estudo de caso, não pertencente a um único bloco, mas sim ao edifício como um todo, foi necessário somar e ponderar os consumos e Red_{CEP} dos blocos para obter um resultado de classificação e consumo final total do edifício de forma unificada.

A ponderação foi realizada através da razão entre o produto Red_{CEP} e o C_{EP} de cada bloco e a soma dos C_{EP} de cada bloco (A, B e C), resultando em (Red_{CEP} ponderado). Também foi necessário somar as áreas e volumes dos envelopes para obter o FF unificado. A seguir está a Equação (13) para ponderação do consumo de energia primária do edifício:

$$Red_{CEP}ponderado = (\sum Red_{CEPn} \times C_{EPn}) / \sum C_{EPn} \quad (13)$$

Onde: $Red_{CEP}ponderado$ é a redução ponderada do consumo de energia primária (kWh/ano), $\sum Red_{CEPn}$ é a soma da redução do consumo de energia primária de um bloco n (kWh/ano), e $\sum C_{EPn}$ é a soma do consumo de energia primária de um bloco n (kWh/ano).

Após a obtenção do valor ponderado da redução do consumo de energia primária ($Red_{CEP}ponderado$), a classificação final de eficiência energética é obtida a partir da Tabela 6. Este valor é comparado com os intervalos calculados para identificar a classificação final de eficiência energética geral.

3.2.1.9. Determinação da Classificação de Autossuficiência Energética de Edificações

Em seguida é realizado o balanço energético do edifício, onde é possível avaliar a contribuição dos sistemas locais de geração de energia renovável gerada no local. Segundo a INI-C, o nível desta contribuição pode classificar o edifício como de energia quase nula (NZEB) ou de energia positiva (PEB) através do potencial de geração de energia (PG) pela utilização de fontes de energia renováveis locais, que é obtido usando a Equação (14).

$$PG = (GEE \times f_{CE} \times 100) / (CEE_{real} \cdot f_{CE}) + (CET_{real} \cdot f_{CT}) \quad (14)$$

Onde: PG é o potencial de geração de energia (%); GEE é a energia gerada por fontes de energia renováveis locais (kWh/ano); CEE,real é o consumo total de energia elétrica da unidade consumidora (UC) em estado real (kWh/ano); CET,real é o consumo total de energia térmica da UC em estado real (kWh/ano); $f_{CE} = 1,6$, é o fator de conversão de energia elétrica em energia primária, que será considerado; f_{CT} é o fator de conversão de energia térmica em energia primária, que será considerado 1,1. Ambos os fatores de conversão podem ser obtidos na Tabela 8.1 da INI-C.

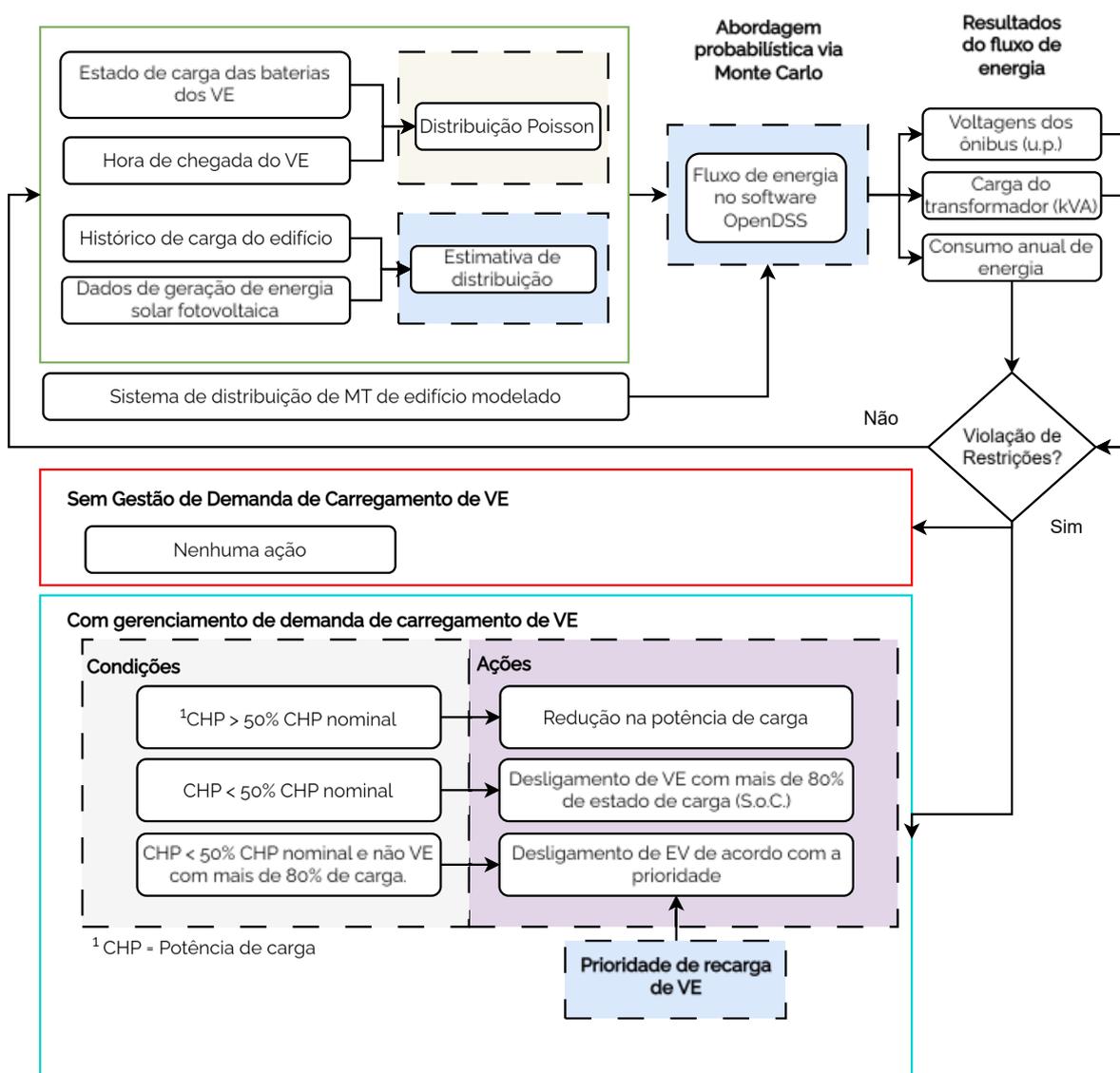
O PG pode determinar se um edifício é NZEB ou PEB. Segundo (INMETRO, 2022a), se o PG fosse maior ou igual a 50%, mas menor ou igual a 100%, o edifício poderia ser considerado NZEB. Pode ser classificado como PEB se for superior a 100%.

3.2.2. Etapa 2: Metodologia de Previsibilidade da Integração do Sistema de Abastecimento de Carros Elétricos em Edificações

Na etapa 2 são utilizados dados reais de consumo de energia da edificação, do sistema de recarga de veículos e da geração fotovoltaica (FV), conforme banco de dados da plataforma Sistema de Gestão do Consumo de Energia Elétrica (SISGEE) elaborado pela equipe do Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia da Universidade Federal do Pará – CEAMAZON-UFPa (Dos Santos Junior *et al.*, 2024; Tabora *et al.*, 2023).

Para prever a integração do carregamento de carros elétricos em edifícios, a metodologia deste estudo estima o tempo de chegada e a percentagem de carga do veículo elétrico (VE) utilizando modelos probabilísticos como modelos de distribuição de Poisson (Abdelsamad; Morsi; Sidhu, 2015). Dada a carga adicional no edifício devido ao carregamento de VE, a solução proposta neste trabalho inclui estratégias de gestão do lado da demanda (DMS, do inglês *demand side management*) para evitar que o carregamento de VE afete o desempenho do edifício, conforme mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Fluxograma metodológico para previsibilidade de integração de VE no edifício.



Fonte: Autora.

Foi utilizado o *peak shaving*, que considera a redução e/ou corte de parte das cargas nos horários de pico do dia. Isto está associado a uma demanda máxima, considerando que o utilizador contratou uma tarifa de energia com custo por kW. Visando a implementação de veículos elétricos em edificações, a carga à qual foi aplicado o DSM foi a dos veículos elétricos, para evitar que o consumo anual da edificação, devido à sua recarga de VE, exceda a geração fotovoltaica do edifício e, portanto, manter a classificação NZEB do edifício.

A infraestrutura de carregamento de veículos elétricos considerada nesta pesquisa é composta por quatro (4) carregadores lentos de 7,6 kVA e três (3) carregadores semirrápidos de 22 kVA. O algoritmo desenvolvido para simular o consumo de energia elétrica dos VEs, feito no *software* OpenDSS, considera esta informação.

3.2.3. Técnicas de resposta do lado da demanda e explicação do algoritmo

As técnicas de resposta do lado da demanda usadas neste estudo são essenciais para gerenciar o consumo de energia e manter a classificação de eficiência energética do edifício, apesar da integração de veículos elétricos (VEs). As técnicas incluem modelos probabilísticos e simulações de Monte Carlo implementadas em *Python*, usando o *software* OpenDSS para avaliar cenários de fluxo de energia.

3.2.4. Modelos probabilísticos e simulação de Monte Carlo

Monte Carlo é uma técnica particularmente relevante no contexto do carregamento de veículos elétricos para tratar de problemas com altos níveis de incerteza e restrições. Este estudo usa modelos probabilísticos para estimar a variabilidade na demanda de carregamento de VEs. Conforme apresentado anteriormente, a distribuição de Poisson é usada para modelar o número de chegada de VEs e seu estado de carga (SOC, do inglês *State of Charge*) nas estações de carregamento.

A distribuição é feita em cada etapa da simulação do OpenDSS a cada dez minutos, usando um número aleatório, com base em uma distribuição padrão de VEs que chegam à estação de carregamento para serem carregados. Além disso, o estado de carga da bateria também é um número aleatório, com base em uma distribuição normal. O método Monte Carlo é usado para simular o comportamento de carregamento de VEs, o que ajuda a entender o impacto da integração de VEs no consumo de energia e na classificação de eficiência do edifício.

3.2.5. Fundamentação Matemática

A taxa média de chegada de VE por um determinado tempo é representada por λ , cujo valor nesse estudo é de 10 min. A distribuição de Poisson dá a probabilidade de k VEs chegarem a cada 10 minutos. O número de VEs que chegam aos pontos de carregamento e a carga da bateria dos VEs à chegada são modelados como uma distribuição normal com média μ e desvio padrão σ , conforme apresentado na Equação (15):

$$X = \mu + \sigma Z \quad (15)$$

Onde: Z é um número aleatório retirado da distribuição normal padrão; portanto, X é um número aleatório da distribuição normal com média μ e desvio padrão σ .

Para o número de VEs que chegarão, é usada uma média de 1 e um desvio padrão de 1, enquanto para a carga da bateria do VE, é usada uma média de 20 e um desvio padrão de 5. É

importante observar que a simulação não funciona com valores fracionários, pois são necessários valores inteiros para o número de VEs, portanto, antes de prosseguir com a simulação, o número absoluto do valor de X é obtido diretamente.

3.2.6. Estratégia de Gerenciamento do Lado da Demanda (DMS)

A análise dos cenários pretende inferir o quanto a implementação de carregamento de veículos pode comprometer a classificação de edificações energeticamente eficientes, principalmente NZEB (Near Zero Energy Building) e EEP (Edificações de Energia Positiva). Portanto serão considerados dois cenários para gerir o aumento da carga devido ao carregamento dos VE:

- **Cenário 1:** Carregamento sem restrições

Os VEs podem carregar até sua capacidade máxima sem restrições. Isso leva a aumentos significativos no consumo de energia dos edifícios. Isso significa que, durante a simulação, o número de VEs permanece um número aleatório com base em uma distribuição normal, e a quantidade de carga da bateria também é recebida como um número aleatório com base em uma distribuição normal. Portanto, os VEs são inseridos na rede para começar a carregar suas baterias até o máximo. Assim, esse cenário visa demonstrar o caso em que os VEs são carregados sem nenhuma restrição em sua potência de carregamento e sem restrição na energia que consomem do edifício.

- **Cenário 2:** Gerenciamento de recarga

O carregamento é otimizado pela redução da energia consumida por cada VE e pelo desligamento dos VEs com uma porcentagem de carga superior a 80%, se necessário. Essa estratégia limita a potência de carregamento evitando picos de consumo e garante que o consumo total de energia permaneça dentro de limites aceitáveis, atenuando o impacto na classificação de eficiência energética do edifício. Isso significa que, durante a simulação, o número de VEs permanece um número aleatório com base em uma distribuição normal, e a quantidade de carga da bateria também é recebida em um número aleatório com base em uma distribuição normal.

No entanto, os VEs podem ter sua potência de carga reduzida para evitar picos de consumo em um determinado momento. Isso é feito se o transformador estiver próximo de sua capacidade máxima; ou seja, o algoritmo funciona reduzindo a potência dos VEs para que não haja

sobrecargas no transformador do edifício. Além disso, a energia consumida pelos VEs afeta diretamente a classificação de eficiência energética do edifício. Por isso, há também uma limitação na energia consumida, de modo que o algoritmo pode desligar o carregamento de um VE para que ele não possa mais carregar naquele dia, buscando limitar esse consumo de energia dos VEs.

3.2.7. Implementações com uso de *Python*

O *script Python* se conecta ao *software* OpenDSS para realizar análises detalhadas do fluxo de potência em um sistema elétrico. O processo começa com o estabelecimento de uma conexão com o OpenDSS, seguido do início da simulação em intervalos de dez minutos. Na sequência, através de comandos de repetições, aplica-se o método de Monte Carlo. Inicialmente, o método escolhe um número aleatoriamente, seguindo uma distribuição normal, para determinar o número de carros que chegam para carregar. Depois, outro número é selecionado de forma semelhante para estimar o nível de carga da bateria dos carros. Com esses dados, a etapa de simulação é realizada.

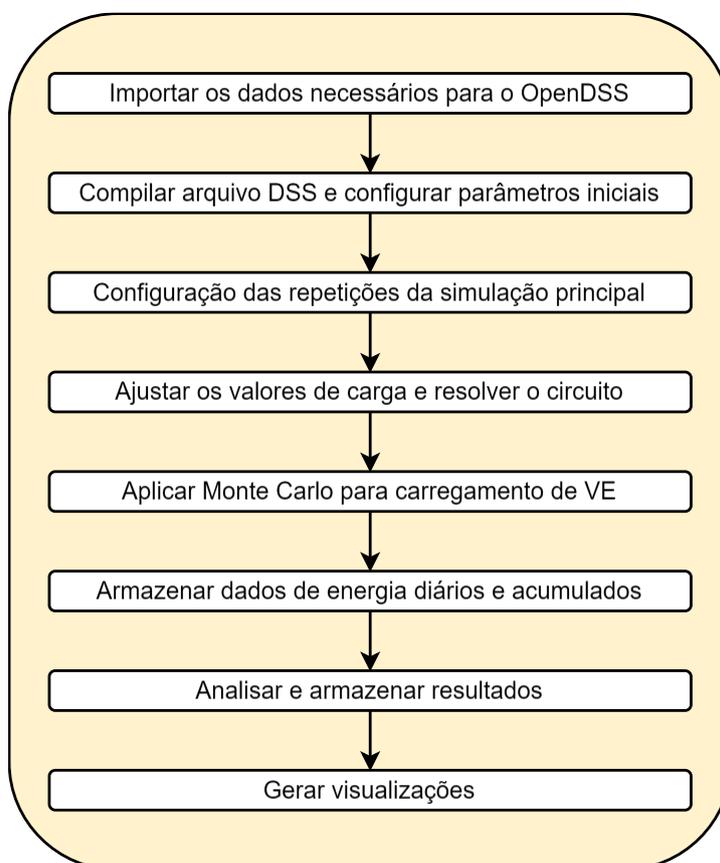
O algoritmo coleta informações como tensão, potência e energia de todos os pontos da rede elétrica. Esses dados são usados para avaliar o desempenho da rede. O sistema de gestão verifica se o transformador está sobrecarregado ou se há subtensões, calcula a energia do equipamento e analisa a classificação do edifício. Se forem detectadas sobrecargas ou subtensões, o algoritmo ajusta a potência de carregamento dos veículos elétricos (VEs). Se a potência de carregamento já tiver sido reduzida para 50% do nível nominal e os problemas persistirem, o algoritmo para de carregar o VE com a carga de bateria mais elevada, mantendo os restantes VEs a carregar a 50% da potência nominal.

Por fim, os dados de energia, potência e tensão são processados para obter informações detalhadas sobre os cenários simulados. O fluxograma mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** representa de forma concisa o fluxo de trabalho da estrutura de simulação usando o OpenDSS. O procedimento começa com a importação dos dados necessários e o estabelecimento de uma conexão com o OpenDSS, depois com a preparação do arquivo DSS e a inicialização dos parâmetros de simulação.

A principal função de repetição envolve o ajuste das condições de carga, a solução do circuito, a aplicação do método Monte Carlo para a simulação de carregamento de VEs e o registro dos dados de energia. Após a simulação, a estrutura analisa e armazena os resultados, que são visualizados para uma interpretação abrangente dos dados. Essa figura ilustra de forma

sucinta as etapas metodológicas da estrutura, garantindo uma análise robusta dos impactos dos VEs nas redes de distribuição de energia.

Figura 21 - Fluxograma metodológico das simulações OpenDSS e Monte Carlo.



Fonte: Autora.

A análise dos cenários visa inferir até que ponto a implementação do carregamento dos veículos poderá comprometer a classificação dos edifícios energeticamente eficientes, especialmente os NZEB (edifícios com energia próxima de zero) e os EEP (edifícios com energia positiva). Por fim, é fundamental ressaltar que a potência total do transformador é outra variável inicialmente pensada. Porém, devido à geração fotovoltaica, nenhuma violação deste parâmetro foi encontrada em múltiplas simulações, portanto não é discutido nos resultados.

3.2.8. Etapa 3: Metodologia de Avaliação de Eficiência e Autossuficiência Energética de Edificações não residenciais, considerando o sistema de abastecimento de VE

Nesta etapa, a metodologia de cálculo estipula um valor de referência para o consumo de energia de uma edificação. Isto ajuda o gestor do edifício a verificar se a classe de eficiência energética, obtida através de boas práticas na fase de projeto ou remodelação do sistema, é afetada pelo aumento do consumo resultante da integração de veículos elétricos.

Para isso, é necessário incluir o consumo de VE na metodologia de cálculo da certificação do INMETRO. Atualmente, a metodologia considera apenas o consumo de equipamentos elétricos, iluminação, ar-condicionado e aquecimento de água, se houver, conforme Equação (1), o que resulta na ponderação apresentada em (14), ambas já fornecidas. Nesta etapa, propõe-se que a carga do veículo seja incluída como fator/coeficiente na Equação (13), uma vez que está ligada ao edifício como um todo e não a um único bloco. Isso resulta na Equação (16):

$$\text{RedCEPponderado} = \frac{\sum \text{RedCEPn} \times \text{CEPn}}{\sum \text{CEPn}} + (\text{CVE} \times f_{\text{CE}}) \quad (16)$$

Onde: CVE é o consumo do veículo elétrico (kWh/ano).

Após a obtenção do valor da redução ponderada do consumo de energia primária (RedCEPponderado), a classificação final de eficiência energética é obtida a partir da Tabela 6. Este valor é comparado com os intervalos calculados para identificar a classificação final de eficiência energética geral. Por fim, com o valor ponderado é realizado o balanço energético do edifício, onde é possível avaliar a contribuição dos sistemas locais de geração de energia renovável.

3.2.9. Etapa 4: Metodologia de Proposição de Medidas de Eficiência Energética para *Retrofit* de Sistemas Construtivos

Após a verificação da classificação de eficiência, autossuficiência e do impacto da integração do sistema de abastecimento de VE na edificação, são apresentadas propostas de melhorias nos sistemas prediais que apresentem nível de classificação energética inferior a A ou que, mesmo sendo de nível A, tenham potencial de melhoria.

As medidas de eficiência energética propostas para o sistema de iluminação são: redistribuição dos acionamentos de iluminação, visando uma maior integração com a iluminação natural ao permitir que o usuário possa desligar a luz artificial da fileira de luminárias paralelas às esquadrias durante o dia; substituição de lâmpadas e luminárias menos eficientes por outras mais eficientes; e automação predial, como a adoção de sensores de presença em ambientes de baixa permanência, como banheiros e circulação, para desligamento automático do sistema, na ausência de usuários.

Para este estudo, os pré-requisitos serão considerados atendidos. O fluxo luminoso das luminárias também foi observado para que o conforto visual esteja de acordo com as determinações da NBR ISO/CIE 8995-1. Iluminação de ambientes de trabalho. Parte 1: Interior (ABNT, 2013). A seleção de lâmpadas adequadas é baseada na iluminância média mínima,

limite de ofuscamento e no índice mínimo de reprodução de cores indicados pelo mesmo padrão.

Além disso, a instrução normativa INI-C do INMETRO inclui fatores de ajuste para potência de iluminação instalada. Eles podem ser usados para estimar a redução de consumo causada pela adoção da automação predial, como no caso do uso de sensores de ocupação com desligamento automático, que tornam a iluminação eficiente, resultando em redução de 20% na potência instalada nesses ambientes (INMETRO, 2022a).

Para o sistema de refrigeração, propõe-se a troca de condicionadores de ar caso o nível A não seja atingido, considerando os parâmetros atuais da INI-C (INMETRO, 2022a). Esta condição de elegibilidade para a classificação A varia de sistema para sistema, dependendo, por exemplo, da tecnologia a ser adotada. Para sistemas *split*, a condição é IDRS (*Seasonal Cooling Performance Index*) mínimo de 5,50, conforme Tabela 7.1 da instrução normativa (INMETRO, 2022a). Diferentes pré-requisitos precisam ser atendidos para esta tecnologia. Para estes também é necessário observar a espessura mínima do isolamento térmico das tubulações; entretanto, para este estudo, esses pré-requisitos serão considerados atendidos.

Para finalizar esta etapa, aplica-se novamente a metodologia de simulação computacional da INI-C apresentada na etapa 1 deste trabalho, onde o edifício será reavaliado para averiguar a nova classificação do nível de eficiência e autossuficiência energética alcançada com as ações de retrofit propostas para a eficiência do edifício.

3.2.10. Etapa 5: Indicador de consumo de energia elétrica para nível de eficiência energética A

Na quinta etapa, é estabelecida a metodologia para estimar o valor máximo de consumo de energia elétrica em kWh/ano para que o edifício não seja penalizado na sua classificação de eficiência energética. A seguinte dedução matemática (Equação 17) define o valor máximo de consumo de um veículo para este fim:

$$\begin{aligned} LA_{,inf} &\leq (\sum RedCEP_n \times CEP_n) / \sum CEP_n + (CE \times f_{CE}) \\ (CE \times f_{CE}) &\leq [(\sum RedCEP_n \times CEP_n) - LA_{,inf} \times \sum CEP_n] / LA_{,inf} \\ CE &\leq [(\sum RedCEP_n \times CEP_n) / LA_{,inf} \times f_{CE}] - (\sum CEP_n / f_{CE}) \end{aligned} \quad (17)$$

Onde: $LA_{,inf}$ é o limite inferior da classificação A para energia primária, e CE é o consumo anual de eletricidade em kWh/ano.

Esta formulação foi escolhida unindo o consumo dos veículos elétricos e a equação final de classificação de energia primária. A instrução normativa INI-C determina que os

equipamentos elétricos precisam ser incluídos no consumo dos blocos; porém, como os blocos fazem parte de um único edifício, isso não é viável (INMETRO, 2022a).

O consumo de VE precisa então ser inserido no edifício como um todo, o que pode ser conseguido na etapa de ponderação adicionando este fator como uma soma ao denominador de (14). Desta forma, a introdução de cargas externas no edifício pode ser simplificada e replicada noutros casos. O consumo de eletricidade (CE) também precisa estar na mesma classe variável dos demais, portanto um consumo de VE precisa ser multiplicado pelo fator de conversão de energia elétrica f_{CE} , que agora pode ser considerado como o consumo de energia primária do VE.

A equação é então resolvida para encontrar o valor máximo permitido de CE. O desmembramento da energia VE primária pela CE foi escolhido por ser uma variável mais simples de entender. É mais fácil compreender o consumo elétrico anual variável do que o consumo anual de energia primária de um veículo elétrico, o que também facilita a aplicação desta formulação noutros casos.

3.2.11. Etapa 6: Metodologia de Previsibilidade de Incremento da Integração do Sistema de Abastecimento de VE em Edificações

Conforme apresentado na Etapa 2, o atual sistema de gestão de energia do sistema de carregamento de veículos elétricos considera algumas premissas de restrição de consumo, como limite de potência e percentual de carga quando o nível de abastecimento atinge 80% da bateria do VE.

Após a determinação do consumo máximo de energia, permitido evitar a desclassificação do nível A do edifício, estabelecido pela metodologia do passo 3, é possível utilizá-lo como nova condição para carregamento de VE. Para tal, o valor limite máximo de consumo da classe A é dividido por 365 dias para se ter uma referência diária de energia disponível, não utilizada pelas cargas do edifício, mas que poderá ser utilizada para recarga de VE. Desta forma, se num determinado dia houver recargas de VE que ultrapassem o limite energético diário em kWh $LimE$, no dia seguinte o algoritmo reduzirá a potência de carregamento para tentar compensar o excesso de consumo.

O algoritmo faz isso calculando a taxa de variação; quanto maior for o consumo ultrapassado, maior será a taxa de variação e, conseqüentemente, mais potência terá de ser reduzida nas próximas recargas para que, no final do ano, a energia total consumida pelos VEs esteja dentro do limite máximo, segundo a Equação (18).

$$\Delta E = E1 - E0 \quad (18)$$

Onde: ΔE é a variação energética (kWh/dia); $E1$ é o consumo de energia acumulada dos VE pelos veículos elétricos (kWh/dia); $E0$ é a energia de referência diária para veículos elétricos (kWh/dia), conforme a Equação (19).

$$E0 = 197,26 \times \text{número de dias acumulados} \quad (19)$$

Com esta alteração, além de gerir a recarga a partir da redução da potência de recarga e da interrupção do carregamento, foi criada outra condição, que avalia a taxa de variação do consumo diário utilizado *versus* a energia diária disponível com base na energia anual permitida para a recarga de VEs. Quando a taxa de variação é positiva, o algoritmo deve agir porque o consumo de energia consumida pelos VEs excede o consumo planejado. A taxa de agressividade é a razão entre a quantidade de energia ultrapassada e consumida, conforme a Equação (20).

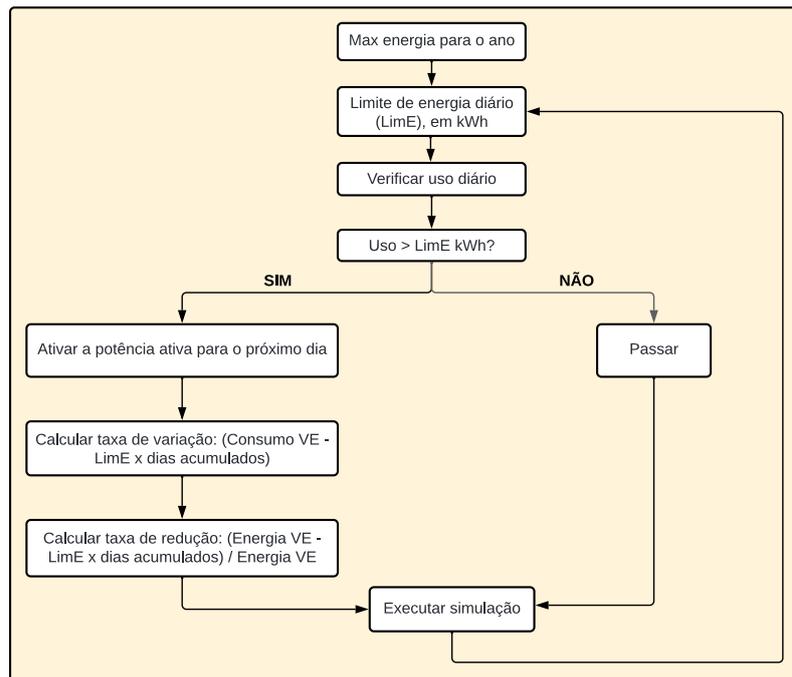
$$Tx = 1 - (W - \text{LimE} \times n/W) \quad (20)$$

Onde: Tx é a alíquota de redução, aplicada no dia seguinte (derivativo); W é a energia consumida pelos veículos elétricos (kWh/ano); e LimE é o limite energético diário em kWh.

A taxa de agressividade é a relação entre a quantidade de energia excedida e a quantidade de energia consumida. Quanto maior for este valor, mais energia terá de ser reduzida no carregamento seguinte para reduzir o consumo de energia dos VEs. O algoritmo desenvolvido para simular o consumo de energia elétrica dos VEs, feito no *software* OpenDSS, considera o valor por dia.

Portanto, caso este valor seja ultrapassado, a administração considerará a diferença de ultrapassagem para reduzir a potência no dia seguinte para que a potência seja reduzida/ajustada para não ultrapassar o valor anual. Assim, a derivada condiciona a agressividade do algoritmo de gerenciamento em reduzir o poder a percentuais maiores para atender à condição mencionada, conforme as Equações (19) e (20). Todo esse processo pode ser resumido com o seguinte fluxograma mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Fluxograma metodológico das simulações OpenDSS e Monte Carlo.



Fonte: Autora.

Portanto, aplicando esta condição, é possível aumentar a oferta de veículos elétricos no edifício sem que este aumento afete o desempenho energético do edifício avaliado.

4. ESTUDO DE CASO

4.1. Considerações Iniciais

O edifício estudado (Figura 23) é o Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON), localizado dentro da Universidade Federal do Pará (UFPA), no Parque Científico e Tecnológico do Guamá, Avenida Perimetral 2.651, latitude $-1,46667$ e longitude $-48,44575$, prédio 01, bairro do Guamá, na cidade de Belém, no Estado do Pará, Brasil.

Figura 23 - Foto em perspectiva do edifício CEAMAZON.



Fonte: Autora.

4.1.1. Descrição da edificação

O CEAMAZON é um edifício de 3 andares com 2.395,43 m² de área total construída e 1.697,3 m² de área útil, dividido em três pavimentos (Figura B1, Anexo B). O Bloco A possui três pavimentos, com área total de 564,48m² e formato em “L”. O Bloco B também possui três pavimentos, área total de 951,37m² e planta retangular. O Bloco C tem formato de leque e área total de 181,45m². Os blocos B e C, embora separados por um bloco de ligação (passarela), estão organizados segundo a tipologia “L”, cuja orientação privilegia a ventilação cruzada e a iluminação natural.

O centro de pesquisas funciona de segunda a sexta-feira, das 8h às 18h. O prédio comporta 75 pessoas: 08 professores, 07 técnicos administrativos e aproximadamente 60 alunos de graduação, mestrado e doutorado que trabalham com pesquisa nos 07 laboratórios que compõem o Centro.

4.1.2. Caracterização dos Sistemas prediais

4.1.2.1. Sistema construtivo – envoltória

Os sistemas de envoltória dos três blocos pertencentes ao CEAMAZON são semelhantes. Não existe isolamento térmico em nenhum dos pisos e paredes, que são constituídos de

alvenaria com argamassa interna e externa de 15, 16, 20, 25 e 32 centímetros, sendo a parede de 15cm a mais comum na edificação. As lajes são compostas por dois tipos: lajes maciças de 10cm de espessura, com forro de gesso; e lajes nervuradas com preenchimento em placas de EPS e forro de gesso.

Os dois tipos de piso possuem geralmente acabamento em revestimento cerâmico de 1,5cm sobre contrapiso. O Bloco C, por se tratar de auditório, possui piso acarpetado sobre laje maciça de concreto de 10 cm de espessura e teto de vermiculita sob cobertura metálica sanduíche com enchimento de poliisocianato (HDI) de 4 cm. Uma lista de materiais, agendas e outras informações relevantes sobre a envoltória podem ser encontradas na Tabela A1 do Apêndice A.

4.1.2.2. Sistemas de Iluminação e Ar-Condicionado

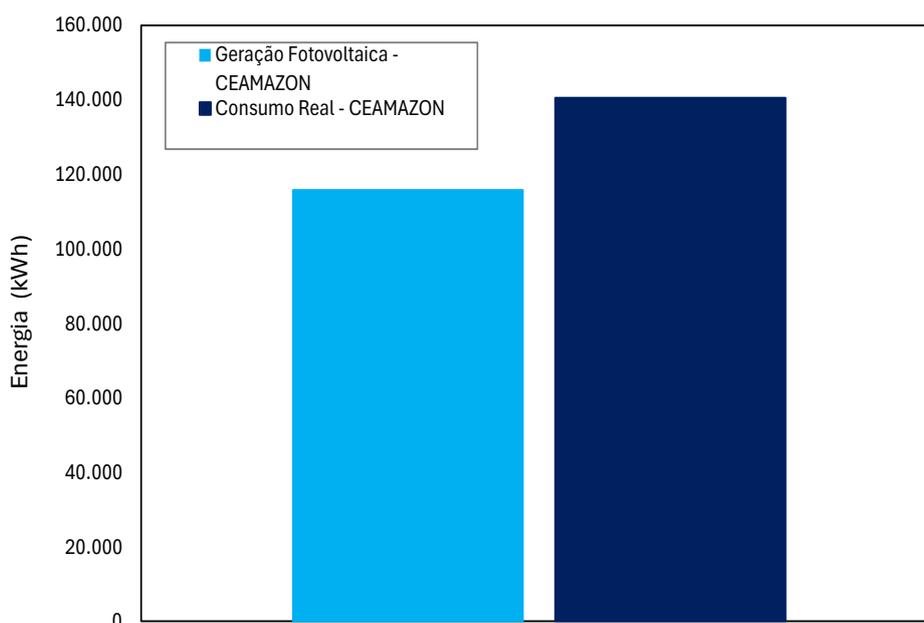
O sistema de iluminação do prédio é composto por 276 lâmpadas, totalizando 16.612W de potência instalada em uma área iluminada de 1.709,29 m². As lâmpadas variam entre 18, 20 e 40W, com tecnologias LED e fluorescentes. O fluxo luminoso dessas lâmpadas também varia entre 900, 1.067, 1.100 e 2.350 lúmens (lm). Todas as lâmpadas serão consideradas totalmente funcionais para este estudo. Esses dados caracterizam o edifício como tendo uma densidade de potência instalada (DPI) de 9,72 W/m², utilizado nas simulações como valor real.

O sistema de ar-condicionado é composto por 35 aparelhos de tecnologia *split*, com potências variando entre 3.516,85, 5.275,28, 6.447,56, 7.033,71, 10.550,56 e 16.998,12, totalizando 262.591,68W de potência instalada. O *setpoint* de simulação de refrigeração utilizado foi 24 °C.

4.1.2.3. Sistema de Monitoramento Energético (curva de carga e histórico de consumo)

O edifício dispõe de medidores de energia instalados, que permitem a definição de curvas de carga de consumo do edifício em tempo real, 24 horas por dia, de acordo com o banco de dados da plataforma Sistema de Gestão do Consumo de Energia Elétrica (SISGEE) elaborado pela equipe do CEAMAZON-UFPA. O histórico de consumo do prédio, que funciona das 8h às 18h durante todo o período letivo (174 dias) e férias universitárias, foi estimado com base nos dados de medição. A partir desses dados foi efetuada a simulação no *EnergyPlus*, que constatou que o edifício tem um consumo total anual de 140.567,88 kWh/ano (Figura 24 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Figura 24 – Consumo e geração anual de energia elétrica do CEAMAZON, em 2022.



Fonte: SISGEE/UFPA, 2024.

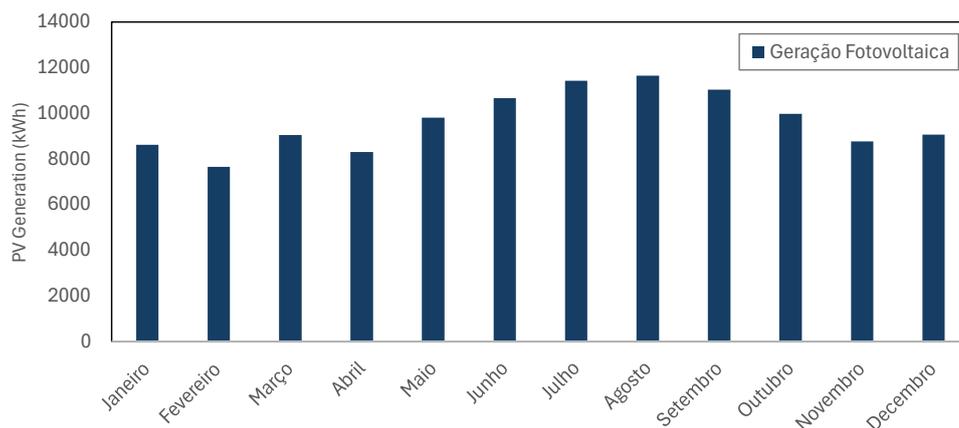
Segundo a base de dados do SISGEE, em uma análise mensal, os meses com maior consumo de energia são maio, junho e setembro.

4.1.2.4. Sistema de Geração de Energia Renovável (Fotovoltaico)

O CEAMAZON, dispõe no seu terreno de um sistema fotovoltaico, composto por três sistemas, nomeados de SFV-CEAMAZON 01, SFV-CEAMAZON 02 e SFV-CEAMAZON 03, totalizando 80 kWp, com módulos fotovoltaicos de 234 e 335 Wp, em funcionamento ininterrupto desde janeiro de 2021. O SFV-CEAMAZON 01 é o maior dos três, com capacidade nominal de 58 kWp.

O SFV-CEAMAZON 01 é a representação de um sistema *on grid* tradicional, ou seja, para que o sistema funcione é necessário que a rede de distribuição interna a UFPA esteja funcionando corretamente, do contrário, por uma questão de segurança, o sistema se desconectará automaticamente. Este sistema possui um inversor SMA *Tripower Core1* de 50 kW. Em 2022, referência para este estudo, o sistema obteve uma geração total anual de energia renovável de 115.854 kW, conforme a Figura 23.

Figura 25. Geração mensal de energia solar fotovoltaica do CEAMAZON em 2022 (kWh).



Fonte: SIS-GEE/UFPA, 2024.

Após análise do gráfico da Figura 25, a geração fotovoltaica do edifício apresenta média mensal de 9.654,47 kWh. Ao verificar a sazonalidade do sistema é possível verificar que os meses com maior geração de energia são junho, julho, agosto e setembro.

É fundamental ressaltar que o CEAMAZON está localizado na região Amazônica, o que apresenta vantagens significativas em relação à geração fotovoltaica, primeiro pela disponibilidade solar na região, que não varia significativamente por ser um clima equatorial, e porque na maioria dos dias do ano chove no final da tarde, o que proporciona uma limpeza natural das células solares e, assim, faz com que a geração solar não seja afetada por fatores externos, como sujeira. Porém, programar programas de limpeza para maximizar o desperdício no fundo é sempre necessário devido à inclinação.

4.1.2.5. Sistema de Abastecimento de veículos elétricos

O edifício dispõe de 26 lugares de estacionamento, mas nem todos dispõem de postos de carregamento elétrico. A infraestrutura de abastecimento de veículos elétricos é composta por quatro (04) carregadores lentos de 7,6kVA e três (03) carregadores semirrápidos de 22kVA. Esses números foram determinados pela disponibilidade do transformador, que possui 150 kVA de potência. Desta capacidade, 50 kVA estão sendo utilizados pelas cargas dos sistemas prediais, restando 75 kVA para abastecimento dos veículos elétricos, sem considerar a utilização dos 25% (25 kVA) reservados para possíveis ampliações no consumo do edifício.

Foram definidas algumas premissas para gerenciamento do sistema, como o limite de potência e tensão do transformador do prédio. A estratégia de gestão visa otimizar o carregamento dos veículos elétricos sem violar as restrições da metodologia da etapa 4, descritas na seção 3.6.

5. RESULTADO E DISCUSSÃO

5.1. Considerações Iniciais

O CEAMAZON é um edifício público federal, que deverá ser avaliado pela Instrução Normativa para Classificação de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (INI-C) do INMETRO caso venha a sofrer reforma, conforme a Instrução Normativa MPOG/SLTI N° 02 de 4 de junho de 2014, publicada no Diário Oficial da União (DOU) (“Instrução Normativa nº 2, de 04 de junho de 2014”, [s.d.]).

O edifício possui uma parte arquitetônica complexa, onde a arquitetura de sua envoltória apresenta volumetria variada e elementos construtivos de sombreamento solar que variam em cada fachada, composta por blocos interligados (Figura A1, Anexo A). Devido a essas características, optou-se pela metodologia de simulação termoenergética para avaliar o nível de eficiência da edificação. Esta metodologia avaliou a envoltória, o sistema de iluminação e a climatização do edifício em estudo.

Os resultados de cada sistema avaliado são apresentados a seguir. Todos os valores das variáveis geradas pela simulação computacional para cada bloco, em sua condição real e de referência com integração de veículos elétricos VE, são apresentados na Tabela B1 Apêndice B. Esses dados individuais foram utilizados nas ponderações para obtenção dos valores gerais do edifício completo.

5.2. Resultados da Classificação do Nível de Eficiência Energética do CEAMAZON

5.2.1. Classificação de Eficiência Energética da Envoltória do CEAMAZON

O edifício possui 2.646,54 m² de área envolvente e volume total de 5.320,55 m³, correspondendo a um fator de forma (FF) de 0,50. Com base na Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicos (INI-C), para a zona bioclimática 8, o fator de forma 0,50 corresponde a um Coeficiente de Redução do Consumo de Energia Primária da classificação D para a classificação A (CRCEPD-A) de 0,27. A partir deste valor foi obtido o intervalo de classificação (i) igual a 3,33, conforme Equação (2). Esse intervalo (i) resultou na Tabela 7:

Tabela 7. Limites das faixas de classificações de eficiência energética do envelope CEAMAZON existente.

RedCgTT (%)				
A	B	C	D	E
RedCgTT > 10%	10% ≥ RedCgTT > 6,67%	6,67% ≥ RedCgTT > 3,33%	3,33% ≥ RedCgTT ≥ 0%	RedCgTT < 0%

Fonte: Autora.

Conforme explicado anteriormente na Seção 3.3.3 – Simulação Termoenergética, o edifício do estudo de caso é analisado em termos de três blocos individuais. Todos os valores das variáveis geradas pela simulação computacional para cada bloco individual, em sua condição real e de referência, são apresentados no Anexo C. Esses dados individuais foram utilizados nas ponderações para obtenção dos valores gerais do edifício completo.

A simulação computacional resultou em uma carga térmica anual total para o edifício real (CgTT,real) de 271.459,51 kWh/ano e uma carga térmica anual total para o edifício em sua condição de referência (CgTT,ref) de 320.031,86 kWh/ano. A partir destes valores, foi possível constatar que a envoltória apresenta uma redução da carga térmica total anual (RedCgTT) de 15,18%, o que, em comparação com a Tabela 7, corresponde ao nível A da classe de eficiência energética da envoltória.

5.2.2. Classificação de Eficiência Energética do Sistema de Ar-Condicionado do CEAMAZON

A INI-C apresenta a Tabela 8.20 para o sistema de ar-condicionado, com os limites de amplitude das classificações de eficiência energética para cada zona bioclimática de acordo com a classificação climática correspondente. Os limites da zona bioclimática 8, onde se localiza o edifício em estudo, são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Limites das faixas de eficiência energética do sistema de ar-condicionado CEAMAZON existente, adaptado da INI-C.

Classificação Climática	RedCR (%)				
	A	B	C	D	E
Zonas Bioclimáticas					
ZB 7 e 8	RedCR > 43%	43% ≥ RedCR > 29%	29% ≥ RedCR > 14%	14% ≥ RedCR ≥ 0%	RedCR < 0%

Fonte: Autora.

Os resultados obtidos na simulação computacional do edifício indicam que o valor do consumo de refrigeração do sistema de ar-condicionado na sua condição real (CR,real) é de 110.476,84 kWh/ano, enquanto na sua condição de referência (CR,ref), foi obtido um valor de 123.089,18 kWh/ano. Ambos os valores finais foram obtidos ponderando o consumo individual de refrigeração de cada bloco (A, B e C).

Dos valores de consumo de refrigeração nas condições reais e de referência, a redução percentual no consumo de energia do sistema de refrigeração (RedCR) foi de 10,25%. Comparando-se com a Tabela 8, tem-se a classe de eficiência energética D para o atual sistema de ar-condicionado do edifício.

5.2.3. Classificação de Eficiência Energética do Sistema de Iluminação do CEAMAZON

O sistema de iluminação analisado pelo medidor de simulação computacional resultou nos valores de potência luminosa limite para classificação A e D (PILD e PILA), de 21.417,72W e 38.157,98W, respectivamente. Além disso, há um valor de 23.026,97W de potência luminosa total instalada (DPI) em seu estado real.

Através destes valores, e com os valores das horas de utilização do edifício por dia e do número de dias de ocupação por ano, de acordo com a tipologia das tabelas constantes do Anexo A da INI-C, são calculados os valores de consumo do sistema de iluminação do edifício, em sua condição de referência D (CIL,refD) e referência equivalente a classe A (CIL,refA), resultando em 17.024,87 kWh/ano e 9.555,95 kWh/ano, respectivamente. A partir desses valores, a Equação (5) gerou um valor de 14,62% para o intervalo entre as classes. Com esse intervalo foram montados os limites de classificação de EE do sistema de iluminação, conforme Tabela 9.

Tabela 9. Limites das classificações de eficiência energética do sistema de iluminação existente no edifício CEAMAZON.

RedC IL (%)				
A	B	C	D	E
RedC IL > 43,87%	43,87% ≥ RedC IL > 29,25%	29,25% ≥ RedC IL > 14,62%	14,62% ≥ RedC IL ≥ 0%	RedC IL < 0%

Fonte: Autora.

A simulação também obteve um valor real de consumo do sistema de iluminação do edifício (CIL,real) de 10.263,43 kWh/ano. A aplicação deste valor à Equação (4) resulta em

uma redução de 39,72% no consumo real do sistema de iluminação da edificação (RedCIL), o que, comparado à Tabela 9, resulta em uma classe de eficiência energética B para o atual sistema de iluminação do CEAMAZON.

5.2.4. Classificação Geral de Eficiência Energética do CEAMAZON

O edifício do CEAMAZON possui um fator de forma (FF) de 0,50. Ao analisar a Tabela 8.4 da INI-C para a zona bioclimática 8, o fator de forma 0,50 corresponde a um Coeficiente de Redução do Consumo de Energia Primária da Classificação D para a Classificação A (CRCEPD-A) de 0,27. A partir deste valor foi obtido o intervalo de classificação (*i*) igual a 9, conforme a Equação (13). Essa figura (*i*) resultou na Tabela 10:

Tabela 10. Limites das faixas da classificação geral de eficiência energética do edifício do CEAMAZON.

RedCEPponderado (%)				
A	B	C	D	E
RedCEP > 27%	$27\% \geq \text{RedCEP} > 18\%$	$18\% \geq \text{RedCEP} > 9\%$	$9\% \geq \text{RedCEP} \geq 0\%$	RedCEP < 0%

Fonte: Autora.

No processo de simulação computacional do *EnergyPlus* foi possível calcular o consumo total de energia elétrica dos três blocos do CEAMAZON, que resultou em 140.567,88kW/h por ano, considerando os valores de consumo do sistema de iluminação, ar-condicionado e demais equipamentos presentes no edifício. Este valor foi multiplicado por 1,6, o fator de conversão de energia elétrica (*f*CE) em energia primária, dado pela Tabela 8.1 da INI-C, resultando em 224.908,61kWh/ano de consumo real de energia primária atual do edifício.

Fazendo estes mesmos cálculos para o edifício de referência, obtém-se o valor de 159.941,66kWh/ano do consumo de energia elétrica, e 255.906,65 kWh/ano para o consumo de energia primária do edifício de referência. Ao aplicar a ponderação conforme (14), obtém-se o valor de uma redução de 11,9% no consumo de energia primária do edifício. Com esse percentual, o edifício CEAMAZON possui classificação nível C para o desempenho energético geral do edifício.

O Apêndice C, Tabela C1, contém todos os consumos para casos reais e de referência, e a Tabela C2, contém todas as taxas de redução e rótulos de cada bloco, facilitando sua utilização.

5.2.5. Classificação de Autossuficiência Energética do CEAMAZON

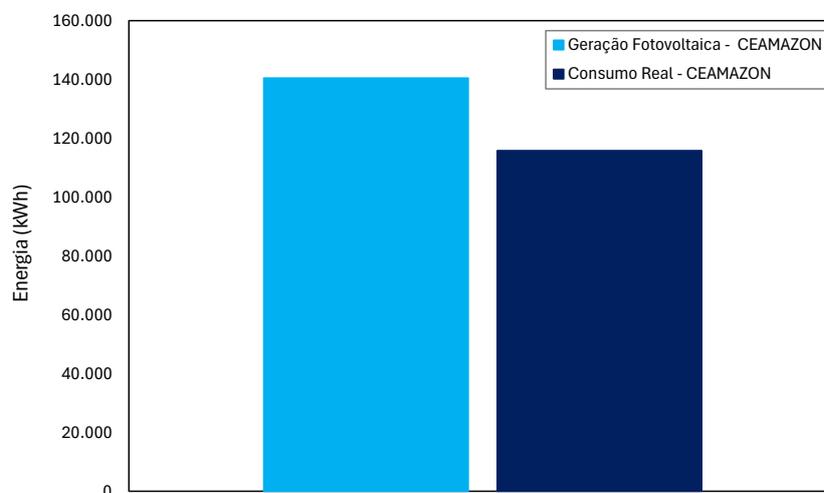
Com valores de consumo de eletricidade ($CEE,real$) de 140.567,88 kWh/ano, geração de energia renovável (GEE) de 116.065,70 kWh/ano, e fator de conversão de eletricidade em energia primária (fCE) de 1,6, o potencial de geração de energia (PG) pôde ser obtido conforme a Equação (15), resultando em um percentual de 82,57%.

Potenciais de geração superiores ou iguais a 50% e inferiores a 100% representam edifícios NZEB, enquanto potenciais mais significativos que 100% mostram EEPs (INMETRO, 2022a). Portanto, os resultados simulados classificam o CEAMAZON como um edifício NZEB.

5.3. Classificação de Eficiência Energética do CEAMAZON, considerando o consumo de Carros Elétricos: Cenário 01, VE sem Otimização

No primeiro cenário, ilustrado na Figura 26, onde não há restrições ao carregamento de VE, a energia consumida pelo carregamento de VE leva a um aumento significativo no consumo de energia do edifício CEAMAZON.

Figura 26 – Geração fotovoltaica e consumo de energia elétrica do CEAMAZON, considerando recarga de carros elétricos, sem otimização.



Fonte: Autora.

Utilizando o *software* de simulação computacional OpenDSS, foi possível obter o consumo de energia elétrica do sistema de abastecimento do carro elétrico para o cenário 1, sem considerar restrições, de 97.388,42 kWh/ano e 155.821,47 kWh/ano convertidos em energia primária. Mantendo o consumo dos demais sistemas energéticos do prédio e somando o consumo do sistema de abastecimento do carro elétrico, o consumo total global de energia

elétrica do CEAMAZON passa de 140.567,88 kWh/ano para 237.956,30 kWh/ano, correspondendo a um aumento de 69,28%.

Este valor de consumo, multiplicado pelo fator de conversão de energia elétrica em energia primária (f_{CE}) de 1,6, resulta num consumo de energia primária de 380.730,07 kWh/ano para o edifício na sua condição atual, com VE. No caso de referência, o consumo de energia primária foi de 255.906,65 kWh/ano, mas este valor sobe para 411.728,12 kWh/ano com os carros elétricos. Com base nestes novos valores de consumo de energia primária no caso real e de referência, tendo em conta o carregamento dos VE, é efetuada uma nova ponderação das reduções no consumo de energia primária (Red_{CEP} ponderado) para cada bloco, dando o valor de 7,03%, usando a Equação (16).

Com este novo valor de redução percentual do consumo de energia primária no cenário 1, o edifício CEAMAZON, que atingiu o nível C sem considerar o consumo de carros elétricos, passa a ter uma classificação de desempenho energético global nível D, face aos valores limite da Tabela 6. Isto mostra o impacto do sistema de abastecimento no desempenho da eficiência energética do edifício.

5.4. Classificação de Autossuficiência Energética do CEAMAZON, considerando o consumo de Carros Elétricos: Cenário 01, VE sem Otimização

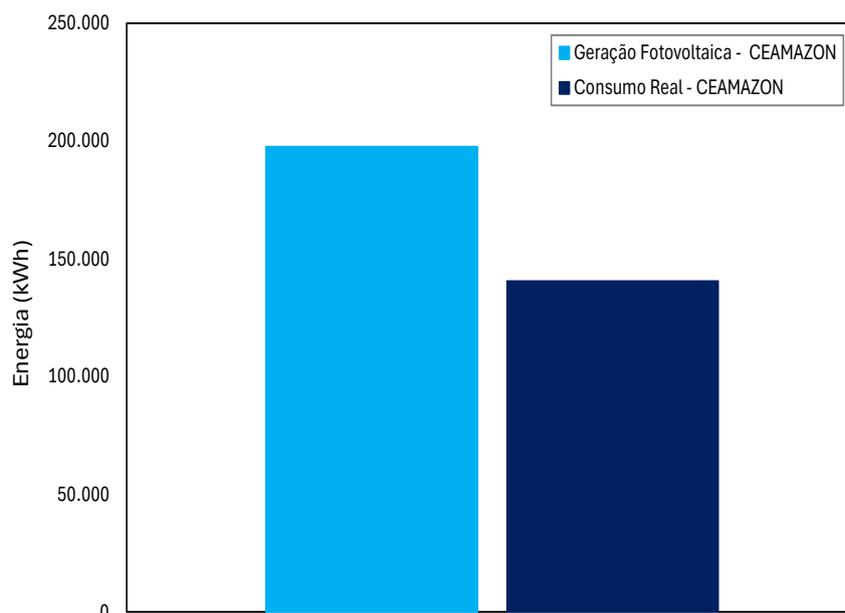
Com os valores do consumo total de energia elétrica na condição do cenário 1 em 237.956,30 kWh/ano, o fator de conversão de energia elétrica em energia primária de 1,6, e o valor da energia gerada pelas fontes locais de energia renovável do CEAMAZON em 116.065,70 kWh, foi possível obter o potencial de geração de energia (PG) de 48,78%, utilizando a Equação (11). Como resultado, o edifício CEAMAZON deixa de ser classificado como NZEB durante o ano para ser um edifício sem autossuficiência. Isto realça o impacto significativo da integração de veículos elétricos em edifícios na classificação de edifícios energeticamente eficientes, particularmente aqueles designados como NZEB ou edifícios de energia positiva.

Em seguida, analisa-se o cenário 2, que considera a otimização do consumo dos VE, para verificar se as restrições permitem a integração dos VE sem afetar a classificação energética, como foi o caso no cenário 1.

5.5. Classificação de Eficiência Energética do CEAMAZON, considerando o consumo de Carros Elétricos: Cenário 02, VE com Otimização

As ações de gestão da demanda apresentadas na Seção 2, subtópico 2.4.3. e 2.4.4., foram implementadas para o segundo cenário, que apresenta novos consumos prediais do CEAMAZON, conforme Erro! Fonte de referência não encontrada..

Figura 27 – Geração fotovoltaica e consumo de energia elétrica do CEAMAZON, considerando recarga de carros elétricos, com otimização.



Fonte: Autora.

O cenário 2 difere do cenário 1 pelas restrições (redução da potência de abastecimento e desligamento de todos os veículos com percentagem de carga superior a 80%) consideradas. A simulação no *software* OpenDSS mostrou que este novo cenário consumiu 56.927,00 kWh/ano de eletricidade com a otimização do sistema de abastecimento do carro elétrico, o que resultou num consumo final para o edifício com carregamento de VE de 197.494,88 kWh/ano.

No cenário 2, o consumo de energia do edifício de referência é de 216.868,66 kWh/ano. Quando o conversor utiliza este valor de referência e o valor de consumo total do edifício CEAMAZON com fornecimento gerenciado de VE (cenário 2), obtém 315.991,82 kWh/ano e 346.989,86 kWh/ano, respectivamente.

Aplicando a Equação (17), há uma redução no consumo de energia primária (RedCEP) de 8,47%. Este valor é avaliado na Tabela 8 do limite de classificação, resultando na classificação nível D de eficiência energética do edifício CEAMAZON. É possível concluir que, mesmo

com restrições, o fornecimento de VE continua a impactar o desempenho energético do edifício.

5.6. Classificação de Autossuficiência Energética do CEAMAZON, considerando o consumo de Carros Elétricos: Cenário 02, VE com otimização e geração renovável

Utilizando o valor do consumo de energia primária do cenário 2 e da geração de energia renovável na Equação (15), o potencial de geração de energia nova (PG) do cenário otimizado é obtido em 58,77%. Este valor resulta na classificação NZEB da autossuficiência energética do edifício do CEAMAZON, retomando a classificação que o edifício recebia no seu estado atual quando não tinha integração VE, mas que tinha perdido com a integração do sistema de abastecimento sem a estratégia de otimização de consumo.

Considerando esse cenário o mais apropriado para a edificação, por garantir um consumo energético de sistema de abastecimento de VE mais eficiente, optou-se por aplicar a próxima etapa de proposição de medidas de EE para o *retrofit* dos sistemas prediais a partir do cenário 02.

5.7. Proposição de Medidas de Eficiência Energética: Cenário 03, *Retrofit* de Sistemas Prediais do CEAMAZON

A envoltória do edifício CEAMAZON apresentou nível A de desempenho energético, conforme apresentado no item 1 da seção 3.4, portanto as propostas de intervenção focaram nos sistemas de ar-condicionado e iluminação, que apresentaram níveis de eficiência energética D e B, respectivamente, conforme pode ser observado na Tabela C1 do Apêndice C. Como mencionado anteriormente, o sistema de alimentação do carro elétrico permaneceu o mesmo do cenário 02 para esta etapa.

5.7.1. Proposta de *Retrofit* do Sistema de Ar-condicionado do CEAMAZON

Para o sistema de ar-condicionado foi proposto um redimensionamento baseado nos procedimentos de cálculo de carga térmica da NBR 16401-2008 (ABNT, [s.d.]). As máquinas escolhidas para substituição estão listadas na Tabela 11.

Tabela 11. Modelos de HVAC para proposta de retrofit do sistema de ar-condicionado do CEA-MAZON.

Recomendações		
Qtd	Potência (W)	Classe de Eficiência (IDRS)
4	2637,64	7,60
15	5275,28	8,25
2	7033,71	8,20
1	8792,13	7,60
2	9378,27	7,5
7	10.550,56	5,87

Fonte: Autora.

Ao todo, 35 máquinas do tipo *split*, que tinham potência instalada de 262.591,67 W, foram substituídas por 31 máquinas, também do tipo *split*, que passaram a representar um valor de 205.149,74 W de potência instalada. Esta troca correspondeu a uma diminuição de 57.441,93 W no edifício, correspondendo a uma redução de 21,87% no sistema de climatização predial do caso atual para o proposto.

5.7.2. Proposta de *Retrofit* do Sistema de Iluminação do CEAMAZON

Para o sistema de iluminação, as ações de eficiência energética propostas para o retrofit consistiram na substituição de lâmpadas menos eficientes por outras mais eficientes, conforme classificações de desempenho do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), e atendendo às diretrizes de conforto luminotécnico estipuladas pela norma brasileira ISO/CIE 8995-1:2013, onde foi definido o número de lúmens para cada nova luminária. Todas as novas adições podem ser vistas na Tabela 12.

Tabela 12. Informações do sistema de iluminação proposto para o retrofit do edifício CEAMAZON.

Recomendações		
Quantidade.	Potência (W)	Potência total (W)
230	9	5.580
230	11	2.530
12	14	168

Fonte: Autora.

No total, 850 lâmpadas, que tinham potência total instalada de 16.612W, foram substituídas por outras mais eficientes. Esta troca correspondeu a uma diminuição global de 8.334W no edifício, o que resultou num valor total de 8.278W de potência instalada no novo sistema. A troca de lâmpadas reduziu em 50,17% a potência instalada no sistema de iluminação predial, afetando diretamente o consumo final da edificação.

5.7.3. Classificação da Eficiência e Autossuficiência Energética do Cenário 03: Retrofit do CEAMAZON

Com a definição das medidas de eficiência energética (EE) propostas para os sistemas de ar-condicionado e iluminação é possível realizar uma nova simulação computacional de avaliação de desempenho energético, conforme apresentada na seção 3.2 da metodologia, para analisar se as ações propostas para os dois sistemas garantem o alcance do nível A.

5.7.4. Classificação da Eficiência Energética do Sistema de Ar-condicionado Proposto para o Retrofit do CEAMAZON

Com o caso proposto para o sistema de ar-condicionado do CEAMAZON, foi possível obter novos valores de consumo de refrigeração em sua condição real (CR_{real}) para cada bloco. A partir das novas simulações realizadas, o bloco A obteve 39.348,90kW/h de consumo, o bloco B 4.874,82kW/h, e o bloco C 2.457,86kW/h, totalizando um consumo de refrigeração em sua condição real final (CR_{real}) de 46.681,58kW/h. Com este novo valor real de CR, em conjunto com 123.089,18kW/h do consumo de referência (CR_{refD}), e aplicando a Equação (10), o novo valor da percentagem de redução do consumo de energia do sistema de refrigeração ($RedCR$) é obtido, no valor de 62,07%.

Conforme a Tabela 4, para se obter o nível A, a redução precisa ultrapassar 42%. Portanto as medidas de eficiência do sistema de ar-condicionado foram suficientes para elevar o nível atual de D para o nível A de eficiência energética do sistema de ar-condicionado, ultrapassando em aproximadamente 20% do limite estabelecido pela INI-C.

5.7.5. Classificação da Eficiência Energética do Sistema de Iluminação Proposto para o Retrofit do CEAMAZON

As medidas de eficiência propostas para o *retrofit* do sistema de iluminação resultaram em novos valores de consumo de iluminação em sua condição real (CIL_{real}), totalizando 8.314,78kW/h. Este valor é a soma dos valores de cada bloco, onde A teve 3.374,44kW/h, B teve 4.777,82kW/h e C obteve 162,52kW/h.

Com este novo CIL, valor real, juntamente com 17.024,87kW/h do consumo de referência (CIL,ref D), e aplicando a Equação (4), o valor da percentagem proposta de redução do consumo de energia do sistema de iluminação (RedCIL) é 51,16%.

Conforme a Tabela 5, a redução precisa ultrapassar 43,87% para obter o nível A, portanto as medidas propostas foram suficientes para elevar o atual nível B do sistema de iluminação para o nível A de eficiência energética, ultrapassando em 7,29% o limite estabelecido na INI-C.

5.7.6. Classificação da Eficiência Energética Geral do Cenário 03: *Retrofit* do CEAMAZON

Caso seja implementada a proposta de *retrofit* dos sistemas prediais do CEAMAZON, a classificação geral deverá considerar os novos valores de consumo dos sistemas de ar-condicionado e iluminação. Porém, são mantidos os valores do caso atual para a envoltória (área, volume e fator de forma), o que resulta no mesmo valor do intervalo entre as classes. Assim, mantém-se a Tabela 6, com os limites dos intervalos das classificações gerais de eficiência energética do edifício.

Por fim, são também utilizados os mesmos valores de consumo do sistema de abastecimento do carro elétrico, pois não foram foco das intervenções das medidas propostas devido à necessidade de efficientizar primeiro os sistemas prediais que estão atualmente ineficientes.

Os novos valores de consumo de energia elétrica resultam no consumo real de energia primária (CEP,real) de cada bloco, onde obtém-se: 97.082,42 kWh/ano (bloco A), 17.934,74 kWh/ano (bloco B) e 4.701,20 kWh/ano (bloco C). Somando esses valores ao CEP,real do consumo de energia do abastecimento dos carros elétricos (91.083,21kWh/ano), encontra-se o CEP,real total da edificação no caso proposto, no valor de 210.801,56kWh/ano de energia primária, conforme pode ser observado na Tabela B2 do Anexo B, e 131.750,97 kWh/ano de energia elétrica.

Utilizando os valores de referência de consumo de energia primária (CEP,ref), temos novos valores de RedCEP para cada bloco: 51,97% (bloco A); 58,25% (bloco B); 56,64% (bloco C); e 0% do sistema de carregamento elétrico, que pode ser o mesmo no caso real e na referência. Novamente, o RedCEP de cada bloco foi ponderado através da Equação (14), resultando em um RedCEP final do caso proposto de 30,15%. Todos os valores das variáveis geradas pela simulação computacional para o *retrofit* de cada bloco individual, em sua

condição real e de referência com integração aumentada de VE, são apresentados na Tabela C2 do Apêndice C.

Conforme a Tabela 6, a redução precisa ultrapassar 27% para obter o nível A, portanto as medidas de eficiência do sistema de ar-condicionado e iluminação, em conjunto, elevaram o nível atual de D para o nível A da classificação de eficiência energética geral do caso proposto para o *retrofit* do CEAMAZON.

5.7.7. Classificação de Autossuficiência Energética do Cenário 03: *Retrofit* do CEAMAZON

Utilizando o mesmo fator de conversão de eletricidade em energia primária de 1,6, o mesmo valor de energia gerada por fontes locais de energia renovável de 116.065,70 kWh, que permanece o mesmo, e utilizando o novo valor de consumo total de eletricidade na condição real de 275.539,82 kWh/ano resultante do *retrofit*, tem-se o potencial de geração de energia (PG) de 88,09%, utilizando a Equação (15). Portanto, o CEAMAZON obtém uma classificação de autossuficiência próxima de obter a classe de energia positiva neste cenário.

5.8. Indicador de Consumo de Energia Elétrica para o Nível A de Eficiência Energética

O resultado da etapa 5 mostrou que as ações de eficiência energética resultaram no nível A de desempenho energético do edifício, mesmo considerando o consumo de energia do sistema de alimentação do veículo elétrico, e sem a necessidade de aplicar qualquer alteração nesse sistema. Além disso, foi possível obter uma redução percentual no consumo de energia primária com uma margem de 3,15% em relação ao limite inferior do nível A, que é de 27%.

Essa redução permite que o consumo de energia dos sistemas do edifício seja ampliado, caso necessário. Como os sistemas de iluminação e ar-condicionado estão redimensionados, atendendo aos parâmetros de conforto térmico e lumínico, decidiu-se analisar a previsão de uma possível expansão do sistema de abastecimento de veículos elétricos. Essa escolha também se baseia no crescente aumento das frotas de veículos elétricos no mercado mundial, especialmente nos nacionais e regionais, conforme demonstrado na seção 2.5 do Capítulo 2.

Nesse sentido, é relevante analisar o aumento do consumo de energia em edifícios que possuam integração com veículos elétricos, com o objetivo de acompanhar o crescimento da tendência do mercado de VE (NEOCHARGE, 2024). No entanto, também é necessário que esse aumento no consumo de energia elétrica nas edificações, resultante do aumento da recarga

de VEs, seja feito com prudência, para que o bom desempenho do nível energético alcançado não seja impactado.

Portanto, visando mitigar o impacto na classificação de eficiência e autossuficiência energética da edificação, utilizou-se o valor do consumo total anual de energia primária (CEP) e o valor do percentual de redução do consumo de energia primária (RedCEP) com o consumo de energia primária de cada bloco, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13. Valores de RedCEP e CEP utilizados para calcular o limite de consumo de energia primária do edifício CEAMAZON.

Blocos	RedCEP	CEP	ΣRedCEPn x CEPn
A	51,97	97.082,42	5.045.373,37
B	58,25	17.934,74	1.044.698,61
C	56,64	4.701,20	266.275,97
Total		119.718,36	6.356.347,94

Fonte: Autora.

O somatório do consumo primário (CEP) resultou em 119.718,36 kWh/ano e 6.356.347,94 kWh/ano do valor total do somatório dos produtos entre (RedCEP) e (CEP), sem a integração do VE. Com esses dois valores e o resultado da ponderação da redução do consumo de energia primária do edifício de 27,01, propositalmente coincidente com o limite superior da classe de nível A, aplica-se a Equação (11) da metodologia proposta na etapa 5.

O cálculo resulta em 115.614,78kWh/ano de consumo de energia primária, o limite para a classificação A de energia primária (LA,inf), correspondente a 72.247,76kWh/ano de consumo de eletricidade, que é o valor máximo de consumo de energia que os sistemas prediais podem aumentar sem que a classe de desempenho energético do edifício diminua do nível A. Como explicado anteriormente, esse valor é usado como referência para gerar um aumento mais significativo no carregamento de veículos elétricos e será aplicado na etapa 6 a seguir.

5.9. Previsibilidade de Incremento da Integração do Sistema de Abastecimento de VE em Edificações: Cenário 04

A quinta etapa apresenta os resultados da simulação do aumento do consumo de eletricidade no edifício resultante do sistema de abastecimento de carros elétricos, mas dentro dos limites estipulados pela etapa anterior.

O limite de consumo desse sistema, definido em 72.247,76 kWh/ano, foi dividido por 365 dias para determinar o valor do limite diário, que foi de aproximadamente 197,939 kWh/dia.

Como resultado, o sistema de gerenciamento exerceu um controle de consumo mais assertivo. Por meio do *software* OpenDSS, obteve-se o aumento de consumo de energia do sistema de carregamento de VE no valor de 71.224,04 kWh/ano (Tabela B2 do Apêndice B).

5.9.1. Classificação da Eficiência Energética Geral do CEAMAZON: Cenário 04, com aumento da integração de VE

O novo valor de consumo de carregamento de energia de VE fixado em 71.224,04 kWh/ano, mantém o percentual de redução de consumo total da edificação abaixo do limite máximo permitido para obter a classe geral de desempenho energético no nível A para o CEAMAZON, como pode ser visto na Tabela 14.

Tabela 14. Percentual de redução no consumo de energia e classificação de EE dos novos sistemas prediais propostos no *retrofit* de cada bloco do CEAMAZON, com integração de VE antes e depois do aumento no consumo de abastecimento.

Classificação	Geral		Envoltória		Sit. de Ar-condicionado		Sit. de Iluminação	
	Bloco	RedCEP (%)	Nível	RedCgTT (%)	Nível	RedCR (%)	Nível	RedCIL (%)
A	51,97	A	12,97	A	61,22	A	51,16	A
B	58,25	A	22,28	A	68,57	A	51,16	A
C	56,64	A	33,82	A	59,88	A	51,16	A
Ponderado*	30,15	A	15,18	A	62,07	A	51,16	A
Ponderado**	27,20	A	15,18	A	62,07	A	51,16	A

* Ponderado com a integração de VE, antes do aumento no consumo do sistema de abastecimento.

**Ponderado com a integração de VE, após o aumento no consumo do sistema de abastecimento.

Fonte: Autora.

Esse resultado confirmou que as expansões no sistema de carregamento de VEs podem ser feitas com cautela, permitindo que os VEs sejam integrados seguindo os preceitos de eficiência energética da classificação geral de edifícios.

5.9.2. Classificação de Autossuficiência Energética do CEAMAZON: Cenário 04, com aumento da integração de VE

Utilizando o valor de 275.539,82 kWh/ano do consumo total de eletricidade da edificação na sua condição real para o caso proposto, ou seja, resultante do *retrofit* e o novo de consumo de energia do sistema de abastecimento de VE, encontra-se o potencial de geração de energia (PG) de 79,47%, utilizando a Equação (15). Lembrando que, o valor aplicado na fração que corresponde a geração de energia renovável da Equação (15) se mantém igual em todos os casos desse estudo, visto que ela não foi alterada. Com este novo percentual, que considera o aumento da carga de VE, o CEAMAZON continua com a classificação NZEB de autossuficiência energética, pois ainda permanece com o valor de PG entre 50% e 100%.

5.10. Discussão

Esta seção discute os resultados de cada uma das 6 etapas propostas neste estudo, quando comparadas ao cenário base, que corresponde a edificação do CEAMAZON antes de receber a integração do sistema de abastecimento dos veículos elétricos e antes das medidas de eficiência energética propostas para o retrofit dos sistemas de iluminação e ar-condicionado. Os resultados das etapas 1, 2 e 3, das seções 3.3, 3.4 e 3.6, do capítulo 3, estão resumidos na Tabela 15 e na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tendo como referência o cenário base, a análise da simulação de dois cenários de integração de veículos elétricos no edifício permitiu medir o impacto do sistema de abastecimento sem gestão (cenário 01) e com gestão de carregamento (cenário 02), como se pode verificar no comparativo resumo dos resultados na Tabela 15.

Tabela 15. Síntese comparativa dos resultados de consumo e níveis de EE e NZEB/EEP dos cenários analisados para o edifício CEAMAZON.

Cenários	Cenário Base		Cenário 01		Cenário 02	
Geração e consumo de energia	Geração fotovoltaica (kWh/ano)	Consumo total, sem VE (kWh/ano)	Consumo de VE (kWh/ano)	Consumo total com VE (kWh/ano)	Consumo de VE (kWh/ano)	Consumo total com VE (kWh/ano)
Energia elétrica	116.065,70	140.567,88	97.388,42	237.956,30	56.927,00	197.494,88
Energia primária	185.705,12	224.908,61	155.821,46	380.730,07	91.083,21	315.991,82
Nível de classificação EE PG		Nível C 82,57%		Nível D 48,78%		Nível D 58,77%
Nível de classificação NZEB/EEP		NZEB		Sem Classificação		NZEB

Fonte: Autora.

Como pode ser observado na Tabela 15, o edifício do CEAMZON possui atualmente nível C de eficiência energética e classificação NZEB de autossuficiência energética. Em relação ao cenário base, o cenário 01 apresentou um aumento anual de 69,28% no consumo de energia elétrica no edifício CEAMAZON, afetado principalmente pelo consumo de VEs (mais 97.388,41 kWh/ano). O aumento do consumo resultou na redução da classificação de desempenho energético para o nível D, lembrando que a escala vai do nível A (mais eficiente) ao E (menos eficiente).

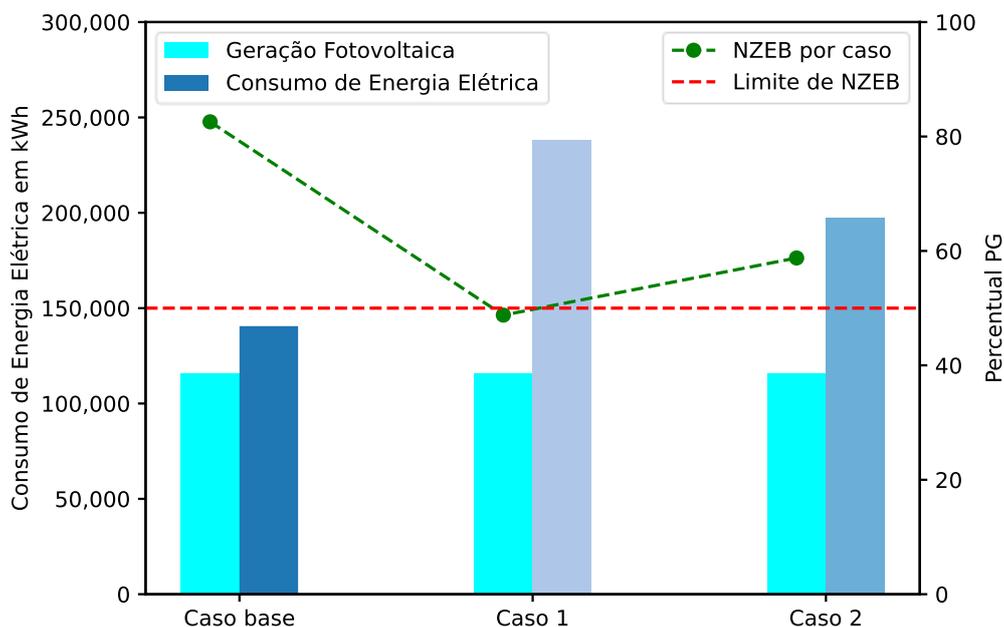
Para mitigar o impacto causado pela utilização de VE no cenário 01, foi proposto o cenário 2, caracterizado pelas medidas de gestão de carregamento que consideram restrições de potência e tensão. Os resultados mostraram um aumento anual de apenas 40,50% no consumo de energia em relação ao caso base, e uma diminuição de 97.388,41 kWh/ano para 56.927,00 kWh/ano no consumo de energia do sistema de abastecimento de VE no edifício, do cenário 01 para o cenário 02, respectivamente.

A técnica de otimização demonstrou um bom potencial para minimizar os impactos dos VE no desempenho energético dos edifícios. No entanto, o resultado da aplicação da metodologia de avaliação energética INI-C mostrou que a redução do consumo não foi suficiente para que a edificação retornasse para o nível C (cenário base), mantendo o edifício no nível D, alterado após a integração dos VEs na edificação.

Na

Figura 28 é possível verificar a geração de energia fotovoltaica e a variação do consumo elétrico anual do CEAMAZON, para cada cenário, de acordo com a base de dados de 2022. Através das linhas tracejadas é possível visualizar que a mudança de consumo gerou impacto na classificação de autossuficiência energética da edificação nos dois cenários apresentados.

Figura 28 – Comparação da geração fotovoltaica e consumo de energia do CEAMAZON, para os cenários base, 01 e 02, em relação ao limite da classificação NZEB da INI-C.



Fonte: Autora.

No cenário 01 o CEAMAZON perde a classificação de autossuficiência energética, porque a geração fotovoltaica passa a suprir menos de 50% do consumo energético do edifício (Tabela 15), como demonstra o ponto verde no gráfico da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, onde a linha vermelha tracejada representa o limite para a classificação NZEB.

Em relação à classificação de autossuficiência energética, o cenário 02 permitiu ao CEAMAZON retornar à categoria de edifícios NZEB, pois o novo balanço energético resultou em um aumento de 20,48% no PG 2 (Tabela 15), superando o limite mínimo de 50%, conforme visto na

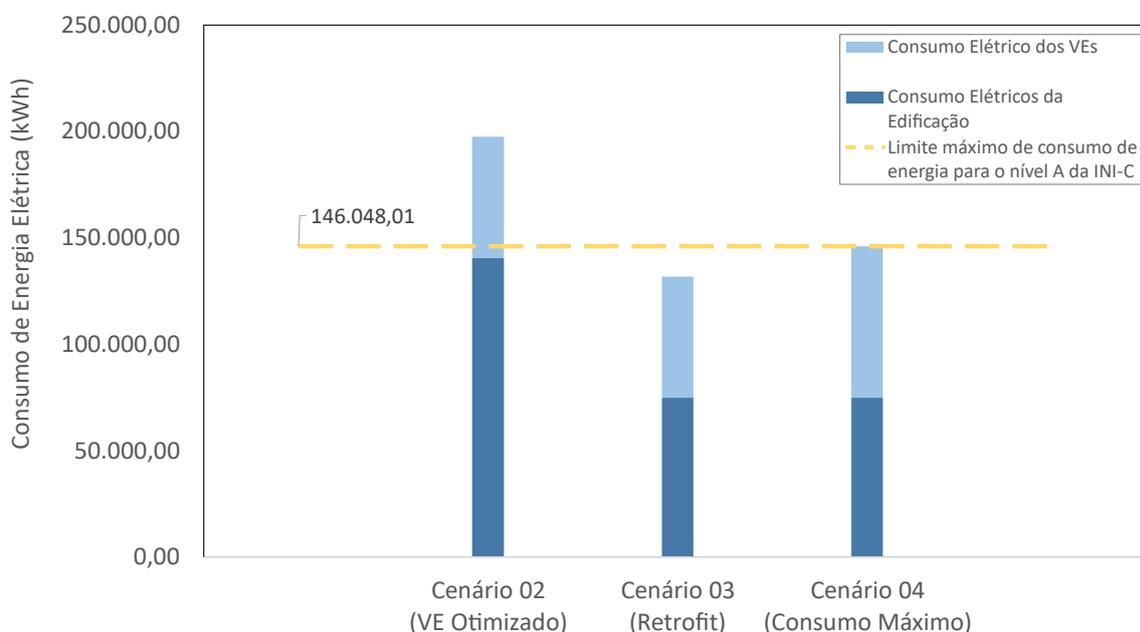
Figura 28.

Como foi possível constatar, apesar das atuais premissas de gestão de VE, o consumo deles ainda impacta negativamente o desempenho do edifício, evidenciando a necessidade de novas restrições. No entanto, devido ao baixo desempenho energético já existente, essas restrições só serão eficazes após a implementação de um *retrofit*, que vise melhorar os sistemas ineficientes. Portanto, além de gerenciar o sistema de abastecimento dos veículos elétricos, é crucial implementar ações que melhorem a eficiência de outros sistemas prediais.

Como o diagnóstico da metodologia da INI-C demonstrou níveis B e D para os sistemas de iluminação e ar-condicionado, respectivamente, evidenciou-se que é crucial propor medidas que melhorem a eficiência desses sistemas, para reduzir o consumo e melhorar o desempenho energético do edifício visando o nível A. Com isso, a etapa 4 de proposição de *retrofit* energético foi desenvolvida e aplicada no estudo de caso a partir do cenário 02, que é caracterizado pela edificação com integração de VE de maneira otimizada.

Com base nos resultados apresentados nas etapas 4, 5 e 6, do capítulo 3, é possível examinar como o consumo de energia e a classificação de EE da edificação variou significativamente, conforme visto na Figura 29, com a síntese dos resultados.

Figura 29 – Comparação do consumo de energia elétrica dos cenários base, 03 e 04, em relação ao limite máximo de consumo de energia necessário para manter o nível A do INI-C.



Fonte: Autora.

Através da Figura 29, é possível verificar que o cenário 02 (VE otimizado) mostra o edifício com um elevado consumo de sistemas construtivos ineficientes, quando se compara a

barra de consumo da edificação com a linha que delimita o máximo de consumo para obtenção do nível A de EE. Esta ineficiência dos sistemas foi comprovada com o resultado da aplicação da metodologia de avaliação INI-C, que resultou no nível D de EE. Quando o cenário 02 (VE otimizado) é comparado com o cenário 03 (*retrofit*), fica mais claro observar o quanto o edifício tinha potencial para tornar mais eficientes seus sistemas (ar-condicionado e iluminação), apontados como responsáveis pelo nível D que o edifício possuía.

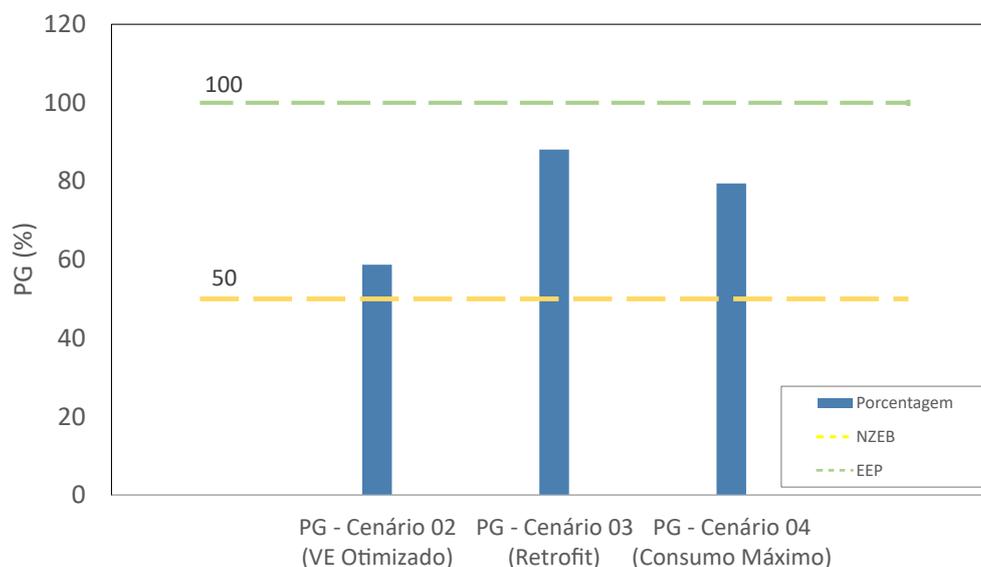
Após a simulação da aplicação das medidas de *retrofit* dos sistemas de iluminação e ar-condicionado, é possível observar que o consumo dos sistemas analisados pela INI-C entrou em equilíbrio com o consumo individual do sistema de abastecimento do carro elétrico, que permaneceu o mesmo até esse ponto do estudo. Os sistemas de iluminação, ar-condicionado e outras cargas prediais (equipamentos) passaram a representar 56,79% do consumo total, enquanto o sistema de abastecimento representa 43,21%. Anteriormente, esse percentual era de 71,18% e 28,82%, respectivamente.

Conhecendo o limite máximo de consumo de eletricidade que o edifício poderia atingir para manter seu mais alto nível de desempenho, foi possível prever uma carga de carregamento maior para os veículos elétricos. Essa alteração, aplicada ao gerenciamento de carga de VE, gerou o cenário 4 (consumo máximo), em que as novas porcentagens de consumo, 51,23% para os sistemas do edifício e 48,77% para o sistema de abastecimento, mostram um equilíbrio de carga quase igual.

É pertinente comentar que essa aproximação na equalização do consumo mostra a grandeza do sistema de abastecimento em detrimento dos demais, quando um único sistema é capaz de gerar consumo de quase 50% em um edifício, em comparação com o restante das cargas provenientes dos sistemas de iluminação, ar-condicionado e outros equipamentos combinados.

Por fim, na Figura 30 é possível observar o potencial de geração de energia renovável (GP), destacando os impactos das ações propostas ao longo da obra no desempenho da autossuficiência elétrica predial.

Figura 30 – O impacto de cada cenário no potencial de geração de energia renovável (PG) da CEAMAZON com base na classificação de autossuficiência energética INI-C.



Fonte: Autora.

Em todos os cenários apresentados na Figura 30, o edifício CEAMAZON apresentou variações no percentual de potencial de geração de energia (PG), que indica a classificação de autossuficiência energética. No cenário 02, o PG estava em 58,77%, mas no cenário 03 esse valor subiu para 88,09% após as ações de eficiência energética, porém, caiu para 79,47% com o aumento do consumo de energia pelos carros elétricos no cenário 04. Nota-se que apesar das variações, os resultados das proposições conseguem cumprir o objetivo de manter os percentuais PG da edificação, no mínimo dentro da faixa de classificação NZEB, de 50% a 100%.

5.11. Conclusões do capítulo

Conclui-se que, a integração de VE na edificação de forma não planejada (cenário 01) acarreta um impacto na classificação de eficiência (de nível C, para nível D) e autossuficiência energética (de classe NZEB, para a desclassificação). A edificação só volta a obter a classificação NZEB após a proposição de estratégias de gerenciamento e otimização do consumo de VEs, na etapa 02, com o cenário 02. Porém, o desempenho energético continua com nível D de eficiência.

Somente a partir da etapa 4 o edifício do CEAMAZON, mesmo com o sistema de abastecimento de VE integrado, conseguiu obter o nível A de desempenho energético, em decorrência das ações de EE propostas no *retrofit* caracterizando o cenário 03.

Em relação ao aumento da autossuficiência, para o CEAMAZON atingir a classificação de energia positiva (EEP), o cenário 02 se mostra mais favorável, por chegar em 88,09%. Entretanto, para que ele passe de 100% e atinja a classe EEP será necessário propor mais medidas de EE em outras cargas, além dos sistemas de iluminação e ar-condicionado, como nos equipamentos de grande consumo como data center, por exemplo. Entretanto, a aplicação de medidas de EE nos equipamentos não garante que a edificação consiga atender a diretriz para EEP, precisaria de um estudo do potencial das demais cargas que não sofreram intervenção.

Outra possibilidade, que pode ser mais assertiva, é a ampliação do sistema fotovoltaico. Porém, antes de propor o aumento da geração é necessário avaliar, dentre outras questões, as informações de demanda contratada, e a disponibilidade de área. Esses e outros fatores podem ser limitações importantes a serem consideradas, pois podem impedir a realização da ampliação desse sistema. Por fim, ressalta-se que a proposição de novas medidas de EE nas demais cargas prediais e a avaliação do aumento da geração de energia renovável da edificação não foram o foco deste trabalho, ficando como sugestão para trabalhos futuros, bem como outras questões que serão recomendadas como continuação no capítulo de conclusão.

6. CONCLUSÕES

6.1. Considerações Iniciais

A mobilidade elétrica e, conseqüentemente, a sua demanda de consumo de eletricidade, é uma realidade que tem chamado atenção, impulsionada pelo rápido crescimento da adoção de veículos elétricos e pela sua integração aos edifícios. No contexto dos edifícios, essa atenção está voltada para o sistema de abastecimento dos modais elétricos, como os carros, que passam a fazer parte do consumo do edifício, juntamente com outros sistemas e cargas de energia.

Esses “novos” usos finais de energia começam a se somar aos já existentes, o que pode acabar impactando o desempenho energético das edificações, especialmente nas edificações ineficientes. Nesse contexto, as implicações energéticas do consumo adicional dos VEs tornam-se relevantes para a literatura.

As metodologias de avaliação do desempenho de edificações possibilitam que as edificações obtenham a classificação de eficiência e de autossuficiência energética, através da análise dos sistemas prediais como envoltória, iluminação e ar-condicionado etc., aliados a fontes de energia renovável, porém ainda não começaram a incorporar as cargas de veículos elétricos nas suas diretrizes e metodologias de cálculo.

Em virtude do que foi exposto, realizou-se uma avaliação abrangente do impacto da integração do sistema de abastecimento de carros elétricos na classificação de eficiência e autossuficiência energética de uma edificação pública existente, localizada na região amazônica, tendo como referência as diretrizes da Instrução Normativa Inmetro para edificações comerciais, de serviços e públicas - INI-C.

6.2. Conclusões gerais

Os resultados validam a hipótese de que a integração não planejada de VEs em um edifício pode comprometer a eficiência energética geral e as classificações de autossuficiência. Conseqüentemente, a introdução não planejada de veículos elétricos pode reduzir os benefícios dessas novas tecnologias na transição energética.

Visando mitigar essa questão, avaliou-se a implementação de algumas ações de gerenciamento do lado da demanda para o carregamento de veículos elétricos, restringindo a potência de carregamento quando necessário e liberando-a totalmente quando possível, mostrando que o consumo final de energia pode ser controlado com essas estratégias e, simultaneamente, evitando problemas de sobrecargas que podem ocorrer com a inserção de VEs nas redes elétricas. Os resultados mostraram que essas ações de gerenciamento não

impediram que o consumo de energia dos VEs afetasse a classificação de eficiência energética (EE). Porém, elas ajudaram a melhorar a classificação de autossuficiência do edifício do estudo de caso do cenário 01 para o cenário 02.

Percebeu-se que, nesse novo cenário proposto, mesmo com as atuais premissas de gerenciamento, o consumo dos VEs ainda impacta o desempenho do edifício, demonstrando a necessidade de aplicar novas restrições. Entretanto, como o edifício já apresenta baixo desempenho energético, independentemente da integração dos VEs, entende-se que a proposta de mais restrições só será válida após o edifício passar por um retrofit para melhorar os sistemas ineficientes.

Portanto, nota-se que, além das ações de gerenciamento de energia elétrica do sistema de abastecimento de veículos elétricos, é necessário propor ações para melhorar a eficiência de outros sistemas do edifício, como o sistema de iluminação e de ar-condicionado, com o objetivo de reduzir o consumo e melhorar o desempenho energético do edifício. Com isso, decidiu-se analisar a combinação de medidas de eficiência e gerenciamento energético, a fim de mensurar o quanto essas ações podem contribuir não apenas para o desempenho do edifício, mas também para a integração sustentável de VEs em edificações.

As medidas de eficiência energética foram propostas e alinhadas com os níveis de conforto térmico e luminoso, determinados nas normas brasileiras, para assegurar a qualidade e alcançar um bom índice de desempenho energético e manter a autossuficiência do edifício. As propostas de retrofit para o edifício CEAMAZON se concentraram nos sistemas de ar-condicionado e iluminação, que apresentavam níveis de eficiência energética D e B, respectivamente.

O sistema de ar-condicionado foi redimensionado, substituindo 35 máquinas split por 31, reduzindo a potência instalada de 262.591,67896 BTU/h para 205.149,74700 BTU/h, uma diminuição de 57.441,93196 BTU/h, resultando em uma redução de 21,87%. O sistema de iluminação trocou 850 lâmpadas, reduzindo a potência instalada de 16.612W para 8.278W, uma redução de 50,17%.

Após a realização de nova simulação, o consumo de refrigeração caiu para 46.681,58 kWh e o consumo de iluminação para 8.314,78 kWh, alcançando reduções de 62,07% e 51,16%, respectivamente, elevando ambos os sistemas ao nível A de EE. A classificação geral do edifício também subiu para o nível A, com um consumo total de 210.801,56 kWh/ano de energia primária e 131.750,97 kWh/ano de energia elétrica, resultando em uma redução de 30,15% da primária. Com relação à energia elétrica, a redução foi de 33% em comparação com o consumo de energia elétrica do cenário base (197.494,88 kWh/ano).

Essa porcentagem está alinhada com o valor da literatura nacional que, de acordo com o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), conclui que o atendimento às diretrizes de regulamentos, padrões e instruções normativas para eficiência energética pode resultar em uma redução de 30% no consumo em edifícios existentes que passam por *retrofit*. Isso permitiu a reclassificação do nível C para o nível A e aumentou a porcentagem de autossuficiência com 30% a mais de energia renovável disponível, permitindo uma melhor capacidade de integração de VEs.

No entanto, visando manter a classe A de eficiência energética e a classificação NZEB de autossuficiência energética da edificação, antes de aumentar o consumo do sistema de abastecimento de VE, foi calculado um valor máximo de consumo anual que o edifício poderia atingir sem perder o desempenho do nível A. Com esse valor estipulado, foi aplicada uma nova condição de gestão de energia para o carregamento de VEs, que, por exemplo, além de limitar a potência (de acordo com a disponibilidade do transformador), passou a limitar o consumo diário do sistema e, conseqüentemente, seu valor anual.

Os resultados das ações de eficiência energética fizeram com que o edifício CEAMAZON fosse classificado como nível de desempenho energético A, mesmo considerando o consumo do sistema de abastecimento de veículos elétricos. A margem de redução percentual do consumo de energia primária mediante *retrofit* foi de 3,15% em relação ao limite superior do nível A, que é de 27%, permitindo uma expansão prudente do consumo de energia dos sistemas do edifício.

Com o uso do *software* OpenDSS, foi obtido um novo valor de consumo de energia do sistema de abastecimento de VE de 71.224,04 kWh/ano, mantendo o consumo total do edifício abaixo do limite máximo permitido para manter a classe de desempenho energético geral do edifício no nível A. Com a maior integração de veículos elétricos, o edifício manteve sua classificação de autossuficiência como Edifício de Energia Quase Zero (NZEB), com um potencial de geração de energia (PG) de 79,47%, demonstrando a eficácia das medidas de modernização implementadas.

Por fim, esse aumento bem orientado no consumo de VE pode ser simulado dentro dos parâmetros de EE. Concluindo, as medidas de eficiência energética desempenham um papel importante na redução do consumo ineficiente de energia, e na promoção do bom uso dos recursos energéticos e financeiros. Além de assegurar bons desempenhos de eficiência energética e autossuficiência das edificações. Além de todos esses benefícios, elas contribuíram para um aumento de 20% na integração de VEs no edifício.

6.3. Limitações e recomendações para trabalhos futuros

O estudo apresenta algumas limitações, como a falta de uma análise da possibilidade de aumentar a geração de energia renovável, visando obter um nível mais alto de autossuficiência e energia positiva da edificação, limitando o estudo apenas ao uso e à avaliação da energia que já é gerada atualmente. Esse aumento na geração de energia fotovoltaica poderia ser aplicado em um estudo futuro, com o objetivo de aumentar o índice de autossuficiência energética.

O estudo também se limitou a avaliar a integração de carros elétricos que absorvem, mas não devolvem energia ao edifício. Portanto, recomenda-se que estudos futuros simulem essa tecnologia com fluxo de carga na direção veículo-edifício (V2B) e avaliem seu impacto sobre a eficiência energética e a classificação de autossuficiência da INI-C.

Outra sugestão para trabalhos futuros seria aplicar o gerenciamento de energia aos horários de baixo (fora de pico) e alto (pico) consumo de energia do Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro, para avaliar a restrição de carga, deslocando as cargas de VE dos horários de pico para os horários fora de pico, avaliando também a maior coincidência de carregamento nos períodos de pico de geração fotovoltaica e o consumo de energia do edifício, e avaliando também o impacto dessa ação na eficiência energética e na classificação de autossuficiência usando a metodologia INI-C.

Por fim, seria interessante analisar a viabilidade financeira e ambiental das medidas energéticas aplicadas neste estudo, para que o gestor da edificação possa ter uma ideia dos custos envolvidos na implementação do *retrofit* proposto, usando como indicador de viabilidade o capital inicial necessário para colocar as ações em prática, o retorno do investimento (*payback*) e o fluxo de caixa acumulado durante a vida útil do projeto, além de medir a pegada de carbono associada à aplicação das medidas de eficiência do sistema.

7. APÊNDICES

7.1. Apêndice A

Tabela A1. Variáveis obtidas através de *site survey*, utilizadas em simulações.

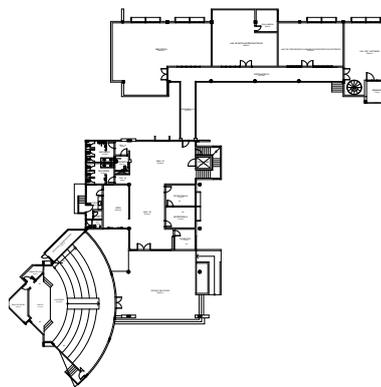
Variáveis	Descrição	Valores	Fonte
Dimensões arquitetônicas	Dimensões de paredes, molduras, teto, pisos e níveis.	<ul style="list-style-type: none"> Bloco A: Volume 2.693,38 m³; Área envolvente: 1382,98 m²; Fator de forma: 0,51; PAFT1 : 17,34 %. Bloco B: Volume 2.176,93 m³; Área envolvente: 990,86 m²; Fator de forma: 0,46; PAFT: 13,53%. Bloco C: Volume 450,24 m³; Área de envelopes; 272,7 m²; Fator de forma: 0,61; PAFT 5,16%. Blocos de referência: PAFT: 50%. 	Pesquisa de local/INI-C
Materiais de construção	Caracterização física dos materiais utilizados nas superfícies internas e externas dos blocos.	<ul style="list-style-type: none"> Cobertura com laje EPS, entreferro ≥ 5 cm e forro em gesso cartonado. Cobertura com laje simples de concreto de 10 cm e manta asfáltica. Cobertura com telhas termoacústicas, entreferro ≥ 5 cm. Paredes de 15, 16, 20, 25 e 32 cm, com argamassa interna e externa, tijolos cerâmicos com 6 furos em diversas condições. Pisos cerâmicos sobre laje maciça de concreto de 10cm e laje nervurada com EPS Fenestração de madeira e alumínio Vidro simples e transparente de 6 mm. Cobertura de referência: com telhas de cimento-amianto, entreferro ≥ 5cm e laje de concreto de 10cm. Parede de Referência: Parede de 14cm com camada de argamassa interna e externa de 2,5cm e 9cm de tijolos cerâmicos com 6 furos. 	Pesquisa de local/INI-C
Horários	Horários e dias do ano para ocupação de um espaço.	<ul style="list-style-type: none"> Dias de funcionamento: 03/01 a 07/11 (primeiro semestre); 24/08–12/12 (segundo semestre). Horário de ocupação: 8h às 18h para Bibliotecas, Laboratórios, Banheiros, Circulação e Armazenamento. 8–12h–14–18h: Auditório; Salas dos professores; Salas de aula; Sala de reuniões; Administração. 12–14h: Cantina. 	Pesquisa de local
Quantidade de ocupantes	Número de pessoas em ambientes condicionados artificialmente.	287 pessoas, distribuídas em 25 vagas, considerando ocupação máxima.	Pesquisa de local/INI-C
DPE ²	A energia elétrica do equipamento é distribuída por metro quadrado do espaço construído.	15 c/m ²	INI-C
DPI3	Potência elétrica da iluminação artificial por	9,34 W/m ² (valor real); Valor de referência: 15,5 W/m ²	Pesquisa de

Variáveis	Descrição	Valores	Fonte
	área iluminada do quarteirão.		local/INI-C
Densidade de ocupação	Quantidade de metros quadrados por pessoa no prédio.	1,5 m ² /pessoa	INI-C
Equipament o HVAC	Modelos de unidades de refrigeração para consulta em catálogos.	12.000; 18.000; 24.000; 30.000; 36.000; 58.000. (BTU/H) dividido entre 35 máquinas HVAC diferentes.	Pesquisa de local
IDRS	Coefficiente de desempenho de resfriamento sazonal para máquinas de ar-condicionado.	Valor de referência do coeficiente de desempenho de resfriamento: valor do modelo de referência 2,6/variável entre 2,51 e 3,40 em valores reais do modelo	Pesquisa de local / INI-C
Ponto de ajuste de temperatura	A temperatura alvo é usada para alcançar o conforto térmico no espaço.	24°C	INI-C
Tipologia	Atividade predominante no bloco em análise.	A.2. (Prédio educacional de nível universitário)	INI-C
Zona bioclimática	Classificação climática brasileira de diferentes regiões.	ZB8	INI-C

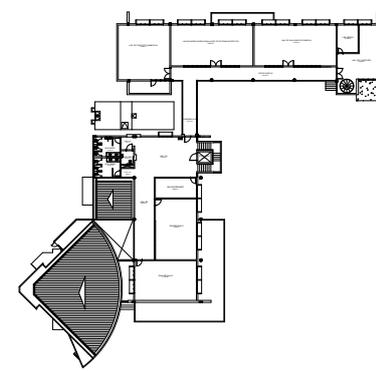
¹ Porcentagem total da área de abertura da fachada. ² Densidade de Potência do Equipamento. ³

Densidade de potência de iluminação.

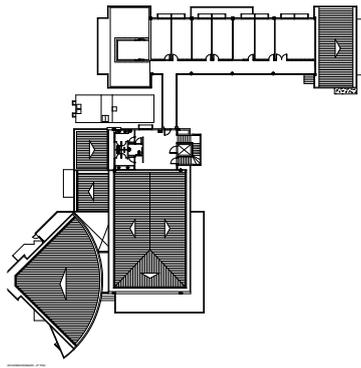
Figura B1. (a) Planta baixa; (b) planta do primeiro andar; (c) planta do segundo andar e (d) edifício dividido em três blocos.



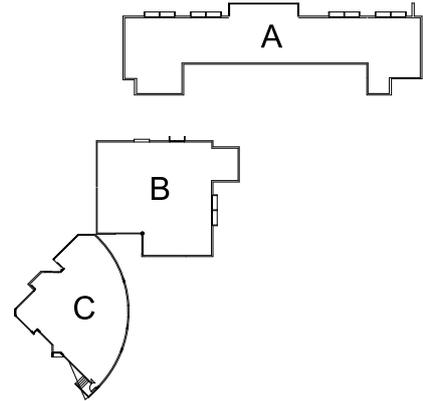
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora.

7.2. Apêndice B

Tabela B1. O consumo atual de energia do edifício CEAMAZON por bloco, para os casos reais e de referência com integração VE, em kWh.

Bloco	CEE,r efD	CEE,r efD	CR,re al	CR,ref D	CIL,r eal	CIL,r efD	CEQ, real	CEQ,r efD	CEP,re al	CEP,r efD
A	113.43 8,69	126.31 7,46	91.322, 08	101.45 4,94	4.163, 44	6.909, 35	17.95 3,17	17.953 ,17	181.501 .904	202.10 7,94
B	21.015, 11	26.847, 53	13.563, 58	15.508, 22	5.894, 96	9.782, 75	1.556, 57	1.556, 57	33.624, 18	42.956, 06
C	6.114,0 8	6.776,6 6	5.591,1 8	6.126,0 2	205.0 3	332,7 7	317,8 7	317,87	9.782,5 3	10.842, 65
VE	56.927, 00	56.927, 00							91.083, 21	91.083, 21
Tot al	197.49 4,88	216.86 8,65	110.47 6,84	123.08 9,18	10.26 3,43	17.02 4,87	19.82 7,61	19.827 ,61	315.991 ,82	346.98 9,86

Tabela B2. O consumo de energia da proposta de retrofit do edifício CEAMAZON por quarteirão, para os casos reais e de referência com VE maior integração, em kWh.

Bloco	CEE, Retrofit	CEE,r efD	CR, Retrofit	CR,r efD	CIL, Retrofit	CIL,r efD	CEQ, Retrofit	CEQ,r efD	CEP, Retrofit	CEP,r efD
A	60.676,51	126.317,46	39.348,90	101.454,94	3.374,44	6.909,35	17.953,17	17.953,17	97.082,42	202.107,94
B	11.209,21	26.847,53	4.874,82	15.508,22	4.777,82	9.782,75	1.556,57	1.556,57	17.934,74	42.956,06
C	2.938,25	6.776,66	2.457,86	6.126,02	162,52	332,77	317,87	317,87	4.701,20	10.842,65
VE*	56.927,00	56.927,00							91.083,21	91.083,21
Total 1	131.750,97	216.868,65	46.681,58	123.089,18	8.314,78	17.024,87	19.827,61	19.827,61	210.801,57	346.989,86
VE**	71.224,04	71.224,04							113958,46	113958,46
Total 2	146.048,01	231.165,69	46.681,58	123.089,18	8.314,78	17.024,87	19.827,61	19.827,61	233.676,82	369.865,11

* Integração VE antes do aumento do consumo de abastecimento.

** Integração VE após aumento no consumo de abastecimento.

7.3. Apêndice C

Tabela C1. Percentual de redução no consumo de energia e classificação de eficiência energética dos sistemas prediais existentes em cada bloco do edifício CEAMAZON.

Bloquear	Energia primária		Envoltória		HAVAC		Iluminação	
	RedCEP (%)	CEP Label	RedCgTT (%)	CgTT Label	RedCR (%)	CR Label	RedCIL (%)	CIL Label
A	10h20	C	12,97	A	9,99	D	39,74	B
B	21,72	B	22h28	A	12,54	D	39,74	B
C	9,78	C	33,82	A	8,73	D	38,39	B
Ponderada*	11h90	C	15,18	A	10h25	D	14,62	B

* Ponderado com integração de VE antes do aumento do consumo de abastecimento.

Tabela C2. Percentual de redução no consumo de energia e classificação de eficiência energética dos novos sistemas prediais propostos no retrofit de cada bloco do edifício CEAMAZON, com integração de VE antes e depois do aumento no consumo de abastecimento.

Bloquear	Energia primária		Envoltória		HAVAC		Iluminação	
	RedCEP (%)	CEP Label	RedCgTT (%)	CgTT Label	RedCR (%)	CR Label	RedCIL (%)	CIL Label
A	51,97	A	12,97	A	61,22	A	51.16	A
B	58,25	A	22h28	A	68,57	A	51.16	A
C	56,64	A	33,82	A	59,88	A	51.16	A
Ponderada*	30h15	A	15.18	A	62.07	A	51.16	A
Ponderada**	27h20	A	15.18	A	62.07	A	51.16	A

* Ponderado com integração de VE antes do aumento do consumo de abastecimento.

**Ponderado com integração de VE após aumento do consumo de abastecimento.

8. REFERÊNCIAS

ABDELSAMAD, S. F.; MORSI, W. G.; SIDHU, T. S. Probabilistic Impact of Transportation Electrification on the Loss-of-Life of Distribution Transformers in the Presence of Rooftop Solar Photovoltaic. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 6, n. 4, p. 1565–1573, out. 2015.

ABESCO, A. B. DE E. DE S. DE C. DE E. **O que é uma ESCO?** Disponível em: <<http://www.abesco.com.br/pt/o-que-e-uma-empresa-esco/>>. Acesso em: 7 set. 2022.

ABNT, A. B. DE N. T. **ABNT NBR 15220-3: Thermal performance in buildings - Part 3: Brazilian bioclimatic zones and building guidelines for low-cost houses.** , 2005. Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/24361/nbr15220-3-desempenho-termico-de-edificacoes-parte-3-zoneamento-bioclimatico-brasileiro-e-diretrizes-construtivas-para-habitacoes-unifamiliares-de-interesse-social>>. Acesso em: 31 maio. 2024

ABNT, A. B. DE N. T. **ABNT NBR ISO/CIE 8995-1. Lighting of work environments. Part 1: Interior.** , 2013. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?Q=anl3N29WeTBzeE1pa2xWUFpGMTNLRUcvWnpld1ZnZFEwaWZ1Qy94ZzVKND0=>>>. Acesso em: 15 abr. 2024

ABNT, A. B. DE N. T. **ABNT NBR IEC 61851-1 NBRIEC61851-1 Sistema recarga.** Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/33080/nbriec61851-1-sistema-de-recarga-condutiva-para-veiculos-eletricos-parte-1-requisitos-gerais>>. Acesso em: 22 ago. 2024a.

ABNT, A. B. DE N. T. **NBR IEC 61851-22 NBRIEC61851-22 Sistema de recarga condutiva.** Disponível em: <<https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/43052/nbriec61851-22-sistema-de-recarga-condutiva-para-veiculos-eletricos-parte-22-estacao-de-recarga-em-corrente-alternada-para-veiculos-eletricos>>. Acesso em: 22 ago. 2024b.

ABNT, A. B. DE N. T. **BR IEC 62196-1 NBRIEC62196-1 Plugues, tomadas.** Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/33232/nbriec62196-1-plugues-tomadas-tomadas-moveis-para-veiculos-eletricos-e-plugues-fixos-para-veiculos-eletricos-recarga-condutiva-para-veiculos-eletricos-parte-1-requisitos-gerais>>. Acesso em: 22 ago. 2024c.

ABNT, A. B. DE N. T. **ABNT NBR 17019 NBR17019 Instalações elétricas de baixa tensão -** Disponível em: <<https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/45925/nbr17019-instalacoes-eletricas-de-baixa-tensao-requisitos-para-instalacoes-em-locais-especiais-alimentacao-de-veiculos-eletricos>>. Acesso em: 22 ago. 2024a.

ABNT, A. B. DE N. T. **ABNT NBR 17019 - Instalações elétricas de baixa tensão - Requisitos para instalações em locais especiais - Alimentação de veículos elétricos.** Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/13344/abnt-nbr17019-instalacoes-eletricas-de-baixa-tensao-requisitos-para-instalacoes-em-locais-especiais-alimentacao-de-veiculos-eletricos>>. Acesso em: 23 nov. 2023b.

ABNT, A. B. DE N. T. **ABNT TR 15220-3-1: Thermal performance in buildings - Part 3-1: Brazilian bioclimatic zones and building guidelines for low-cost houses.** , 2024. Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/13893/abnt-tr15220-3-1-desempenho-termico-de-edificacoes-parte-3-1-zoneamento-bioclimatico-por-desempenho-lista-de-cidades-brasileiras>>. Acesso em: 15 jun. 2024

ABNT, A. B. DE N. T. **ABNT NBR 16401-1 NBR16401-1 Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos das instalações.** , [s.d.]. Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/27416/nbr16401-1-instalacoes-de-ar>>

condicionado-sistemas-centrais-e-unitarios-parte-1-projetos-das-instalacoes>. Acesso em: 22 jun. 2024

ABVE. **Frotas de veículos leves eletrificados no Brasil**. Disponível em: <<https://abve.org.br/bi-frotas/>>. Acesso em: 2 out. 2024a.

ABVE, A. B. DO V. E. **O Brasil está preparado para a grande mudança?** ABVE, 2022. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/o-brasil-esta-preparado-para-a-grande-mudanca/>>. Acesso em: 22 jul. 2022

ABVE, A. B. DO V. E. **Vendas de eletrificados em 2024 já ultrapassam total de 2023**. ABVE, 10 ago. 2024b. Disponível em: <<https://abve.org.br/vendas-de-eletrificados-em-2024-ja-ultrapassam-total-de-2023/>>. Acesso em: 22 ago. 2024

ABVE, A. B. DO V. E. **BEVs puxam crescimento de eletrificados no semestre**. ABVE, 2022b. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/bevs-puxam-aumento-de-eletrificados-no-semester/>>. Acesso em: 22 jul. 2022

AFFONSO, C. M.; KEZUNOVIC, M. **Probabilistic Assessment of Electric Vehicle Charging Demand Impact on Residential Distribution Transformer Aging**. 2018 IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS). *Anais...* Em: 2018 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROBABILISTIC METHODS APPLIED TO POWER SYSTEMS (PMAPS). jun. 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8440211>>. Acesso em: 23 abr. 2024

ANEEL, A. N. DE E. E. **RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.000, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021**. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-normativa-aneel-n-1.000-de-7-de-dezembro-de-2021-368359651>>. Acesso em: 22 ago. 2024.

ANEEL, A. N. DE E. E. **Veículos Elétricos**. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/veiculos-eletricos>>. Acesso em: 22 ago. 2024.

ANEEL, A. N. DE E. E. **Ranking da Tarifa Residencial: Relatório apresenta classificação das tarifas aplicadas aos consumidores residenciais**. Disponível em: <<https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/rankingtarifas>>. Acesso em: 17 ago. 2024.

BARAI, G. R.; KRISHNAN, S.; VENKATESH, B. **Smart metering and functionalities of smart meters in smart grid - a review**. 2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). *Anais...* Em: 2015 IEEE ELECTRICAL POWER AND ENERGY CONFERENCE (EPEC). out. 2015. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7379940>>. Acesso em: 21 ago. 2024

BARASSA, E.; CONSONI, F.; CRUZ, R. **Notas de aula do Curso de Extensão em Mobilidade Elétrica: Políticas, Planejamento e Oportunidades de Negócio**. Escola de Extensão da Universidade de Campinas (UNICAMP), 2022.

BELUSSI, L. et al. A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. *Journal of Building Engineering*, v. 25, p. 100772, 1 set. 2019.

BJELLAND, D.; BROZOVSKY, J.; HRYNYSZYN, B. D. Systematic review: Upscaling energy retrofitting to the multi-building level. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 198, p. 114402, 1 jul. 2024.

BRASIL. **PLS 340/2016 - Dispõe sobre a Isenção do Imposto sobre Produtos Industrializados – IPI, na aquisição de veículos elétricos, e dá outras providências.** Disponível em: <<https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/126913>>. Acesso em: 22 jun. 2024.

BRASIL. **PLS 454/2017 - dispõe sobre a redução de emissão de poluentes por veículos automotores e dá outras providências, para dispor sobre a vedação a comercialização e a circulação de automóveis movidos a combustíveis fósseis.** Disponível em: <<https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/131656>>. Acesso em: 22 ago. 2024a.

BRASIL. **PLS 304/2017 - Dispõe sobre a vedação a comercialização e a circulação de automóveis movidos a combustíveis fósseis.** Disponível em: <<https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/130612>>. Acesso em: 22 jun. 2024b.

BRASIL. **PL 5590/2019 - Institui tarifa para custear a implantação de pontos de recarga para veículos elétricos e híbridos e dá outras providências.** Disponível em: <<https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/139468>>. Acesso em: 22 jun. 2024.

BRASIL. **PL 808/2021 - Dispõe sobre a instalação obrigatória de infraestrutura para a recarga de veículos elétricos nas edificações de uso coletivo, a ser regulamentada pelos municípios.** Disponível em: <<https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/147296>>. Acesso em: 22 jun. 2024.

BRASIL. **PL 403/2022 - Concede isenção do Imposto sobre Importação para veículos elétricos e híbridos.** Disponível em: <<https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/151951>>. Acesso em: 22 jun. 2024.

BRASIL, G. B. C. **Zero Energy: é possível ter edifícios totalmente sustentáveis e autossuficientes energeticamente? GBC Brasil**, 13 out. 2020. Disponível em: <<https://www.gbcbrasil.org.br/zero-energy-e-possivel-ter-edificios-totalmente-sustentaveis-e-autossuficientes-energeticamente/>>. Acesso em: 6 out. 2022

BRASIL; ME, M. D. ECONOMIA.; INMETRO, I. N. DE M., Qualidade e Tecnologia. **Portaria nº 309, de 06 de setembro de 2022.** Disponível em: <<https://pbeedifica.com.br/portariaconsolidada>>. Acesso em: 31 maio. 2024.

CAO, S. Comparison of the energy and environmental impact by integrating a H2 vehicle and an electric vehicle into a zero-energy building. **Energy Conversion and Management**, v. 123, p. 153–173, 1 set. 2016.

CASTILLO-CALZADILLA, T. et al. E-Mobility in Positive Energy Districts. **Buildings**, v. 12, n. 3, p. 264, mar. 2022.

CAVALCANTE, I. et al. Electric Vehicles Charging Using Photovoltaic Energy Surplus: A Framework Based on Blockchain. **Energies**, v. 16, n. 6, p. 2694, jan. 2023.

CHANG, S. et al. Energy infrastructure transitions with PV and EV combined systems using techno-economic analyses for decarbonization in cities. **Applied Energy**, v. 319, p. 119254, 1 ago. 2022.

CHAVES, A. F. et al. **3º Anuário Brasileiro da Mobilidade Elétrica: Rumo à expansão do mercado, políticas e tecnologias no Brasil.** Disponível em: <<https://pnme.org.br/biblioteca/3o-anuario-brasileiro-da-mobilidade-eletrica/>>. Acesso em: 9 abr. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. **DIRECTIVA 2009/33/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 23 de Abril de 2009 relativa à promoção de veículos de transporte rodoviário**

não poluentes e energeticamente eficientes. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32009L0033&from=EN>>. Acesso em: 14 jul. 2022.

COMISSÃO EUROPEIA. Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the energy performance of buildings (recast). . 2021.

COMISSÃO EUROPEIA; PARLAMENTO EUROPEU. **Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council.** Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0559>>. Acesso em: 21 abr. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA; PARLAMENTO EUROPEU. **Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast) (Text with EEA relevance).** Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj>>. Acesso em: 21 abr. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA; PARLAMENTO EUROPEU. **Nearly zero-energy buildings.** Disponível em: <https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_pt>. Acesso em: 9 jul. 2022.

COPEL, C. P. DE ENERGIA. **Norma Técnica COPEL - NTC 902210. Fornecimento de Energia: Estações de recarga de veículo elétrico.** Disponível em: <<https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Copel-publica-norma-para-recarga-de-veiculos-eletricos>>. Acesso em: 22 ago. 2024.

CUNHA, R. **Veículos elétricos: A estrutura do mercado e os regulamentos dos VEs. Revista Fotovoltot. Ano 7, nº 42. Editora aranda. - Outubro - 2021.** Disponível em: <https://issuu.com/aranda_editora/docs/v/1>. Acesso em: 18 set. 2022.

DOS SANTOS JUNIOR, L. C. et al. Demand-Side Management Optimization Using Genetic Algorithms: A Case Study. **Energies**, v. 17, n. 6, p. 1463, jan. 2024.

EDGE BUILDINGS. **EDGE Zero Carbon Certification.** Disponível em: <<https://edgebuildings.com/certify/certification/>>. Acesso em: 7 maio. 2024.

ELETROBRAS, C. E. B. S. A. **Chamada Pública PROCEL Edifica - NZEB Brasil.** Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/Chamada-Publica-Procet-Edifica2019.aspx>>. Acesso em: 25 out. 2022.

ELI, L. G. et al. **Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto ground domain no programa EnergyPlus – Versão 9.0.1.** Disponível em: <<https://labeee.ufsc.br/pt-br/node/805>>. Acesso em: 21 abr. 2024.

ENEL. **Especificação Técnica nº 280: Conexão de Recarga para Veículos Elétricos.** Disponível em: <<https://www.eneldistribuicao.com.br/rj/normastecnicas.aspx>>. Acesso em: 22 ago. 2024.

ENERGISA. **Norma de Distribuição Unificada NDU – 042: Fornecimento de energia para estações de recarga de veículo elétrico. Norma Técnica ENERGISA/GTD-NRM/Nº 023/2021.** , 2021. Disponível em: <<https://www.energisa.com.br/Documents/Normas%20t%C3%A9cnicas/NDU/>>. Acesso em: 20 maio. 2024

ENERGY INNOVATION. **Energy Policy Solutions: Electric Vehicle Policies.** Disponível em: <<https://docs.energypolicy.solutions/dcs/policies/electric-vehicle-policies/>>. Acesso em: 26 mar. 2023.

ENERGY INNOVATION. **EV Charger Deployment | Energy Policy Simulator Documentation**. Disponível em: <<https://docs.energypolicy.solutions/ev-charger-deployment.html>>. Acesso em: 26 mar. 2023.

EPE, E. DE P. E. **Relatório Final. Balanço Energético Nacional 2023: Ano base 2022. Rio de Janeiro**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>>. Acesso em: 25 mar. 2024a.

EPE, E. DE P. E. **Atlas de Eficiência Energética Brasil 2023**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-de-eficiencia-energetica-brasil-2023>>. Acesso em: 22 ago. 2024b.

EPE, E. DE P. E. **Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas)**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 24 jul. 2024c.

EQUATORIAL ENERGIA. **Norma Técnica nº 042: Critérios de Conexão de Conexão para Estações de Recarga de Veículos Elétricos**. Disponível em: <<https://ceee.equatorialenergia.com.br/ceee/normas-tecnicas/normas-de-fornecimento/minutas-comunicado-revisao-normas-eqtl-1/nt-042-criterios-de-conexao-de-conexao-para-estacoes-de-recarga-de-veiculos-eletricos>>. Acesso em: 22 ago. 2024.

ETEMAD, A. et al. Assessing strategies for retrofitting cooling systems in historical buildings. **Energy Reports**, v. 11, p. 1503–1516, 1 jun. 2024.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **Final energy consumption in the households sector, EU-28 — European Environment Agency**. Data Visualization. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/total-final-energy-consumption-by-sector-4>>. Acesso em: 24 out. 2022.

FACHRIZAL, R. et al. Optimal PV-EV sizing at solar powered workplace charging stations with smart charging schemes considering self-consumption and self-sufficiency balance. **Applied Energy**, v. 307, p. 118139, 1 fev. 2022.

GBC BRASIL, G. C. B. **GBC Brazil Zero Energy**. Disponível em: <<https://www.gbcbrazil.org.br/certificacao/zero-energy/>>. Acesso em: 18 out. 2022.

GBC Zero Energy. GBC Brasil, 2024. Disponível em: <<https://www.gbcbrazil.org.br/certificacao/zero-energy/>>. Acesso em: 21 ago. 2024

GERWEN, R. VAN; JAARSMA, S.; WILHITE, R. **Smart Metering**. Disponível em: <<https://www.idc-online.com/resources/technical-references/electrical-engineering-technical-references.html>>. Acesso em: 21 ago. 2024.

GILLERAN, M. et al. Impact of electric vehicle charging on the power demand of retail buildings. **Advances in Applied Energy**, v. 4, p. 100062, 19 nov. 2021.

GIZ. **Caderno técnico de Referência: Eficiência Energética na mobilidade Urbana**. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes/mobilidade-urbana>>. Acesso em: 19 set. 2022.

GIZ, D. G. FÜR I. Z. **Guia Prático Para Preparação de Investimentos Urbanos - Eficiência Energética e Energia Solar Fotovoltaica em Prédios Públicos**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/felicity/caixa-de-ferramentas/guia-pratico>>

para-preparacao-de-investimentos-urbanos-ee-e-fv-em-predios-publicos/guia-pratico>. Acesso em: 11 set. 2022.

GOIÁS. **Norma Técnica 45/2024. Sistemas de Recarga de Veículos Eletrificados. Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás - CBMGO. Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás**, 2024. Disponível em: <<https://www.bombeiros.go.gov.br/sem-categoria/normas-tecnicas-do-cbmgo-2.html>>. Acesso em: 22 ago. 2024

HUANG, P. et al. A coordinated control to improve performance for a building cluster with energy storage, electric vehicles, and energy sharing considered. **Applied Energy**, v. 268, p. 114983, 15 jun. 2020.

IEA, I. E. A. **Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency – Analysis**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/capturing-the-multiple-benefits-of-energy-efficiency>>. Acesso em: 14 abr. 2024.

IEA, I. E. A. **Global EV Outlook 2023 – Analysis**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>>. Acesso em: 15 abr. 2024.

IEA, I. E. A. **Global EV Outlook 2024 – Analysis**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>>. Acesso em: 22 ago. 2024.

IFC, I. F. C.; BANCO MUNDIAL. **Certificação EDGE**. Disponível em: <<https://edge.gbci.org/certification#ZeroCarbon>>. Acesso em: 23 mar. 2024.

INMET, I. N. DE M. **Instrução Normativa N° 2, de 04 de junho de 2014**. Disponível em: <<https://www.gov.br/compras/pt-br/aceso-a-informacao/legislacao/instrucoes-normativas/instrucao-normativa-no-2-de-04-de-junho-de-2014>>. Acesso em: 22 jun. 2024.

INMET, I. N. DE M. **Climate Archives**. Disponível em: <<http://pbeedifica.com.br/arquivos-climaticos>>. Acesso em: 31 maio. 2024.

INMETRO, I. N. DE M., Qualidade e Tecnologia. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C). PORTARIA N° 309/2022**. Disponível em: <<https://pbeedifica.com.br/inic>>. Acesso em: 9 abr. 2024a.

INMETRO, I. N. DE M., Qualidade e Tecnologia. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R). Portaria n° 309/2022**. Disponível em: <<https://pbeedifica.com.br/inir>>. Acesso em: 1 jun. 2024b.

JANG, H. S. et al. Apartment-level electric vehicle charging coordination: peak load reduction and charging payment minimization. **Energy and Buildings**, v. 223, p. 110155, 15 set. 2020.

KABALCI, Y. A survey on smart metering and smart grid communication. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 302–318, 1 maio 2016.

KATSAPRAKAKIS, D. A. et al. Rational Use of Energy in Sports Centres to Achieve Net Zero: The SAVE Project (Part A). **Energies**, v. 16, n. 10, p. 4040, jan. 2023.

KETENG, J. et al. **Photovoltaic optimal configuration of net zero energy building based on whole-process energy efficiency**. 2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). **Anais...** Em: 2022 IEEE 5TH INTERNATIONAL ELECTRICAL AND ENERGY CONFERENCE (CIEEC). maio 2022. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9846453>>. Acesso em: 15 abr. 2024

LEIVA, J.; PALACIOS, A.; AGUADO, J. A. Smart metering trends, implications and necessities: A policy review. 2016.

LI, Y. et al. Event-Triggered-Based Distributed Cooperative Energy Management for Multienergy Systems. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 15, n. 4, p. 2008–2022, abr. 2019a.

LI, Y. et al. Review of building energy performance certification schemes towards future improvement. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 113, p. 109244, 1 out. 2019b.

LIAO, W. et al. A comparative study of demand-side energy management strategies for building integrated photovoltaics-battery and electric vehicles (EVs) in diversified building communities. **Applied Energy**, v. 361, p. 122881, 1 maio 2024.

MELO, A. P. **Desenvolvimento de um método para estimar o consumo de energia de edificações comerciais através da aplicação de redes neurais | Laboratório de Eficiência Energética em Edificações**. Disponível em: <<https://labeee.ufsc.br/node/381>>. Acesso em: 24 out. 2022.

MILIEU; PANTEIA; TRINOMICS. **Promotion of e-mobility through buildings policy: final report. Directorate General for Energy (European Commission)**. LU: Serviço das Publicações da União Europeia, 2022.

MOREIRA, G. A. M. et al. **Demand Side Management Strategies for the Introduction of Electric Vehicles: A Case Study**. 2023 IEEE Colombian Caribbean Conference (C3). **Anais...** Em: 2023 IEEE COLOMBIAN CARIBBEAN CONFERENCE (C3). nov. 2023. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10436204>>. Acesso em: 21 abr. 2024

MOUSAVI, S. et al. Data-driven prediction and optimization toward net-zero and positive-energy buildings: A systematic review. **Building and Environment**, v. 242, p. 110578, 15 ago. 2023.

MUNKHAMMAR, J. et al. Household electricity use, electric vehicle home-charging and distributed photovoltaic power production in the city of Westminster. **Energy and Buildings**, v. 86, p. 439–448, 1 jan. 2015.

MUNKHAMMAR, J.; GRAHN, P.; WIDÉN, J. Quantifying self-consumption of on-site photovoltaic power generation in households with electric vehicle home charging. **Solar Energy**, v. 97, p. 208–216, 1 nov. 2013.

NEOCHARGE. **Frota de Carros Elétricos no Brasil**. Disponível em: <<https://www.neocharge.com.br/carros-eletricos-brasil>>. Acesso em: 17 mar. 2024.

NOOR-A-RAHIM, MD. et al. 6G for Vehicle-to-Everything (V2X) Communications: Enabling Technologies, Challenges, and Opportunities. **Proceedings of the IEEE**, v. 110, n. 6, p. 712–734, jun. 2022.

PALOMINO, A.; PARVANIA, M. Data-Driven Risk Analysis of Joint Electric Vehicle and Solar Operation in Distribution Networks. **IEEE Open Access Journal of Power and Energy**, v. 7, p. 141–150, 2020.

PARK, H. et al. Energy retrofit technology for modern and contemporary educational historical buildings considering preservation and utilization aspects. **Energy Reports**, v. 11, p. 3995–4007, 1 jun. 2024.

PARK, M. et al. Multi-objective building energy system optimization considering EV infrastructure. **Applied Energy**, v. 332, p. 120504, 15 fev. 2023a.

PARK, S. et al. Design and Implementation of a Futuristic EV Energy Trading System (FEETS) Connected with Buildings, PV, and ESS for a Carbon-Neutral Society. **Buildings**, v. 13, n. 3, p. 829, mar. 2023b.

PBE EDIFICA, P. B. DE E. DE E. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas - RTQ-C. Portaria: nº 372/2010, com alterações das portarias: nº17 de 2012 e nº299 de 2013.** Disponível em: <<https://pbeedifica.com.br/etiquetagem/comercial/manuais>>. Acesso em: 17 ago. 2024.

PINTO OLIVEIRA, D. C.; CHIANCA PIMENTEL FILHO, M.; ALENCAR FREITAS, A. A. **Energy Efficiency Analysis in Buildings of a University Campus Using the PROCEL RTQ-C.** 2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON). **Anais...** Em: 2021 14TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON). ago. 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9529606>>. Acesso em: 15 abr. 2024

PNME, P. N. DE M. E. **Eletropostos: instalação de equipamentos de recarga para grandes demandas.** Disponível em: <<https://pnme.org.br/biblioteca/eletropostos-instalacao-de-equipamentos-de-recarga-para-grandes-demandas/>>. Acesso em: 26 maio. 2024.

PNME, P. N. DE M. E. **1º Anuário Brasileiro da Mobilidade Elétrica.** PNME, 2021. Disponível em: <<https://www.pnme.org.br/biblioteca/1o-anuario-brasileiro-da-mobilidade-eletrica/>>. Acesso em: 25 out. 2022

PNME, P. N. DE M. E. **MAPEAMENTO E DIAGNÓSTICO DAS INICIATIVAS SOBRE MOBILIDADE ELÉTRICA NO BRASIL.** PNME, 2022a. Disponível em: <<https://www.pnme.org.br/biblioteca/mapeamento-e-diagnostico-das-iniciativas-sobre-mobilidade-eletrica-no-brasil/>>. Acesso em: 12 ago. 2022

PNME, P. N. DE M. E. **Eletromobilidade: Uma das soluções para alcançar a neutralidade de carbono.** PNME, 2022b. Disponível em: <<https://pnme.org.br/biblioteca/eletromobilidade-uma-das-solucoes-para-alcancar-a-neutralidade-de-carbono/>>. Acesso em: 23 nov. 2023

PROCEL, E. **Etiquetagem de Eficiência Energética em Edificações. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica em Edificações (PBE Edifica).** Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BD3C90184-7BCF-454B-A22E-31B8F2E1EE3C%7D&Team=¶ms=itemID=%7BC28C2387-3172-4D9F-B769-EB386F0961E5%7D;LumisAdmin=1;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>>. Acesso em: 25 fev. 2022.

QU, Y. Energy Saving Retrofitting of Existing Public Building: A Case Study in Shanghai Area. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 701, n. 1, p. 012057, mar. 2021.

QUDDUS, M. A. et al. A collaborative energy sharing optimization model among electric vehicle charging stations, commercial buildings, and power grid. **Applied Energy**, v. 229, p. 841–857, 1 nov. 2018.

ROAF, S.; CRICHTON, D.; NICOL, F. **A adaptação de edificações e cidades às mudanças climáticas: Um guia de sobrevivência para o século XXI.** Porto Alegre, Brazil: Bookman, 2009.

ROHLOFF, A.; ROBERTS, J.; GOLDSTEIN, N. Impacts of Incorporating Electric Vehicle Charging into Zero Net Energy (ZNE) Buildings and Communities. n. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 2010.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos. 1. ed. Florianópolis – SC: LABSOLAR/UFSC, 2004. v. 1. 114p.** [s.l.: s.n.].

SÃO PAULO (SP). **Lei nº 17.336 de 30 de março de 2020. Dispõe sobre a obrigatoriedade da previsão de solução para carregamento de veículos elétricos em edifícios (condomínios) residenciais e comerciais, no Município de São Paulo, e dá outras providências. São Paulo, SP.** Disponível em: <<http://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/>>. Acesso em: 22 ago. 2024a.

SÃO PAULO (SP). **Lei Municipal 17.336/2020 - Dispõe sobre a obrigatoriedade da previsão de solução para carregamento de veículos elétricos em edifícios (condomínios) residenciais e comerciais, no Município de São Paulo, e dá outras providências.** Disponível em: <<http://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/>>. Acesso em: 22 ago. 2024b.

SÃO PAULO (SP). **Lei 17.563/2021 - Adiciona a possibilidade de utilização dos créditos gerados em favor dos proprietários de veículos elétricos ou movidos a hidrogênio para o pagamento do IPTU e dá outras providências.** Disponível em: <<http://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/>>. Acesso em: 22 ago. 2024.

SEHAR, F.; PIPATTANASOMPORN, M.; RAHMAN, S. Demand management to mitigate impacts of plug-in electric vehicle fast charge in buildings with renewables. **Energy**, v. 120, p. 642–651, 1 fev. 2017.

SHANKAR, A.; VIJAYAKUMAR, K.; BABU, B. C. Energy saving potential through artificial lighting system in PV integrated smart buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 43, p. 103080, 1 nov. 2021.

SILVA, L. E. S. E et al. Probabilistic operational costs assessment of combined PV–PEV connections in LV distribution networks. **Electric Power Systems Research**, v. 214, p. 108906, 15 jan. 2023.

SOARES GERALDI, M. et al. Assessment of the energy consumption in non-residential building sector in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 273, p. 112371, 15 out. 2022.

SØRENSEN, Å. L. et al. Energy profiles and electricity flexibility potential in apartment buildings with electric vehicles – A Norwegian case study. **Energy and Buildings**, v. 305, p. 113878, 15 fev. 2024.

SOUZA, A. C. D. B. DE S. **Eficiência Energética de Edificações Visando a Certificação pelo RTQ-C e a Análise Energético-Financeira e Ambiental.** Dissertação de Mestrado—[s.l.] Universidade Federal do Pará-UFPA, 2017.

TABORA, J. M. et al. Hybrid System Assessment in On-Grid and Off-Grid Conditions: A Technical and Economical Approach. **Energies**, v. 14, n. 17, p. 5284, jan. 2021.

TABORA, J. M. et al. **An Assessment of Power Factor Correction Strategies from Billing and Measurement Systems: A Case Study in Medium Voltage Consumers.** 2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON). **Anais...** Em: 2023 15TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON). nov. 2023. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10374990>>. Acesso em: 21 abr. 2024

TIE, S. F.; TAN, C. W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 82–102, 1 abr. 2013.

UNIÃO EUROPEIA. **DIRECTIVA 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010. Relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação).** Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A02010L0031-20181224>>. Acesso em: 4 jan. 2024a.

LEED. A Certificação LEED. Disponível em: https://aressustentabilidade.com.br/certificacao-leed/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwqre1BhAqEiwA7g9Qht0ke4xgTicGY4mcC8ln5tdD1Y5AdYrWmhmGsyjliUeUzPmoX0yKVhoCNm8QAvD_BwE. Acesso em: 03 de ago. de 2024.

PNME, P. N. DE M. E. 3o Anuário Brasileiro da Mobilidade Elétrica. PNME, 2023. Disponível em: <https://pnme.org.br/wp-content/uploads/2023/12/3o-Anuario-Brasileiro-de-Mobilidade-Eletrica.pdf>. Acesso em: 03 de ago. de 2024.

ABVE, A. B. DO V. E. Elétricos crescem em todas as regiões do Brasil. ABVE, 2024.

Disponível em: <https://abve.org.br/veiculos-eletricos-crescem-em-todo-o-pais/>.

Acesso em: 03 de ago. de 2024.

UNIÃO EUROPEIA. **Nearly-zero energy and zero-emission buildings**. Disponível em: <https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-and-zero-emission-buildings_en>. Acesso em: 21 abr. 2024.

UNIÃO EUROPEIA, U. **Desempenho energético dos edifícios**. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:en0021#keyterm_E0001>. Acesso em: 9 jul. 2022b.

UNIÃO EUROPEIA, U. **Commission Recommendation (EU) 2016/1318 of 29 July 2016 on guidelines for the promotion of nearly zero-energy buildings and best practices to ensure that, by 2020, all new buildings are nearly zero-energy buildings, C/2016/4392**. Website. Disponível em: <<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f2a71495-5876-11e6-89bd-01aa75ed71a1/language-en>>. Acesso em: 3 jan. 2024.

UNIÃO EUROPEIA, U. **Energy performance of buildings directive. European Commission**. Disponível em: <https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en>. Acesso em: 14 jul. 2022a.

UNIÃO EUROPEIA, U. **Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast)**. , 1 jan. 2021b. Disponível em: <<http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/2021-01-01/por>>. Acesso em: 14 jul. 2022

URIBE-PÉREZ, N. et al. State of the Art and Trends Review of Smart Metering in Electricity Grids. **Applied Sciences**, v. 6, n. 3, p. 68, mar. 2016.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Table of Contents: Input Output Reference — EnergyPlus 24.1**. Disponível em: <<https://bigladdersoftware.com/epx/docs/24-1/input-output-reference/>>. Acesso em: 31 maio. 2024.

WANG, Z. et al. Integration of plug-in hybrid electric vehicles into energy and comfort management for smart building. **Energy and Buildings**, v. 47, p. 260–266, 1 abr. 2012.

ZHANG, N. et al. Event-Triggered Distributed Hybrid Control Scheme for the Integrated Energy System. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 18, n. 2, p. 835–846, fev. 2022.

ZHOU, Y. et al. Energy integration and interaction between buildings and vehicles: A state-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 114, p. 109337, 1 out. 2019.

ZHU, Y. et al. Electric Vehicle Charging Facility Configuration Method for Office Buildings. **Buildings**, v. 13, n. 4, p. 906, abr. 2023.

EPE, E. DE P. E. Atlas da Eficiência Energética Brasil 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-788/Atlas%20da%20Efici%C3%Aancia%20Energ%C3%A9tica%20Brasil%202023.pdf>>. Acesso em: 03 de ago. de 2024.

PROCEL, E. Etiquetagem de Eficiência Energética em Edificações. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica em Edificações (PBE Edifica). Disponível em:

<<https://www.pbeedifica.com.br/sobre>>. Acesso em: 03 de ago. de 2024.

GBC BRAZIL, G. C. B. GBC Brazil Zero Energy. Disponível em: <<https://www.gbcbrazil.org.br/certificacao/zero-energy/>>. Acesso em: 03 de ago. de 2024.