



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

CYBELLE SAAD SABINO DE FREITAS FARIA

REQUALIFICAÇÃO ENERGÉTICA E AMBIENTAL:

**Otimização multiobjetivos do desempenho de um edifício público na cidade
de Goiânia**

Brasília-DF

2025

CYBELLE SAAD SABINO DE FREITAS FARIA

REQUALIFICAÇÃO ENERGÉTICA E AMBIENTAL:

**Otimização multiobjetivos do desempenho de um edifício público na cidade
de Goiânia**

Tese de doutorado apresentada à Banca Examinadora,
como requisito para a obtenção do título de Doutora
em Arquitetura e Urbanismo pelo Programa de Pós-
graduação de Arquitetura e Urbanismo da
Universidade e Brasília, FAU-UNB.

Orientadora: Dra. Chenia Rocha Figueiredo

BRASÍLIA – DF

2025

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER
MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE
QUE CITADA A FONTE

BANCA DEFESA DE TESE

Orientadora - Profa. Dra. Chenia Rocha Figueiredo
Universidade de Brasília

Examinador externo - Prof. Dr. Lucas Rosse Caldas
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Examinador externo - Prof. Dr. José Marcelo Martins Medeiros
Universidade Federal do Tocantins

Examinador Interno - Prof. Dr. Daniel Richard Sant'Ana
Universidade de Brasília

Brasília, 29 de abril de 2025.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa o ápice de uma jornada de aprendizado e dedicação que não teria sido possível sem o apoio de muitas pessoas e instituições. Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela força que me concedeu, ao longo dessa trajetória, guiando e me promovendo paz, sabedoria e paciência, para passar por todas as etapas que me trouxeram até aqui.

À minha orientadora, Dra. Chenia Rocha Figueiredo, minha gratidão por sua confiança incondicional em meu potencial, o estímulo contínuo que me impulsionou a ir além e, acima de tudo, sua sabedoria acadêmica e de vida que guiaram este trabalho. Sua dedicação e a generosidade em compartilhar seu vasto conhecimento foram decisivas para a conclusão desta tese.

Aos membros da banca examinadora, Professores Dr. Lucas Rosse Caldas, Dr. José Marcelo Martins Medeiros e Dr. Daniel Richard Sant'Ana, meu sincero reconhecimento. Agradeço imensamente por dedicarem seu tempo à leitura atenta e à análise crítica deste estudo. Suas arguições pertinentes e valiosas contribuições enriqueceram significativamente este trabalho, elevando sua qualidade.

À Universidade de Brasília (UnB) e, em especial, ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PPG-FAU/UnB), minha gratidão por proporcionarem um ambiente acadêmico fértil e toda a infraestrutura necessária para o desenvolvimento desta pesquisa de doutorado. Estendo meu agradecimento aos eficientes e solícitos funcionários do Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, cujo suporte administrativo foi fundamental em todas as etapas, desburocratizando processos e permitindo que eu me concentrasse na pesquisa.

Um agradecimento especial ao Tribunal de Justiça do Estado de Goiás, que, gentilmente concedeu acesso a informações e dados cruciais para a pesquisa. Essa colaboração institucional foi a base empírica que validou as análises apresentadas neste trabalho.

Aos meus dedicados colegas da Diretoria de Engenharia e Arquitetura, agradeço imensamente. Em particular, a José Eduardo Stort Fernandes, Camila de Castro Alves, Liliane Taveira Conceição e Neuton Xavier de Oliveira, por sua generosidade intelectual, pelas discussões construtivas que sempre resultavam em novos detalhes que somaram muito no trabalho.

Por fim, e com um carinho que transcende qualquer esforço acadêmico, dedico meu mais profundo agradecimento à minha família, meu maior suporte e fonte de inspiração. Aos meus pais, que não estão mais neste plano, a minha Tia Celeste pela inestimável ajuda durante momentos cruciais deste trabalho. Ao meu querido Pedro Ivo, pela paciência inesgotável, pela compreensão dos meus longos períodos de ausência e por ser a força silenciosa que me impulsionou a cada

dia. Às minhas queridas filhas, Ana Luisa, Laura e Beatriz, por seu apoio incondicional, por compreenderem a minha indisponibilidade em tantos momentos importantes de suas vidas e por serem a motivação diária que me lembra do propósito de todo esse esforço.

A cada um que, de uma forma ou de outra, contribuiu para que este sonho se tornasse realidade, meu mais profundo e sincero agradecimento.

RESUMO

A indústria da construção civil tem um papel significativo no consumo de energia e nas emissões de gases de efeito estufa. Por isso, é fundamental repensar as estratégias de projeto arquitetônico e a seleção de materiais, para garantir conforto, com eficiência energética e menor impacto ambiental. Estudos indicam que a requalificação energética, ou a concepção de edifícios eficientes pode reduzir drasticamente o consumo de energia, ao longo de sua vida útil. Este estudo aprofunda as questões que afetam o desempenho energético e ambiental de edificações, tanto na fase de pré-uso quanto na operacional, avaliando o potencial de redução do consumo de energia elétrica e das emissões de CO₂, por meio da otimização multiobjetivo, considerando variáveis, como a composição do envelope construtivo, a integração de energias renováveis e a modificação do cronograma de uso. Para isso, foram utilizadas ferramentas de simulação computacional e Avaliação do Ciclo de Vida, em um edifício público, em Goiânia. A simulação termoenergética, realizada com o software *EnergyPlus*, revelou que o sistema de climatização artificial é responsável por 75,38% do consumo de energia elétrica do edifício. Com a implementação das melhores estratégias, é possível reduzi-lo em 34,55%. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) demonstrou que a fase de pré-uso do edifício contribui com mais emissões de carbono do que a fase operacional. Os materiais que mais impactaram o Potencial de Aquecimento Global foram o concreto, o aço, o granito e o tijolo. As estratégias adotadas no estudo podem reduzir as emissões de carbono da fase operacional em, aproximadamente, 30%, gerando um pequeno aumento no carbono incorporado, devido à implementação dessas medidas. O estudo enfatiza que o desempenho ambiental das edificações está diretamente ligado ao consumo de energia. Assim, a análise das características do edifício, especialmente a composição do envelope construtivo, na fase de projeto e na requalificação, é crucial, dada a sua influência no consumo energético. Além disso, destaca-se a contribuição positiva da adoção e aprimoramento de fontes de energia renováveis, que geram energia no local e são conectadas à rede. Por fim, a gestão do uso da energia nas edificações pode controlar e monitorar o consumo de energia, de forma inteligente, consolidando a ideia de que a otimização energética e ambiental das edificações é um esforço contínuo que envolve múltiplos aspectos.

PALAVRAS-CHAVE: Desempenho energético; Desempenho Ambiental; Eficiência energética; Redução de emissões; Otimização multiobjetivos; Simulação computacional; Avaliação do Ciclo de Vida.

ABSTRACT

The construction industry plays a significant role in energy consumption and greenhouse gas emissions. Therefore, it is essential to rethink architectural design strategies and material selection to ensure comfort with energy efficiency and reduced environmental impact. Studies indicate that energy requalification or the design of efficient buildings can drastically reduce energy consumption throughout their useful life. This study delves into the issues that affect the energy and environmental performance of buildings, both in the pre-use and operational phases, evaluating the potential for reducing electricity consumption and CO₂ emissions through multi-objective optimization, considering variables such as the composition of the building envelope, the integration of renewable energy sources and the modification of the usage schedule. For this purpose, computer simulation and Life Cycle Assessment tools were used in a public building in Goiânia. The thermoenergetic simulation performed with the EnergyPlus software revealed that the artificial air conditioning system is responsible for 75.38% of the building's electricity consumption. By implementing the best strategies, it is possible to reduce energy consumption by 34.55%. The Life Cycle Assessment (LCA) demonstrated that the pre-use phase of the building contributes more carbon emissions than the operational phase. The materials that had the greatest impact on the Global Warming Potential were concrete, steel, granite and brick. The strategies adopted in the study can reduce carbon emissions in the operational phase by approximately 30%, generating a small increase in embodied carbon due to the implementation of these measures. The study emphasizes that the environmental performance of buildings is directly linked to energy consumption. Therefore, the analysis of the characteristics of the building, especially the composition of the building envelope in the design phase and in the requalification, is crucial, given its influence on energy consumption. In addition, the positive contribution of the adoption and improvement of renewable energy sources, which generate energy on site and are connected to the grid, is highlighted. Finally, managing energy use in buildings can control and monitor energy consumption intelligently, consolidating the idea that energy and environmental optimization of buildings is an ongoing effort that involves multiple aspects.

KEYWORDS: Energy performance; Environmental performance; Energy efficiency; Emissions reduction; Multi-objective optimization; Computer simulation; Life cycle assessment.

Lista de figuras

Figura 2.1 - Consumo de energia elétrica por área de todas as edificações da amostra	17
Figura 2.2 – Etapas da simulação computacional no EnergyPlus	20
Figura 2.3 - Propriedades do envelope construtivo	23
Figura 2.4 – Projeção da composição da capacidade instalada total por fonte energética	31
Figura 2.5 – Produção de energia solar em MJ/m ² .dia do território nacional	33
Figura 2.6 – Composição do Valor final da Energia Elétrica	37
Figura 2.7 – Principais fatores de influência para a implementação de edifícios com zero emissão de carbono	40
Figura 2.8 – Potencial de redução de emissões de carbono em usos finais até 2050	41
Figura 2.9 – Estágios e respectivos módulos de avaliação do ciclo de vida das edificações.....	44
Figura 2.10 – Estrutura de Avaliação do Ciclo de Vida	49
Figura 2.11 – Possíveis funções-objetivo e as principais variáveis de projeto no desempenho energético e ambiental das edificações	50
Figura 3.1 – Estrutura metodológica utilizada para o presente estudo.....	58
Figura 3.2 – Mapa da cidade de Goiânia com a localização do Bairro Park Lozandes	59
Figura 3.3 – Localização do Fórum Cível na Avenida Olinda e edificações próximas	60
Figura 3.4 – Fachadas do Edifício avaliado	60
Figura 3.5 – Átrio descoberto e circulação principal do edifício avaliado.....	62
Figura 3.6 – Planta baixa do pavimento-tipo	62
Figura 3.7 – Vistas internas – Hall de entrada e o sistema de segurança	63
Figura 3.8 – Ambientes internos e sala de trabalho do edifício	63
Figura 3.9 – Fachadas frontal e lateral da edificação	64
Figura 3.10 – Corte da edificação avaliada	64
Figura 3.11 – Implantação e orientação solar da edificação	65
Figura 3.12 – Estudos da trajetória do sol em relação à edificação	65
Figura 3.13 – Vista da cobertura com a disposição das placas solares	66
Figura 3.14 – Identificação das zonas climatizadas (1 a 8) e não climatizadas (9 a 12) do edifício avaliado	68
Figura 3.15 – Temperatura de bulbo seco e úmido e zona de conforto da cidade de Goiânia	69

Figura 3.16 – Temperaturas médias e pluviosidade anual da cidade de Goiânia	69
Figura 3.17 – Características da ocupação da edificação – quantidade de pessoas durante as horas do dia ao longo da semana	71
Figura 3.18 – Características do funcionamento do sistema de climatização da edificação	73
Figura 3.19 – Modelagem do edifício padrão	77
Figura 3.20 - Modelagem do edifício padrão	77
Figura 3.21 – Imagem da planta baixa do pavimento-tipo obtida para o estudo solarimétrico através de simulação computacional	78
Figura 3.22 – Imagem da Fachada do edifício obtida pela simulação computacional	79
Figura 3.23 – Corte do edifício modelado pela simulação computacional	79
Figura 3.24 – Composição dos cenários das simulações computacionais relacionadas à alteração do envelope construtivo	89
Figura 3.25 - Configuração básica de um sistema fotovoltaico conectado á rede	92
Figura 3.26 – Planta da Cobertura com a indicação da localização das placas fotovoltaicas	93
Figura 3.27 – Vista da usina solar fotovoltaica ligada à rede e os dois inversores localizados no barrilete da edificação	94
Figura 3.28 – Imagem aérea da cobertura do edifício avaliado com as placas do sistema fotovoltaico ligado à rede	95
Figura 3.29 – Vista do estacionamento descoberto existente e a proposta de criação do cenário CEZ-5 com vagas cobertas por carpots solares além do que foi inserido no cenário CEZ-4	96
Figura 4.1 – Consumo energético total, em kWh/ano, para os cenários CEZ-0, CEZ-1, CEZ-2 e CEZ-3	119
Figura 4.2 – Consumo de energia por categorias e cenários estudados	120
Figura 4.3 – Consumo de energia relacionada aos cenários propostos e seus efeitos no consumo de energia primária para o resfriamento, ventilação e bombas	120
Figura 4.4 – Energia produzida pelo sistema solar fotovoltaico do edifício avaliado, em kWh ,por ano	124
Figura 4.5 – Reestruturação do sistema fotovoltaico do cenário CEZ-4	124
Figura 4.6 – Mapa da irradiância solar	125
Figura 4.7 – Inclinação das placas do cenário CEZ-5 e azimuth adotado.....	126
Figura 4.8 – Mapa da irradiância solar para o cenário CEZ-5	127
Figura 4.9 – Geração de energia, em kWh. Obtida para o cenário CEZ-0 e para os cenários com acréscimo de SFV CEZ-4 E CEZ-5	129

Figura 4.10 – Consumo de energia elétrica mensal do edifício, em kWh, nos horários fora de ponta (FP) e de Ponta (P) em 2024	131
Figura 4.11 – Consumo medido e valores pagos da edificação no ano de 2024	132
Figura 4.12 – Consumo elétrico do edifício avaliado	138
Figura 4.13 – Consumo e geração de energia (SFV) nos anos de 2023 e 2024	139
Figura 4.14 – Consumo de energia elétrica, em kWh/ano, em 2024 do edifício avaliado por usos finais de energia	140
Figura 4.15 – Consumo mensal de energia elétrica por usos finais no ano de 2024	140
Figura 4.16 – Dados mensais do consumo elétrico do ano de 2024 – dados reais e dados obtidos na simulação computacional	141
Figura 4.17 – Consumo de água (m ³) da edificação (2017 a 2024)	142
Figura 4.18 – Consumo de gás do edifício avaliado entre os anos de 2022 a 2024	143
Figura 4.19 – Imagem dos containers utilizados no edifício avaliado	144
Figura 4.20 – Emissão de gases de efeito estufa na fase de uso, em KgCO ₂ –eq/pessoa.ano para o edifício avaliado, considerando dados reais	162
Figura 4.21 – Percentual de carbono incorporado do edifício avaliado em 1 ano e, estimado, para uma vida útil de 50 anos	167
Figura 4.22 – Emissão de carbono operacional, em percentual, para 1 ano e 50 anos	167
Figura 4.23 – Fachadas frontal e posterior da edificação	173
Figura 4.24 – Fachadas laterais da edificação	174
Figura 4.25 – Detalhe da placa adotada para o estudo (DHN-7x16/DG)	176
Figura 4.26 – Composição da placa solar fotovoltaica	176
Figura 4.27 – Estrutura para carpot em aço galvanizado a fogo considerado neste estudo	177
Figura 4.28 – Definição de emissões evitadas	183
Figura 4.29 – Parâmetros de influência no desempenho energético e ambiental das edificações avaliadas nesta pesquisa	192

Lista de tabelas

Tabela 2.1. Checklist de boas práticas a serem apresentadas no método de estudo envolvendo simulações energéticas para avaliação do desempenho térmico e energético.....	21
Tabela 2.2 – Propriedades do vidro que proporcionam menor consumo energético	30
Tabela 2.3 – Postos tarifários para os consumidores do grupo A	36
Tabela 2.4 – Impactos ambientais mais relevantes calculados na ACV.....	42
Tabela 3.1 – Áreas e usos do Fórum Cível de Goiânia	61
Tabela 3.2 – Resumo do sistema construtivo da edificação	67
Tabela 3.3 – Dados climatológicos (valores médios) da cidade de Goiânia entre os anos de 1991 a 2021	70
Tabela 3.4 – Características diárias da ocupação da edificação (dias da semana)	71
Tabela 3.5 – Característica gerais do sistema de climatização da edificação	72
Tabela 3.6 – Densidade de iluminação por ambiente	73
Tabela 3.7 – Características gerais da densidade dos equipamentos utilizados nos ambientes ...	74
Tabela 3.8 – Dados gerais da simulação computacional	75
Tabela 3.9 – Dados gerais da edificação avaliada	76
Tabela 3.10 – Parâmetros geométricos da envoltória do edifício em estudo	78
Tabela 3.11 – Comparação dos resultados mensais do gasto energético da simulação com os consumos obtidos pelas faturas de energia	81
Tabela 3.12 – Critérios de verificação de acordo com FEMP, diretiva ASHRAE 14 e MPVP	82
Tabela 3.13 – Cenários propostos para as simulações de desempenho energético	83
Tabela 3.14 – Tipos de vidros utilizados na simulação computacional	84
Tabela 3.15 – Tipos de revestimento externo utilizados na simulação computacional	86
Tabela 3.16 – Tipos de isolamento utilizados na simulação computacional	87
Tabela 3.17 – Especificação dos Materiais de mudança de fase (PCMs) utilizados na simulação computacional	89
Tabela 3.18 – Componentes do cenário CEZ – 1	90
Tabela 3.19 – Componentes do cenário CEZ-2	91
Tabela 3.20 – Componentes do cenário CEZ-3	91
Tabela 3.21 – Componentes do cenário CEZ-4	95

Tabela 3.22 – Cenário CEZ-5 proposto com adição de novas placas solares e instalação de vagas de garagem cobertas por <i>carpots</i> solares (retrofit + upgrade do SFV).....	97
Tabela 3.23 – Tarifas de aplicação e base econômica para o Grupo 4, modalidade verde (Equatorial GO) conforme resolução 3.279/2023 (ANEEL)	99
Tabela 3.24 – Reajustes tarifários na Concessionária Equatorial Energia Goiás	100
Tabela 3.25 – Tarifas vigentes de Aplicação e base econômica para o Grupo A, Modalidade Verde (Equatorial GO)	101
Tabela 3.26 – Fases para a condução da ACV de acordo com a NBR 14040	103
Tabela 4.1 – Componentes do cenário CEZ-0 e resultados do consumo energético	109
Tabela 4.2 – Cenários propostos e tipo de intervenção	111
Tabela 4.3 – Componentes do cenário CEZ-1 e resultados do consumo energético	113
Tabela 4.4 – Componentes do cenário CEZ-2 e resultados do consumo energético	114
Tabela 4.5 – Componentes do cenário CEZ-3 e resultados do consumo energético	116
Tabela 4.6 – Resultados das simulações energéticas para os cenários propostos	117
Tabela 4.7 – Sistema proposto para o cenário CEZ-4 e a energia gerada	125
Tabela 4.8 – Sistema proposto para o cenário CEZ-5 e a energia gerada	128
Tabela 4.9 – Geração de energia em MKWh obtida para o cenário CEZ-0 e para os cenários CEZ-4 e CEZ-5	131
Tabela 4.10 – Consumo, em kWh/ano, percentual de consumo, valor pago e percentual do valor pago na tarifa de 2024	133
Tabela 4.11 – Cálculo do consumo economizado em um ano – relativo ao funcionamento do ar condicionado.....	134
Tabela 4.12 – Resumo das estratégias de estudo adotadas para os diferentes cenários	136
Tabela 4.13 – Economia de energia para os cenários propostos, em relação ao cenário padrão	137
Tabela 4.14 – Cenários de estudo propostos e resultados, em percentual de economia de energia gerados em relação ao cenário padrão (CEZ-0)	137
Tabela 4.15 – Consumo de água (m³) da edificação nos referente aos anos de 2017-2024	141
Tabela 4.16 – Consumo de gás nos anos de 2022 a 2024 do edifício avaliado	142
Tabela 4.17 – Informações para a condução da ACV neste estudo	146
Tabela 4.18 – Materiais considerados na edificação avaliada	148
Tabela 4.19 – Dados de projeto por material para os elementos fundação e fator de impacto	148

Tabela 4.20 – Resultados do ICV das emissões de GEE embutidas para os elementos Fundação por material e somatória total	148
Tabela 4.21 – Dados de projeto por material para o elemento Estrutura e fator de impacto	149
Tabela 4.22 – Resultados do ICV das emissões de GEE embutidas para o elemento Estrutura por material e somatória total	149
Tabela 4.23 – Dados de projeto por material para os elementos da Envoltória e fator de impacto	151
Tabela 4.24 – Resultados do ICV das emissões de GEE embutidas para os elementos da Envoltória por material e somatória total	152
Tabela 4.25 – Dados de projeto por material para as partições internas e fator de impacto	153
Tabela 4.26 – Dados do ICV das emissões de GEE embutidas para as partições internas por material e somatória total	154
Tabela 4.27 – Dados de projeto por material para os acabamentos internos e fator de impacto	155
Tabela 4.28 – Resultados do ICV das emissões de GEE embutidas para os acabamentos internos por material e somatória total	156
Tabela 4.29 – Dados de consumo reais por etapa e fator de impacto	157
Tabela 4.30 – Resultados do indicador de CO ₂ equivalente para a etapa de uso	158
Tabela 4.31 – Emissões embutidas de carbono na fase pré-uso	159
Tabela 4.32 – Emissões embutidas de carbono operacional	161
Tabela 4.33 – Emissão de carbono (medida em kgCO ₂ -eq	164
Tabela 4.34 – Determinação da vida útil de projeto (VUP) e fator de reposição	165
Tabela 4.35 – Combinação das estratégias de energia CEZ-1, CEZ-5 e CEZ-6	169
Tabela 4.36 – Combinação das estratégias de energia CEZ-2, CEZ-5 e CEZ-6	169
Tabela 4.37 – Combinação das estratégias de energia CEZ-3, CEZ-5 e CEZ-6	170
Tabela 4.38 – Resumo das combinações dos cenários para redução de energia	170
Tabela 4.39 – Total de economia de energia dos cenários CEZ-1	171
Tabela 4.40 – Total de economia de energia dos cenários CEZ-2	171
Tabela 4.41 – Total de economia de energia dos cenários CEZ-3	171
Tabela 4.42 – Resumo da emissão de carbono (medida em kgCO ₂ -eq) do edifício avaliado	172
Tabela 4.43 – Cálculo do consumo de matérias-primas para os cenários CEZ-1, CEZ-2 e CEZ-3	175
Tabela 4.44 – Cálculo do consumo de matérias-primas para o cenário CEZ-5	177

Tabela 4.45 – Energia embutida nos materiais – Cenários CEZ-1, CEZ-2 e CEZ-3	178
Tabela 4.46 – Energia embutida nos materiais para o cenário CEZ-5	179
Tabela 4.47 – Total de Energia Embutida nos materiais dos cenários de estudo.....	179
Tabela 4.48 – Cálculo da emissão dos materiais dos cenários CEZ-1, CEZ-2 e CEZ-3.....	180
Tabela 4.49 – Cálculo da emissão dos materiais do cenário CEZ-5	181
Tabela 4.50 – Resultados da emissão dos materiais dos cenários de estudo	181
Tabela 4.51 – Resultados carbono incorporado composição dos cenários	182
Tabela 4.52 – Resultados do cálculo do carbono operacional no caso de implantação dos cenários CEZ-2, CEZ-5 E CEZ-6	184
Tabela 4.53 – Emissão de carbono (em KgCO ₂ eq) para os cenários propostos	185
Tabela 4.54 – Classificação dos resultados quanto aos indicadores de sustentabilidade	186
Tabela 4.55 – Classificação dos cenários em faixas de benefícios em sustentabilidade	187
Tabela 4.56 – Comparação do nível de sustentabilidade entre os cenários	188
Tabela 4.57 – Classificação dos cenários em faixas de benefícios em sustentabilidade	188
Tabela 4.58 – Contabilização dos resultatos relacionados à combinação dos melhores cenários	188
Tabela 4.59 – Cálculo do percentual de carbono das fases pré-uso, uso e fim de vida	189
Tabela 4.60 – Contabilização de carbono incorporado considerando os melhores cenários	189
Tabela 4.61 – Contabilização de carbono operacional	191

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

AICV – Avaliação do Inventário do Ciclo de Vida

APE – Auto produção de energia

ASHRAE – Sociedade Americana de Engenharia de Aquecimento e Refrigeração e ar condicionado

BEO – Otimização da Energia em Edificações

BIPV – *Building Integrated Photovoltaic* (Elemento fotovoltaico integrado à edificação)

CAG – Central de Água Gelada

CNJ – Conselho Nacional de Justiça

CO₂ – Dióxido de Carbono

CVRMSE – Coeficiente de variação da raiz do erro quadrático médio

DAP – Declaração Ambiental de Produto

DOE – Department of energy

ECM – Medidas de Conservação de Energia

EMM – Medidas de Modulação de Energia

EVO – *Efficient Valuation Organization* (Organização de Avaliação de Eficiência)

FEMP – *Federal Energy Management Program*

GD – Geração distribuída

GEE – Gases de Efeito Estufa

GW - Gigawatt

GWP – *Global Warming Potential* (Potencial de Aquecimento Global)

HVAC – Heating, Ventilation and Air Conditioning (Aquecimento, Ventilação e Ar condicionado)

ICV – Inventário do Ciclo de Vida

iNDC – Contribuição Nacionalmente determinada

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

IPVMP – *Internacional Performance Measurement and Verification Protocol*

ISO – *International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Padronização)

KWh – Quilowatt hora

Low-e – Vidros com revestimento de baixa emissividade

MBE – Erro de viés médio

NBR – Norma Brasileira

NMBE – Erro de viés médio normalizado

nZEB – *Nearly Zero Energy* (edifício energia quase zero)

ODS – Objetivos do desenvolvimento sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

PAF – Proporção de Abertura de Fachada

PAG – Potencial de Aquecimento Global

PC – Personal computer (computador pessoal)

PCM – *Phase Change Material* (Material de Mudança de Fase)

PLS – Plano de Logística Sustentável

PUR – Poliuretano Rígido

PV – Painéis Fotovoltaicos

SFVCR – Sistema Fotovoltaico Conectado à rede elétrica

SHGC – *Solar Heat Gain Coefficient* (Coeficiente de Ganho de Calor Solar)

TE – Tarifa de energia

Tvis – Taxa de Transmissão visível de vidros

TUSD – Tarifa de uso do sistema de distribuição

VRF – *Variable Refrigerant Flow*

U – Medida de transferência de calor por unidade de área

UNEP – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

WWR – *Window Wall Ratio* ou Percentual de abertura de fachada

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO	01
1.1 Contextualização	02
1.2 Justificativa	07
1.3 Objetivos	10
1.4 Estrutura da tese	11
Capítulo 2 – REQUALIFICAÇÃO ENERGÉTICA E AMBIENTAL	12
2.1 Contextualização	13
2.2 Desempenho energético das edificações	14
2.2.1 Benchmarking	16
2.2.2 Simulação computacional energética	18
2.2.3 Influência da envoltória no consumo energético das edificações	22
2.2.4 Influência das energias renováveis no desempenho energético das edificações	30
2.2.5 Influência das condições de uso da edificação no desempenho energético	35
2.3 Desempenho ambiental das edificações	38
2.3.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no ambiente construído	42
2.3.2 Medidas para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa pelas edificações	48
2.4 Otimização multiobjetivo do desempenho das edificações	50
Capítulo 3 – ESTRUTURA METODOLÓGICA	56
3.1 Contextualização	57
3.2 Estrutura Metodológica	58
3.3 Estudo de caso	59
3.3.1 Dados do edifício	67
3.3.1.1 Dados climáticos	68
3.3.1.2 Perfil de Ocupação e dados de iluminação e equipamentos	70
3.4 Ferramentas de simulação computacional	74
3.4.1 Definição da modelagem geométrica e caracterização dos componentes construtivos	76
3.4.2 Validação do modelo paramétrico	80
3.5 Cenários de estudo propostos	83
3.5.1 Cenários para o aprimoramento do envelope construtivo	84
3.5.1.1 Cenário CEZ-1	90
3.5.1.2 Cenário CEZ-2	90
3.5.1.3 Cenário CEZ-3	91
3.5.2 Cenários propostos de integração de fontes de energias renováveis do edifício	92

3.5.2.1 Cenário CEZ-4	93
3.5.2.2 Cenário CEZ-5	96
3.5.3 Cenário proposto para alteração do cronograma de uso da edificação	97
3.5.3.1 Cenário CEZ-6	100
3.6 Avaliação da emissão de carbono	101
3.6.1 Base de dados e metodologia utilizada	103
3.6.2 Vida útil e unidade declarada	105
Capítulo 4 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	106
4.1 Contextualização	107
4.2 Avaliação de Desempenho Energético dos cenários propostos	107
4.2.1 Avaliação do desempenho energético do modelo padrão	108
4.2.2 Avaliação da Influência do Envelope construtivo	111
4.2.2.1 Cenário CEZ-1	112
4.2.2.2 Cenário CEZ-2	114
4.2.2.3 Cenário CEZ-3	115
4.2.2.4 Avaliação geral dos cenários de reabilitação do envelope construtivo	116
4.2.3 Avaliação das estratégias de integração de energias renováveis	121
4.2.3.1 Cenário CEZ-4	122
4.2.3.2. Cenário CEZ-5	126
4.2.3.3 Avaliação dos cenários de integração de energias renováveis.....	128
4.2.4 Avaliação da alteração do cronograma de uso da edificação	129
4.2.4.1 Cenário CEZ-6	130
4.2.5 Avaliação geral dos cenários propostos	133
4.3 Dados operacionais do edifício	138
4.3.1 Consumo elétrico	138
4.3.1.1 Indicador de consumo elétrico	139
4.3.1.2 Comparação entre o consumo de energia e a energia gerada pela usina fotovoltaica	139
4.3.1.3 Comparação entre dados reais e a simulação computacional	140
4.3.2 Consumo de água	141
4.3.2.1 Indicador de consumo de água	142
4.3.3 Consumo de gás	142
4.3.3.1 Indicador de consumo de gás	143
4.3.4 Quantidade de resíduo gerado	143
4.3.4.1 Indicador de resíduo gerado	144
4.4 Avaliação de desempenho ambiental	144

4.4.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	145
4.4.1.1 Definição do Objetivo e escopo	145
4.4.1.3 Avaliação do Ciclo de Vida da fundação e estrutura	147
4.4.1.2 Avaliação do Ciclo de Vida para a envoltória do edifício	150
4.4.1.3 Avaliação do ciclo de vida para as partições internas	153
4.4.1.4 Avaliação do ciclo de vida para os acabamentos internos do edifício	154
4.4.1.5 Avaliação da energia operacional – fase de uso	156
4.4.1.6 Análise de <i>Benchmarking</i>	158
4.4.1.7 Análise geral das emissões de carbono do edifício avaliado	163
4.5 Discussão de resultados	168
4.6 Otimização multiobjetivo	184
Capítulo 5 – CONCLUSÕES	194
Referências bibliográficas	199

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O consumo global de energia está crescendo exponencialmente, impulsionado pelo aumento populacional, à procura de maior conforto térmico em ambientes internos e as inevitáveis mudanças climáticas globais, como apontado por Santamouris (2016). Nossos ambientes contemporâneos são, em grande parte, construídos e mantidos com uma dependência intensa de energia e recursos naturais não renováveis. Diante do elevado consumo energético e das volumosas emissões de gases de efeito estufa (GEE) geradas pelas edificações, torna-se crucial adotar estratégias sustentáveis. O objetivo primordial vai além da mera redução de custos operacionais; trata-se de mitigar o impacto ambiental decorrente da produção e do consumo de energia, nessas construções, sem comprometer, é claro, o conforto dos usuários.

Para ilustrar a magnitude do desafio, o Relatório de *Status* Global para Edificações e Construções, divulgado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, 2025), revela que o setor de edificações e construção é responsável por significativos 34% da demanda global de energia e por 37% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) ligadas à energia e aos processos de funcionamento das edificações. No Brasil, especificamente, as emissões de GEE provenientes da construção civil correspondem a 6% do total nacional, somando 139 milhões de toneladas de CO₂ anualmente. Em alinhamento com as metas do Acordo de Paris para 2030, o Governo Brasileiro, por meio de sua Contribuição Nacionalmente Determinada (iNDC), comprometeu-se a reduzir suas emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005, até 2025, e a projetar uma redução de cerca de 43%, até 2030 (BRASIL, 2025a).

Inspirado pelos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da ONU, pelo Pacto Global da ONU e pelo Acordo de Paris, o Poder Judiciário brasileiro, por exemplo, tem implementado medidas para diminuir o impacto ambiental de suas operações. Com a criação do Programa Justiça Carbono Zero aprovado pelo Conselho Nacional de Justiça, por meio da Resolução 400/2021 (CNJ, 2021) e reiterado pela Resolução 597/2024 (CNJ, 2024), os órgãos do Poder Judiciário visam alcançar a neutralidade de carbono nos próximos cinco anos.

Nesse contexto, a eficiência energética é destacada pelo IPCC (2023) como uma ação fundamental no portfólio de mitigação de GEE. Além de reduzir as emissões, a eficiência energética oferece diversos benefícios socioambientais e impulsiona ganhos de produtividade. No cenário brasileiro, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024) prevê um potencial técnico de 66%, para aprimoramento da eficiência energética em edificações, até 2034. Assim, a reabilitação de edificações existentes emerge como uma estratégia indispensável, para que o país atinja suas metas ambientais em nível nacional.

Estimativas sugerem que a reforma de edifícios para maior eficiência energética (*retrofits*), ou a construção de novas edificações já projetadas para serem eficientes, podem resultar em uma redução de 30% a 50% no consumo de energia. A eficiência energética, portanto, deve ser uma

preocupação em todas as fases do ciclo de vida de uma edificação (Fukuoka *et al.*, 2024). Esses dados sublinham o imenso potencial de atuação nesse campo, e a redução das emissões de carbono, em edifícios, atrelada à eficiência energética, é considerada uma das medidas mais significativas para a proteção ambiental e a sustentabilidade (Pan *et al.*, 2023; Fakhstedt *et al.*, 2024).

Estudos demonstram que um projeto arquitetônico adequado pode aumentar a eficiência energética dos edifícios, ao mesmo tempo em que garante o conforto térmico, diminui as emissões de carbono e reduz o consumo de energia, durante a fase operacional (Latha *et al.* 2015; Cabeza *et al.*, 2020; He *et al.* 2021). Contudo, se aspectos como a escolha de materiais de construção, a localização e a orientação do edifício não forem devidamente considerados na fase de projeto, o problema do consumo energético pode se tornar complexo para ser resolvido posteriormente (Latha *et al.* 2015). Além disso, sem programas de reabilitação energética para as construções já existentes, o setor da construção continuará a ser um grande contribuinte para o consumo de energia e a emissão de gases de efeito estufa (Toosi *et al.*, 2020).

Além da drástica redução de GEE proporcionada pela melhoria do desempenho energético, outras razões impulsionam as reformas arquitetônicas, como a extensão da vida útil da edificação, a adequação a novos códigos e a melhoria geral da qualidade do edifício (Toosi *et al.*, 2020; Adly e El-Khourly, 2022). É importante notar que levará muitas décadas para que apenas novas construções eficientes gerem benefícios consideráveis. Assim, há uma necessidade urgente de se desenvolverem projetos de edifícios energeticamente eficientes, tanto para novas construções quanto para promover a reabilitação dos edifícios existentes (Ascione *et al.*, 2017; He *et al.*, 2021).

Nesse cenário, o *retrofit* sustentável de edifícios é considerado um dos métodos mais eficazes para reduzir o consumo de energia e as emissões de carbono, além de outros impactos ambientais em edificações existentes. Embora a atenção à pesquisa em sustentabilidade na modernização de edifícios tenha aumentado, a taxa de adoção, na prática, ainda é relativamente baixa, muitas vezes, devido à complexidade de selecionar as medidas de modernização energética mais eficazes (He *et al.*, 2021).

Apesar de o nível de desempenho energético quase nulo ainda não ser ideal, em termos de rentabilidade, considerando os preços atuais das tecnologias, Ascione *et al.* (2017) sugerem que a meta deve ser a de alcançar níveis de eficiência energética razoáveis. Isso pode ser conquistado por meio das melhores práticas atuais e da conversão de energia, no local, a partir de fontes renováveis. Para entender os diversos fatores que influenciam a eficiência energética de edifícios, Chen *et al.* (2022) classificaram estudos em três categorias principais: características do edifício (como formato, orientação, isolamento, tipo e tamanho das janelas), sistemas operacionais (aquecimento, resfriamento, ventilação, energias renováveis e iluminação) e condições climáticas específicas (temperatura, umidade, radiação solar e velocidade do vento).

Hu *et al.* (2023) confirmam que a eficiência energética reduz drasticamente as emissões de GEE e o consumo de energia em edifícios. Para melhorar o conforto ambiental interno e diminuir o consumo em edifícios públicos, diversas medidas podem ser adotadas. Essas ações incluem tanto estratégias ativas quanto passivas, como a alteração dos materiais da envoltória, o aprimoramento e o ajuste do desempenho de sistemas de ar condicionado, a formulação de políticas de descarbonização e o uso de energia renovável, especialmente a fotovoltaica. Acredita-se que essas iniciativas podem aprimorar a eficiência energética e mitigar os impactos ambientais adversos das edificações.

Em um tópico relacionado à eficiência energética, Ascione *et al.* (2020) ressaltam o papel fundamental dos ocupantes, na viabilidade da renovação energética. Comportamentos, como o uso intensivo de sistemas elétricos e de iluminação, a abertura de janelas durante o funcionamento de sistemas de aquecimento ou resfriamento, a alteração das temperaturas e a desativação de sistemas de sombreamento podem comprometer seriamente a eficiência. Corroborando essa visão, Li *et al.* (2020) afirmam que o alto consumo de energia em edifícios não se deve apenas ao projeto arquitetônico e à construção, mas, também, e de forma crítica, ao comportamento dos usuários e à maneira como eles interagem com os sistemas de energia.

A otimização da energia em edificações (*Building Energy Optimization* - BEO) é uma tarefa complexa, como identificado por Ascione *et al.* (2019), envolvendo múltiplas funções-objetivo (energia, ambiental, econômica e conforto) e variáveis de projeto (geometria, envoltória, sistemas de energia e comportamento do usuário). Para avaliar o desempenho energético de uma edificação, a simulação computacional é uma ferramenta valiosa, pois calcula o comportamento térmico e energético de cada ambiente e sistema, em resposta ao clima e à geometria, fornecendo resultados detalhados de temperatura interna e consumo de energia, ao longo do ano (Fukuoka *et al.*, 2024). Essa técnica analítica facilita a verificação e o aprimoramento de soluções arquitetônicas, indicando as melhores opções sob as perspectivas ambiental e energética.

Compreender como os parâmetros da construção afetam o desempenho energético de um edifício é crucial para embasar decisões, nas etapas iniciais do projeto arquitetônico. Caso contrário, o desempenho das edificações dependerá de componentes ativos, como sistemas de aquecimento, resfriamento, ventilação e iluminação, geralmente escolhidos nas fases finais. Fazer escolhas precoces no projeto, incorporando valores ideais para os parâmetros de construção, é essencial no desenvolvimento de edifícios eficientes. Essa tarefa é particularmente importante porque existem várias opções para os parâmetros construtivos. As condições climáticas, que são critérios independentes e incontroláveis, influenciam diretamente o consumo de energia. Ignorá-las pode resultar em maior consumo, mas, ao aplicar princípios de transferência de calor e selecionar cuidadosamente os parâmetros críticos, é possível reduzir significativamente a energia para aquecimento e resfriamento (Yldiz e Arsan, 2011).

O envelope do edifício desempenha um papel fundamental na eficiência energética e no conforto humano. A radiação solar nas fachadas é a principal responsável pela transferência de calor do ambiente externo para o interno, e o tipo de fachada influencia diretamente a carga térmica da edificação (Dornelles *et al.*, 2014; Bessa, 2010; Krstić-Furundžić *et al.*, 2019; Cândido *et al.*, 2023). Ganhos e perdas de calor pelos telhados, janelas, portas e paredes podem representar até 60% do total de ganho de calor de uma edificação (Ascione *et al.*, 2019).

Dado que a fachada contribui significativamente para o aquecimento e arrefecimento, o *retrofit* de fachadas é uma solução eficaz para minimizar a demanda por climatização, em edifícios existentes. Sarihi *et al.* (2021) demonstraram que diferentes medidas de retrofit podem reduzir o consumo de energia para aquecimento e resfriamento em até 50%, por meio de intervenções arquitetônicas. Os resultados indicam que, para minimizar o consumo, o retrofit pode incluir medidas de conservação de energia (ECMs), que evitam a transmissão excessiva de calor, e medidas de modulação de energia (EMMs), que distribuem o consumo por meio de estratégias passivas de aquecimento e/ou resfriamento, além da combinação de ambas.

As ECMs, como isolamento térmico, melhoria do envidraçamento, controle da tensão do ar e otimização da relação janela-parede (PAF ou WWR) minimizam a transferência de calor condutiva e convectiva. Já as EMMs, mais cruciais em climas dominados pelo resfriamento, controlam a transferência de calor radiativo, por meio da adição de componentes ao edifício, como fachadas duplas envidraçadas, fachadas ventiladas opacas, revestimentos, sombreamento, fachadas verdes e o uso de materiais de mudança de fase (PCM), modulando o consumo de energia em períodos específicos (Sarihi *et al.*, 2021). Sarihi *et al.* (2021) recomendam a combinação dos dois tipos de medidas para explorar todos os benefícios. Além disso, a demanda por energia pode ser reduzida em até 90% com a melhoria de sistemas mecânicos e a integração de sistemas fotovoltaicos (BIPV - Building Integrated Photovoltaic). No entanto, focar apenas na redução do uso de energia pode levar à utilização de materiais e tecnologias que aumentam os impactos ambientais gerais, portanto, a eficiência das tecnologias e materiais é crucial para mitigar os efeitos negativos dos edifícios.

Para atingir as metas de redução de GEE, é essencial uma abordagem de ciclo de vida da edificação (Miranda, 2012). A metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), normatizada no Brasil pela ISO 14040 (ABNT, 2014), quantifica o impacto ambiental potencial de um produto ou serviço. A ACV revela a relação entre a energia incorporada dos materiais (na construção) e a energia operacional (para o funcionamento do edifício), permitindo a escolha de alternativas sob uma perspectiva ambiental (Vilches *et al.*, 2017). A ACV é fundamental para a transição para a emissão zero de carbono, no setor da construção, dividindo as emissões em carbono incorporado e carbono operacional (Gan *et al.*, 2018). As emissões operacionais têm sido amplamente estudadas, especialmente em relação à eficiência energética. Contudo, os impactos ambientais no ciclo de vida são interdependentes; a redução de impactos na fase de uso (com isolamento

térmico, por exemplo) pode aumentar a energia incorporada. Essa situação pode ser revertida com o uso de materiais menos processados, ou que demandem menos energia para sua produção (Vilches *et al.*, 2017).

O processo de tomada de decisão sobre quais sistemas substituir em uma renovação de edifício apresenta desafios significativos, incluindo restrições arquitetônicas, manutenção do conforto e mitigação ambiental. A previsão desses fatores permite que as edificações se tornem mais eficientes e sustentáveis. A otimização multiobjetivo tem sido amplamente utilizada para melhorar a eficiência energética, manter o conforto térmico, reduzir custos e emissões de carbono (Ascione *et al.*, 2019; Linczuk e Bastos, 2020; Benaddi *et al.*, 2024; Luo *et al.*, 2024).

Myint *et al.* (2025) enfatizam que compreender os princípios, tecnologias e políticas de construções de baixo impacto ambiental é essencial para arquitetos, engenheiros e formuladores de políticas, dada a demanda por mais estudos sobre as melhores práticas para minimizar a emissão de carbono. Myint e Shafique (2024) acrescentam que atingir edifícios com menor carbono incorporado e operacional requer uma transformação fundamental nas práticas de projeto, construção e fornecimento de materiais. Estratégias eficazes, como projetos solares passivos, geradores de energia eficientes e sistemas de energia renovável, contribuem significativamente para a meta de descarbonização no ambiente construído.

Pesquisas que combinam parâmetros passivos e sistemas fotovoltaicos têm obtido bons resultados (Maka *et al.*, 2024; Oliveira e Viajante, 2024; Kang *et al.*, 2025). Kang *et al.* (2025) destacam que a sinergia entre esses elementos melhora o desempenho da edificação e impulsiona o desenvolvimento de padrões e políticas para a descarbonização (nZEB). Maka *et al.* (2024) afirmam que sistemas de energia solar renovável têm uma influência significativa no ambiente e são cruciais para descarbonizar edifícios, prevendo que tecnologias inovadoras e resilientes fornecerão mais energia de baixo carbono, no futuro. Maka *et al.* (2024) também indicam que a eficiência da tecnologia fotovoltaica integrada em edifícios (BIPV) é uma forma de descarbonizar a energia, ajudando a enfrentar desafios ambientais, energéticos, sociais e econômicos. Oliveira e Viajante (2024) apontam que a geração de energia por fontes renováveis oferece ganhos financeiros, tecnológicos e pedagógicos, promovendo a conscientização e impactos sociais positivos.

Por outro lado, Chen *et al.* (2022) alertam que considerar apenas as características da construção não garante o melhor projeto energético, pois outros fatores, como a atualização de equipamentos e tecnologias de eficiência energética e o comportamento dos ocupantes, são igualmente importantes. Eles sugerem que intervenções no comportamento dos ocupantes podem ser soluções de baixo, ou nenhum custo, para melhorar a eficiência energética, ressaltando a importância de incluir a gestão do comportamento dos ocupantes em estudos. Ascione *et al.* (2020) corroboram essa visão, mostrando um aumento considerável no consumo energético devido ao comportamento indefinido dos ocupantes, o que afeta as medidas de economia de

energia. Capozzoli *et al.* (2017) ilustram isso com um estudo de otimização de cronograma de operação de um sistema HVAC baseado na ocupação, que resultou em uma economia de 14% no consumo de energia, em comparação com um cronograma independente da ocupação.

Copiello *et al.* (2017) revelam que os resultados dos estudos também são impactados por parâmetros incertos, como o custo e as mudanças no preço do fornecimento de energia. Li *et al.* (2025) analisaram a relação entre ocupação, uso do ar condicionado e temperaturas de tolerância em edifícios de escritórios, em Wuhan, alcançando uma redução de 32% na energia para resfriamento.

Em suma, diversos fatores impactam a sustentabilidade dos edifícios. Nesse sentido, “maior sustentabilidade” no presente estudo refere-se a um consumo energético reduzido e a uma menor emissão de CO₂, sem desconsiderar a viabilidade financeira e o conforto dos ocupantes. Dessa forma, esta pesquisa, ao examinar os estudos sobre o tema e as diferentes influências que as construções sofrem para se tornarem mais eficientes, visa aplicar alguns princípios de eficiência energética a um edifício público, na cidade de Goiânia, e avaliar os resultados da adoção de medidas que favorecem a economia de energia e a redução das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para o avanço das pesquisas na área da requalificação arquitetônica.

1.2 JUSTIFICATIVA

A pesquisa em questão surgiu da necessidade e relevância de agregar conhecimento acerca das questões teóricas e práticas relacionadas aos fatores que impactam a melhoria do desempenho energético e ambiental das construções. Além disso, buscou-se oferecer suporte a decisões projetuais em renovações arquitetônicas de edificações e em novos projetos arquitetônicos, ampliando a discussão sobre eficiência e sustentabilidade na arquitetura.

A eficiência no uso de energia deve permear todas as etapas do ciclo de vida dos edifícios: desde o planejamento e a construção (incluindo a fabricação e aplicação de materiais), passando pelo uso, operação, manutenção e reformas, até o descarte final. Dada sua natureza multidisciplinar, é essencial integrar conceitos e disciplinas de arquitetura, engenharia elétrica, iluminação e climatização, entre outras (Fukuoka *et al.*, 2024).

A discussão sobre arquitetura sustentável atualmente é permeada por termos, como neutralidade de carbono, neutralidade climática, carbono zero e emissões líquidas zero. É importante distinguir que a neutralidade de carbono se restringe ao CO₂, enquanto a neutralidade climática abrange todos os gases de efeito estufa. Emissão líquida zero refere-se à compensação total das emissões do edifício por meios naturais, e carbono zero designa elementos que não liberam CO₂ na atmosfera (Rodrigues, 2022).

Edifícios altos (acima de sete pavimentos) representam um desafio particular, devido ao uso intensivo de material e energia em sua construção e operação (Mulya *et al.*, 2024). Eles

também enfrentam limitações de área disponível para a instalação de painéis solares e consomem muita energia para manter o conforto térmico, especialmente em climas tropicais. Mulya *et al.* (2024), ao avaliar a descarbonização de edifícios de escritórios de grande altura, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), observaram que o carbono operacional pode ser maior que o incorporado em um período de 30 anos, que o transporte de materiais contribui com mais de 50% do carbono incorporado e que projetos inovadores de energia fotovoltaica integrada em edifícios podem compensar até 15,9% da energia consumida.

No contexto deste estudo, embora os edifícios altos do Tribunal de Justiça do Estado de Goiás não sejam numerosos, eles são responsáveis por quase 70% da energia consumida pela instituição. Das 158 edificações, o fórum cível de Goiânia, um desses edifícios altos, consome, em média, 25% da energia total da instituição. Esse alto consumo impacta negativamente o desempenho do Tribunal de Justiça nas avaliações do Conselho Nacional de Justiça (CNJ), que monitora o consumo elétrico dos órgãos do Poder Judiciário, para identificar oportunidades de redução de gastos e eficiência energética, além de buscar alternativas para diminuir as emissões de carbono.

A Resolução nº 400/2021 (CNJ, 2021), reeditada recentemente (CNJ, 2024), estabelece a política de sustentabilidade no Poder Judiciário e institui a gestão do Plano de Logística Sustentável (PLS). Esse plano é uma ferramenta que, alinhada à Política Nacional do Judiciário e aos Planos Estratégicos dos diversos órgãos, define objetivos, responsabilidades, indicadores, metas, prazos e formas de monitoramento e avaliação de resultados. O PLS visa implementar e acompanhar práticas sustentáveis, promovendo a eficiência nos gastos públicos e na gestão dos processos de trabalho, com uma visão holística da instituição.

Os indicadores de desempenho definidos pelo CNJ são cruciais para avaliar o progresso nas áreas ambiental, econômica, social e cultural. Anualmente, diversas informações devem ser enviadas ao órgão. Relacionados às edificações, os indicadores incluem consumo de energia elétrica, uso de água e esgoto, gestão de resíduos, qualidade de vida no ambiente de trabalho, reformas e layout, e ações de descarbonização (CNJ, 2021). Esses indicadores compõem o Balanço da Sustentabilidade do Poder Judiciário, atualizado mensal e anualmente. Os órgãos desse Poder também devem elaborar um inventário e promover a redução e compensação das emissões de GEE de suas atividades para alcançar a neutralidade de carbono, até 2030 (CNJ, 2021).

A presente investigação se justifica pela relevância de aprimorar os indicadores relacionados às edificações públicas. Os resultados esperados focam na diminuição do uso de energia e na quantidade de emissões de GEE que podem ser evitadas. Embora o estudo tenha se concentrado em um edifício específico, as estratégias avaliadas podem ser aplicadas a outras edificações da instituição, ou outras, com características semelhantes. Dada a grande quantidade

de edificações já existentes, prevê-se que as reabilitações serão mais frequentes que as novas construções.

Compreender como os parâmetros construtivos afetam o desempenho energético de um edifício é crucial para direcionar esforços e recursos de projeto para as questões com maior potencial de eficiência. A revisão bibliográfica indicou caminhos para a redução do consumo de energia e GEE em edificações. Em geral, os resultados mais efetivos foram obtidos com a alteração das características do envelope construtivo, a integração de fontes de energia renovável e a consideração da avaliação comportamental dos usuários. No caso específico de Goiânia, as pesquisas consultadas focaram nas estratégias mais eficazes para climas quentes.

Os diversos elementos do envelope de um edifício – paredes externas, pisos, telhado, teto e janelas – determinam a energia necessária para aquecimento e resfriamento, o conforto térmico, a ventilação e a iluminação. Existem várias estratégias para melhorar a eficiência energética, por meio desses componentes, mas é necessário encontrar um equilíbrio entre energia, design, estética, conforto dos usuários e as exigências ambientais (Krstić-Furundžić *et al.*, 2019).

Gupta e Deb (2023) avaliaram o efeito do envelope construtivo no consumo de energia em climas tropicais, identificando que sua eficácia é determinada por características térmicas, físicas, ópticas e pela geometria. As características térmicas, como isolamento térmico e massa térmica, são cruciais; materiais isolantes adequados podem reduzir o consumo de energia, ao diminuir o fluxo de calor por condução, enquanto a alta massa térmica retarda e reduz o pico da temperatura interna, economizando energia. As propriedades ópticas, como absorção solar e emissividade, quando combinadas, tornam a superfície mais fria. O uso de materiais frios (alta emissividade e refletância solar) reduz o consumo de energia para resfriamento. As propriedades físicas mais influentes são a taxa de abertura e o sombreamento, e na geometria, a forma e a orientação da construção. Os autores concluem que modificações criteriosas nas variáveis de projeto do envelope podem reduzir o consumo de energia.

Em outro estudo, Gupta e Deb (2022) avaliaram o impacto de diversos materiais de retrofit do envelope em temperaturas internas e no consumo de energia, para resfriamento de um edifício educacional, em Mumbai, Índia. O desempenho energético foi analisado com a aplicação de isolamento térmico (com e sem revestimento refletivo), telhado verde e sistemas de sombreamento à base de bambu. O aumento do isolamento do envelope, seguido pelo fornecimento de sombreamento natural, resultou nas maiores reduções das cargas de resfriamento, com economia de energia de até 25% e redução de até 60%, nas horas com temperaturas internas acima de 35°C.

Diversos estudos apontam para a importância de integrar os benefícios do envelope, da energia renovável e do comportamento do usuário para minimizar o carbono incorporado e operacional das edificações.

Embora a literatura seja rica em estudos sobre desempenho energético e ambiental de edifícios, este trabalho propõe uma metodologia própria, ao avaliar, por meio de um estudo de caso, diversos aspectos da eficiência energética e ambiental. Foi desenvolvida uma avaliação integrada do consumo energético (por meio da simulação computacional) e dos potenciais impactos, ao longo do ciclo de vida (por meio da ACV) de um edifício público em Goiânia. As soluções analisadas incluíram diferentes cenários de envelopes construtivos (baseados na revisão bibliográfica), alternativas de energia renovável e a avaliação comportamental, para propor uma alteração no cronograma de uso da edificação. O objetivo foi obter soluções eficientes, aliando redução de emissões, economia de energia, conformidade com normas e manutenção do conforto térmico para as condições climáticas da zona bioclimática 6.

Assim, esta tese contribui com o desenvolvimento de uma metodologia que avalia o desempenho energético e ambiental, com foco na requalificação arquitetônica de um edifício público em Goiânia. Após uma revisão bibliográfica detalhada, identificaram-se lacunas nas pesquisas sobre o tema, especialmente na zona bioclimática estudada. Além disso, a pesquisa apresenta resultados significativos, ao combinar diferentes metodologias – simulações computacionais, indicadores reais e análise de emissões – utilizando uma abordagem que considera o ciclo de vida do edifício. Isso demonstra que a escolha de materiais e tecnologias não deve se basear apenas na estética e no custo, fornecendo subsídios valiosos para que arquitetos e engenheiros considerem critérios ambientais e energéticos nas etapas de projeto e renovação das edificações, suprimindo a frequente falta de dados e estudos que impedem essa inclusão.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é avaliar o potencial de redução do consumo de energia elétrica e de emissões de CO₂ na reabilitação de uma edificação, por meio da otimização multiobjetivo considerando variáveis relacionadas à composição do envelope construtivo, integração de energias renováveis e modificação do cronograma de uso, empregando as ferramentas de simulação computacional e Avaliação do Ciclo de Vida.

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Desenvolver uma revisão bibliográfica das principais variáveis que influenciam na eficiência energética e no desempenho ambiental das edificações situadas em regiões de climas quentes, com foco no envelope construtivo, na integração de energias renováveis e no comportamento dos usuários;
- Analisar o desempenho energético da edificação, no estado em que se encontra, atualmente, e dos cenários de estudo, com a variação de materiais construtivos na envoltória, integração de energia renovável e alteração do cronograma de uso da edificação;

- Quantificar a emissão de carbono por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do edifício, nas fases de pré-uso (fase construtiva) e na fase de operação do edifício;
- Gerar os indicadores de consumo do edifício, na fase operacional, e avaliar as estratégias propostas para redução do consumo energético, visando a requalificação do edifício, ou novos edifícios a serem construídos com características semelhantes; e
- Avaliar se a melhoria no desempenho energético do envelope construtivo resulta na melhoria do desempenho ambiental global da edificação.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos.

O capítulo 1 introduz o tema da requalificação energética e ambiental, apresentando a introdução, as justificativas, o objetivo e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 traz os fundamentos teóricos da pesquisa e a revisão bibliográfica da tese, divididos pelos assuntos que abordam os temas do desempenho energético, a ferramenta de simulação computacional, a influência do envelope construtivo, das energias renováveis e das condições de uso da edificação, do desempenho ambiental, a Avaliação do Ciclo de Vida no ambiente construído, as medidas de mitigação das emissões de gases de efeito estufa pelas edificações e a questão da otimização multiojetivo.

O capítulo 3 aborda a estrutura metodológica do trabalho, descrevendo o estudo de caso, os dados climatológicos e as características da edificação, além do perfil de ocupação e demais dados do edifício. Neste capítulo também é detalhada a composição dos cenários de estudo e os detalhes para a adoção da ferramenta da Avaliação do Ciclo de Vida das edificações.

O capítulo 4 demonstra os dados processados provenientes dos métodos aplicados, com gráficos e tabelas, apresentando os resultados detalhados das etapas metodológicas adotadas e os cálculos realizados. Apresenta a avaliação do desempenho energético dos cenários propostos e a análise dos dados operacionais do edifício, com os indicadores de consumo e das análises das emissões de carbono.

O capítulo 5 estabelece as considerações finais da pesquisa, reunindo, de forma resumida, o que foi abordado ao longo do estudo e apresentando os resultados mais relevantes.

CAPÍTULO 2

REQUALIFICAÇÃO ENERGÉTICA E AMBIENTAL

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O setor de edificações é um dos maiores consumidores de energia e um dos principais responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE), em nível mundial. De acordo com o relatório global *Status Report for Buildings and Construction* de 2024/25, as edificações são responsáveis pelo consumo de 32% da energia global e por 34% das emissões globais de GEE (UNEP, 2025) e, no Brasil, respondem por cerca de metade do consumo de energia elétrica (BRASIL, 2024a) e 6% das emissões de GEE (SEEG, 2025).

Edificações existentes que não atendem aos padrões de eficiência contribuem para o cenário de alto consumo elétrico. Nesse contexto, requalificar uma edificação refere-se ao processo de adaptação para que ela se conforme às exigências normativas contemporâneas de desempenho, conforto e funcionalidade. Essa prática constitui uma oportunidade destacada para elevar os edifícios a padrões superiores de eficiência ambiental, com foco particular na redução do consumo de energia. Quando aplicada de forma abrangente a uma parcela substancial do estoque edificado, a reabilitação com vistas à melhoria do desempenho das construções pode gerar impactos imediatos nas iniciativas e políticas direcionadas à mitigação de problemas ambientais (Munarim, 2014).

A requalificação, com ênfase na eficiência energética, foca inicialmente na operação eficiente da edificação, ao melhorar suas características arquitetônicas e o conforto dos usuários, visando propor intervenções para essa eficiência. A requalificação ambiental envolve o estudo do desempenho ambiental do edifício e sua relação com o meio ambiente visando à proposição de medidas e tecnologias para reduzir os impactos negativos da edificação e otimizar recursos naturais.

A requalificação energética e ambiental de edificações tem potencial para diminuir, de maneira significativa, o uso de energia, auxiliando na obtenção de metas governamentais voltadas para a eficiência energética e a redução dos gases de efeito estufa. Promover uma requalificação integrada, energética e ambiental, é um processo complexo que envolve diversas etapas de estudo e requer analisar uma série de funções e variáveis do edifício em operação.

A escolha das medidas de modernização a serem aplicadas em um projeto específico configura um desafio de otimização, que pode ser de objetivo único, ou múltiplo, enfrentando diversas restrições e limitações. Além disso, é particularmente importante conhecer os benefícios e os riscos da implantação de medidas sustentáveis de modernização para a correta tomada de decisão. Nessa perspectiva, a otimização do processo é crucial para promover a sustentabilidade e para enfrentar desafios importantes da atualidade, como as mudanças climáticas, a eficiência energética e a emissão de carbono pelas edificações.

2.2 DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES

Edifícios com adequado desempenho energético são aqueles que conseguem equilibrar as necessidades de conforto e funcionalidade dos usuários, com eficiência no uso da energia, observando as premissas do projeto, pois o desempenho energético deve ser avaliado no contexto das necessidades e expectativas estabelecidas para cada edifício específico (Fukuoka *et al.*, 2024).

A preocupação com o alto consumo de energia teve início com a crise do petróleo, ocorrida na década de 70, quando diversos países direcionaram recursos e linhas de pesquisa para o desenvolvimento de sistemas energéticos mais eficientes e de fontes alternativas de energia. Na oportunidade, grande visibilidade foi dada ao desempenho energético das edificações, responsáveis por uma parcela significativa do consumo de energia elétrica no mundo. Diversos países, fortemente dependentes do petróleo para o suprimento de energia elétrica, mobilizaram-se para promover iniciativas para o desenvolvimento de edificações mais eficientes (Haddad, 2005).

Na União Europeia, no que diz respeito às normas de desempenho energético do patrimônio construído, foram constatados avanços significativos, após a promulgação da diretiva europeia 2002/91, que trata do desempenho energético de edifícios (EPBD, 2002). Esse documento instituiu a obrigação de seguir diretrizes energéticas durante a modernização de edifícios (ou partes de edifícios). Em 2010, essa diretiva foi revisada (Diretiva 2010/31/EU - EPBD, 2010), e a atualização estabeleceu novas exigências mínimas relacionadas ao desempenho energético de construções, seja para edificações novas ou reformadas. Nesse contexto, foram introduzidos os conceitos de energia líquida e quase nula (nZEBs), e a otimização de custos passou a ser um critério fundamental para definir o nível apropriado de eficiência energética em edificações de referência.

Em 2010, foi apresentado, nas normas europeias, o conceito de custo-ótimo, que descreve o equilíbrio entre o investimento necessário e as economias em custos de energia, ao longo da vida útil do edifício (Rosso *et al.*, 2020). Em 2012, a otimização de custos foi detalhada pelo regulamento delegado 244 da Comissão Europeia (EU 244/2012), que criou uma base de comparação para identificar o nível mais eficiente do consumo energético. Em 2018, uma nova atualização da regulamentação foi elaborada para promover reforma energética significativa e econômica na infraestrutura construída de todos os países da União Europeia, alinhando-se à abordagem de ciclo de vida, estabelecendo novos métodos para a avaliação dos sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC), digitalização dos edifícios e suas instalações, além de novos critérios relacionados à saúde e à qualidade do ar (Hogeling e Derjanecz, 2018).

Países, como o Japão, os Estados Unidos e a Suécia figuram entre as nações que adotaram metas e políticas relacionadas à construção de edifícios de energia zero (ZEBs), enquanto países, como o Marrocos, implementaram normas térmicas para edificações,

estabelecendo requisitos mínimos de eficiência energética para novas obras (Manni e Nicolini, 2022; EPBD, 2015).

No Brasil, o desempenho energético de edificações é regido por um conjunto de normas e regulamentações. A preocupação com a racionalização da energia elétrica nos edifícios, no país, iniciou-se com a crise no setor elétrico, ocorrida em 2001. O governo instituiu, na oportunidade, a Lei nº 10.295/2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, prevendo o desenvolvimento de mecanismos para promover a eficiência energética em edificações (Brasil, 2001). Posteriormente, o Decreto 9.864/2019 regulamentou a Lei 10.295/2001 e instituiu o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética (CGIEE) (Brasil, 2019). No contexto desse decreto, foi criado o PROCEL-EDIFICA (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – Edificações). Entre os principais objetivos desse programa, consta o desenvolvimento do Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicas – RTQ-C (Brasil, 2010a) e do Regulamento Técnico da Qualidade para Edifícios Residenciais – RTQ-R (Brasil, 2010b).

No âmbito das edificações comerciais, de serviços e públicas, foi estabelecido que elas deverão atender aos requisitos relacionados ao desempenho da envoltória, à potência instalada do sistema de iluminação e à eficiência do sistema de condicionamento de ar. A classificação é feita para cada requisito, variando de A (mais eficiente) até E (menos eficiente). Em seguida, são atribuídos pesos aos itens avaliados, sendo estes classificados como envoltória (30%), sistema de iluminação (30%) e sistema de condicionamento de ar (40%) (Brasil, 2010a).

Além disso, as normas da ABNT, NBR 15220: Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2022) e NBR 15575: Edificações habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho (ABNT, 2021), estabelecem requisitos e critérios para o desempenho térmico de edificações, visando garantir o conforto dos ocupantes e reduzir o consumo de energia.

Com relação às edificações públicas do poder judiciário, a questão do desempenho energético é regida pela Resolução 400/2021 do Conselho Nacional de Justiça (CNJ) que dispõe sobre a política de sustentabilidade no âmbito do Poder Judiciário e estabelece que seus órgãos devem realizar a gestão do Plano de Logística Sustentável (PLS). O consumo de energia elétrica é um dos indicadores do PLS que deve ser informado, anualmente, ao CNJ (CNJ, 2021) que atribui notas para avaliar a sustentabilidade de cada órgão. A nota é baseada nos indicadores que consideram o impacto no meio ambiente.

O 8º balanço da sustentabilidade do poder judiciário registrou que houve um aumento expressivo no consumo de energia elétrica, no ano de 2023, após as quedas de 2020 e 2021. Para o futuro, o Conselho Nacional de Justiça espera que esse indicador apresente reduções, tendo em vista a ampliação do uso de fontes de energia alternativa, como a energia fotovoltaica, e

estabelece para o ano de 2025 que a energia gerada por fontes alternativas passará a ser um indicador a ser informado à instituição (CNJ, 2024).

A busca por edificações mais sustentáveis passa pelo conhecimento dos fatores que influenciam seu desempenho energético. Uma previsão mais detalhada sobre o comportamento energético do edifício e dos usuários pode trazer vantagens significativas, como redução no consumo de energia, diminuição de custos e melhoria do conforto ambiental interno. A utilização de análises estatísticas desempenha um papel importante, ao ampliar o entendimento sobre os fatores que influenciam o consumo, possibilitando diagnósticos energéticos para edifícios individuais e fornecendo subsídios para o *benchmarking*, em grandes conjuntos de edificações (Yoshino *et al.*, 2017).

Alguns estudos apontam que o uso de energia em edifícios é influenciado principalmente pelo clima, envoltória do edifício, serviços de construção e sistemas de energia, operação e manutenção do edifício, atividades e comportamento dos ocupantes e, ainda, a qualidade ambiental interna (Yoshino *et al.*, 2017; He *et al.*, 2021; Carpino *et al.*, 2022). Veloso (2017) identificou, no estudo de dados reais de 101 edificações de escritórios, em Belo Horizonte, que as variáveis que mais influenciaram no consumo anual de energia elétrica foram o modo de condicionamento de ar, o fator solar dos vidros e a proporção janela-parede. Elofety *et al.* (2015) atribuem a influência do uso de energia em edificações altas aos fatores naturais, arquitetônicos (relações espaciais, forma, envelope, altura), humanos e tecnológicos.

Apesar do extenso conhecimento já consolidado sobre o desempenho energético das edificações, é fundamental prosseguir com os estudos, considerando a necessidade de prever as mudanças climáticas, atender às especificidades regionais e acompanhar a evolução desse campo, em constante transformação.

2.2.1 Benchmarking

Avaliar o desempenho de um edifício envolve a comparação a um parâmetro de referência, ou a um edifício de referência, especificado por normas, ou mesmo, contrastá-lo com o mesmo edifício sob diferentes estratégias (Pan *et al.*, 2023). Um importante parâmetro a ser considerado para as análises de desempenho energético é o consumo relativo de energia elétrica, de acordo com as tipologias das edificações. Estes levantamentos são conceituados como marcos de consumo ou *benchmarking*, que é definido como um processo contínuo e sistemático que permite a comparação das performances das organizações e respectivas funções.

De acordo com o dicionário *Merriam-Webster* (2025), a definição do termo *benchmarking*, em tradução livre, é um ponto de referência, a partir do qual podem ser feitas medições. Segundo Chung *et al.* (2006), o *benchmarking* do desempenho energético é um processo que compara o uso da energia em um edifício, ou grupo de edifícios com características semelhantes, ou analisa

a forma como o uso de energia varia de acordo com um nível pré-estabelecido. Com o conhecimento desse indicador, é possível identificar as ações que mais contribuem para a redução no consumo de energia elétrica.

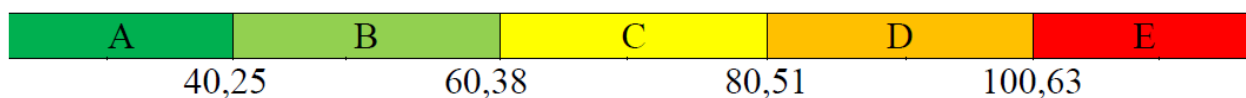
De acordo com Lamberts *et al.* (2014), um edifício pode ser considerado energeticamente mais eficiente do que outro, quando proporciona as mesmas condições ambientais de conforto ao seu usuário, com menor consumo de energia.

Carlo (2008) entende que o consumo de energia é função de variáveis que utilizam diretamente a energia, como os sistemas de iluminação artificial, de equipamentos e de condicionamento de ar e de variáveis que interferem nesses sistemas, como partes da envoltória da edificação e a forma de uso de tais sistemas consumidores de energia. Além disso, a edificação consome mais ou menos energia pelas trocas térmicas entre os ambientes interno e externo.

Uma base de comparação correta deve levar em consideração edificações de mesma tipologia para o estabelecimento de um *benchmarking*. No Brasil, pode-se citar o estudo de *benchmarking* desenvolvido por Silva (2013), que avaliou as áreas comuns de edificações comerciais de alto padrão, na região metropolitana de São Paulo. As variáveis utilizadas foram ano da edificação, relação área/pessoa, tipo de ar condicionado, sistema de distribuição de água gelada, sistema de distribuição de ar e alimentação dos condicionadores, sendo considerados grupos com condicionadores de ar central e edifícios com ar condicionado unitário. Os resultados obtidos acerca do consumo por área foram de 99,60 a 191,90 kWh/m²/ano.

Veloso (2017) estudou a influência das decisões de projeto no consumo de energia elétrica em edificações de escritório, na cidade de Belo Horizonte/MG. A partir de dados de consumo medidos, dados construtivos e informações sobre os tipos de sistemas de condicionamento de ar, foi verificada a existência ou não de correlação entre as decisões de projeto e o maior ou menor consumo anual por área de energia elétrica. A figura 2.1 apresenta os consumos da pesquisa desenvolvida por Veloso (2017), de acordo com as faixas de eficiência, sendo A para as mais eficientes e E para as menos eficientes, dados em kWh/m²/ano. Os dados são apresentados, respectivamente, para as edificações totalmente condicionadas, edificações com modo misto de condicionamento de ar e edificações sem condicionamento de ar.

Figura 2.1: Consumo de energia elétrica por área de todas as edificações da amostra (kWh/m²/ano).



Consumo de energia elétrica por área das edificações totalmente condicionadas (kWh/m²/ano)

A	B	C	D	E
72,25	108,38	144,51	180,63	

Consumo de energia elétrica por área das edificações com modo misto de condicionamento de ar (kWh/m²/ano)

A	B	C	D	E
31,80	47,70	63,60	79,50	

Consumo de energia elétrica por área das edificações sem condicionamento de ar (kWh/m²/ano)

A	B	C	D	E
18,33	27,50	36,67	45,84	

Fonte: Veloso (2017).

Os dados apresentados na figura 2.1 demonstram que os edifícios com modo misto de condicionamento de ar apresentaram o consumo anual de energia elétrica, por área, atingindo até 180,63 kWh/m²/ano. Já o consumo de energia dos edifícios totalmente condicionados foi cerca de 219% superior ao consumo das edificações sem condicionamento de ar.

2.2.2 Simulação computacional energética

A simulação computacional de energia surge como um meio eficaz de avaliar o desempenho termoenergético de um edifício, ao levar em consideração as especificações construtivas e os agentes externos (como condições bioclimáticas, vegetação, sombreamento etc.) (Mendes *et al.*, 2024). É uma ferramenta que utiliza modelos para imitar a operação de processos e sistemas relacionados à energia e pode ser utilizada em projetos de eficiência energética, reduzindo o tempo de trabalho para a análise do comportamento térmico e energético, detalhando as temperaturas internas de cada área, além do uso de energia de cada sistema e da construção, apresentando resultados por hora durante o decorrer do ano (Fukuoka *et al.*, 2024).

A ferramenta também pode ser aplicada para analisar a produção de energia, otimizar a geração de energia solar fotovoltaica, identificar o efeito de cada fator isoladamente e testar soluções mais eficientes, sem a necessidade de intervir na edificação. O *software* de simulação utiliza equações de balanço de energia para prever o consumo geral, as temperaturas internas, os níveis de umidade, as despesas de energia, a eficácia das fontes de energias renováveis, o dimensionamento do sistema HVAC, os requisitos de iluminação, a emissão de CO₂, entre outros.

As primeiras ferramentas computacionais para simulação de edificações surgiram na década de 70, impulsionadas pela busca por fontes alternativas de energia e sistemas mais eficientes. A partir da década de 90, com o aumento da popularidade dos computadores pessoais (PCs), diversas empresas e grupos de pesquisa passaram a focar na criação de interfaces para softwares mais sofisticados, como o *EnergyPlus*, entre outros, que permitem a análise de fenômenos físicos complexos (Mendes *et al.*, 2005).

Por meio de *softwares* de simulação, é possível analisar a eficiência térmica e energética de edificações sob várias alternativas de projeto arquitetônico, materiais de construção, sistemas de iluminação, equipamentos e climatização. O *software* de simulação tem a capacidade de definir parâmetros-chave para diferentes partes e componentes de um edifício (Pezeski *et al.*, 2019).

A modelagem computacional para a estimativa de carga de aquecimento e resfriamento e a previsão da utilização de energia são essenciais para atingir o objetivo de poupança de energia, redução de emissões em edifícios e otimização do projeto arquitetônico (Pan *et al.*, 2023). O desempenho térmico é influenciado por variáveis interdependentes e conceitos multidisciplinares (Mendes *et al.*, 2024). Nesse contexto, a capacidade de processamento dos computadores revolucionou a forma de projetar e reformar as edificações, permitindo simulações complexas e detalhadas.

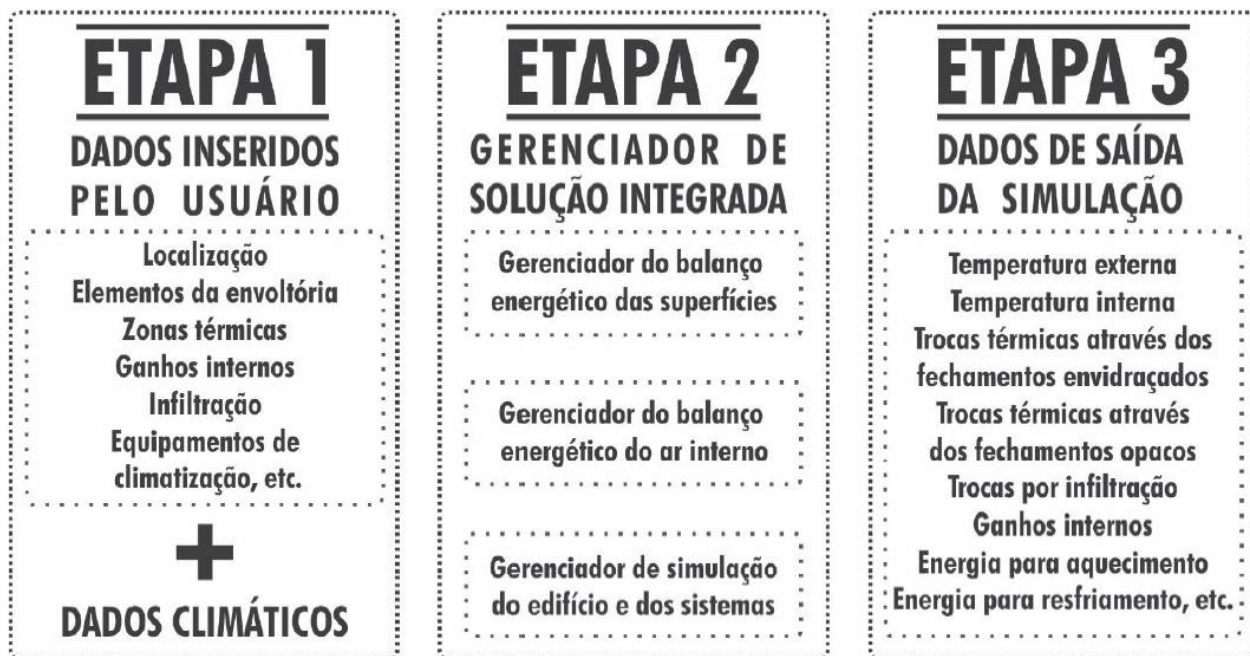
Por ser uma das tecnologias mais importantes e avançadas para a mitigação do carbono no setor da construção civil, a simulação energética de edifícios tornou-se um método prático e de apoio para projetos de eficiência energética, operações e modernização de edifícios, com o objetivo de melhorar o desempenho energético e reduzir as emissões de carbono (Pan, Y. *et al.*, 2023). A técnica da simulação computacional também é um importante apoio para a otimização da eficiência energética em múltiplas escalas, com diferentes estágios, durante todo o ciclo de vida do edifício (Waibel *et al.*, 2019). Na atualidade, as metodologias de modernização de edifícios para a eficiência energética e a diminuição da emissão de carbono avaliam o desempenho dos edifícios com técnicas de simulação. O processo de otimização automatizado por computador permite que um grande número de alternativas de projeto seja gerada e analisada em um curto período de tempo, alcançando melhor desempenho (Pan *et al.*, 2023).

Atualmente, no Brasil, o programa de simulação do desempenho térmico e energético de edificações mais utilizado é o *EnergyPlus*. Este programa possui suas raízes nos programas BLAST (Building Loads Analysis Thermodynamics) e DOE-2, desenvolvido pelo departamento de energia dos Estados Unidos e validado pela norma ASRHAE 140 (ASHRAE, 2014). É um programa modular e de livre acesso, além disso, é um programa confiável que permite simular o desempenho das edificações em relação à demanda de aquecimento, resfriamento, iluminação, ventilação, entre outros.

Essa ferramenta possui um mecanismo de simulação cujos dados de entrada e saída são arquivos de textos simples. A estrutura do trabalho no programa *EnergyPlus* é composta por 3 etapas. Na primeira são informados os dados de entrada da simulação que abrangem os que caracterizam a edificação e o arquivo climático (que contém informações relacionadas à temperatura, umidade, radiação solar entre outros dados do clima da edificação em estudo). A segunda etapa é composta pelo gerenciamento da solução integrada, a simulação propriamente dita, em que há a interação dos dados de entrada. Na etapa três, o programa de simulação apresenta os dados de saída da simulação, como temperatura externa, temperatura interna,

trocas térmicas através dos fechamentos envidraçados e opacos, trocas por infiltração, ganhos internos, entre outros (Brugnera, 2018). As etapas descritas por Brugnera (2018) estão resumidas na Figura 2.2.

Figura 2.2: Etapas da simulação computacional no *EnergyPlus*.



Fonte: Brugnera (2018).

Segundo Mendes *et al.* (2024), a referência ou o padrão mais utilizado nos estudos de simulação computacional para a eficiência energética é a norma internacional ASHRAE 90.1 (2022) da Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar condicionado. Esta norma estabelece os requisitos mínimos para a eficiência energética de edifícios, tanto na fase de projeto quanto na fase de operação, sendo publicada em 1975 e atualizada em 2022. Outra norma importante para as simulações de eficiência é a ASHRAE 55 (2023), que prescreve condições aceitáveis para conforto térmico interno.

Para a identificação do padrão, ou das diretrizes utilizados nas simulações, Mendes *et al.* (2024) desenvolveram uma lista de verificação projetada para aumentar a clareza, a auditabilidade e a replicabilidade em procedimentos de modelagem energética, apresentada na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – *Checklist* de boas práticas a serem apresentadas no método de estudo envolvendo simulações energéticas para avaliação do desempenho térmico e energético.

CHECKLIST PARA SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

- Software de simulação;
- Área total de construção;
- Identificação de zonas térmicas;
- Planta e corte do edifício, com escala ou dimensões gráficas e modelo 3D;
- Orientação geográfica do edifício;
- Localização da simulação (com latitude e longitude, se aplicável);
- Definição do clima de acordo com algum padrão, se aplicável;
- Fonte do arquivo meteorológico;
- Descrição do clima da região ;
- Período simulado;
- Tipo de contato do edifício com o solo;
- Detalhamento da temperatura do solo utilizada;
- Detalhamento de elementos de sombreamento do próprio edifício (por exemplo, beirais);
- Sombreamento de elementos vizinhos (por exemplo, vegetação e outros edifícios);
- Estratégia adotada para calibração/validação do modelo energético, se aplicável
- Método usado para avaliar o desempenho térmico;
- Requisitos usados para determinar o desempenho térmico;
- Status de janela aberta (ou especificação de fração aberta);
- Ganho de energia interna: iluminação;
- Ganho de energia interna: equipamentos eletrônicos;
- Ganho de energia interna: pessoas;
- Outros ganhos de energia interna, se aplicável;
- Padrão de ocupação e funcionamento de equipamentos de iluminação/eletrônicos;
- Tipo de ventilação (natural, mecânica ou mista);
- Taxa de infiltração de ar;
- Especificação e eficiência do sistema HVAC;
- Horário de funcionamento do sistema HVAC;
- Limites de temperatura de ponto de ajuste/operação/conforto;
- Propriedades dos materiais que compõem o envelope (pelo menos: calor específico, gravidade específica, condutividade térmica, espessura e absorvância);
- Simplificações adotadas em modelos simulados;
- Algoritmos, ferramentas ou processos anexados à simulação, se aplicável ;
- Padrões, diretrizes e referências adotadas.

Fonte: Mendes *et al.* (2024).

Esses parâmetros de entrada de dados, bem como a definição da temperatura do ponto de ajuste (*setpoint*), isto é, o valor da temperatura na qual o sistema de condicionamento de ar deve se manter, são extremamente importantes, pois tem impacto direto no consumo de energia do

edifício (Mendes *et al.*, 2024). Da mesma forma, são importantes o conhecimento da programação de uso do edifício, a programação de equipamentos que ligam e desligam automaticamente, entre outros (Pan *et al.*, 2023).

2.2.3 Influência da envoltória no consumo energético das edificações

No âmbito da requalificação arquitetônica voltada para a eficiência energética, é fundamental levar em conta as características da envoltória da construção, realizando ajustes que visem à diminuição das suas necessidades energéticas (Eliopoulou e Mantziou, 2017; Hamdaoui *et al.*, 2018; Nematchoua *et al.*, 2020; Gupta e Deb, 2023).

Investir em elementos de alto desempenho para compor a envoltória das edificações é considerada uma vantagem a longo prazo, pois eles oferecem maior conforto térmico, ao manterem a temperatura do ar interno mais estável, minimizando as demandas térmicas dos edifícios, ao mesmo tempo em que oferecem a maneira menos onerosa de redução de emissões de carbono. Quando se analisam outras soluções para edifícios, a escolha dos materiais da envoltória se torna especialmente relevante, considerando a durabilidade prolongada dessas construções e os custos envolvidos, conforme observado pela *International Energy Agency* (Yoshino *et al.*, 2017).

A camada externa ou envelopamento de uma construção é crucial para o seu desempenho térmico, pois consiste em componentes que interagem diretamente com o ambiente externo e atuam como a primeira barreira contra fatores externos (Ferreira *et al.*, 2017). A composição dessa camada externa é influenciada por diversos parâmetros e critérios de seleção, que são essenciais para a criação de edifícios que consomem pouca energia (Kumar *et al.*, 2022; Iwaro *et al.*, 2013; Kumar e Suman, 2013; Mostafavi *et al.*, 2021; Gilani *et al.*, 2022; Gupta e Deb, 2022). Assim, a relação entre a envoltória e o consumo de energia tem recebido atenção crescente.

Al-Tamimi (2022) analisou que investir em pequenas melhorias na camada externa de um edifício, durante o planejamento ou renovação, pode resultar em significativas economias de energia para edificações. Por sua vez, Kumar e Suman (2013) afirmam que as paredes e os telhados constituem as principais partes da envoltória, expostas ao ambiente externo e sujeitas aos efeitos da radiação solar, temperatura externa, vento e chuvas, motivo pelo qual devem receber a necessária atenção no projeto, ou na modernização.

Gupta e Deb (2023) apresentam uma relevante revisão de literatura acerca do impacto das variáveis do projeto do envelope, no consumo de energia, em edifícios situados em áreas de clima tropical. Segundo os autores, a eficácia da envolvente do edifício é determinada pelas características térmicas, físicas, ópticas e geométricas. As variáveis de projeto que mais influenciam no desempenho do envelope construtivo são apresentadas na figura 2.3.

Figura 2.3 – Propriedades do envelope construtivo.



Fonte: Gupta e Deb (2023).

As propriedades térmicas são caracterizadas pela massa térmica e pelo isolamento; as propriedades físicas são determinadas pela taxa de abertura (ou WWR) e pelo sombreamento externo; as propriedades ópticas são definidas pela absortância/refletância e pela emissividade e as propriedades geométricas compreendem a orientação e a forma da construção (Gupta e Deb, 2023). Pode-se observar que as características que mais influenciam são as propriedades térmicas: massa térmica, isolamento térmico e o tipo do envidraçamento e as propriedades ópticas: tipo do revestimento externo.

De acordo com Gupta e Deb (2023), as características térmicas da camada envolvente são definidas pela massa térmica e pelo isolamento que atuam de maneiras diferentes no cenário da construção e apresentam atributos diversos. O isolamento térmico tem como objetivo reduzir a transferência de calor entre o interior e o exterior do edifício, enquanto a massa térmica visa manter a temperatura interna, ao acumular e liberar calor de forma gradual. Ambas as propriedades são fundamentais para garantir o conforto térmico e a eficiência energética de um edifício.

A massa térmica refere-se à habilidade de um material em absorver, armazenar e liberar calor. Isso é alcançado pelo uso de elementos de alta densidade, como concreto ou taipa, ou, ainda, com materiais de mudança de fase (PCM) (Cabeza *et al.*, 2020). Estruturas que possuem grande massa térmica nas suas fachadas reagem de forma reduzida e mais lenta às variações de

temperatura do ambiente externo, fenômeno conhecido como inércia térmica (Verbeke e Audenaert, 2018; Ascione, 2017).

A eficiência da massa térmica é influenciada por diversos fatores, incluindo o clima, a técnica de construção, as características dos materiais, a disposição do edifício, entre outros (Brito, 2015). Sem a massa térmica nos materiais de construção, o calor adentra rapidamente os ambientes, resultando em temperaturas excessivamente elevadas, durante o dia, e frias, à noite. Tais materiais costumam ser sensíveis ao armazenamento de calor, possuindo uma capacidade de retenção limitada. O uso de materiais que armazenem calor de forma latente se apresenta como uma opção para incrementar a massa térmica nos elementos de construção (Bhamare *et al.*, 2019).

De maneira geral, em regiões onde ocorre uma grande variação diária na temperatura do ar exterior (em torno de 10°C ou mais), e onde as temperaturas máximas e mínimas se aproximam da zona de conforto térmico, a alta inércia térmica da edificação pode melhorar as condições de conforto térmico. Por outro lado, em áreas com pouca variação diária (6°C ou menos), onde as temperaturas mínima e máxima do ar permanecem acima da zona de conforto, por grande parte do dia, uma alta inércia térmica pode causar uma maior sensação de desconforto para os ocupantes (Brito, 2015).

Uma abordagem passiva para aumentar a massa térmica envolve a utilização de materiais que retêm calor latente, conhecidos como material de mudança de fase (PCM), o que resulta na redução da variação de temperatura entre o dia e a noite, adiando a transferência de calor para as últimas horas do dia no interior da edificação (Saffari *et al.*, 2016; Cabeza e Chàfer, 2020; Miranda *et al.*, 2021). Esses materiais acumulam e liberam calor durante a mudança de fase a temperaturas praticamente constantes (Bhamare *et al.*, 2019). De acordo com Al-Yasiri e Szabó (2022), a adição de PCM, em edificações localizadas em regiões quentes, representa uma estratégia eficaz para aprimorar o conforto térmico e a eficiência energética.

Bhamare *et al.* (2019) explicam que, durante o dia, o PCM capta calor, sob a forma de calor latente, tanto das superfícies opacas quanto das janelas do edifício, alcançando uma temperatura estável. Dessa forma, a temperatura interna da edificação é estabilizada e reduzida. O calor armazenado no PCM é liberado durante a noite. No caso do resfriamento passivo, essa liberação de calor ocorre por processos naturais, enquanto no resfriamento ativo, ela é realizada por sistemas de ar-condicionado, que geram determinados custos energéticos.

Os materiais de mudança de fase (PCM) aumentam a inércia térmica da construção, quando ocorrem mudanças de fase entre sólido e líquido. Os PCMs ajudam a minimizar as variações de temperatura interna no edifício, proporcionando maior conforto térmico aos ocupantes, e também são comumente utilizados para gerenciar picos de carga e em outras abordagens ativas (Cabeza *et al.*, 2020).

Nos últimos anos, diversos pesquisadores têm reconhecido a relevância dos PCMs na construção civil. Existem diversas metodologias para a sua inserção em materiais de construção, incluindo incorporação direta, imersão, impregnação a vácuo, encapsulamento e estabilização de forma, entre outras (Nazi *et al.*, 2017; Nematchoua *et al.*, 2020; Al-Yasiri e Szabó, 2022; Imafidon e Ting, 2023).

No contexto brasileiro, a adição de Material de Mudança de Fase (PCM) nas construções tem sido tema de pesquisas (Brito *et al.* 2016; Pons e Stanescu, 2017; Almeida, 2022). Os autores concordam que o PCM pode reduzir o consumo de energia pela manutenção do conforto térmico em ambientes internos.

O isolamento térmico das fachadas trata da capacidade de um material, ou elemento construtivo de minimizar a transferência de calor entre o ambiente interno e o externo de uma edificação, proporcionando conforto, tanto no calor quanto no frio, reduzindo a necessidade de uso de sistemas de aquecimento e refrigeração (Gupta e Deb, 2023).

O isolamento dos elementos do edifício pode desempenhar um papel importante no alcance dos critérios de eficiência energética, conforto térmico e baixa emissão de carbono, se aplicados corretamente (Kumar *et al.*, 2020), proporcionando conforto, com menos custo operacional. No entanto, a magnitude da poupança de energia e o resultado do uso de isolamento térmico variam, de acordo com o tipo do edifício, as condições climáticas em que o edifício está localizado, bem como o tipo, a espessura e a posição do material isolante utilizado (Kumar e Suman, 2013).

O principal objetivo de instalar o isolamento na envoltória é reduzir o consumo de energia para resfriamento ou aquecimento, aumentando a resistência térmica da envolvente do edifício (Aditya *et al.*, 2017; Mousavi *et al.*, 2022; Dabous *et al.*, 2022). Em climas quentes, o menor consumo de energia está associado ao envelope do edifício mais insulado. Um melhor isolamento com baixa condutividade térmica contribui significativamente para novas construções e modernização de edifícios existentes (Singh e Garg, 2009; Kumar e Suman, 2013; Cicesky e Meir, 2014; Sarihi, Saradj e Faizi, 2021).

Gallardo *et al.* (2016) afirmam que bons resultados na avaliação de desempenho térmico dependem, em grande parte, da especificação de materiais e sistemas construtivos. Analisando, com base em um clima quente e úmido, o Equador, os autores observaram que a escolha adequada de materiais de isolamento pode reduzir em até 50% o número de horas de desconforto térmico de uma habitação.

Song *et al.* (2021) afirmam que a aplicação de isolamento em paredes e telhados é um dos métodos mais econômicos e eficientes para reduzir o consumo de energia, funcionando bem em diferentes condições ambientais e climáticas. Suas qualidades são durabilidade, custo, resistência ao escoamento de compressão, absorção de vapor de água, boa resistência à combustibilidade e

à inflamabilidade, operação simples e boa condutividade térmica. Para isso, recomenda-se o uso de materiais com baixa condutividade térmica, como poliestireno expandido (EPS), lã de vidro, lã de rocha ou poliuretano (Kumar *et al.*, 2022).

Kumar *et al.* (2020) apresentaram amplo levantamento bibliográfico sobre as propriedades e desempenho dos materiais de isolamento de edifícios, classificando-os como materiais de isolamento convencionais, de última geração e sustentáveis. Os materiais de isolamento convencionais têm impactos ambientais adversos, enquanto os materiais de isolamento avançados têm a menor condutividade térmica. Embora os sustentáveis tenham um menor impacto ambiental, eles são inadequados para climas úmidos ou chuvosos, com baixo comportamento higroscópico e resistência ao fogo.

A energia do ciclo de vida, custo e avaliação ambiental revelam que a baixa condutividade de isoladores é melhor para regiões dominadas pelo calor. É necessário comparar as propriedades dos materiais isolantes (térmica, higroscópica, acústica, reação ao fogo e ambiental) e o desempenho (energia do ciclo de vida, custo do ciclo de vida, ciclo de vida avaliação ambiental e conforto térmico) (Tovarović *et al.*, 2017; Torres-rivas *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2022).

Portanto, a otimização para a escolha do material do isolamento deve incluir quatro critérios: energia, meio ambiente, economia e conforto. As propriedades térmicas são necessárias para economia de custos e de energia operacionais, enquanto as propriedades ambientais são essenciais para a redução das emissões de CO₂ no ambiente construído. As propriedades higroscópicas são importantes para controlar a umidade relativa interna, em uma região úmida. As propriedades acústicas são particularmente importantes, se houver necessidade de manter um nível mínimo de ruído (Kumar *et al.*, 2020).

Na pesquisa desenvolvida por Gupta e Deb (2022), em uma escola, na Índia, o consumo de energia reduziu gradualmente com o aumento do isolamento do envelope. Os efeitos da redução de valores de transmitância térmica (U) do envelope resultaram em economias anuais de energia de até 18,5% em comparação com o modelo base, sem isolamento. Eliopoulou e Mantziou (2017) comprovaram, na modernização de um complexo escolar na Grécia, que a adição de isolamento reduziu o gasto de energia em cerca de 10%.

Segundo Kumar *et al.* (2020), a otimização do isolamento do envelope deve levar em consideração as propriedades térmicas para economia de custos e economia de energia operacional, enquanto as propriedades ambientais são essenciais para a redução das emissões de CO₂ no ambiente construído.

A temperatura da superfície do envelope externo é função de vários fatores, como a temperatura, a quantidade de radiação solar direta e difusa, o ângulo da radiação, a absorvidade da superfície e a condutividade térmica da superfície. A absorvidade da superfície é função da

cor e das características que aumentam a refletividade e diminuem proporcionalmente a radiação absorvida, incluindo textura e polimento do material (Cicelsky e Meir, 2014).

A refletância solar e a emissividade são parâmetros ópticos que têm um forte impacto no equilíbrio térmico da fachada, portanto, a mudança nos parâmetros de superfície deve ser levada em consideração na reabilitação energética. As estratégias de *retrofit* de fachadas relacionadas à melhoria do acabamento opaco incluem a mudança da refletância solar, emissividade e cor da fachada (Alonso *et al.*, 2017; Santamouris *et al.*, 2011; Gupta e Deb, 2023). Superfícies de alta emissividade térmica, quando expostas ao sol, têm a capacidade de liberar rapidamente o calor absorvido para o ambiente (Alonso *et al.*, 2017).

A refletância solar é uma medida da capacidade de um acabamento superficial para refletir a radiação solar (Santamouris *et al.*, 2011). A emitância infravermelha é uma medida da capacidade de uma superfície liberar e absorver calor. É usada para calcular a troca de calor por radiação entre as superfícies e o céu.

Como a absorvidade influencia não só no visível, mas também na faixa infravermelha do espectro da parede, a cor não necessariamente será a principal característica determinante na escolha do acabamento mais adequado (Alonso *et al.*, 2017). Assim, a seleção do material de revestimento da fachada é uma importante decisão multicritério, pois pode ser responsável por diminuir a transferência de calor pela envolvente do edifício, resultando em menor temperatura interior e maior conforto térmico (Kumar *et al.*, 2022; Dabous *et al.*, 2022).

Considera-se que os materiais reflexivos têm grande potencial para melhorar o conforto térmico de edifícios, entre eles, os revestimentos de resfriamento com maior refletância são a tecnologia mais conveniente e eficaz na vanguarda do domínio da energia. Telhado e paredes exteriores com esses revestimentos favorecem uma redução na absorção de energia solar e radiação e inibem a condução de calor solar dentro do prédio (Joudi *et al.*, 2013). Assim, em climas quentes, esses revestimentos frios podem manter o conforto térmico interno e economizar no consumo de energia para resfriamento do sistema (Ascione *et al.*, 2017; Qiu *et al.*, 2021).

Tais materiais representam uma alternativa econômica e ecologicamente correta para acabamentos de edifícios. Caracterizados por uma alta refletividade solar e emissividade térmica, revestimentos frios podem reduzir a temperatura da superfície, levando a uma redução da demanda de resfriamento (Synnefa *et al.*, 2008; Berardi *et al.*, 2020).

De acordo com Candido *et al.* (2023), as telhas e as tintas com valores de absortância mais elevados são responsáveis, respectivamente, pelo acréscimo de 24,74% e 17,55% no total de horas anuais em desconforto por calor. No inverno, telhas e tintas com maior absortância apresentaram influência no decréscimo de até 17,07% e 13,7% no total de horas anuais em desconforto por frio. Conforme esperado, é recomendada a utilização de absortâncias mais baixas para zonas bioclimáticas mais quentes e mais altas para regiões frias.

Gupta e Deb (2022) relatam em pesquisa na cidade de Mumbai (Índia) que a adição dos revestimentos reflexivos, na fachada, permitiu uma poupança anual de energia de 1% e redução na temperatura média para os horários de pico, durante os meses de abril e maio, correspondente a 1,5°C. Mousavi *et al.* (2022) sugerem que poupanças mínimas de energia de até 12% e 16% podem ser alcançadas no clima semiárido de Monterrey, México, por meio de aplicação combinada de isolamento e revestimentos reflexivos para paredes e telhado.

Correia *et al.* (2024) avaliaram, por meio de simulação computacional, a aplicação de revestimentos superfrios em escolas padronizadas para 8 climas do Brasil. Os resultados do estudo revelam que a utilização desses materiais pode promover efeitos consideráveis de resfriamento em regiões urbanas de clima mais quente, especialmente quando aplicadas a diferentes superfícies, como telhados, paredes e áreas adjacentes. Além disso, os autores observaram que, quando integradas a outras estratégias de resfriamento passivo, essa solução demonstrou elevado potencial para melhorar o conforto térmico, contribuindo para a redução do uso de climatização artificial em escolas brasileiras.

Com relação ao sistema de envidraçamento das janelas, ele é considerado como a estratégia individual mais crucial no projeto solar passivo de edifícios, desempenhando um papel vital na manutenção de um ambiente confortável (Hee *et al.*, 2015), uma vez que a principal carga de energia é causada pela transferência de calor através dos vidros das janelas (Chan *et al.*, 2009).

A transmissão de calor através das janelas é cinco vezes maior do que através de outros componentes da envolvente do edifício, e a perda de energia pelas janelas pode representar até 20% do consumo total de energia de edifícios (Bülow-Hübe, 2001). Por essa razão, a adoção de vidros de janela com eficiência energética pode efetivamente reduzir o ganho de calor solar e diminuir a demanda de resfriamento nas zonas dominantes de resfriamento. Portanto, a instalação de janelas com vidros mais eficientes, em termos energéticos, oferecem um meio importante de economia de energia (Huang *et al.*, 2014).

O desempenho do sistema de envidraçamento depende da taxa de transferência de calor (U), do ganho térmico solar (SHGC) e da transmitância visível (T). O valor U afeta principalmente a taxa de transferência de calor entre o ambiente externo e o interior de edifícios; o SHGC indica a quantidade de calor solar radiante admitido através dos vidros para o interior do edifício; e o T determina a intensidade da iluminação natural projetada no edifício. A seleção do envidraçamento deve considerar as compensações de resfriamento, aquecimento e consumo de energia de iluminação em edifícios sob diferentes climas (Qiu *et al.*, 2021).

Nas zonas quentes, janelas com menor SHGC são a melhor escolha para reduzir o uso de energia em edifícios (He *et al.*, 2021). Nessas regiões, o valor U dos vidros das janelas é menos importante do que o SHGC na redução da demanda de resfriamento. Diminuir o SHGC da janela

pode ser mais útil para a eficiência energética de um edifício do que alterar sua transmitância térmica nas zonas quentes (Gupta e Tiwari, 2016; Ascione, 2017).

Nos casos em que 20-30% das paredes são compostas por janelas, estas representam cerca de 45-60% da carga de resfriamento (Bhamare *et al.*, 2019). Embora a adição de sombreamento reduza significativamente a necessidade de resfriamento em edificações, esta estratégia pode ter um desempenho contraproducente, devido à redução da iluminação natural e radiação solar, durante o inverno. Portanto, é essencial equilibrar a porcentagem janela-parede, sombreamento e propriedades do vidro para diferentes orientações (Fereidani *et al.*, 2021).

As propriedades térmicas das janelas podem ser aprimoradas por meio da adição de vidros, separados por vãos de ar, ou preenchimento com gás de movimento lento, como argônio ou criptônio, além disso, as cavidades seladas nessas janelas são muito úteis na melhoria do seu isolamento e o valor U e SHGC de painéis duplos e os vidros transparentes são melhores do que os de vidros simples (Chow *et al.*, 2010; Konstantinou e Prieto, 2018).

Ascione (2017) observou que existem vidros sensíveis que podem alterar a transparência, de acordo com a intensidade solar externa (fotocrômica), temperatura (termocrômico), ou quando ativado por uma carga elétrica (eletrocrômica).

O vidro reflexivo é o melhor tipo de envidraçamento para reduzir as demandas de resfriamento em climas quentes, pois tem o SHGC mais baixo, mas sua implementação é restrita, pelo efeito do espelho solar, o que pode causar problemas ao tráfego e aos edifícios vizinhos. Os vidros de baixa emissividade (*low-e*) podem controlar o SHGC, uma vez que seu revestimento pode bloquear a maior parte da radiação de ondas longas do meio ambiente (Chow *et al.*, 2010).

Reduzir o SHGC é mais importante do que diminuir o valor da temperatura da transmitância térmica, em climas dominados pelo resfriamento, porque uma fachada com baixo valor U pode causar pequenos problemas de superaquecimento (Lamrhari e Benhamou, 2018).

Estudos, comparando o consumo de energia de um edifício com diferentes tipos de vidros de janela, descobriram que vidros duplos de baixa emissividade podem fornecer o melhor suporte para redução de energia (Asadi *et al.*, 2012; Ihm *et al.*, 2012). Eles afirmam que os vidros duplos são a melhor escolha para o desempenho térmico de janelas no que diz respeito à redução do consumo de energia, especialmente em edifícios altos. A tabela 2.2 apresenta as propriedades do vidro que proporcionam melhor influência na redução do consumo energético, conforme descritos por Bhamare *et al.* (2019).

Tabela 2.2 – Propriedades do vidro que proporcionam menor consumo energético.

PROPRIEDADES DO VIDRO PARA MENOR CONSUMO ENERGÉTICO	
Taxa de transferência de calor (U)	O valor U de um vidro afeta a taxa de transferência de calor do exterior para o interior do edifício Para regiões de clima frio, deve ser adotado um valor U mais baixo para reduzir a carga de aquecimento; Para regiões mais quentes, adota-se maior valor U do envidraçamento. O valor U em torno de 1,5 é recomendado para reduzir a carga de resfriamento.
Ganho térmico solar (SHGC)	A quantidade de calor solar que penetra no edifício depende do SHGC; No verão, é necessário um baixo SHGC para reduzir o ganho de calor solar no edifício, enquanto no inverno é preferível um envidraçamento com alto SHGC; Para regiões de clima frio, deve ser adotado um SHGC mais elevado para reduzir a carga de aquecimento; Para regiões mais quentes, adota-se menor SHGC do envidraçamento.
Transmitância visível (Tvis)	A transmitância visível determina a quantidade de iluminação natural dentro do edifício; O aumento da transmitância visível é benéfico para a iluminação diurna, mas reduz a poupança de energia térmica; O seu valor é decidido com base na poupança energética ideal e na iluminação natural.

Fonte: Bhamare *et al.* (2019).

Segundo Prieto *et al.* (2018), é possível identificar cinco tipos de intervenções, a partir da mudança de parâmetros específicos do envidraçamento: número de camadas, cor do vidro, utilização de revestimentos, combinação dessas variáveis e substituição do vidro estático convencional por tecnologias de vidro comutável ou dinâmico.

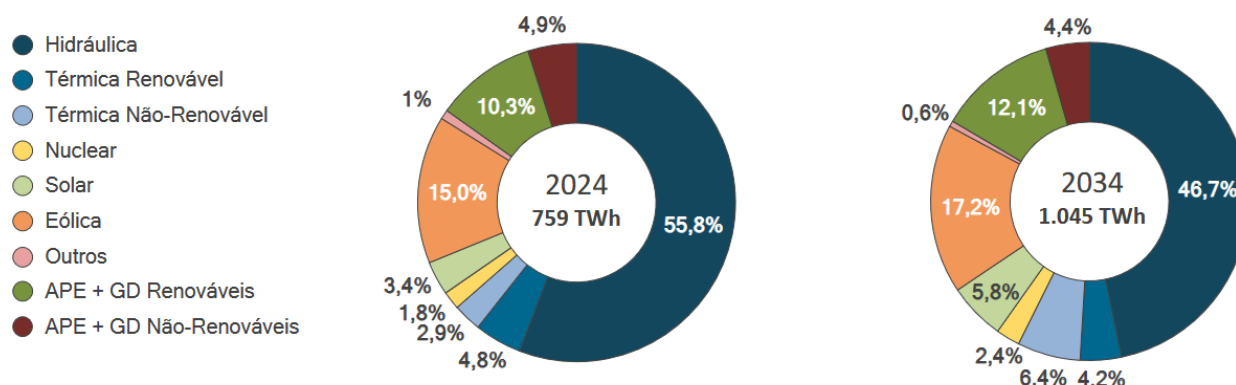
Gupta e Deb (2022) observaram que diminuir a temperatura do ar interior e as cargas de resfriamento está associado a SHGCs de vidro mais baixos. Qiu *et al.* (2021) constataram que o parâmetro mais importante para a carga de resfriamento com relação ao envidraçamento é o valor de SHGC.

2.2.4 Influência das energias renováveis no desempenho energético

A eletricidade é a fonte de consumo final de energia mais utilizada no setor comercial e público, com cerca de 90% de participação no consumo total do país, em 2023 (Brasil, 2024b). Em termos de capacidade instalada, observa-se uma previsão de maior diversificação da matriz elétrica brasileira para os próximos nove anos, com redução na participação hidrelétrica, sendo compensada pelo crescimento da capacidade instalada das fontes eólica e solar. Estima-se que a

participação das fontes renováveis em autoprodução (APE) e geração distribuída (GD) passem de 10,3% para 12,1%, no período, portanto, estima-se que a capacidade de geração de energia elétrica brasileira atinja o nível de renovabilidade de 86,2%, em 2034, conforme mostrado na figura 2.4.

Figura 2.4: Projeção da composição da capacidade instalada total por fonte energética.



Fonte: Brasil (2024).

Apesar de a matriz energética brasileira ser notável por sua alta porcentagem de fontes limpas e renováveis, destacando-se no cenário global a construção e a manutenção das usinas hidrelétricas, envolve atividades que geram emissões, principalmente na fase de sua construção, como a produção de concreto e o uso de equipamentos pesados. Além disso, os reservatórios de hidrelétricas podem liberar metano, um gás de efeito estufa mais potente do que o dióxido de carbono. Isso ocorre devido à decomposição da matéria orgânica submersa nos reservatórios, especialmente em áreas de clima quente. É preciso considerar também que, desde a crise hídrica de 2020-2021, o governo vem acionando cada vez mais usinas termelétricas (ou térmicas), mais caras e poluentes para suprir o déficit de energia do país (Nexo, 2021).

Inatomi e Udaeta (2005) entendem que as usinas hidrelétricas não são vistas como uma solução ecológica ideal devido aos efeitos ambientais que provocam na hidrologia, clima, erosão e assoreamento, sismologia, fauna, flora e transformação de paisagens. Quanto aos sistemas fotovoltaicos, os autores discorrem sobre a emissão de produtos tóxicos, durante o processo de produção da matéria-prima, ocupação de área para implementação do projeto, impactos visuais e riscos associados ao descarte de materiais tóxicos. No entanto, a fase de operação dos sistemas fotovoltaicos não apresenta perigo, ou impactos ambientais.

Dessa forma, Forlin e Rossi (2025) entendem que todas as formas de obtenção de energia possuem seus aspectos positivos e negativos. Em análise sobre a geração de eletricidade e sua relação com a sustentabilidade ambiental, Ramos *et al.* (2017) concluíram que a melhor forma de reduzir os impactos ambientais da produção de eletricidade é conectar a fonte geradora diretamente à demanda. Isso ajuda a diminuir a necessidade de linhas de transmissão e distribuição.

A utilização de energia renovável, em edificações, representa uma oportunidade de melhoria da eficiência energética e redução dos impactos ambientais, na fase de operação. A energia solar fotovoltaica é a tecnologia mais difundida, atualmente, e converte luz solar em eletricidade, por meio de painéis fotovoltaicos. Os sistemas podem ser instalados em telhados, fachadas e até integrados a vidros, gerando energia para consumo próprio ou injeção na rede elétrica.

Sendo assim, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFVCR) surgem como alternativa limpa e de disponibilidade ilimitada num cenário onde a diversificação do setor energético é recomendada para garantir uma matriz energética equilibrada e adaptável, que seja capaz de lidar com desafios climáticos e flutuações na oferta de recursos (Forlin e Rossi, 2025; Brasil/EPE, 2025).

A integração de sistemas de geração de energia renovável, como painéis solares fotovoltaicos e coletores térmicos, permite que os edifícios produzam parte, ou a totalidade da energia que consomem. A energia gerada pode ser utilizada diretamente no edifício para atender às diversas demandas (iluminação, climatização, equipamentos etc.), reduzindo a necessidade de utilizar a energia da rede distribuidora. Diversas são as vantagens desses sistemas, como a elevada produtividade, ausência de banco de baterias e custos mais acessíveis (Sokka *et al.*, 2016).

Posto isto, Myint *et al.* (2025) ponderam que integrar soluções de energia renovável, como painéis fotovoltaicos (PV), em projetos de edificações, pode significativamente aumentar a eficiência energética e reduzir as emissões operacionais de carbono, particularmente, quando se combina a implementação de materiais de construção com eficiência energética e estratégias de projeto solar passivo. O uso de materiais de isolamento avançados, geometria de construção otimizada e sistemas com eficiência energética, como ar-condicionado e projeto de fachada, desempenha papéis importantes na minimização do consumo de energia e na melhoria da sustentabilidade geral. Incorporar esses princípios de projeto e fontes de energia renováveis será crucial para atingir edifícios com energia líquida zero e contribuir para os esforços de descarbonização no ambiente construído.

Entender a radiação solar que incide sobre a superfície dos painéis fotovoltaicos é crucial para o adequado dimensionamento do sistema instalado na construção (seja no telhado ou na fachada) e para uma previsão precisa da quantidade de energia que pode ser produzida anualmente. Nesse sentido, o Atlas Brasileiro de energia solar apresenta um aprimoramento da estimativa da disponibilidade do recurso solar em todo o país (INPE, 2017).

Como o sistema fotovoltaico depende da irradiação solar, há a desvantagem de o sistema não gerar energia, durante a noite, além da variação do clima. Atualmente, os painéis solares possuem uma eficiência maior, necessitando de menor espaço para gerar a mesma quantidade

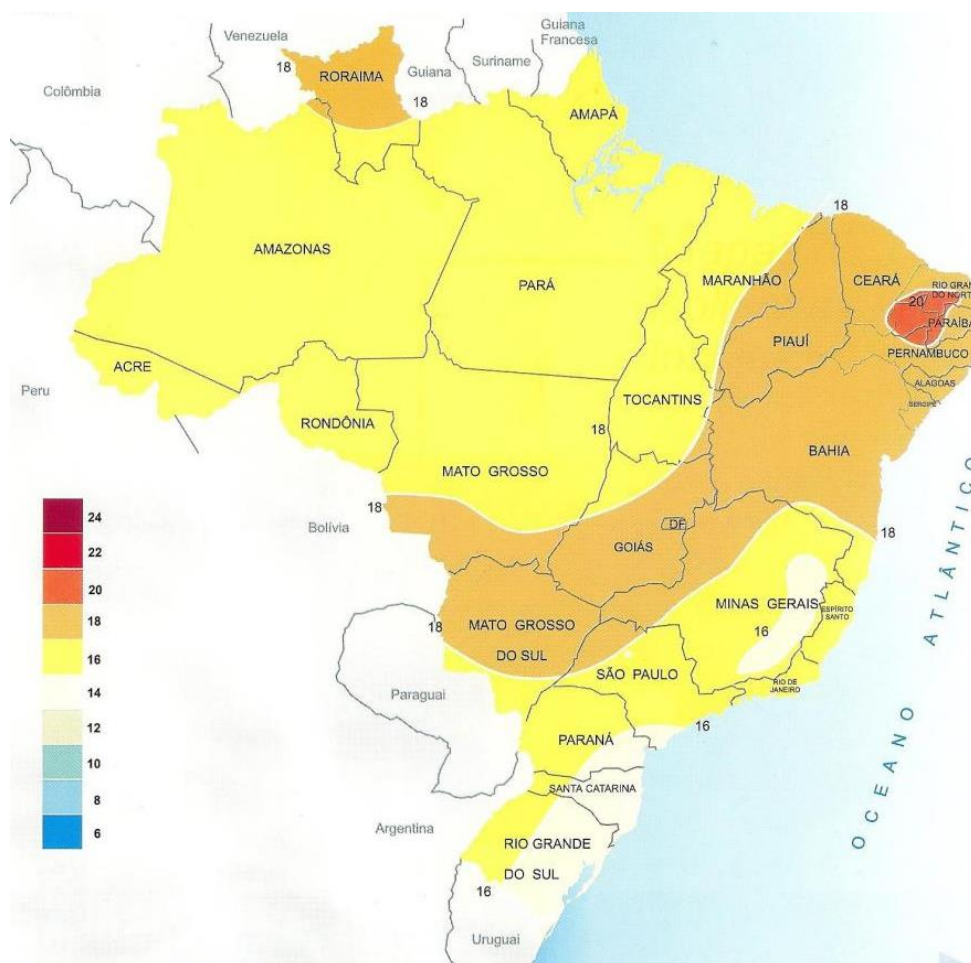
de energia elétrica, e possuem maior vida útil. Quase 80% dos painéis fotovoltaicos no mundo são baseados em alguma variação de silício e sua eficiência depende da pureza deste (Garcia, 2025).

Países, como o Brasil e a Austrália, e regiões, como a América Central, Sul e Norte da África figuram entre os locais com maior irradiação solar no planeta, evidenciando sua significativa capacidade para a produção de energia fotovoltaica (Garcia, 2025).

O Brasil possui um enorme potencial para ampliar a geração distribuída de energia solar fotovoltaica em larga escala, impulsionado pela alta incidência de radiação solar e pelas tarifas de energia elétrica que se comparam aos países líderes em tecnologia. Em 2024, a capacidade instalada de geração fotovoltaica no território brasileiro alcançou 43,6 GW, representando aproximadamente 18,7% do total nacional. Esse desempenho posiciona a energia solar como a segunda maior fonte energética do país, em termos de potência instalada.

A Figura 2.5 apresenta o mapa da produção de energia solar, no território nacional, apresentado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2017), no Atlas Brasileiro de energia solar.

Figura 2.5 – Produção de energia solar, em MJ/m².dia, do território nacional.



Fonte: INPE (2017).

Segundo o mapa da produção de energia solar no território nacional, a região Nordeste apresenta o maior potencial solar, seguida pelas regiões Sudeste e Centro-Oeste (INPE, 2017).

Estudos na literatura avaliam o uso de energias renováveis para a redução do consumo de energia elétrica em edificações. Gan *et al.* (2023) descobriram que os sistemas fotovoltaicos podem economizar em até 170% o consumo de energia elétrica.

Nematchoua *et al.* (2020) introduziram painéis fotovoltaicos de silício policristalino, em uma área de 96 m², em edifícios de escritórios, em diversas regiões da Ilha de Madagascar. A capacidade dos painéis fotovoltaicos instalados foi estimada na faixa de 1,5 a 3 kW. Os autores observaram que combinar painéis fotovoltaicos e estratégias passivas reduziu o uso de energia em 72,7% do consumo anual. O efeito dos painéis fotovoltaicos se mostrou mais significativo em climas tropicais quentes, onde o sistema é capaz de produzir 16% mais energia do que nas zonas tropicais úmidas.

Kang *et al.* (2025) analisaram a implantação de painéis fotovoltaicos, considerando a instalação em telhados, janelas e paredes opacas, por meio de 300 cenários, em um edifício de escritório, com consumo de energia quase zero, em Pequim, na China. Pelo estudo desenvolvido, os autores concluíram que o melhor resultado em quantidade de geração de energia foi obtido com a instalação dos painéis em telhados, com um ângulo de 30°.

Mariano (2017) estudou a implantação de energia fotovoltaica em diversas edificações do Campus da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, concluindo que a aplicação de estratégias que utilizam a geração fotovoltaica se apresenta como uma solução sustentável, pois a implantação dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR) aumenta a oferta de energia no sistema elétrico da instituição, promove a redução das emissões de GEE's, na matriz elétrica de Curitiba e adiciona a possibilidade de alteração do perfil de demanda da instituição, a partir da aplicação de estratégias de eficiência energética, tornando sua operação mais efetiva.

Além disso, diversos autores concordam que a integração de módulos fotovoltaicos (PV) em edifícios reduz as emissões operacionais de carbono (Jankovic e Bharadwaj, 2021; Luo *et al.*, 2024).

Hu *et al.* (2023) investigaram a aplicação de energia renovável, como a fotovoltaica e a geotérmica superficial, para equilibrar o consumo energético de edifícios públicos, na China. O estudo avaliou principalmente a análise de ciclo de vida relacionada à estratégia de conservação de energia e redução de emissões em edificações, considerando o custo inicial e na fase operacional. Os autores ressaltaram que a utilização dessas fontes renováveis reduz o consumo energético e destacaram a importância da diversificação das fontes de energia, para garantir um fornecimento confiável, dado que a energia renovável apresenta características de intermitência, volatilidade e aleatoriedade. A energia da rede elétrica deve ser usada para assegurar a continuidade do consumo regular.

2.2.5 Influência das condições de uso da edificação no desempenho energético

As condições de uso da edificação exercem influência direta e significativa no seu desempenho energético. Compreender padrões de ocupação e consumo, ao longo do dia, permite implementar estratégias eficazes para reduzir o consumo de energia, otimizar o uso dos recursos e diminuir os custos operacionais.

Convém afirmar que as condições de uso da edificação são dependentes do comportamento dos usuários. Segundo Chen *et al.* (2022), a avaliação comparativa de desempenho energético de intervenções relacionadas ao comportamento dos ocupantes é necessária para identificar soluções inteligentes, que visem à redução do gasto energético.

Ascione *et al.* (2019) pesquisaram o papel do comportamento dos usuários, em um *retrofit* energético de um edifício residencial, em Nápolis, no sul da Itália, e concluíram que a incerteza no comportamento dos ocupantes não pode ser negligenciada nos estudos de eficiência energética. Os autores identificaram que o *retrofit* proposto poderia atingir o valor mínimo de 94 kWh/m² e máximo de 202 kWh/m², a depender da sensibilidade dos ocupantes. Este fato aponta para a necessidade de uma educação energética dos usuários.

A avaliação do desempenho energético de edifícios, com base em dados reais, tem se mostrado essencial para compreender a eficiência dos sistemas e o impacto das condições operacionais no consumo. Como observado, além das características construtivas e das tecnologias empregadas, o comportamento dos usuários desempenha um papel significativo na demanda energética. Fatores, como padrões de ocupação, uso de equipamentos, tipo de fornecimento de energia, demanda contratada, preferências térmicas e hábitos de ventilação influenciam diretamente os indicadores de consumo de eletricidade, água e gás. Assim, a análise da fase operacional de um edifício deve considerar não apenas medições quantitativas, mas, também, a interação dos usuários com o ambiente construído, a fim de propor estratégias eficazes para a otimização do desempenho energético e a redução das emissões de carbono.

Nesse contexto, é importante compreender o conceito de demanda contratada. Esse termo se refere à quantidade de potência ativa que a concessionária deve fornecer continuamente no ponto de entrega, conforme o que foi estipulado no contrato de fornecimento. Essa demanda deve ser paga integralmente, independentemente de ter sido utilizada, ou não, durante o período de faturamento, e é medida em quilowatts (kW).

No Brasil, as unidades consumidoras são classificadas em dois grupos tarifários: Grupo A, que tem tarifa binômia, e Grupo B, que tem tarifa monômia. O agrupamento é definido, principalmente, em função do nível de tensão em que é atendido, e também como consequência, em função da demanda (kW) (PROCEL, 2011).

As unidades consumidoras atendidas em tensão abaixo de 2300 volts são classificadas no Grupo B (baixa tensão). Em geral, estão nessa classe as residências, lojas, agências bancárias,

pequenas oficinas, edifícios residenciais, grande parte dos edifícios comerciais e a maioria dos prédios públicos federais, uma vez que, na sua maioria, são atendidos nas tensões de 127 ou 220 volts. Os consumidores atendidos em alta tensão, acima de 2300 volts, como indústrias, shopping centers e grandes consumidores são classificados no Grupo A, que é dividido de acordo com a tensão de atendimento. Os prédios públicos são classificados no Grupo A, e, em geral, estão no subgrupo A4.

Nas modalidades tarifárias do Grupo A, aplicam-se os horários de ponta e fora de ponta. Os postos tarifários são definidos por distribuidora, no seu processo de revisão tarifária periódica, de acordo com a Resolução Normativa (REN) nº 1000/2021 (Brasil, 2021) e os Procedimentos de Regulação Tarifária – Proret (Brasil, 2022a).

O horário de ponta é um período de três horas consecutivas, excluindo sábados, domingos e feriados nacionais. Ele é definido pela concessionária, com base nas características do seu sistema elétrico. Durante esse horário, algumas tarifas podem ser mais altas, tanto para a demanda quanto para o consumo de energia elétrica. Já o horário fora de ponta abrange as outras 21 horas do dia, que não se enquadram no horário de ponta.

Os postos tarifários são aplicados aos dias úteis. Já, nos fins de semana e feriados nacionais, todas as horas são consideradas como fora de ponta. O horário (posto) fora é o período diário composto pelas horas consecutivas e complementares ao horário de ponta em que as tarifas de energia elétrica têm um valor menor, em relação ao período de ponta. A Tabela 2.3 apresenta os postos tarifários atuais para os consumidores do Grupo A (Brasil/ANEEL, 2021).

Tabela 2.3: Postos tarifários para os consumidores do grupo A.

Grupo A		
Período	Posto fora de ponta	Posto de ponta
Fora do horário de verão	21h às 17h59m (dia seguinte)	18h às 20h59m

Fonte: BRASIL (2022).

Conforme a tabela 2.3, para o grupo A, o horário fora de ponta compreende o período de 21 horas às 17 horas e 59 minutos do dia seguinte, e o horário de ponta compreende o período de 18 horas às 20 horas e 59 minutos. Esta opção de enquadramento na estrutura tarifária verde somente é possível para as unidades consumidoras do Grupo A, subgrupos A3a, A4 e A5. Essa modalidade exige um contrato específico com a concessionária, no qual se pactua a demanda pretendida pelo consumidor (demanda contratada), independentemente da hora do dia (de ponta ou fora de ponta).

Sendo assim, com o conhecimento dos fatores que geram alto consumo, é possível atuar de forma a aprimorar a eficiência energética no consumo de energia. Posto isso, faz-se necessário compreender os tributos e encargos que estão embutidos nas faturas de energia.

Para cumprir o compromisso de fornecer energia elétrica com qualidade, a distribuidora tem custos que devem ser avaliados na definição das tarifas. A tarifa considera três custos distintos: a energia gerada, o transporte de energia até as unidades consumidoras (transmissão e distribuição) e encargos setoriais.

A tarifa é ainda taxada pelos governos federal, estadual e municipal que oneram a conta de luz com impostos, como o PIS/CONFINS, o ICMS e a Contribuição para iluminação pública. Segundo a Aneel (2021), a maior parte da fatura (53,5%) é referente ao consumo de energia, transmissão e encargos setoriais. A transmissão engloba o transporte de energia da unidade geradora (hidrelétrica) até a subestação que distribui a energia para as unidades consumidoras. Os encargos setoriais são valores determinados por lei que são utilizados para financiar o desenvolvimento do setor elétrico nacional (CDE¹, PROINFRA², RGR³, ESS⁴, CFURH⁵ entre outros). Outra parcela da fatura, equivalente a 29,5%, refere-se a impostos federais (PIS⁶ e CONFINS⁷), estaduais (ICMS⁸) e municipais (CIP⁹/COSIP¹⁰). E, ainda, os 17,0% restantes são cobrados para suprir os custos da distribuição. A figura 2.6 apresenta como é composto o valor final da tarifa de energia elétrica, no Brasil.

Figura 2.6 – Composição do valor final da tarifa de energia elétrica nacional.



Fonte: Brasil / ANEEL (2016).

Para efeito das faturas de energia elétrica, esses valores são distribuídos na composição das parcelas referentes ao consumo (na ponta e fora dela), demanda e ultrapassagem (PROCEL,

¹ CDE – Conta de desenvolvimento Energético, Lei 10.438/2002, alterada pelas leis 12.783/2013 e 12.839/2013.

² PROINFRA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, Lei 10.438/2002 e Decreto 5.025/2004

³ RGR – Reserva Global de Reversão (RGR) Decreto 41.019/1957

⁴ ESS – Decreto nº 2.665/1998.

⁵ CFURH – Compensação Financeira pela Utilização de Recursos Hídricos, CF 1988

⁶ PIS – Programa de Integração Social (1,65% da tarifa de energia)

⁷ COFINS – Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (7,6% da tarifa de energia)

⁸ ICMS – Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS)

⁹ CIP – Contribuição de Custeio de Iluminação Pública, CF, 1988

¹⁰ COSIP – Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública)

2011). A parcela de consumo ($P_{consumo}$) das unidades consumidoras, englobadas no Grupo A, é calculada através da equação 1, observando-se, nas tarifas, o período do ano:

$$P_{consumo} = (\text{Tarifa de consumo na ponta} \times \text{consumo medido na ponta}) + (\text{tarifa de consumo fora de ponta} \times \text{consumo medido fora de ponta}) \quad (\text{Equação 1})$$

A parcela de demanda ($P_{demanda}$) das unidades consumidoras do grupo A é calculada, multiplicando-se a tarifa de demanda pela demanda contratada, ou pela demanda medida (a maior delas), caso esta não ultrapasse em mais de 10% a demanda contratada, conforme apresentado na equação 2.

$$P_{demanda} = (\text{Tarifa de demanda}) \times (\text{demanda contratada}) \quad (\text{Equação 2})$$

As duas parcelas somadas constituem o total da tarifa a ser paga pelo consumo nas unidades consumidoras do grupo A.

Portanto, é fundamental que os responsáveis pelas decisões institucionais e os gestores considerem cuidadosamente a margem de demanda a ser contratada, avaliem o desperdício de energia e analisem o uso da edificação, durante os horários de pico, visando maximizar sua eficiência energética.

2.3 DESEMPENHO AMBIENTAL DAS EDIFICAÇÕES

A construção e o funcionamento de edifícios geram uma variedade de categorias de impactos ambientais, incluindo: uso de água, utilização de energia não renovável, risco de aquecimento global, dano à camada de ozônio, acidificação de águas e solos, exaustão de combustíveis fósseis e recursos energéticos e, ainda, considerável percentual de geração de resíduos.

O impacto das emissões de poluentes se tornou uma preocupação mundial, no final dos anos 80, quando foi criado o Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (IPCC) da Organização das Nações Unidas (ONU) para avaliar as evidências em torno das alterações no clima. Em consequência, em 1990, o IPCC divulga seu primeiro Relatório de Avaliação. O documento conclui que, no século XX, houve um aumento da temperatura global entre 0,3 e 0,6 °C, vez que as emissões provocadas pela atividade humana estavam sendo adicionadas às emissões naturais de gases formadores do efeito estufa e esse adicional resultaria na elevação ainda maior da temperatura do planeta. Em 1997, foi assinado o Protocolo de Kyoto, que entrou em vigor em 2005, estabelecendo metas para a redução de emissões de GEE para países desenvolvidos, que se comprometeram, na oportunidade, a reduzir as emissões, em média de 5%, no período de 2008 a 2012. O conceito de carbono zero surgiu nesse Protocolo. No entanto, o protocolo não obteve o sucesso esperado devido à retirada dos Estados Unidos (Silva, 2009).

Mais adiante, o Acordo de Paris, assinado em 2015, traçou um plano global para limitar o aquecimento da temperatura média global a bem abaixo de 2 °C, preferencialmente a 1,5 °C, em relação aos níveis pré-industriais. Com esse acordo, o Brasil se comprometeu a reduzir as emissões em 37%, até 2025, com relação ao que ocorria em 2005. Posteriormente, o governo federal ampliou o compromisso brasileiro de redução da emissão de gases de efeito estufa para 48% até 2025. Para 2030, o Brasil se comprometeu a reduzir as emissões em 53% (Brasil, 2023).

Entre os vários setores emissores de Gases de Efeito Estufa (GEE), o da construção civil é um contribuinte significativo (Norouzi *et al.*, 2021). O maior volume GEE leva ao aumento da temperatura média do planeta, pois esses gases absorvem e refletem a radiação infravermelha na atmosfera. Os principais gases responsáveis por tal efeito são o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O), os clorofluorocarbonos (CFCs), o hexafluoreto de enxofre (SF₆) e outros. Cada um desses gases tem potencial de aquecimento global, denominado GWP (Global Warming Potential ou Fator de Aquecimento Global). O GWP é uma medida utilizada para determinar a eficácia do gás em reter o calor na Terra, em um determinado período de tempo (Schneiders *et al.*, 2023).

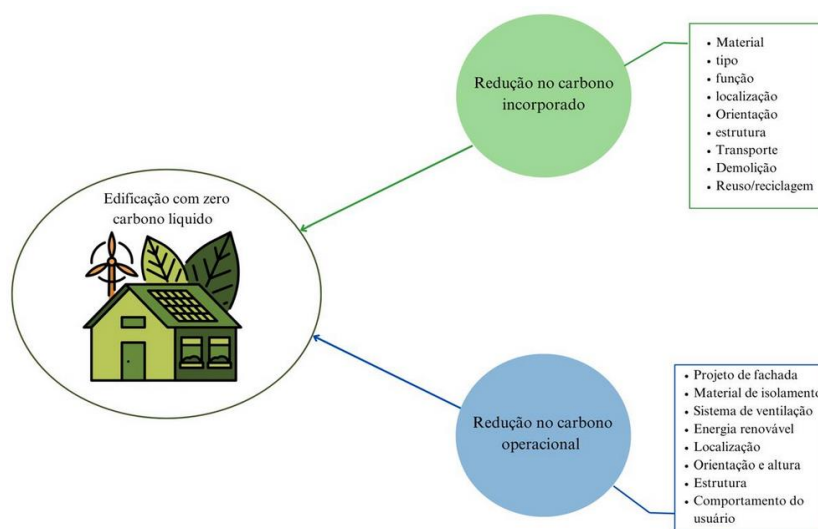
A diminuição da geração de emissões de carbono pelas edificações é vista como uma das iniciativas mais relevantes para a preservação ambiental e a sustentabilidade. Em virtude dos elevados níveis de emissão de carbono gerados pelo setor da construção civil, edificações que não emitam carbono certamente focarão na eficiência energética e na adoção de fontes de energia renovável, seguindo diretrizes avançadas (Pan *et al.*, 2023).

Construções zero carbono podem ser definidas como aquelas concebidas e/ou atualizadas para minimizar os impactos ambientais, ao longo do seu ciclo de vida, e produzir a mesma quantidade de energia renovável que é consumida ao longo de um período que, em geral, é de um ano. Esse equilíbrio líquido contribui para zerar as emissões de carbono (UKGBC, 2021).

Com relação ao tema, Myint e Shafique (2024) explicam que um edifício com menos carbono incorporado e operacional requer uma transformação fundamental nas práticas de projeto, construção e especificação de materiais. Além disso, Myint *et al.* (2025) indicam que, para esse objetivo, é necessário incorporar nas edificações outras estratégias eficazes, como projetos solares passivos, geradores de energia eficientes e sistemas de energia renovável.

O carbono incorporado é conceituado como o carbono contido nos materiais necessários para construir, renovar e demolir estruturas, bem como a energia consumida durante esses processos (Gan *et al.*, 2018; WBCSD, 2021 ; Norouzi *et al.*, 2023). O carbono incorporado é influenciado pelos seguintes fatores: materiais empregados, tipo e função da edificação, localização, orientação, estrutura da edificação, transporte, demolição e processos de reutilização/reciclagem do edifício (Myint *et al.*, 2025), conforme apresentado na figura 2.7.

Figura 2.7 : Principais fatores de influência para a implementação de edifícios com zero emissão de carbono.



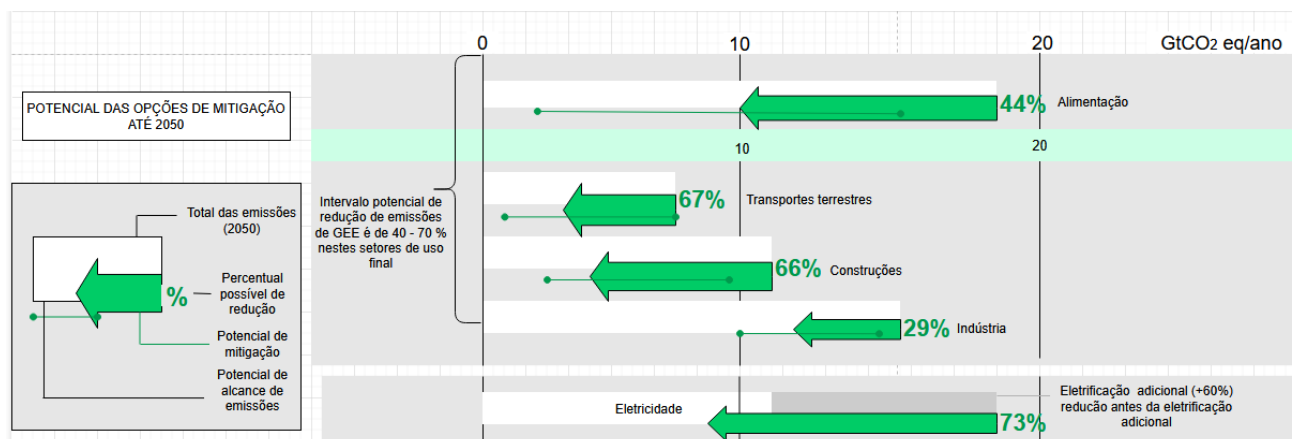
Fonte: Myint *et al.* (2025).

O carbono operacional, também apresentado na figura 2.7, é definido como aquele decorrente da energia consumida para funcionamento e manutenção regulares dos edifícios (WBCSD, 2021). Conforme apontado por Myint *et al.* (2025), a redução do carbono operacional se concentra na diminuição das emissões, por meio de projeto de fachada eficiente, materiais de isolamento, sistemas de ventilação, utilização de energia renovável, localização, orientação e altura do edifício, estrutura e comportamento dos usuários (Myint *et al.*, 2025), ainda conforme apresentado acima.

No entanto, é preciso considerar que muitas décadas serão necessárias para alcançar benefícios consideráveis, se apenas novas construções eficientes forem construídas. Portanto, há necessidade de promover a reabilitação, ou a requalificação de edifícios existentes, focando a atenção na redução do consumo de energia e nas emissões de carbono associadas ao funcionamento dessas edificações. He *et al.* (2021) observam que, apesar do aumento da atenção da investigação, em matéria de sustentabilidade, na modernização de edifícios, a taxa de adoção, na prática, ainda é relativamente baixa, devido à complexidade de selecionar medidas eficazes de modernização energética.

De acordo com o IPCC (2023), existe grande potencial de mitigação de emissão de carbono por parte das edificações, conforme demonstra a figura 2.8. Apesar do aumento das emissões, devido ao aumento do número de novas construções, existe potencial de redução de emissões estimado em 66% até 2050, equiparando-se à taxa estimada para a redução de emissões provenientes do uso de transporte terrestre.

Figura 2.8 – Potencial de redução de emissões de carbono em usos finais até 2050.



Fonte: IPCC 2023.

No Brasil, a regulamentação das emissões de carbono em edificações está em desenvolvimento, mas já existem normas e iniciativas importantes que abordam o tema. A Lei 12.187/2009 (Brasil, 2009) trata da Política Nacional sobre Mudança do Clima e estabelece diretrizes para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) em diversos setores, incluindo a construção civil.

No entanto, somente recentemente entrou em tramitação no Senado Federal o Projeto de Lei nº 4.364/2023, que inclui regras, ações de apoio a pesquisas e ao desenvolvimento de energias renováveis, visando à redução da emissão de GEE, no âmbito da Política Nacional sobre a Mudança do Clima (Senado Federal, 2024).

A ferramenta GHG Protocol tem sido utilizada para a elaboração de inventário de emissões de GEE por empresas e organizações, incluindo as do setor da construção civil, fornecendo diretrizes para a quantificação e o relato de emissões, auxiliando na identificação de oportunidades de redução.

No âmbito do Poder Judiciário, foi instituído o Programa Justiça Carbono Zero, no ano de 2024, visando a promoção da descarbonização do Poder Judiciário Brasileiro, com ações para medir, reduzir e compensar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) decorrentes do funcionamento dos órgãos integrantes do PJ (CNJ, 2024). Com as alterações produzidas, a Resolução nº 400, estabeleceu que:

Art. 24. Os órgãos do Poder Judiciário devem adotar medidas para a elaboração de inventário, redução e compensação de emissões de gases de efeito estufa (GEE) resultantes de seu funcionamento com a finalidade de alcançar a neutralidade de carbono até o ano de 2030 (Agenda 2030 – ONU) (redação dada pela Resolução n. 594, de 8.11.2024).

Para que os edifícios emitam menos GEE, devem equilibrar o carbono e a energia que consomem com o carbono e a energia que produzem, visando diminuir a pegada líquida, ao longo

de seu ciclo de vida. Dessa forma, entender os principais fatores de influência é crucial para implementar e operar eficientemente edifícios, com menos emissão de carbono. Myint e Shafique, (2024) recomendam abordar os principais fatores de influência, de forma holística, para a melhoria do desempenho e da sustentabilidade de edifícios com zero emissão de energia, ao longo de seu ciclo de vida, garantindo que eles atinjam suas metas de forma eficaz.

2.3.1 Avaliação do ciclo de vida (ACV) no ambiente construído

A Avaliação do Ciclo de Vida no setor da construção civil é uma maneira eficaz de analisar o consumo de energia e o uso de recursos naturais, além de contribuir para a compreensão do impacto das edificações no meio ambiente. Por isso, essa técnica tem sido empregada na construção civil para auxiliar a análise e escolha de materiais e produtos que causem menos danos ao meio ambiente. Ela também é útil para avaliar o desempenho de edifícios, as práticas de projeto e a otimização dos processos de construção (Cabeza *et al.*, 2014).

A ACV calcula os mais relevantes impactos ambientais cujas principais categorias que podem ser extraídas pela metodologia são o potencial de aquecimento global (PAG), depleção da camada de ozônio, acidificação de fontes terrestres e hídricas, eutrofização, formação de ozônio troposférico, depleção de recursos energéticos não renováveis e depleção de combustíveis fósseis. Esses impactos ambientais são apresentados na tabela 2.4, com as suas unidades de medidas (GBC, 2023).

Tabela 2.4 – Impactos ambientais mais relevantes calculados na ACV

Impacto Ambiental	Unidade de medida
Potencial de aquecimento global (PAG ou PWG)	Kg CO ₂ eq
Depleção da camada de ozônio	Kg CFC-11eq
Acidificação de fontes terrestres e hídricas	Moles de H ⁺ ou kg de SO ₂ e
Eutrofização	Kg de nitrogênio ou kg de fostato
Formação de ozônio troposférico	Kg de NOx ou kg de O ₃ eq ou Kg de eteno
Depleção de recursos energéticos não renováveis	MJ
Depleção de combustíveis fósseis	TRACI

Fonte: GBC (2023).

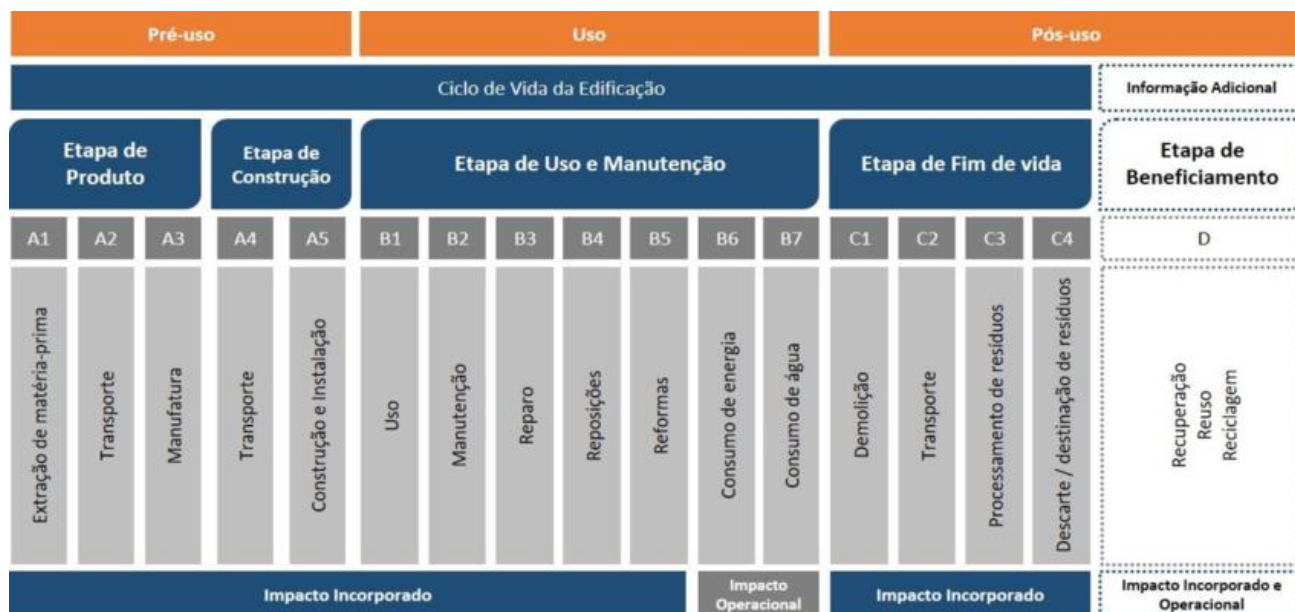
Entretanto, atualmente o principal impacto que requer medidas imediatas para a sua diminuição é o potencial de aquecimento global (PAG). As principais causas do aquecimento global são as atividades humanas que liberam gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), que são responsáveis por reter o calor do Sol e impedir que ele escape de volta para o espaço (GBC, 2023).

A Avaliação do Ciclo de Vida é uma abordagem que faz uma verificação, de maneira sistemática, do impacto ambiental de produtos, ou processos, ao longo de toda a vida útil. Isso inclui desde a extração das matérias-primas, passando pela produção e uso, até o descarte e a reciclagem, quando o produto chega ao final de sua vida útil (Cabeza *et al.*, 2014). Além disso, a ACV fornece uma visão holística dos impactos ambientais associados a um edifício, ao longo de sua vida, identificando oportunidades de melhoria, apoiando a tomada de decisões e comunicando de forma transparente o desempenho ambiental de edificações (Fahkstedt *et al.*, 2024).

A abordagem da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é significativa para atingir a meta de carbono zero do setor da construção civil (Ansah *et al.*, 2021). Analisar as emissões embutidas, ao longo do ciclo de vida da edificação, torna-se, assim, uma abordagem indispensável para compreender, buscar estratégias e reduzir os impactos ambientais do setor, especialmente diante da crescente demanda por práticas mais sustentáveis. Para alcançar as metas estabelecidas pela agenda climática, é crucial aprofundar o estudo de metodologias e dados que possam promover avanços nas pesquisas voltadas para a superação das barreiras existentes (Khan *et al.*, 2022).

As normas EN 15978 (CEN, 2011) e a EN 15804 (CEN, 2013) dividem o ciclo de vida das edificações em módulos A, B, C e D, como está apresentado na figura 2.9. O módulo A é denominado de pré-uso. A fase de pré-uso é dividida em etapa de produto (que abrange a extração de matéria-prima, transporte e manufatura) e etapa da construção (que abrange transporte, construção e instalação). O módulo B é chamado de uso, que contempla a etapa de uso e manutenção (abrange o uso, manutenção, reparo, reposições, reformas, consumo de energia e consumo de água). O módulo C faz parte da fase pós-uso e é chamado de etapa de fim de vida (demolição, transporte, processamento de resíduos e descarte/destinação de resíduos). O módulo D compreende a etapa de beneficiamento e também faz parte da fase pós-uso e abrange a recuperação, o reuso e a reciclagem dos materiais. A figura 2.9 apresenta os estágios e respectivos módulos de avaliação do ciclo de vida das edificações.

Figura 2.9 – Estágios e respectivos módulos de avaliação do ciclo de vida das edificações



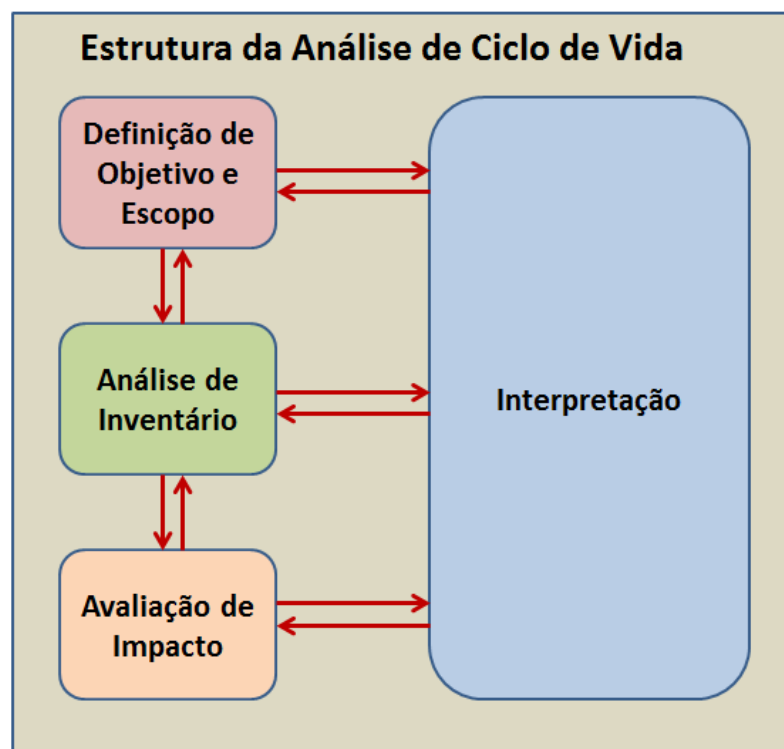
Fonte: Pulgrossi e Silva (2020).

É importante observar que o impacto incorporado abrange todas as etapas do ciclo de vida da edificação e o impacto operacional se restringe à etapa de uso e manutenção (B6-B7) e à etapa de beneficiamento pós-uso (D).

A ACV completa inclui todos os estágios definidos nas normas ISO, anteriormente citados. Os resultados de pesquisas anteriores mostram que metodologias ACV simplificadas podem ser precisas na tomada de decisão para a reforma energética de edifícios (Vilches *et al.*, 2017).

A realização de uma ACV de edificações segue uma estrutura metodológica definida, conforme as normas ISO 14040 e ISO 14044:2009. Conforme a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) a metodologia de ACV é dividida em quatro etapas: Definição do objetivo e escopo; Análise de inventário; Avaliação de impacto do ciclo de vida e Interpretação. As etapas de uma ACV estão descritas na figura 2.10.

Figura 2.10: Estrutura de avaliação do ciclo de vida.



Fonte: Caldas (2016)

Na primeira etapa, denominada definição do escopo, devem ser declarados, detalhadamente, o objetivo pretendido, as razões para conduzir o estudo e o público-alvo, além de se informarem os seguintes itens: função e unidade funcional, fronteiras do sistema, requisitos da qualidade dos dados, requisitos para comparações entre sistemas e consideração sobre análise crítica.

A segunda etapa, chamada Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), abrange a coleta de dados e procedimentos de cálculos, para quantificar os elementos de entradas e saídas de matéria e energia das fronteiras do sistema, determinadas na fase anterior. Os dados coletados podem ter caráter primário, quando obtidos diretamente com o fabricante do produto, ou secundário, a partir de bases de dados internacionalmente aceitas, como, por exemplo o Ecoinvent. A terceira etapa, denominada Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), tem como objetivo apresentar as consequências para o meio ambiente, os processos envolvidos no ciclo de vida dos materiais. A quarta e última etapa é destinada à interpretação de resultados.

Calcular o carbono incorporado dos materiais e o carbono operacional das edificações requer a consideração de todas as emissões de gases de efeito estufa, ao longo do ciclo de vida do produto. A análise do ciclo de vida é considerada complexa e a coleta de dados é trabalhosa e não facilita a tomada de decisões. Uma forma de simplificação é concentrar-se nas preocupações ambientais prioritárias, como o cálculo da energia incorporada e emissões de CO₂ (Belizário-Silva *et al.*, 2023).

No contexto brasileiro, o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC, 2022), permite calcular indicadores de desempenho ambiental de produtos de construção, com base em dados brasileiros e nos conceitos da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Esta ferramenta é um sistema *on-line* e simplificado que calcula e comunica dados indicados de ciclo de vida para produtos de construção – energia incorporada e emissão de CO₂, incluindo todas as etapas para a publicação de DAP (Declaração Ambiental de Produto ou EPD Environmental Product Declaration) simplificadas e verificadas.

A simplificação proposta no Sidac consiste em quantificar apenas as emissões de CO₂, pois esse gás responde por 76% do forçamento radiativo total e por mais de 90% do forçamento radiativo associado à fabricação de produtos de construção (Belizário-Silva *et al.*, 2023). Outros GEE, como o óxido nitroso (NO₂) e o metano (CH₄) não estão incluídos. Além de ser pouco representativa no setor da construção, a emissão desses gases não pode ser facilmente calculada por meio de fatores de emissão e os existentes são genéricos (IPCC, 2018). A emissão de CO₂ biogênico não é considerada no indicador de emissão de dióxido de carbono, porque ela não contribui para o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, uma vez que foi previamente absorvida pela biomassa renovável que a originou.

Com isso, o SIDAC visa contribuir para incorporar o desempenho ambiental nas decisões do dia a dia da construção civil brasileira, de forma simples, prática e acessível, para viabilizar a redução do carbono e da energia incorporados nas edificações. O Sidac é uma iniciativa pública, com a participação da indústria da construção civil, sob coordenação do Ministério de Minas e Energia (SIDAC, 2022).

O Sidac calcula indicadores de desempenho ambiental para os produtos, de forma automática, a partir da inserção de dados de inventário, considerando sempre a fronteira do berço (primeiro processo que interage com a natureza) até o término do processo elementar que produz determinado produto – essa fronteira é genericamente denominada como “berço ao portão”. Para isso, a administração do Sidac especifica os fatores de conversão que correlacionam os fluxos elementares aos respectivos indicadores, por meio da funcionalidade de cadastro de fluxos elementares no sistema.

Apesar de sua ampla utilização, em diversos estudos pelo mundo, no contexto brasileiro a aplicação da ACV enfrenta desafios significativos. Iyer *et al.* (2023) destacam, em sua revisão, a falta de estudos brasileiros com a aplicação a ACV em edificações. Segundo os autores, o Brasil possuía cerca de 10 a 50 estudos, a China variava entre 100 e 150, enquanto os Estados Unidos eram foco de mais de 400 pesquisas acerca do tema.

Conforme destacado por Costa e Kos (2021), a falta de uniformidade metodológica é um dos principais obstáculos, que se agrava pela escassez de dados nacionais sobre materiais de construção civil. A ausência de uma base de dados padronizada e completa para o setor é um

fator crítico que impede a adoção de práticas mais sustentáveis. Essa lacuna na informação dificulta análises consistentes e comparativas, comprometendo a eficácia da ACV, como uma ferramenta de avaliação ambiental.

Vilches *et al.* (2017) analisaram as contribuições sobre o impacto ambiental relacionado às operações de reforma das edificações. A maior diferença entre os estudos pode ser encontrada nos limites do sistema (fim de uso e vida útil esperada) e unidades funcionais (1 m² ou o edifício inteiro). O artigo recomenda que as principais opções metodológicas sejam definidas em pesquisas futuras, para tornar possível a comparação quantitativa entre as ACVs de tais reformas. Em relação à energia incorporada dos materiais utilizados durante a reforma do edifício, é necessário que sejam mais claras as regras de categoria para a unidade funcional, limites do sistema e método LCI; a disposição de substituição e o cenário de fim de vida. Em relação à energia operacional, é necessário informar o procedimento de obtenção das cargas operacionais, o cenário ocupacional, o cenário de transporte dos usuários do edifício para a área circundante e vice-versa.

Acrescente-se que os cenários operacionais devem incluir aquecimento, resfriamento, umidificação, ventilação, iluminação, bombas e controles. Os aparelhos domésticos não devem ser adicionados. Ao avaliar o ciclo de vida de reformas de edifícios, o impacto ambiental produzido no fim da vida útil dos novos materiais deve ser incluído nos estudos (Vilches *et al.*, 2017).

Vilches *et al.* (2017) realizaram uma revisão sobre as pesquisas que tratam da reforma e renovação de edificações, utilizando a metodologia de ACV. A partir desses estudos, os autores reconhecem que diversas interpretações foram realizadas e diferentes limites de sistema foram aplicados, tornando a comparação dos resultados de diferentes estudos uma tarefa complexa. Diferentes propósitos de ACV dependem de diferentes decisões metodológicas, caso contrário, ela pode ser mal interpretada. Posto isto, a seguir são relacionados os pontos de referência que permitem as comparações para reformas de edifícios (Anand e Anor, 2017; Vilches *et al.*, 2017).

De acordo com Gaspar e Santos (2015), a unidade funcional mais utilizada para o desenvolvimento de ACVs é o metro quadrado, por ano, durante um período de 50 anos. Segundo Vilches *et al.* (2017), a seleção de um metro quadrado como unidade funcional permite a comparação entre diferentes estudos. Quanto à vida útil esperada do edifício, Vilches *et al.* (2017) afirmam que, após vários estudos avaliados, foram diversos os dados de vida útil esperada, ou, às vezes, ela não foi declarada. No entanto, a vida útil esperada deve ser baseada nos princípios da série de normas ISO 15686 (ISO, 2011) sobre “Edifícios e ativos de construção – Planejamento de Vida Útil”. De acordo com as normas citadas, para o desenvolvimento da ACV, é aconselhável que sejam apresentadas uma descrição das condições do imóvel, as estratégias de modernização adotadas e a eficiência dessas estratégias em edificações semelhantes.

2.3.2 Medidas para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa pelas edificações

A quantidade de emissões de gases de efeito estufa causadas por edifícios pode ser medida de forma abrangente, ao longo do seu ciclo de vida. O objetivo é duplo: reduzir as emissões associadas às várias demandas de energia, durante a fase operacional de um edifício, incluindo aquecimento, resfriamento, ventilação e iluminação; e reduzir as emissões de carbono incorporadas em materiais, associadas às emissões de GEE produzidas pela fabricação, renovação, manutenção e fim de vida útil dos materiais de construção (Norouzi *et al.*, 2023).

Myint *et al.* (2025) examinaram as melhores práticas da descarbonização de edifícios, como implementação de medidas de eficiência energética, utilização de fontes de energia renováveis e adoção de princípios de economia circular, além do emprego de novos materiais. Os autores concluíram que tecnologias, como painéis fotovoltaicos e construção modular, contribuem para reduzir as emissões operacionais.

Jankovic *et al.* (2021) recomendam o uso de painéis fotovoltaicos para minimizar a energia operacional. Já Luo *et al.* (2024) conduziram estudos de caso, incluindo células solares de silício monocristalino para telhados e materiais fotovoltaicos emergentes, como células solares de perovskita para fachadas. As descobertas revelaram que, embora seu uso combinado resulte nas maiores emissões de carbono, durante a fase de construção, ele atinge as menores emissões durante a fase operacional. Newberry *et al.* (2023) destacaram que a proporção de energias renováveis na mistura de energia da rede afeta significativamente os níveis de carbono operacional.

Nematchoua *et al.* (2020) observaram que as emissões de carbono, durante a fase operacional, diminuem com a aplicação de PCM nas edificações de escritórios estudadas, em clima tropical costeiro de Madagascar, em até 10%. Os autores observam também que a implementação de painéis fotovoltaicos tem um efeito significativo na emissão de carbono, durante a fase operacional, reduzindo o carbono produzido pelos edifícios em até 85%.

Myint *et al.* (2025) observaram que a maioria dos estudos realizados acerca dos tipos de edifícios difere significativamente sobre a quantidade de carbono que pode ser reduzido. Os edifícios residenciais usam comparativamente mais energia do que edifícios comerciais e contribuem com uma parcela significativa das emissões de carbono, dentro do estoque de edifícios. Destaca a necessidade de mais pesquisas para edifícios de escritório e consideram o uso da madeira para reduzir a pegada de carbono.

No entanto, é preciso atentar para o fato de que melhorar o desempenho ambiental da fase de operação do edifício pode contribuir para o aumento das emissões incorporadas, por vezes, excedendo o impacto da fase operacional (Norouzi *et al.*, 2023). Nesse cenário, focar na eficiência do material é fundamental para a mitigação das mudanças climáticas globais (Lausset *et al.*, 2021).

Pan *et al.* (2023) adotaram uma abordagem genérica, para estimar a pegada de carbono do ciclo de vida e fornecer um roteiro sobre os caminhos de descarbonização de edifícios, promovendo a transição da sustentabilidade, em direção à era do carbono duplo. Os resultados da pesquisa mostram que o edifício de escritórios mostra a maior emissão incorporada do estudo, enquanto o hotel e o edifício residencial mostram comparativamente maiores emissões operacionais de carbono do que os escritórios.

Gaspar e Santos (2015) fazem uma avaliação da relação custo/benefício, associada a duas estratégias diferentes de intervenção, em uma casa unifamiliar de 40 anos, em Portugal, considerando a demolição, ou a reforma. Não foi considerada a variável custo, sendo observado o impacto ambiental. Os autores ponderam que, em vez de considerar ciclos de vida de 50 anos, estender a vida útil pode otimizar a energia inicial e minimizar a produção de resíduos de demolição. Concluiu-se que a reforma era uma estratégia mais sustentável do que a demolição.

No âmbito científico brasileiro, Brugnera (2018) utilizou a ACV para quantificar e compreender potenciais impactos ambientais advindos da energia e incorporados nos materiais em solução de fachada de edifícios de escritórios, no Brasil. Costa e Kos (2021) analisaram o ciclo de vida energético de uma residência em Belém com o uso da ACV. Caldas *et al.* (2020), a partir da ACV, apresentaram uma estrutura para o impacto das mudanças climáticas, ao longo do ciclo de vida dos edifícios.

Mariano (2017) estudou a implantação de energia fotovoltaica, em diversas edificações do Campus da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, concluindo que a aplicação de estratégias que utilizem a geração fotovoltaica se apresenta como uma solução sustentável, pois a implantação dos sistemas fotovoltaicos, conectados à rede (SFVCR), aumenta a oferta de energia no sistema elétrico da instituição, promove a redução das emissões de GEEs, na matriz elétrica de Curitiba e adiciona a possibilidade de alteração do perfil de demanda, a partir da aplicação de estratégias de eficiência energética, tornando sua operação mais efetiva. O estudo identificou que, ao aumentar a geração de energia fotovoltaica e diminuir a utilização de energia elétrica da rede, foi evitada a emissão de 284,43 tCO₂/ano pelo Sistema Interligado Nacional (SIN). O SIN é um sistema disponibilizado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação que divulga a quantidade de emissão de CO₂ associada a uma geração de energia elétrica determinada. Assim, o fator de emissão de CO₂ é calculado pela média das emissões da geração, levando em consideração todas as usinas que estão gerando energia, no país.

Vilches *et al.* (2017) argumentam que a construção de edifícios é grande fornecedora de serviços, o que demanda uma avaliação dinâmica do seu ciclo de vida. Su *et al.* (2017) notaram que muitos parâmetros do edifício, devido à sua longa expectativa de vida, sofrerão alterações e, portanto, reconhecem os desafios envolvidos na criação de um modelo de ciclo de vida para um sistema dinâmico complexo. Collinge *et al.* (2013) concluíram que ajustar a ACV para uma

abordagem mais dinâmica pode aumentar a eficácia do método, na avaliação do desempenho de edifícios e outros sistemas complexos, no ambiente construído.

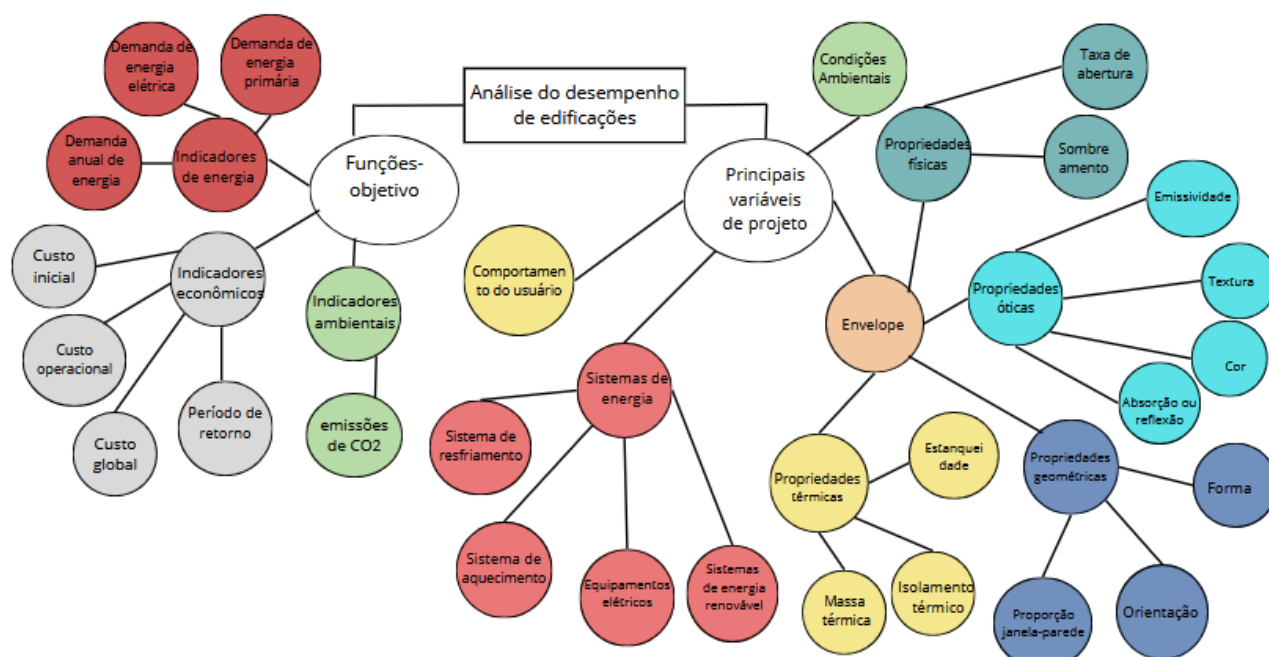
Por sua vez, Badea e Badea (2014) investigaram o desempenho de um edifício educacional, erguido em 1972 na Romênia. A análise de ciclo de vida (ACV) foi realizada em nível de material, utilizando o Inventário do Ciclo de Vida para comparar a adoção de três cenários: instalação de isolamento com poliestireno expandido (EPS), poliestireno extrudado (XPS) e poliuretano rígido (PUR). A ACV foi conduzida, seguindo as diretrizes da Declaração Ambiental do Produto (DAP). Como resultado, a avaliação do desempenho do edifício, tanto antes quanto após a aplicação do isolamento, junto com a análise da energia incorporada, em relação à energia operacional, indicou uma economia de energia de 55%, durante a fase de uso do edifício, após a reforma, destacando que a energia incorporada do produto EPS foi recuperada em um ano.

2.4 OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DO DESEMPENHO DE EDIFICAÇÕES

Existem muitas ações de modernização possíveis de adoção nas edificações, quando os objetivos considerados são a economia de energia e a proteção ambiental. Sendo assim, a escolha das estratégias é um problema de otimização multiobjetivo.

A análise do desempenho das edificações depende da consideração simultânea de diferentes funções-objetivo, conforme indicados na figura 2.11, a saber, indicadores de energia (demanda de energia elétrica, energia primária, e demanda anual de energia) (Carpino *et al.*, 2022; Ghaderyan e Veysi, 2021), indicadores econômicos (custo anual de energia e custo de investimento) (Rosso *et al.* 2020; He *et al.*, 2021; Ascione *et al.*, 2021) e indicadores ambientais (emissões de CO₂) (Myint *et al.* 2025; Pan *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023), com diferentes variáveis de projeto, sendo as principais, os sistemas de energia da edificação (Veloso, 2017; Zheng *et al.*, 2024), as propriedades do envelope construtivo (Eliopoulou e Mantiziou, 2017; Nematchoua *et al.*, 2020; Gupta e Deb, 2023), as condições ambientais (He *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2023) e o comportamento do usuário (Hong *et al.*, 2017; Happle *et al.*, 2018; Tam e Le, 2018; Ascione *et al.*, 2020).

Figura 2.11 – Possíveis funções-objetivo e as principais variáveis de projeto no desempenho energético e ambiental das edificações.



Fonte: Adaptado de Rosso *et al.* (2020); Ascione *et al.* (2019) e Gupta e Deb (2023).

Devido à quantidade de fatores que influenciam na redução do impacto ambiental dos edifícios e na eficiência energética, os métodos de tomada de decisão multicritério e otimização multiobjetivo têm sido usados para determinar estratégias de modernização ideais. Em muitos casos, os problemas a serem resolvidos nas edificações e os objetivos traçados são conflitantes entre si. Uma solução aceitável para um problema com múltiplos objetivos é analisar um conjunto de soluções, em que cada uma atenda aos objetivos de forma satisfatória, sem ser superada por nenhuma outra solução. A eliminação dos fatores menos essenciais e, conseqüentemente, a redução do espaço de busca podem tornar os métodos de otimização mais eficientes para atingir a solução ideal em problemas de construção. Além disso, é particularmente importante conhecer os riscos da implantação de medidas sustentáveis de modernização, pois os tomadores de decisão podem estabelecer se as metas de poupança de energia e custos podem ser alcançados (He *et al.*, 2021).

A otimização pode ser dividida em duas tipologias: aquelas que envolvem restrições e aquelas que não as incluem, com base nas limitações que definem quais alternativas são viáveis, em uma análise mais ampla. Lidar com um problema, sem restrições, geralmente é bem mais simples do que enfrentar um que impõe limitações, no entanto, a maioria dos problemas de otimização possui restrições (Zemero, 2019).

A metodologia de otimização multiobjetivo é, atualmente, empregada em diversas áreas do conhecimento. Para o estudo das edificações, os métodos de otimização podem ser empregados em diferentes problemas de projetos, como, por exemplo, na envoltória, na orientação solar, no

projeto de fachada, no conforto térmico, na iluminação natural, na análise do ciclo de vida, na análise de projeto estrutural, em energia, no custo construtivo, entre outros (Zemero, 2019). Vê-se, assim, que, devido aos inúmeros tipos de problemas de otimização, um grande número de métodos com essa finalidade foi desenvolvido (Sönmez, 2018).

Para a compreensão do desempenho da edificação, em termos locais e globais, os principais indicadores utilizados, atualmente, são, respectivamente, o consumo energético medido por metro quadrado da edificação e as emissões de CO₂ (Gonçalves e Bode, 2015).

Azari (2014) realizou uma análise integrada, com o objetivo de avaliar soluções de fachada, do tipo cortina de vidro, para um edifício de escritórios (com área total de 335 m²), em Seattle, com vida útil de 60 anos. A unidade funcional considerada foi a área total do edifício. As estratégias adotadas no estudo foram a variação da proporção janela-parede (40%, 60%, 80%), o tipo de material de isolamento (fibra de vidro ou lã mineral), o tipo de vidro (*low-e* duplo com gás argônio ou ar) e da estrutura do material do caixilho (alumínio, fibra de vidro ou PVC). Seis cenários de análise foram criados. As fases avaliadas foram a de pré-uso, uso e fim-de vida (considerando o transporte em todas as etapas). O autor apontou que a fase de uso foi a que mais contribuiu para os impactos ambientais no ciclo de vida, sendo fundamental reduzir os impactos advindos da fase operacional, pela implementação de estratégias de eficiência energética e uso de materiais com durabilidade maior, para reduzir as necessidades de substituição e manutenção.

Segundo Stephan e Stephan (2020), para reduzir efetivamente o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa (GEE), as políticas devem abordar tanto a conservação de recursos quanto a mitigação climática, de forma holística, pois políticas focadas em energia, por si sós, são insuficientes para atingir as metas climáticas. A seguir, são apresentados alguns trabalhos que abordam o tema da descarbonização em edificações, por meio do *retrofit*, além dos objetivos, parâmetros analisados e as principais conclusões ou recomendações.

Nematchoua *et al.* (2020) desenvolveram estudos sobre os impactos de estratégias passivas sobre o conforto térmico e a demanda de energia para resfriamento em energia para escritórios em Madagascar. Foi observada uma redução de energia de até 19,4%, combinando isolamento térmico (poliestireno expandido com 5 cm) e sombreamento externo. Com relação às emissões de CO₂, as reduções foram de 10%, ao utilizar PCMs nas paredes internas associadas ao isolamento e de até 85%, com a geração de energia por meio de painéis fotovoltaicos.

Çidir *et al.* (2020) investigam o impacto dos elementos de fachada e sistemas construtivos de edifícios de escritórios, em Izmir, tendo observado que não é viável alcançar emissão nula somente por meio dos elementos de fachada. No entanto, anexando sistemas auxiliares, como controle de iluminação e geração de energia limpa, é possível.

Carpino *et al.* (2022), em um edifício residencial da década de 90, localizado no sul da Itália, estudaram intervenções sobre o envelope que consistiram em isolamento térmico de paredes externas (com painéis de EPS), telhado, piso externo e laje térrea, substituição de janelas (em PVC) e painéis de vidro duplo com 4 mm, com tratamento de baixa emissão, intercalados com camada de 16 mm de argônio. Os autores aplicaram as análises de incerteza e de sensibilidade, com o objetivo de identificar as medidas corretivas, na fase de *design*, que mais apresentavam chances de êxito nas intervenções energéticas. Os parâmetros mais influentes foram o sistema de resfriamento utilizado, seguido pelas temperaturas do ponto de ajuste, a eficiência dos módulos fotovoltaicos, o fator de transmissão solar de superfícies transparentes e o sistema de aquecimento.

Edifícios energeticamente eficientes e ambientalmente positivos demandam a integração de uma variedade de tecnologias e estratégias de *design*, aplicáveis, tanto a novas construções quanto à renovação das já existentes, especialmente considerando os desafios impostos pelas mudanças climáticas globais.

No contexto brasileiro, o setor de geração de energia ocupa uma posição relevante no desenvolvimento sustentável, enfrentando questões significativas associadas a demandas energéticas e impactos ambientais. Apesar de a matriz energética nacional ser majoritariamente baseada em fontes renováveis e apresentar níveis de emissão de gases de efeito estufa relativamente baixos, diante da média global, é imperativo reconhecer que nenhuma forma de produção energética é isenta de consequências adversas. Assim, torna-se indispensável o desenvolvimento de alternativas que visem à redução do consumo energético global.

Nesse cenário, o estudo dos elementos que influenciam a eficiência energética das edificações é um tema de crescente importância. A aplicação de simulações computacionais tem ganhado destaque, ao permitir a predição do comportamento energético de construções, oferecendo bases para intervenções mais precisas e eficazes. Revisões na literatura apontam que a integração de diferentes parâmetros, como o planejamento das fachadas, o emprego de fontes renováveis de energia e a avaliação contínua das condições operacionais das edificações configuram estratégias promissoras para aprimorar a eficiência energética.

Além de considerar aspectos técnicos relacionados ao consumo energético, torna-se igualmente essencial avaliar o desempenho ambiental das edificações, por meio da análise do ciclo de vida. Essa abordagem proporciona uma visão abrangente sobre os impactos ambientais em todas as fases do edifício, desde sua construção até as etapas de operação, manutenção e descarte, ao término da vida útil. A análise detalhada desses estágios constitui um componente indispensável para embasar decisões mais informadas acerca dos impactos gerados por edificações.

Adicionalmente, dada a complexidade dos fatores que influenciam tanto na redução do impacto ambiental quanto na melhoria da eficiência energética, têm-se destacado os métodos de tomada de decisão multicritério e otimização multiobjetivo, como ferramentas úteis para delinear estratégias de *retrofit* adequadas. Esses métodos são particularmente relevantes, devido à necessidade de considerar as peculiaridades climáticas e contextuais de cada caso específico, garantindo que as estratégias adotadas sejam adaptadas às características regionais. Também é fundamental avaliar os riscos associados à implementação de medidas sustentáveis de modernização, uma vez que tais avaliações permitem aos tomadores de decisão determinarem se as metas associadas à economia de energia e custos são viáveis, em termos práticos e econômicos.

Em resumo, para minimizar o impacto ambiental das edificações, especialmente no que tange ao alto consumo energético e consequente emissão de carbono, a requalificação energética e ambiental emerge como uma estratégia crucial. A operação de edifícios representa uma fonte significativa de emissões de carbono, tornando essencial a busca por soluções que otimizem o uso de energia.

Ferramentas de simulação computacional são indispensáveis para avaliar o desempenho energético de uma edificação. Elas permitem quantificar o consumo de energia por usos finais (como ar condicionado, iluminação e equipamentos), possibilitando a comparação entre a situação atual e cenários de otimização. Essa análise detalhada é fundamental para identificar e propor intervenções eficazes.

O presente estudo focou em ações que visam a redução de carbono e energia. Diversas pesquisas indicam que o envelope da construção tem uma influência considerável no consumo energético e nas emissões. Em climas quentes, características como isolamento térmico, aumento da massa térmica, refletividade do revestimento externo e o sistema de envidraçamento são fatores-chave para o desempenho do envelope.

No estudo em questão, observou-se que estratégias eficazes para a edificação, com baixo impacto estético na fachada, incluem: isolamento térmico, pois este reduz a transferência de calor entre o interior e o exterior, minimizando a necessidade de climatização e a massa térmica, que mantém a temperatura interna estável, acumulando e liberando calor gradualmente. Essas características são especialmente desejáveis para edifícios que operam 100% do tempo com ar condicionado central, como o objeto de estudo.

Adicionalmente, em zonas de clima quente com edificações climatizadas artificialmente, o uso de revestimentos externos reflexivos é benéfico, pois impede a entrada de calor para o interior. O aprimoramento do sistema de envidraçamento também é uma solução eficaz e com pouca influência na estética da edificação, aproveitando as propriedades ópticas dos materiais para otimizar o desempenho térmico.

Além disso, a implementação de energias renováveis, como a solar em regiões com alta irradiação como Goiânia, contribui significativamente. A energia gerada no próprio local reduz o gasto energético da edificação ao injetar na rede e, consequentemente, diminui a emissão de CO₂.

Outra medida, sem custo adicional, é a gestão do consumo nos horários de ponta. Embora não afete diretamente o consumo total de energia, impacta o valor pago à concessionária, otimizando os custos operacionais.

Para quantificar o impacto geral das estratégias na emissão de carbono, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta apropriada. Ela permite comparar as emissões geradas pelas ações de construção e funcionamento das edificações. A redução do carbono operacional está diretamente ligada à eficiência da fachada, ao uso de energias renováveis e à eficiência energética global do edifício. A combinação da simulação computacional e da ACV direciona a escolha das soluções mais eficientes e sustentáveis.

CAPÍTULO 3

ESTRUTURA METODOLÓGICA

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Este capítulo descreve a estrutura metodológica do trabalho, o objeto de estudo, as condições climatológicas do local avaliado, as condições de uso da edificação e a ferramenta de simulação computacional utilizada. Inicialmente, foi realizado o levantamento das características físicas da edificação, considerando os projetos arquitetônico e complementares. A modelagem da edificação, com a informação dos dados foi feita por meio do *software Revit Autodesk* (2023).

Com os dados levantados e a modelagem feita, foi rodada, por meio do software *Enegy Plus*, a primeira simulação, denominada padrão (CEZ-0), que permitiu criar um modelo padrão, considerando a coleta das propriedades dos materiais do envelope, condições de uso, padrões de ocupação, condições ambientais e a descrição das condições técnicas do sistema de condicionamento de ar, equipamentos, iluminação e geração de energia fotovoltaica.

O método proposto aplica-se a edificações públicas, comerciais, ou de escritório, com a mesma tipologia da edificação em análise.

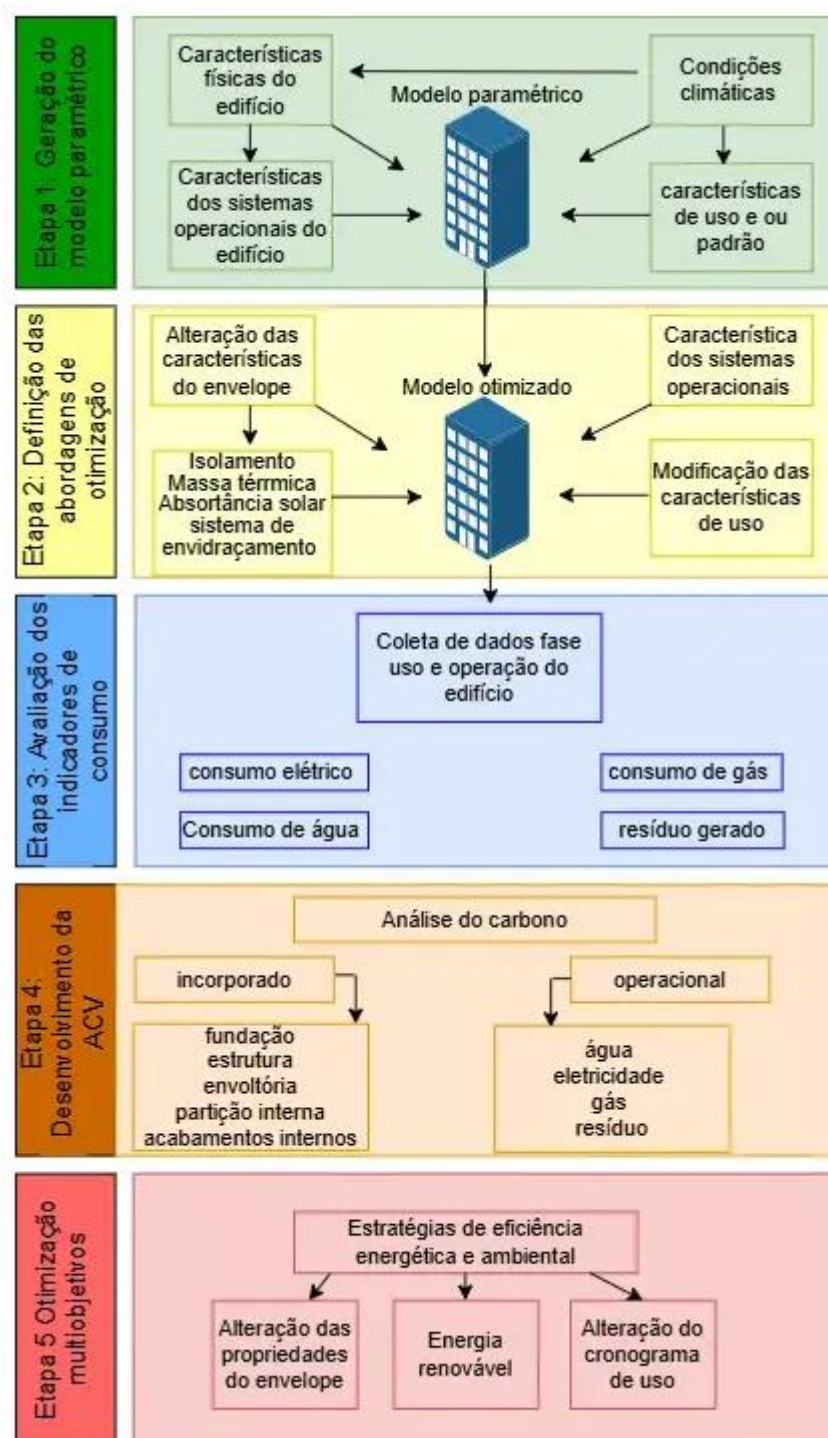
A utilização das estratégias aqui propostas pode ocorrer tanto na fase de projeto, em novos empreendimentos, como durante a revitalização da edificação, fornecendo dados apontados como as melhores estratégias.

3.2 ESTRUTURA METODOLÓGICA

A metodologia foi aplicada para avaliação do desempenho energético e ambiental de um edifício institucional público na cidade de Goiânia, contudo, o procedimento aqui adotado pode ser estendido a outras arquiteturas comerciais, de serviços e públicas, com as mesmas características. O objetivo foi aprofundar os conhecimentos relativos à reabilitação de edifícios para a melhoria de desempenho, entretanto, o procedimento pode ser adotado também para projetos de novos edifícios com características semelhantes.

O presente estudo foi dividido em cinco etapas. O fluxograma da metodologia proposta é apresentado na figura 3.1. Nele estão representadas as etapas de desenvolvimento do estudo e as ações desenvolvidas em cada etapa. A primeira etapa da pesquisa constitui-se no desenvolvimento do modelo paramétrico, considerando dados reais, sendo estes extraídos dos projetos arquitetônicos e complementares, da especificação dos materiais empregados na construção do edifício e dos dados meteorológicos da cidade de Goiânia. Com esses dados e, após rodada a primeira simulação, foi possível conhecer o desempenho energético da edificação.

Figura 3.1 – Estrutura metodológica utilizada para o presente estudo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na etapa 2 foram propostos os cenários, considerando as soluções mais eficazes para a eficiência energética das edificações conforme a revisão bibliográfica para o envelope construtivo, para a utilização de energia renovável em edificações e para a mudança de cronograma de uso da edificação, visando à eficiência energética.

Na terceira etapa, foram coletados dados da fase operacional do edifício, por pelo menos cinco anos, permitindo obter indicadores de consumo da edificação. O consumo de água, energia, gás e os resíduos gerados pelos usuários foram obtidos por m² e por pessoa.

Na quarta etapa foram analisadas as emissões de carbono incorporado da fase construtiva do edifício, levando em conta os dados reais obtidos no orçamento da obra e o carbono emitido na fase operacional, considerando os dados de consumo da edificação.

Na etapa 5 foram comparados os cenários de estudo com relação ao desempenho energético e ambiental através da otimização multiobjetivo, considerando as estratégias de alteração da composição do envelope, utilização de energia renovável e alteração do cronograma de uso da edificação.

3.3 ESTUDO DE CASO

O edifício avaliado é o Fórum Cível Dr. Heitor Moraes Fleury, um edifício institucional público, administrado pelo Poder Judiciário do Estado de Goiás, inaugurado em 2016 e localizado na cidade de Goiânia, no bairro denominado Park Lozandes. O edifício foi selecionado por representar um consumo energético bastante expressivo, de cerca de 25% de toda a energia elétrica da instituição e tendo em vista que o projeto arquitetônico da edificação será futuramente replicado. A figura 3.2 apresenta a localização do Park Lozandes no mapa da cidade de Goiânia, na região leste da cidade.

Figura 3.2 – Mapa da cidade de Goiânia com a localização do Park Lozandes.



Fonte: elaborado pela autora.

O Park Lozandes contando com uma infraestrutura de comércio, lazer e serviços consolidada, abriga vários e importantes órgãos públicos, como as sedes da Prefeitura Municipal

de Goiânia, do Ministério Público Federal, da Defensoria Pública do Estado de Goiás, da Assembleia Legislativa de Goiás e do Fórum Cível da capital. A figura 3.3 mostra a localização do Fórum Cível na Avenida Olinda e a proximidade com a Assembleia Legislativa do Estado, a BR-153 e o Estádio Serra Dourada.

Figura 3.3 – Localização do Fórum Cível na Avenida Olinda e edificações próximas.



Fonte: elaborado pela autora.

O edifício é composto por uma torre principal, com anexos (que não foram objeto do estudo). Possui geometria retangular, com abaulado na face da fachada frontal e área construída de 40.706,25 m².

As fachadas maiores, orientadas para sudeste e nordeste, bem como a posterior, com orientação para a face sudoeste, contam com sistema de sombreamento vertical móvel do tipo termobrise e pintura do tipo textura média na cor areia. A figura 3.4 apresenta a fachada frontal e lateral da edificação.

Figura 3.4 – Fachadas do edifício avaliado.



Fonte: Acervo TJGO.

A edificação é composta por 13 pavimentos, divididos em subsolo, térreo, mezanino e 10 pavimentos-tipo. O subsolo é composto por estacionamento, celas, depósitos, almoxarifado e salas técnicas. O pavimento térreo é composto por hall de entrada, postos bancários, espaço

destinado à Ordem dos Advogados do Brasil, auditório e salas de atendimento ao público. O mezanino é constituído pela Diretoria do Fórum e salas administrativas. As áreas e usos do fórum cível estão resumidos na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Áreas e usos do Fórum Cível de Goiânia.

Categoria	Área (m²)	Uso
Subsolo	10.385,19	Celas, salas técnicas, estacionamento, depósitos
Térreo	2.533,34	Hall de entrada, auditório, OAB, bancos, salas de atendimento ao público
Mezanino	2.454,21	Diretoria do Fórum, salas administrativas
Pavimento-tipo	10 x (2.533,34)	Varas judiciais (gabinetes de juiz, salas de audiência, sala de assessores, escrivanias)
Área total	40.706,25	

Fonte: elaborado pela autora.

A unidades judiciárias estão distribuídas na edificação de forma que os setores que apresentam maior procura do público externo estão localizados nos pavimentos mais baixos da edificação. Assim, o atendimento ao público externo é feito, em grande parte, no pavimento térreo da edificação.

A circulação principal possui 3 metros de largura e contorna o núcleo da edificação, servindo também como espera para os usuários externos (advogados e jurisdicionados). Existem dois átrios descobertos para ventilação e iluminação natural das circulações centrais e das salas que se localizam no núcleo da edificação onde estão instalados diversos equipamentos e espaços de uso público, como elevadores, *fan-coil*, sanitários e copas, além de depósitos de materiais de limpeza, salas técnicas e salas para outras instituições. A figura 3.5 apresenta um dos átrios descobertos e a circulação principal do edifício, com as longarinas para a espera dos usuários.

Figura 3.5 – Átrio descoberto e circulação principal do edifício avaliado.



Fonte: Autora.

Os pavimentos-tipo da edificação têm área construída de 2.533,34 m², apresentando geometria retangular (aproximadamente 38 x 77 metros), com dois vazios para ventilação e iluminação das circulações e das salas centrais. O pé-direito é de 2,70 m (3,60 m no total – medindo do piso até o fundo da laje superior).

O núcleo da edificação tem aproximadamente 600 m² (12 x 50 m), sendo esta área destinada a elevadores, sanitários, salas técnicas, copas e algumas salas de trabalho. Apenas as salas de trabalho são climatizadas artificialmente, enquanto a circulação, as escadas e os sanitários não são. A figura 3.6 apresenta o desenho do pavimento-tipo da edificação.

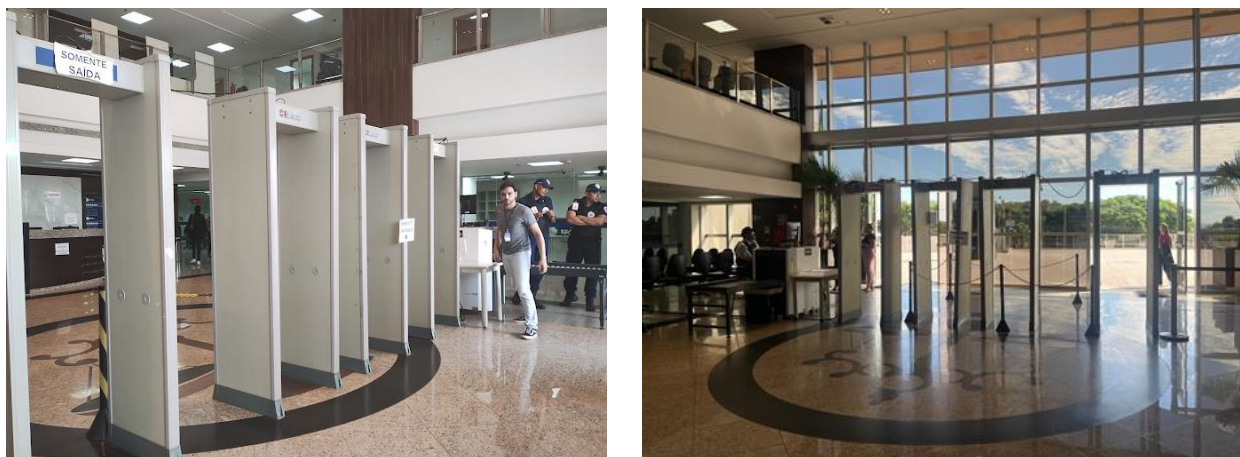
Figura 3.6 – Planta baixa do pavimento-tipo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Cada pavimento-tipo é constituído por seis unidades judiciárias (separadas por cores, conforme a figura 3.6), que são formadas pelos seguintes ambientes: gabinete do juiz, sala de audiências, salas de assessores e assistentes e o espaço para a escrivania (cartório).

Figura 3.7 – Vistas internas – Hall de entrada e o sistema de segurança.



Fonte: Elaborado pela autora.

O Hall de entrada possui pé-direito duplo. O local concentra toda a parte de identificação dos usuários externos com estações para cadastramento e os equipamentos de segurança, como detectores de metal e esteira (figura 3.7). Na figura 3.8 são apresentadas imagens ilustrativas do interior das salas de trabalho do edifício.

Figura 3.8 – Ambientes internos e sala de trabalho no edifício.



Fonte: Acervo TJGO.

A fachada frontal do edifício possui, no centro, fechamento com pele de vidro, do tipo refletivo laminado duplo de segurança (espessura de 4 + 6 mm), na cor bronze, e revestimento nas laterais com ACM (chapa de alumínio composto). A figura 3.9 apresenta as fachadas frontal e lateral da edificação.

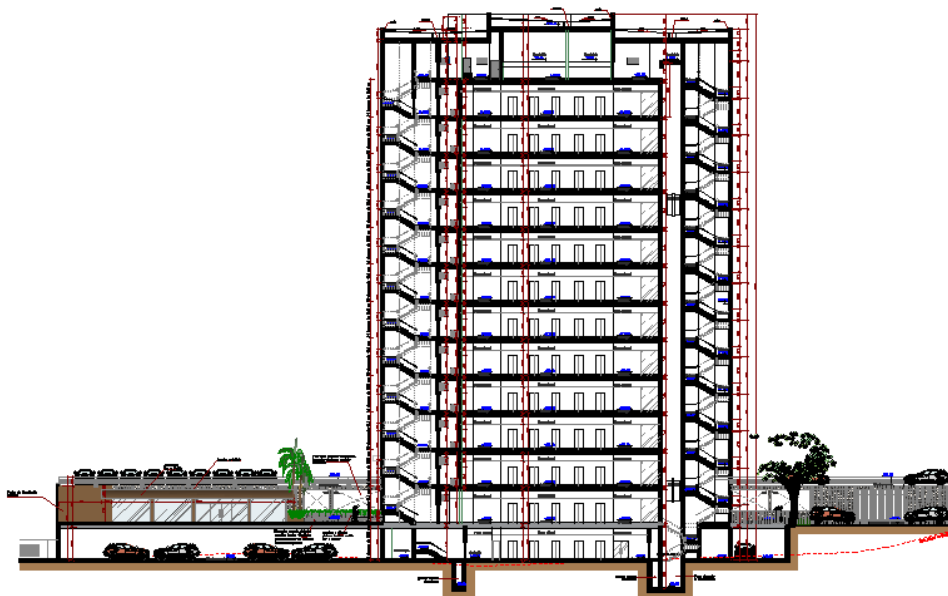
Figura 3.9 – Fachadas frontal e lateral da edificação.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na figura 3.10 é apresentado o corte da edificação, mostrando os 13 pavimentos (subsolo, térreo, mezanino e 10 pavimentos-tipo). A estrutura da edificação foi executada em concreto armado.

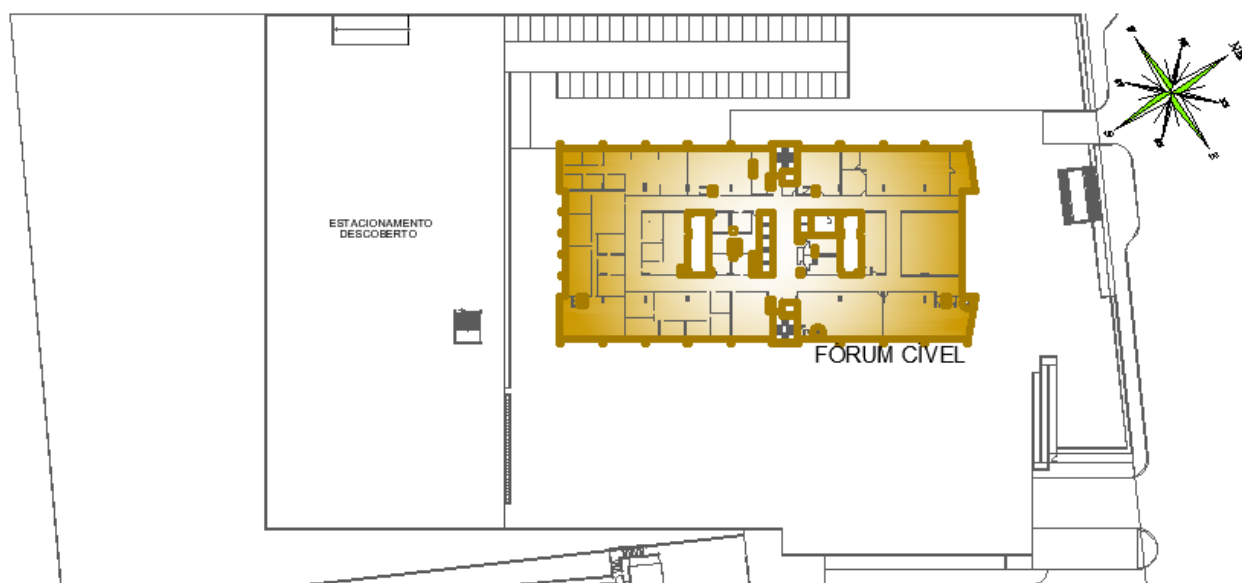
Figura 3.10 – Corte da edificação avaliada.



Fonte: Acervo TJGO.

A orientação solar da edificação é apresentada na figura 3.11. A sua implantação, com ângulo de aproximadamente 57° em relação ao norte verdadeiro, indica que a fachada frontal está voltada para a orientação nordeste, a fachada posterior está orientada para a posição sudoeste e as maiores fachadas para a posição sudeste e noroeste.

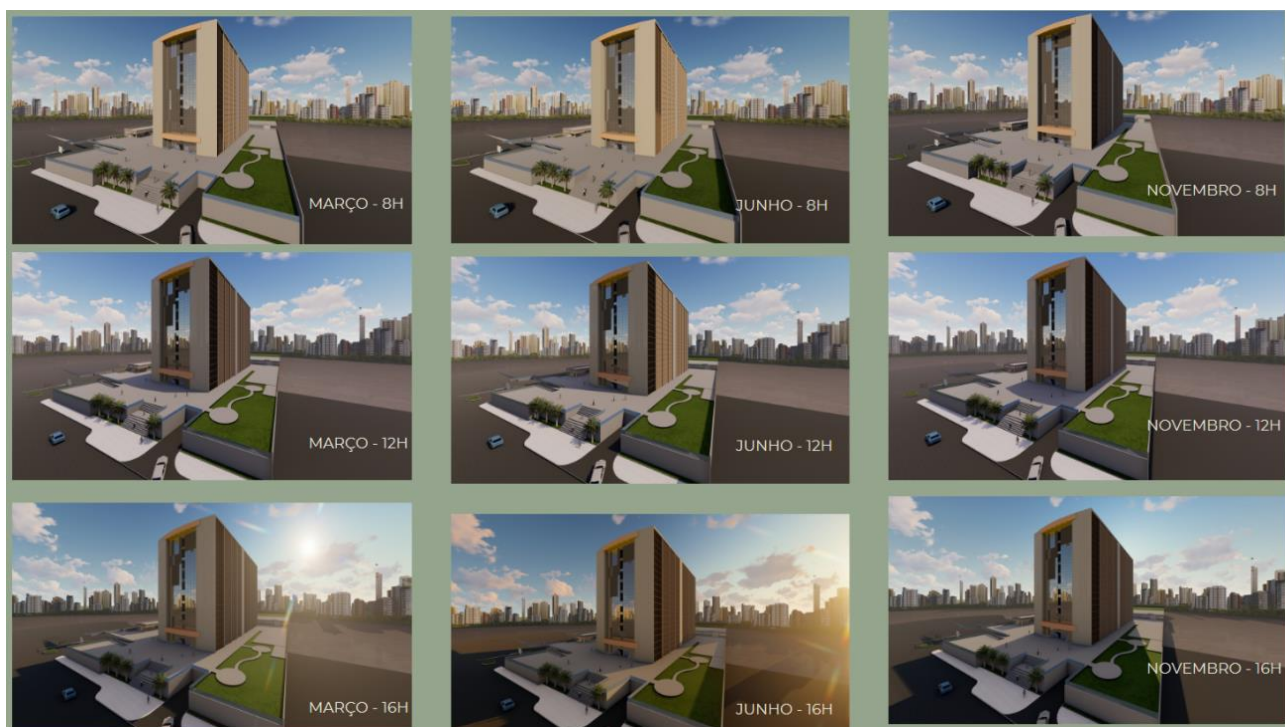
Figura 3.11 – Implantação e orientação solar da edificação.



Fonte: Acervo TJGO

Na figura 3.12 são apresentados estudos da trajetória do sol em relação à edificação. Pode-se observar o edifício modelado em diferentes períodos e horários do dia e do ano, sob a influência da trajetória do sol, mostrando o sombreamento ao longo dos meses em diferentes horários do dia.

Figura 3.12 – Estudos da trajetória do sol em relação a edificação.



Fonte: Elaborado pela autora.

Dessa forma, a fachada frontal (nordeste) (Figura 3.12), que se caracteriza por uma grande área envidraçada, recebe a radiação direta, principalmente pela manhã, com maior intensidade na primavera e no verão, quando o sol se inclina mais ao norte. Este fato pode ser verificado na figura 3.12, que representa a edificação pela manhã (março – 8h, junho – 8h e novembro – 8h). À tarde, não haverá insolação nessa fachada (março – 16h, junho – 16h e novembro – 16h).

A fachada posterior, que está voltada para o sudoeste, não recebe radiação direta pela manhã, e a maior incidência ocorre à tarde, quando o sol está no quadrante sudoeste-oeste. No verão, com o sol se pondo mais ao sul, essa fachada pode receber bastante calor. As fachadas laterais são voltadas para o sudeste e noroeste. A fachada sudeste recebe intensa radiação solar direta pela manhã, quando o sol está no quadrante leste-sudoeste, sendo mais pronunciado na primavera, verão e outono. À tarde, a sombra da própria edificação protege a fachada do sol direto. A fachada noroeste recebe radiação solar principalmente à tarde, quando o sol está no quadrante sudoeste-oeste. Pela manhã, a incidência solar nessa fachada não é significativa.

A edificação em estudo possui, na cobertura, um sistema de geração de energia solar fotovoltaico (SFV) *on grid*, isto é, conectado à rede de energia elétrica. Este é um sistema que se caracteriza por gerar energia solar e injetá-la na rede elétrica mas, não é possível armazenar energia. Quando ocorre o corte de energia na rede, a edificação não tem acesso à energia da usina. A figura 3.13 apresenta uma vista da cobertura com as placas fotovoltaicas demonstrando a disposição da instalação.

Figura 3.13 – Vista da cobertura com disposição das placas fotovoltaicas existentes.



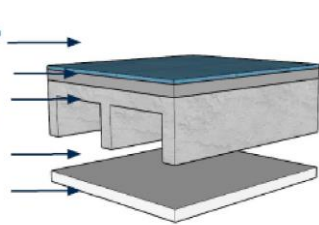
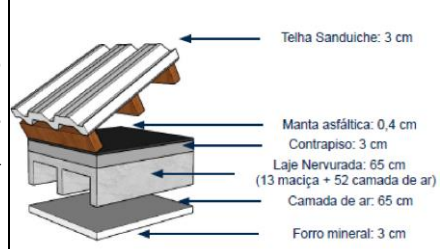
Fonte: Arquivo TJGO.

Em momentos em que não há produção de energia da usina, é possível utilizá-la da distribuidora, e nos momentos em que houver o excesso de produção, é possível receber créditos de energia pela produção própria.

3.3.1 Dados do edifício

Os dados construtivos foram utilizados para modelar o edifício padrão e para comparar o seu desempenho com o desempenho das estratégias propostas. A tabela 3.2 apresenta os materiais construtivos utilizados na construção da edificação para a realização da simulação, descritos em piso, entrepisos, tetos, parede, vidros e cobertura.

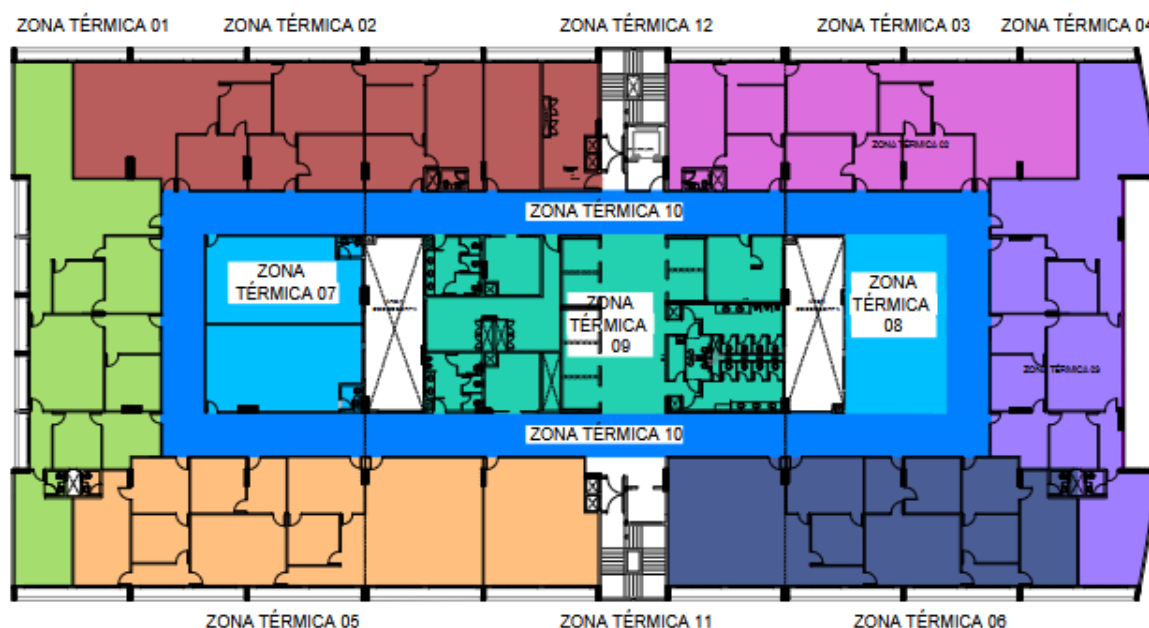
Tabela 3.2 – Resumo do sistema construtivo da edificação.

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS CONSTRUTIVOS		
Piso	Granito com espessura de 2 cm	 Revestimento em granito 2 cm Contrapiso 3 cm Laje Nervurada 65 (13 maciça + 52 camada de ar) Camada de ar 31 cm Forro Gesso 1,6 cm
Entrepisos	Composição formada por granito com espessura de 2 cm + Contrapiso de 3 cm + laje nervurada de 13 cm e 52 cm de ar + camada de ar de 31 cm – passagem de tubulações + forro mineral de 1,6 cm	
Teto 1	Forro mineral de 1,6 cm	
Teto 2	Banheiros com teto em gesso liso tabicado	
Parede interna 1	Alvenaria com pintura interna na cor branca com absorvância de 14%	
Vidro 1	Fachadas laterais e posterior. Nas janelas foi adotado o vidro temperado incolor 10 mm marca e modelo Guardian/Cebrace.	
Vidro 2	Fachada frontal com vidro laminado incolor 4 mm + 6 mm, marca e modelo Guardian/Cebrace	
Cobertura	Sistema de cobertura com espessura total de 139,4 cm (laje nervurada com 65 cm sendo 13 cm maciça e 52 cm camada de ar + camada de manta asfáltica com 0,4 cm + telha sanduiche com 3 cm)	 Telha Sanduiche: 3 cm Manta asfáltica: 0,4 cm Contrapiso: 3 cm Laje Nervurada: 65 cm (13 maciça + 52 camada de ar) Camada de ar: 65 cm Forro mineral: 3 cm

Fonte: Elaborado pela autora.

O pavimento-tipo foi dividido em 12 zonas térmicas, sendo as zonas de 1 a 8 climatizadas artificialmente e as zonas 9 a 12 não climatizadas artificialmente (figura 3.14). Pode-se observar que não são climatizadas as áreas das escadas, a circulação, os sanitários e os depósitos.

Figura 3.14 – Identificação das zonas climatizadas (1 a 8) e não climatizadas (9 a 12) do edifício avaliado.



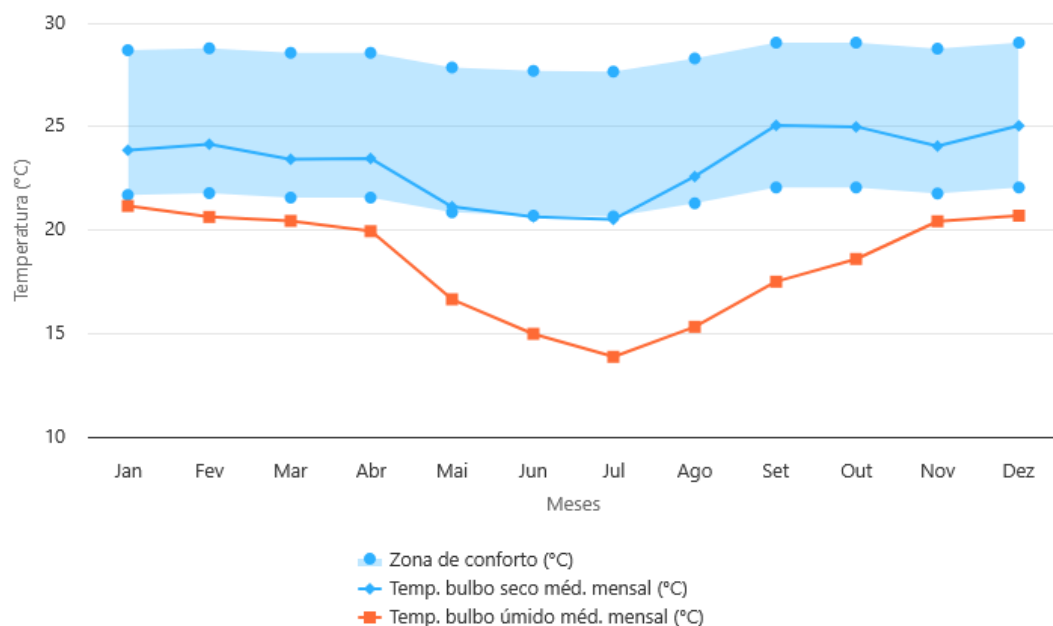
Fonte: Elaborado pela autora.

A simulação energética fez uma estimativa do consumo de energia do edifício, de forma geral, levando em consideração as cargas presentes na edificação. Para a simulação adotou-se um período anual completo, totalizando 8760 horas. Toda a edificação foi simulada. Para efeito do estudo, não foi considerado o entorno imediato, uma vez que as edificações circundantes são de baixa estatura e, por isso, resultam em projeções de sombreamento limitadas sobre a área analisada.

3.3.1.1 Dados climáticos

A cidade de Goiânia está localizada na região Centro-Oeste do Brasil, apresentando as condições climáticas prevaescentes, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, denominadas de Aw, ou clima tropical úmido e seco, caracterizadas por duas estações do ano bem definidas: verão quente e úmido e inverno ameno e seco. A temperatura média anual é de 23°C, enquanto as mínimas e as máximas variam entre 15°C e 31°C. O edifício avaliado se encontra na zona bioclimática 6 (NBR 15220:2013). A figura 3.15 apresenta as temperaturas de bulbo seco e úmido médio mensal e a zona de conforto ao longo do ano da cidade de Goiânia.

Figura 3.15 – Temperatura de bulbo seco e úmido e zona de conforto da cidade de Goiânia.

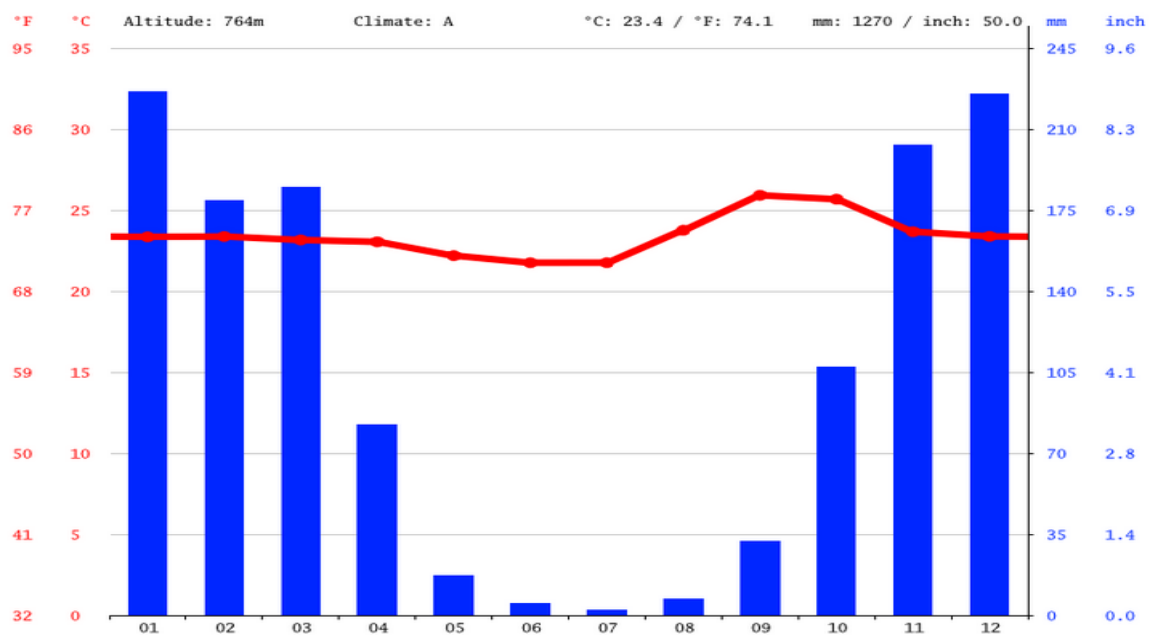


Fonte: Climate data.

Pode-se observar que, para a temperatura no bulbo seco, ao longo do ano, a cidade se encontra na zona de conforto considerada, o mesmo não ocorrendo para a temperatura no bulbo úmido.

A figura 3.16 indica o período chuvoso na cidade, que ocorre de outubro a abril, sendo que a média pluviométrica anual é de 1270 mm.

Figura 3.16 Temperaturas médias e pluviosidade da cidade de Goiânia.



Fonte: Climate-data (2025).

A amplitude térmica diária apresenta variação significativa ao longo do ano. Nos meses da estação chuvosa, oscila entre 10 e 12 °C e, no período seco, fica acima de 16 °C, com máxima, em geral, no mês de agosto, mês mais seco do ano, atingindo até 19°C de amplitude diária. Nesse período, as características são de clima desértico. No período chuvoso, os valores da amplitude caem bastante, embora não sejam baixos (Fernandes, 2007). De acordo com a Tabela 3.3, que apresenta os dados climatológicos, ao longo de 30 anos, a temperatura mínima média foi de 16°C em julho e a temperatura máxima média foi de 31,9 °C em setembro. Quanto à umidade, a média mínima foi no mês de agosto, 37%, e a máxima foi em março, com 79%.

Tabela 3.3 – Dados climatológicos (valores médios) da cidade de Goiânia entre os anos de 1991 a 2021.

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Temperatura média (°C)	23.4	23.4	23.2	23	22.2	21.8	21.8	23.8	25.9	25.7	23.7	23.4
Temperatura mínima (°C)	19.8	19.7	19.6	18.8	17.1	16.4	16	17.8	20.2	20.7	20	19.9
Temperatura máxima (°C)	27.7	27.9	27.7	27.9	27.7	27.5	27.7	29.9	31.9	31.2	28.3	27.7
Chuva (mm)	228	179	185	82	17	5	2	7	32	107	203	225
Umidade(%)	78%	78%	79%	71%	60%	53%	46%	37%	39%	54%	74%	78%
Dias chuvosos (d)	18	15	15	9	3	1	0	1	4	11	16	18
Horas de sol (h)	9.3	9.5	9.0	9.4	9.5	9.7	9.9	10.3	10.5	10.3	9.5	9.3

Fonte: *Climate-data* (2025).

Para a informação dos dados meteorológicos no programa de simulação, foi utilizado o arquivo climático, disponibilizado pelo INMET (2024) para a cidade de Goiânia. Esses dados são fornecidos em planilha eletrônica do tipo Excel e foram transformados em EPW (*EnergyPlus Weather File*), conforme exigido pelo programa. O arquivo utilizado possui informações de 29 variáveis do clima, como temperatura de bulbo seco, temperatura de ponto de orvalho, temperatura do solo, velocidade do vento, direção do vento, pressão atmosférica, quantidade de nuvens, tipo de nuvens, altura das nuvens, radiação solar, entre outras. Os arquivos climáticos fornecem dados medidos para as 8760 horas do ano.

3.3.1.2 Perfil de ocupação e dados de iluminação e equipamentos

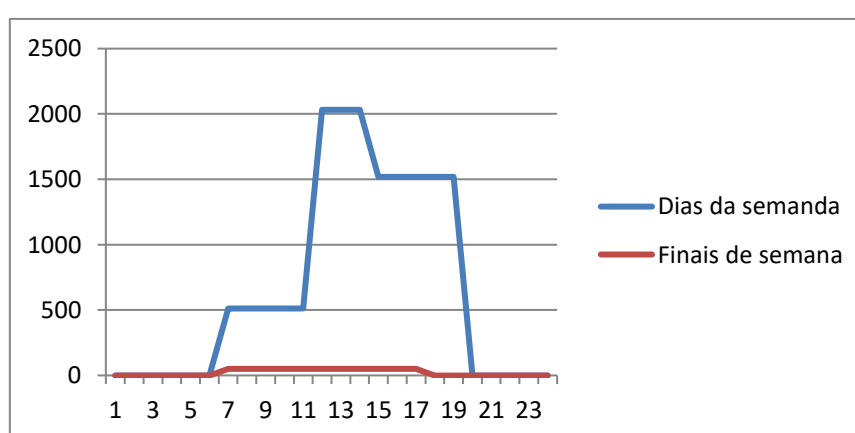
A ocupação do edifício é de segunda a sexta-feira, sendo 25% dela atribuída ao horário entre as 7h e as 12 hs; 100% entre 12h e 14 h; e 75% entre 14h e 19 h. Aos finais de semana e feriados, aproximadamente, 50 pessoas ocupam a edificação. Os dados de ocupação utilizados na simulação são apresentados na tabela 3.4 e na figura 3.17.

Tabela 3.4 – Características diárias da ocupação da edificação (dias da semana).

Público	Turno matutino 7 às 14h	Turno vespertino 12 às 19h	Total
Servidores	250	540	790
Estagiários	162	378	540
Público	100	600	700
	512	1518	2030

Fonte: Administração da edificação.

Figura 3.17 – Características da ocupação da edificação, dado em quantidade de pessoas durante as horas do dias ao longo da semana.



Fonte: Elaborado pela autora.

No total, a população do edifício, em média, é de 2030 pessoas por dia. Para os ambientes administrativos, considerou-se o número de pessoas, com base na disposição das estações de trabalho. Em áreas sem *layout* definido, realizou-se uma estimativa da ocupação.

A edificação possui 4 tipos de climatização diferentes: áreas climatizadas com sistema geral, contemplando as áreas de trabalho e com programação de funcionamento em horários determinados durante os dias da semana; áreas não climatizadas, que são escadas, áreas de serviços, circulação, elevadores; áreas climatizadas 24 horas por dia, 7 dias na semana, que são as salas técnicas e áreas climatizadas pelo sistema do tipo *split*, nas salas utilizadas pelos servidores plantonistas. Estas últimas funcionam aos finais de semana.

O sistema de ar-condicionado da edificação é constituído por três tipos: um sistema VRF (*Variable Refrigerant Flow*), que é um sistema central de expansão direta, com múltiplas unidades evaporadoras. Esse sistema está instalado nas salas técnicas que precisam de refrigeração contínua, mesmo em finais de semana e no período noturno. O sistema VRF é composto basicamente por uma única unidade condensadora, de grande porte, localizada em ambiente separado (localizada em ambiente externo) e diversas unidades evaporadoras, todas conectadas entre si e com a condensadora, por intermédio de uma rede de tubulações de cobre, por meio das quais escoam fluido refrigerante (R410a).

O segundo sistema é do tipo central, chamado de Central de Água Gelada (CAG). Esse sistema é composto por dois tipos de máquinas: os resfriadores de líquidos (*chiller*) e os misturadores de ar (*fancoils*), conectados entre si por uma rede fechada de tubulações de água. O sistema central ar/água atende basicamente as salas de trabalho.

O terceiro sistema, do tipo *split*, funciona aos finais de semana e feriados, nas salas das audiências de custódia, quando trabalham, aproximadamente, 50 pessoas. Os dados extraídos do sistema de ar-condicionado são apresentados na tabela 3.5.

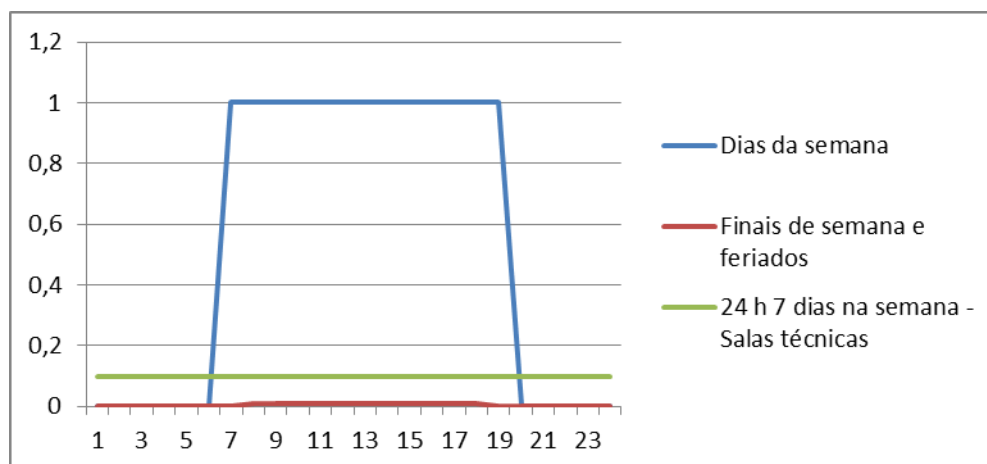
Tabela 3.5 – Características gerais do sistema climatização artificial da edificação.

Características gerais do sistema de ar-condicionado	
Tipo 1	CAG (Central de água gelada com 4 <i>chillers</i>) e as unidades condensadoras do sistema e as unidades de tratamento de ar estão instaladas em áreas técnicas no subsolo e em salas específicas ao longo de todos os pavimentos – funcionamento de 7 a 19h.
Tipo 2	Sistema de VRF de menor porte que atende determinadas áreas como salas técnicas que funcionam ininterruptamente
Tipo 3	Sistema <i>split</i>
Coeficiente de Performance médio (COP)	3,03
Set point	Aquecimento – 20 °C – das 7h às 19h Resfriamento – 25 °C – das 7h às 19h
Padrão de uso	Segunda a sexta, das 7h às 19h (Tipo 1) Segunda a domingo 24 horas por dia (Tipo 2) Finais de semana, das 8h às 17h

Fonte: Elaborado pela autora.

O funcionamento do sistema de ar-condicionado nas dependências das edificações administradas pelo Poder Judiciário de Goiás é regulado pelo Decreto Judiciário TJGO nº 2.151/2023 (TJGO, 2023), que estabelece que o sistema central deve ser programado para funcionar entre 7 e 19 horas, nos dias úteis, sendo desligado aos sábados, domingos e feriados, salvo situações especiais. Além disso, o decreto estabelece que a temperatura de funcionamento dos sistemas centrais de ar será de 23 °C, com uma variação de 2°C, ou seja, poderá variar de 21°C a 25°C. A figura 3.18 representa o funcionamento do sistema de climatização artificial, em percentual, ao longo do dia.

Figura 3.18 – Características do funcionamento do sistema climatização artificial do edifício avaliado.



Fonte: elaborado pela autora.

A potência de iluminação foi definida por ambiente, em W/m^2 , conforme estabelecido na norma ASHRAE 90.1/2022. A Tabela 3.6 apresenta a densidade de iluminação utilizada por ambiente na simulação computacional.

Tabela 3.6 – Densidade de iluminação por ambiente.

Ambiente	Densidade de iluminação (W/m^2)
Biblioteca	10,01
Banheiros	10,54
Copas	8,82
Áreas técnicas	10,22
Escritórios fechados	11,94
Escritórios abertos (Escrivanias)	10,54
Circulação/Corredores	7,10

Fonte: ASHRAE 90.1 (2022).

A iluminação dos ambientes, segundo Decreto Judiciário nº 2.151/2023 (TJGO, 2023), permanece ligada, nos dias úteis, apenas entre as 7h e as 19 h. Caso se faça necessário que as luzes permaneçam ligadas fora desse horário, deverá ser autorizado pela Administração da edificação.

Para estipular a densidade de carga dos equipamentos, em W/m^2 , foi consultada a norma ASHRAE 140 (2014). A Tabela 3.7 apresenta as densidades dos equipamentos utilizados na simulação computacional.

Tabela 3.7– Características gerais dos equipamentos utilizados.

Ambiente	Densidade de equipamentos (W/m ²)
Copas	10,76
Áreas técnicas	2,90
Escritórios fechados	6,88
Escritórios abertos (escrivânias)	7,64
Circulação / Corredores	1,72

Fonte: ASHRAE 140 (2014).

3.4 FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO ENERGÉTICA

A construção da edificação no programa de simulação, parâmetro por parâmetro, é chamada de modelagem paramétrica. A modelagem do edifício para o estudo foi desenvolvida, utilizando os dados mais próximos possíveis dos dados reais (Gouveia, 2008). As simulações computacionais permitem obter o consumo energético do edifício padrão e das estratégias utilizadas, considerando o projeto arquitetônico, suas dimensões e condições climáticas. A metodologia proposta no presente estudo considerou os critérios estabelecidos para a avaliação do desempenho energético proposto pelas normas ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021) e ABNT NBR 15220 (ABNT, 2022), ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2022), ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2022) e ASHRAE 55 (ASHRAE 2023).

Para a simulação computacional, foram utilizados os Softwares *Revit Architecture* (Autodesk, 2023), para modelar a edificação, o *Legacy Open Studio Sketup Plug-in*, para edição da geometria da edificação e o Software *EnergyPlus*, para o cálculo dos consumos da edificação.

A escolha do *EnergyPlus* como ferramenta de simulação energética para o presente trabalho se deu em virtude de diversas razões. Primeiramente, é um software de código aberto, gratuito, que está em constante desenvolvimento, com novas funcionalidades e melhorias sendo adicionadas regularmente pelos desenvolvedores da ferramenta. É reconhecido e utilizado por profissionais, pesquisadores e instituições, em todo o mundo, como uma ferramenta de referência para a simulação termoenergética de edificações. Além disso, é o programa de simulação de desempenho energético de edificações mais utilizado no Brasil, e os dados de entrada são inseridos por meio de arquivos de texto simples.

A Tabela 3.8 apresenta os principais dados da simulação energética desenvolvida e as normas de referência para o estudo.

Tabela 3.8 – Dados gerais da simulação computacional.

DADOS DA SIMULAÇÃO		
Programa	Nome	EnergyPlus versão 9.0.1 (2020)
	Plug-in	Open Studio 2.8.0 (2020)
Principais dados	Período simulado	8.760 horas (período anual completo)
	Entorno imediato	Não considerado
	Pavimentos analisados	Todo o edifício – 10 pavimentos-tipo, 1 térreo, 1 mezanino, 1 subsolo
	Arquivo climático adotado	BRA_G0. Goiânia.834230_INMET
Normas de referência	ASHRAE 90.1 (2022) - Atlanta, GA: <i>Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings</i> .	
	ASHRAE 62.1 (2022) Atlanta, GA: <i>Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality</i> .	
	ASHRAE 55 (2023) Atlanta, GA: <i>Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy</i> .	
	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2021). NBR15575 – Edifícios habitacionais – desempenho. Rio de Janeiro.	
	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2022). NBR15220 – Desempenho térmico de edificações Parte1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro.	

Fonte: Elaborado pela autora.

A metodologia proposta no presente estudo considerou os critérios estabelecidos para a avaliação do desempenho energético proposto por normas brasileiras e internacionais. Na falta de normas específicas para edifícios públicos ou de escritórios, foram utilizadas as normas para edifícios residenciais. As normas brasileiras consideradas foram a ABNT NBR 15575 - norma sobre requisitos mínimos de qualidade, segurança, conforto e durabilidade para edificações residenciais (ABNT, 2021) e ABNT NBR 15220 - norma de desempenho térmico das edificações (ABNT, 2022). As normas internacionais consultadas foram ASHRAE 90.1 - norma que estabelece requisitos mínimos para eficiência energética em edificações (ASHRAE, 2022); ASHRAE 62.1 - norma para ventilação e qualidade do ar para ambientes internos (ASHRAE, 2022) e ASHRAE 55 - norma que estabelece as condições ambientais térmicas aceitáveis (ASHRAE, 2023).

Na primeira etapa da simulação, são inseridos os dados de entrada, que abrangem a caracterização da edificação e o arquivo climático (que apresenta informações, como temperatura, umidade, radiação solar, entre outras). Na segunda etapa, é feita a simulação propriamente dita, na qual acontece o gerenciamento dos dados de balanço energético das superfícies, do ar interno e dos sistemas de funcionamento da edificação. Na terceira etapa são apresentados os dados de saída da simulação.

Os dados utilizados na simulação foram extraídos dos projetos de arquitetura e complementares fornecidos pela Administração do edifício. São dados da geometria do edifício, propriedades termofísicas dos materiais utilizados, os padrões de uso e de ocupação de

equipamentos e do sistema de iluminação artificial, além das características do sistema de condicionamento artificial de ar.

Com essas informações, o programa prevê as trocas de calor do edifício com o ambiente externo, comparando as temperaturas interna e externa e o calor transmitido por condução através da envoltória da edificação e calcula o fluxo de ar entre zonas, pelas frestas e janelas. Os resultados obtidos são os dados de ganhos de calor interno, a temperatura interna de cada zona térmica, a taxa de infiltração de ar, consumo de energia de cada sistema do edifício, entre outros resultados. Os dados extraídos podem ser em dias de projeto, ou pelo período de um ano completo (Bessa, 2010).

3.4.1 Definição da modelagem geométrica e caracterização dos componentes construtivos

Para realizar a modelagem paramétrica do estudo de caso, foi considerado o edifício real como um todo. O consumo energético do edifício existente, denominado padrão, foi modulado pela simulação computacional, desconsiderando interferências de edificações circundantes, por um período anual completo, totalizando 8.760 horas. A tabela 3.9 apresenta os dados gerais da edificação, como dimensões, localização, arquivo climático utilizado, áreas, entre outras informações relevantes para a simulação.

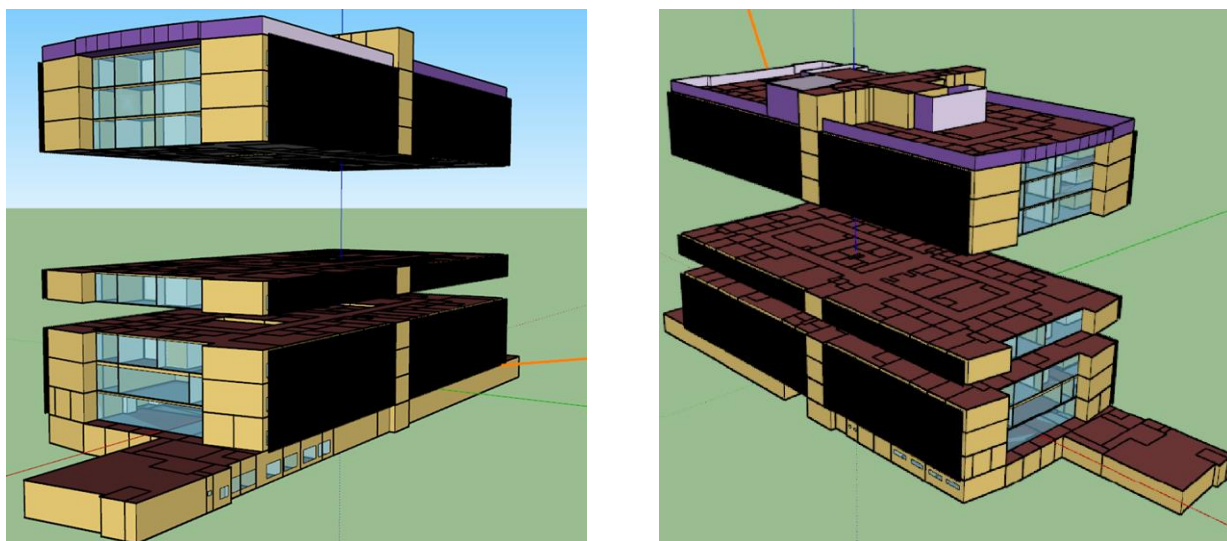
Tabela 3.9 – Dados gerais da edificação avaliada.

Dados da edificação			
Nome	Fórum Doutor Heitor Moraes Fleury		
Endereço	Avenida Olinda, 722, Quadra G, Lote 04 – Park Lozandes, Goiânia (GO)		
Coordenadas geográficas	Latitude (grau) -16.69706	Longitude (grau): -49.22577	Elevação (m): 770,00
Arquivo climático utilizado	Goiânia GO BRA INMET WMO#=834230		
Parâmetro	Valor		
Pavimento-tipo (m ²)	2.533,34		
Pé direito (m)	2,70 m (até o forro), sendo total de 3,60 m		
Área total da edificação (m ²)	40.706,25		
Área condicionada (m ²)	33.595,32		
Área não condicionada (m ²)	7.110,93		
Área de abertura de janelas (m ²)	3236,48		
Relação janela-parede (%)	23,39		
Área do telhado (m ²)	4.610,16		
Quantidade de pavimentos	13		

Fonte: Elaborado pela autora.

Considerou-se uma área total construída de 40.706,25 m² e uma área de construção condicionada líquida de 33.595,32 m². A área de abertura de janelas total (*WWR*) é de 3.236,48 m² e a área do telhado é de 4.610,16m². A modelagem do edifício está apresentada nas figuras 3.19 e 3.20.

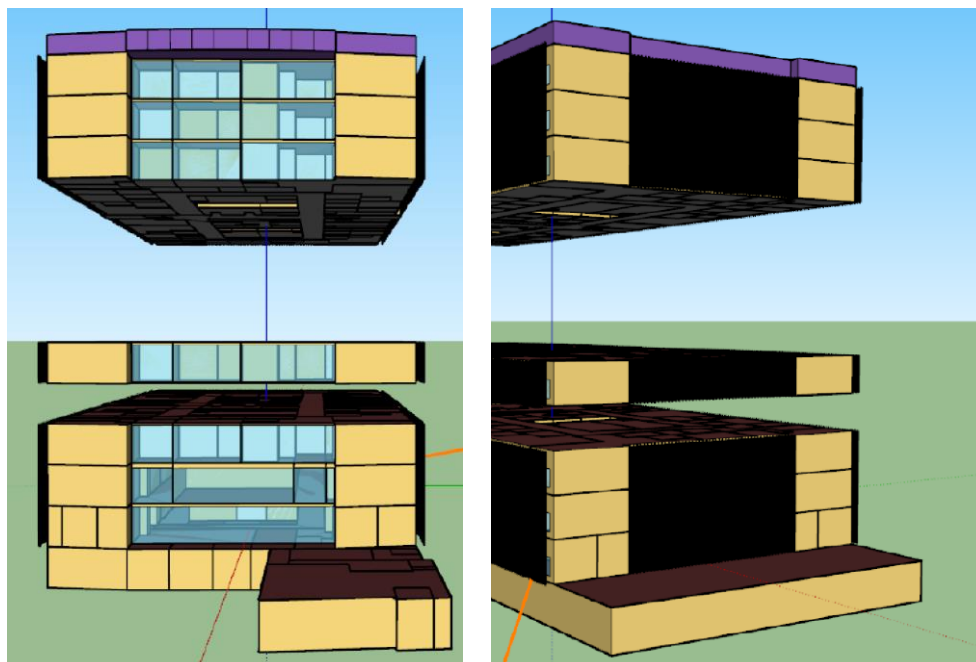
Figura 3.19 – Modelagem do edifício padrão.



Fonte: *EnergyPlus*.

A fachada frontal possui uma grande área envidraçada. As demais fachadas possuem janelas de vidro e alumínio protegidas por breje de alumínio móvel. A PAF representa a porcentagem de área envidraçada da fachada. As relações janela-parede (PAF) para as diferentes orientações do edifício são: 16,30% (norte); 25,75% (leste); 30,97% (sul) e 25,16% (oeste).

Figura 3.20 – Modelagem do edifício padrão.



Fonte: *EnergyPlus*.

A proporção geral das janelas com relação às paredes da edificação (PAF) é de 23,39%. O detalhamento das proporções janela-parede da área total de fachada são apresentadas na tabela 3.10.

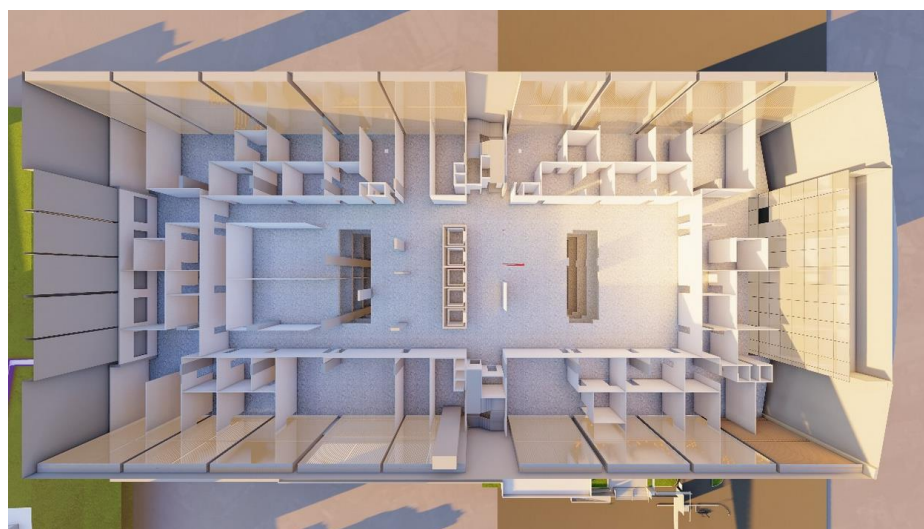
Tabela 3.10 - Parâmetros geométricos da envoltória do edifício em estudo.

Informações da edificação – Proporção janela-parede da área total					
Parâmetro	Total	Norte (315 a 45 graus)	Leste (45 a 135 graus)	Sul (135 a 225 graus)	Oeste (225 a 315 graus)
Área bruta da parede (m ²)	16.588,50	3.415,09	4.873,71	3.424,87	4.874,83
Área de parede acima do solo (m ²)	16.588,50	3.415,09	4.873,71	3.424,87	4.874,83
Área de abertura de janela (m ²)	3.236,48	556,75	1.254,85	198,36	1.226,53
Proporção janela-parede (%)	19,51	21,34	25,75	5,79	25,16
Proporção entre janela e parede acima do solo (%)	19,51	21,34	25,75	5,79	25,16
Informações da edificação – Proporção janela-parede da área condicionada					
Área bruta da parede (m ²)	12.737,01	2.502,10	4.095,49	2.218,92	3.920,51
Área de parede acima do solo (m ²)	12.737,01	2.502,10	4.095,49	2.218,92	3.920,51
Área de abertura de janela (m ²)	2.978,91	506,02	1.206,85	118,83	1147,20
Proporção janela-parede(%)	23,39	20,22	29,47	5,36	29,26
Proporção entre janela e parede acima do solo (%)	23,39	20,22	29,47	5,36	29,26

Fonte: Elaborado pela autora.

Foram utilizados os softwares *Lumion* e *SketchUp* para os estudos solarimétricos da edificação. As imagens extraídas para o pavimento-tipo, as fachadas e um corte da edificação são reproduzidas nas figuras 3.21, 3.22 e 3.23.

Figura 3.21 – Imagem da planta baixa do pavimento-tipo do edifício obtida para o estudo solarimétrico através da simulação computacional.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 3.22 – Fachada do edifício obtida pela simulação computacional.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 3.23– Corte do edifício modelado pela simulação computacional.



Fonte: Elaborado pela autora.

Com a utilização da ferramenta *SketchUp*, foi possível analisar a trajetória do sol e incidência solar nas aberturas da edificação, permitindo observar o sombreamento, ao longo do meses, e a influência da incidência solar em diferentes horários do dia.

3.4.2 Validação do modelo paramétrico

Os *softwares* de simulação são mais facilmente utilizados para estimativa do consumo de edifícios ainda não construídos, em fase de projeto. Para edifícios em operação, a estimativa prevista pelo modelo deve passar por um processo de calibração, ou seja, deve ser comparada com o seu modelo real, obtido por medições, e, então, é feito o ajuste, conforme necessário (He *et al.*, 2021).

O modelo deve representar o edifício real tal como ele é operado, de maneira que se possa analisar as alternativas de *retrofit* ou padronização para um estudo de caso, com confiabilidade. Isso quer dizer que o modelo deve captar os sistemas energéticos tal como eles estão instalados, operados e usados. No caso de falta de dados disponíveis, para a elaboração dos modelos de simulação, adotam-se valores padrão disponíveis a partir de normas ou da literatura. Em complementação, na impossibilidade de coletar todos os parâmetros de entrada exigidos pelo *EnergyPlus*, ou, ainda, discrepâncias muito elevadas, certas simplificações podem ser utilizadas. Entretanto, para verificar a acurácia em representar o edifício real, devem ser utilizados métodos para a calibração (Ascione *et al.*, 2019).

Na literatura, existem vários métodos para a calibração de um modelo de simulação e os modelos estatísticos estão entre os meios mais básicos. A estimativa de oportunidades de eficiência energética é escopo das chamadas diretrizes de medição e verificação, destacando o protocolo internacional de medição e verificação da performance EVO¹¹ (EVO, 2011), ASHRAE 14 (2002) e a guia de medição e verificação de performance da USDOE (2015). Essas diretrizes apresentam abordagens e procedimentos para fazer a estimativa dos potenciais de eficiência energética com confiabilidade.

Nessa etapa, deve ser feita uma comparação entre os resultados obtidos na simulação e aqueles fornecidos por dados reais, que podem ser dados relativos aos parâmetros microclimáticos, ou dados medidos por contratos de fornecimento, ou, ainda, pela utilização de medidores de energia (Ascione *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2020; Aruta *et al.*, 2023).

Com base na diretriz ASHRAE 14 (2002), a precisão de uma simulação do modelo é avaliada, usando dois critérios: erro de viés médio normalizado (NMBE) e coeficiente de variação da raiz do erro quadrático médio (CVRMSE). Assim, um dos pressupostos numa avaliação sobre critérios das diretrizes de medição e verificação é equiparar as condições de operação do equipamento, antes e depois de uma ação de eficiência energética.

O erro de viés médio, denominado pela sigla MBE, é a média dos erros no espaço amostral. É uma medida não dimensional, resultado da soma de todo desvio entre medição e estimativa do modelo para cada intervalo de tempo, que pode ser horário, mensal, ou anual. Ele indica, com valores positivos, o valor médio da sobre-estimativa (simulação média acima da medição) e, com valores negativos, o valor médio da subestimativa (simulação média abaixo da medição).

¹¹ EVO – *Efficiency Valuation Organization* (Organização de Avaliação de Eficiência).

medição). Segundo Diamond e Hunn (1981), o MBE é um bom indicador do desvio médio do modelo, ao longo de todo o período de avaliação e é calculado, como na equação 3, onde m_i é o valor medido, s_i é o valor simulado e n é o número de medições (Çildir *et al.*, 2020).

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{n} \quad (\text{Equação 3})$$

Foi realizada a simulação do modelo padrão com os dados informados, buscando verificar se a simulação imita o desempenho real do edifício objeto do presente estudo. A tabela 3.11 apresenta os dados obtidos por essa simulação e os valores médios de consumo obtidos pelos dados da concessionária.

Tabela 3.11 – Comparação dos resultados mensais do gasto energético da simulação com os consumos obtidos pelas faturas de energia.

Mês	Consumo medido (M_i)	Consumo simulado (S_i)	Diferença entre o consumo simulado e o consumo medido ($S_i - M_i$)
Janeiro	423.654,00	487.281,91	63.627,91
Fevereiro	451.483,20	440.079,18	-11.404,02
Março	427.729,68	502.380,13	74.650,45
Abril	497.434,56	445.217,13	-52.217,43
Maio	495.210,24	467.348,86	-27.861,38
Junho	451.305,12	403.771,17	-47.533,95
Julho	459.945,35	372.279,42	-87.665,94
Agosto	472.184,16	450.270,28	-21.913,88
Setembro	495.267,36	484.941,51	-10.325,85
Outubro	595.202,16	508.215,92	-86.986,24
Novembro	610.493,52	486.792,45	-123.701,07
Dezembro	464.294,88	471.289,40	6.994,52
Somatório	5.844.204,24	5.519.867,36	-324.336,88
Média	487.017,02	459.988,94	

Fonte: Elaborado pela autora.

O modelo é verificado, comparando-se os dados medidos com os obtidos na simulação, de acordo com a diretriz ASHRAE 14 (2002), *Federal Energy Management Program* (FEMP) e o *Internacional Performance Measurement and Verification Protocol* (IPVMP). Esses protocolos usam os principais índices de incerteza do Erro Médio Normalizado de Viés (NMBE), Coeficiente de Variação do Erro Quadrático Médio Raiz (CV (RMSE)) e coeficiente de determinação (R2).

O erro de polarização médio (MBE) é a média dos erros no espaço amostral, conforme descrito na equação 3. A equação NMBE é a normalização dos resultados do MBE, tornando-os comparáveis. Ela divide os resultados do MBE pela média dos valores medidos, resultando na diferença global entre os valores reais e os valores previstos. Na Equação 4, p é o número de variáveis ajustáveis do modelo e recomenda-se que seja zero, para fins de calibração.

$$NMBE = \frac{1}{m_-} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{n-p} \times 100(\%) \quad (\text{Equação 4})$$

Enquanto a diretriz 14 (ASHRAE,2002) subtrai os valores medidos (m_i) dos valores simulados (s_i), o FEMP e o IPMVP fazem o oposto, conforme apresentado na tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Critérios de verificação de acordo com FEMP, diretiva ASHRAE 14 e MPVP.

Critérios de verificação	Índices	Diretiva ASHRAE 14	FEMP	IPMVP
Valores mensais	NMBE	± 5	± 5	± 20
	CV (RMSE)	15	15	-
Valores horários	NMBE	± 10	± 10	± 5
	CV (RMSE)	30	30	20

Fonte Ruiz e Bandera, 2017.

Em geral, os modelos são declarados calibrados, se produzirem um MBE dentro de mais ou menos 5%. A diferença entre o valor real e o valor simulado, no presente estudo, foi de (-324.336,88). O valor calculado, segundo a tabela 3.12 e a equação 4, resultou em um MBE de (-5,55%), que foi adotado como adequado.

Com relação ao coeficiente de variância do erro quadrático médio, denominado CV(RMSE), ou *Coefficient of Variation of Root Square Error*, o uso do erro médio quadrático remove o sinal do erro, considerando apenas a sua magnitude (Willmott e Matsuura, 2005). Para a remoção do sinal, a cada diferença entre simulação e medição, eleva-se ao quadrado e calcula-se a raiz quadrada. Isso cancela o efeito de compensação e o indicador do coeficiente de variância desse erro permite a determinação de quanto o modelo se adequa às medições reais. O CV(RMSE) é obtido pela equação 5.

$$CV(RMSE) = \frac{1}{m_-} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n-p}} \times 100(\%) \quad (\text{Equação 5})$$

O CV(RMSE) mede a variabilidade dos erros entre as medidas obtidas. Na calibração do modelo padrão aqui utilizado obteve-se o valor de 12,81%, que está dentro da faixa de até 15% estabelecido pela ASHRAE 14 (2002). Portanto, o modelo padrão foi calibrado.

3.5 CENÁRIOS DE ESTUDO PROPOSTOS

Com base na revisão da literatura, sabe-se que o tema da eficiência energética das edificações é uma questão que envolve um grande domínio de variáveis e objetivos, configurando-se como um desafio que requer múltiplas fases e objetivos para a otimização. Assim, é importante combinar diferentes estratégias de projeto, principalmente em regiões de climas quentes (Benaddi *et al.*, 2024; Al-Tamimi, 2022; Qiu *et al.*, 2021; Nematchoua *et al.*, 2020; Ascione *et al.*, 2019).

Foram propostos seis cenários de estudo, buscando a melhoria da eficiência do edifício avaliado, seja para um *retrofit*, ou para a construção de novos empreendimentos com características semelhantes, conforme apresentados na tabela 3.13.

Tabela 3.13: Cenários propostos para as simulações de desempenho energético.

Cenário	Descrição	Tipo de intervenção
CEZ-1	Alteração na composição do envelope	estrutural
CEZ-2	Alteração na composição do envelope	estrutural
CEZ-3	Alteração na composição do envelope	estrutural
CEZ-4	Atualização sistema fotovoltaico	estrutural
CEZ-5	Ampliação do sistema fotovoltaico	estrutural
CEZ-6	Alteração do cronograma de uso	operacional

Fonte: Elaborado pela autora.

Para os cenários de estudo, denominados CEZs, diferentes medidas estruturais e operacionais foram implementadas, visando reduzir o consumo de energia do edifício. Para isso, adotou-se como estratégias a alteração da composição do envelope, a integração de energias renováveis e a análise do padrão de uso da edificação. Para todas as estratégias, foram mantidas a mesma taxa de ocupação, a carga de equipamentos elétricos e a de iluminação. As medidas foram definidas da seguinte forma:

a) cenário CEZ-1: Substituição do sistema de envidraçamento frontal por vidros duplos, com preenchimento de ar + envelope opaco com isolamento com poliestireno expandido (EPS) 70mm + PCM 25 + revestimento externo com acrílico elastomérico;

b) cenário CEZ-2: Substituição do sistema de envidraçamento frontal por vidros duplos com preenchimento de argônio + envelope opaco com isolamento térmico com espuma de poliuretano 60 mm + PCM 28 + revestimento externo com poliuretano acrílico;

c) cenário CEZ-3: Substituição do sistema de envidraçamento frontal por vidros duplos com preenchimento com argônio + isolamento térmico com fibra de vidro 80mm + PCM 35 + revestimento externo com isolante refletivo de calor;

d) cenário CEZ-4: reabilitação do sistema fotovoltaico existente para melhoria da geração do sistema e diminuição do uso de energia elétrica;

e) cenário CEZ-5: ampliação do sistema fotovoltaico com a implantação de carpots no estacionamento descoberto para reduzir o uso de energia elétrica da rede;

f) cenário CEZ-6: Alteração do cronograma de uso da edificação para redução do uso de energia elétrica.

3.5.1 Cenários propostos para o aprimoramento do envelope construtivo

Os parâmetros do envelope construtivo analisados foram o tipo do envidraçamento, dada a sua influência na quantidade de calor solar transmitido pela envolvente do edifício, perdas de calor, propriedades de isolamento térmico e visibilidade de transmissão da luz. Adicionalmente, foram investigadas diversas composições para as paredes, visando aprimorar a estratégia de massa térmica. Com o intuito de proporcionar benefícios extras, o isolamento térmico foi integrado nas paredes, uma vez que ajuda a restringir a transferência de calor e a diminuir as perdas térmicas no edifício. Além disso, foi simulado o aumento da massa térmica, por meio da inclusão de material de mudança de fase nas paredes externas da edificação.

Segundo Qiu *et al.* (2021), o sistema de envidraçamento é o fator mais crítico da energia total consumida em uma edificação. Com base na revisão bibliográfica, foram propostos três tipos de envidraçamento, para avaliar seu comportamento no desempenho energético, conforme apresentado na tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Tipos de vidros utilizados na simulação computacional.

Símbolo	Tipo de vidro	U-value [W/m²K]	SHGC	Tvis	Referência
Padrão	Cebrace incolor 4 mm + 6 mm	5,5	0,63	0,69	Projeto arquitetônico
V1	Vidro 6 mm baixa transmissão (<i>Low-e</i>) + 12mm de ar+ 6mm vidro claro	1.8	0.3	0.35	Qiu <i>et al.</i> (2021)
V2	Vidro 6 mm média transmissão <i>Low-e</i> + 12 mm argônio + 6 mm vidro claro	1.4	0.5	0.62	Qiu <i>et al.</i> (2021)
V3	Vidro duplo 3 mm, seletivo <i>low-e</i> (0,04) /13mm argônio/ 3mm clear (low SGHC)	1,37	0,41	0,24	Cicelsky e Meir (2014)

Fonte: Elaborado pela autora.

Devido à alta transmissão de calor pelas janelas, nas regiões de clima quente, diversos autores concordam que a utilização de vidros com baixo coeficiente de ganho solar (SHGC) é a melhor escolha para a redução da demanda de resfriamento (Bhamare *et al.*, 2019; Qiu *et al.*, 2021).

A adoção de vidros duplos é a escolha mais comum para melhorar o desempenho térmico de janelas, no que diz respeito à redução do consumo de energia e custo de *retrofit*. As propriedades térmicas das janelas podem ser aprimoradas por meio da adição de vidros, separando-os por vãos de ar, ou preenchendo com gás de movimento lento, como argônio ou criptônio, nos ambientes com necessidades de resfriamento que apresentam uso frequente de ar-condicionado (Chow *et al.*, 2010; Konstantinou e Prieto, 2018; Qiu *et al.*, 2021).

O valor U (transmitância térmica) afeta a taxa de transferência de calor entre o ambiente externo e o interior de edifícios. SHGC indica a quantidade de calor solar radiante admitido através dos vidros para o interior do edifício e intensidade de iluminação (Tvis) determina a intensidade da iluminação natural projetada no edifício (Qiu *et al.*, 2021).

Cicelsky e Meir (2014) escolheram, para a região sul de Israel, que tem os invernos amenos e os verões extremamente quentes, durante o dia, vidros com fatores U, variando de 6,3 a 0,49 W/m²k. Os melhores desempenhos dos vidros (baixa condutividade e alto isolamento) associados a temperaturas interiores mais elevadas, no inverno, e menor consumo de energia, no verão, quando o resfriamento mecânico foi empregado, foram os vidros com valores de U de 3 a 1,5 W/m²k.

Tendo em vista os trabalhos consultados, o sistema de envidraçamento para as simulações foi escolhido com valores U e SHGC também mais baixos do que o vidro existente no edifício real. Com relação à intensidade de iluminação (Tvis), os vidros escolhidos para a simulação podem ter menor visibilidade, se comparados ao existente.

Considerando que, na edificação em estudo, os vidros das janelas são protegidos por sombreamento com brises metálicos, a estratégia de atualização do sistema de envidraçamento será adotada apenas para o painel de vidro frontal que não possui nenhuma proteção de sombreamento, uma vez que, caso fosse sombreada a fachada frontal, alteraria a estética da edificação.

Com relação ao acabamento da superfície externa do edifício, esta é a principal interface em contato direto com a luz solar e geralmente se refere ao telhado e às paredes externas. A refletância solar do telhado e das paredes externas é uma propriedade óptica essencial, representando o grau de refletância da energia solar radiante na superfície do edifício (Santamouris, 2011). Diversas pesquisas indicam que uma barreira radiante proporciona uma redução eficaz no uso de energia, pois bloqueia mais energia solar e inibe a condução de calor solar para dentro da edificação, reduzindo a temperatura interna, e, conseqüentemente, reduzindo

a necessidade do resfriamento artificial (Dornelles *et al.*, 2014; Jelle *et al.*, 2015; Qiu *et al.*, 2021; Gupta e Deb, 2023). Materiais que apresentam baixas absorptâncias e altas emissividades são conhecidos como materiais refletivos ou frios (*cool materials*). Esses materiais são bons emissores de radiação de onda longa, facilitando as perdas de calor das superfícies (Castro *et al.*, 2003).

Apesar de o uso de telhados denominados frios demonstrar maior potencial de resfriamento do que paredes frias, dada sua exposição direta à radiação solar, causa menos problemas de ofuscamento no contexto urbano (Correia *et al.*, 2024). No presente estudo, a barreira radiante não será empregada no telhado, uma vez que existe um sistema fotovoltaico instalado e ele já é objeto da estratégia do cenário CEZ-4. Portanto, para esta pesquisa, a estratégia de aumentar a reflexão do envelope será adotada somente para as paredes verticais da edificação.

Pesquisas indicam que uma barreira radiante proporciona uma redução eficaz no uso de energia, pois bloqueia mais energia solar e reduz a temperatura interna, consequentemente, reduzindo a necessidade do resfriamento artificial (Qiu *et al.*, 2021; Jelle *et al.*, 2015; Gupta e Deb, 2023). Foram propostos três diferentes tipos de revestimentos externos para as simulações, apresentados na tabela 3.15.

Tabela 3.15: Tipos de revestimento externo utilizados a simulação computacional.

Símbolo	Material	Refletividade	Referência
Padrão	Pintura		Projeto arquitetônico
P1	Revestimento com acrílico elastomérico	0,9	Jain <i>et al.</i> , (2020).
P2	Poliuretano acrílico	0,89	Qiu <i>et al.</i> , 2021
P3	Revestimento isolante refletivo de calor	0,84	Qiu <i>et al.</i> , 2021

Fonte: Elaborado pela autora.

Qiu *et al.* (2021) alcançaram bons resultados com a aplicação de poliuretano acrílico com refletividade 0,89 e revestimento isolante de calor com refletividade 0,84, em edifícios de escritório do sul da China, local de clima quente e úmido. Os resultados indicaram uma redução de 4,78 kWh/m²/ano, com o poliuretano acrílico e 1,45 kWh/m²/ano, com o revestimento isolante de calor.

Correia *et al.* (2024) conseguiram resultados altamente positivos no estudo sobre escolas modulares, implantadas em 8 zonas bioclimáticas do Brasil, com adoção de revestimentos super frios, visando alcançar o conforto térmico de forma passiva. As avaliações incluíram várias composições de telhados e paredes com refletividade de 10 a 90%. Considerando as condições climáticas externas de 8 zonas bioclimáticas brasileiras e o desempenho térmico do edifício escolar de referência, diferentes grupos surgem como cenários de otimização, cada um

recomendando pinturas super frias específicas. Cidades secas dominadas por resfriamento e por resfriamento extremo (zonas 4 a 7), como é o caso de Goiânia, que pertence à zona bioclimática 6 e apresenta umidade de até 80%, segundo os autores, podem se beneficiar da emissividade espectralmente seletiva.

Considerando que, quanto mais baixa a absorvância solar da tinta, ou do revestimento externo, menor a temperatura das superfícies do edifício, seguindo a linha dos trabalhos consultados, este estudo adotou revestimentos externos com refletividade mais alta do que a existente atualmente na edificação.

Uma das soluções mais eficazes é o uso de materiais capazes de refletir uma parte significativa da energia solar. Tintas que rejeitam o calor solar reduzem a carga de resfriamento com uma economia de energia que pode até ultrapassar 90% (Kontoleon *et al.*, 2023)

Com relação ao isolamento das paredes, foi observado nas pesquisas que, se as paredes externas apresentarem um valor U mais baixo, a carga de resfriamento do edifício também será inferior e vice-versa (Kumar e Suman, 2013; Nematchoua *et al.*, 2020; Çildir *et al.*, 2020; Ascione *et al.*, 2020; Rosso *et al.*, 2020; Gamero-Salinas *et al.*, 2021). Foram propostas três novas opções para alcançar melhor desempenho térmico das paredes do edifício, com o uso de poliestireno expandido, espuma de poliuretano, ou fibra de vidro, considerados materiais favoráveis para a eficiência térmica, em estudo realizado por Kumar e Suman (2013). As opções utilizadas para a simulação estão apresentadas na tabela 3.16.

Tabela 3.16 - Tipos de isolamento utilizados na simulação computacional.

Símbolo	Material	Densidade (Kg/m ³)	Valor U (W/m ² K)	Calor específico J/KgK	Referência
Padrão	Sem isolamento				Projeto arquitetônico
M1	Poliestireno expandido (EPS) 70mm	16	0,0380	1,34	Kumar e Suman, 2013; Pomponi, 2015
M2	Espuma de poliuretano de (PUF) 60 mm	32	0,027	0,82	Kumar e Suman, 2013
M3	Fibra de vidro 80mm	16	0,0400	1,00	Kumar e Suman, 2013

Fonte: Elaborado pela autora.

A minimização do desempenho energético sempre exige o uso eficiente de materiais maciços combinados com isolamento adequado. O isolamento das superfícies externas pode melhorar o desempenho térmico, o que é mais eficaz do que isolar as superfícies internas. Os indicadores térmicos dinâmicos mais vantajosos, do ponto de vista da temperatura, são para configurações de paredes contendo duas camadas de isolamento. Com o aumento do nível de

isolamento, o benefício energético anual, tanto para resfriamento quanto para aquecimento, pode chegar a até 42% (Kontoleon *et al.*, 2023).

Materiais de isolamento são incorporados na construção com o objetivo de diminuir as demandas de energia de aquecimento/resfriamento e melhorar o conforto térmico interior em edifícios (Kumar *et al.*, 2020; Belatrache *et al.*, 2023). A espuma de poliuretano é um material versátil, devido à sua morfologia e ampla gama de propriedades mecânicas, podendo ser facilmente sintetizado com técnicas mínimas e pode ser aplicado em vários tipos de superfície, devido às suas características essenciais de ligação com vários substratos, bem como à sua característica autossustentável que não requer adesivo adicional. Além disso, apresenta peso leve, fácil manuseio, custo-benefício, eficiência energética e sustentabilidade (Somarathma *et al.*, 2018).

Em regiões de clima quente, onde predomina o uso de sistemas de resfriamento, quanto menor a resistência térmica (baixa condutividade e maior capacidade volumétrica) da parede, maior será a economia de energia operacional. Kumar *et al.* (2020) investigaram diversos tipos de materiais de isolamento. Quanto à escolha do melhor material para uma zona climática determinada, foi investigado, com base no custo mínimo do custo de vida e os critérios do período de retorno (custo do ciclo de vida). O poliestireno expandido (EPS) foi o material mais rentável na região dominada pelo resfriamento, com período de retorno inferior a 2 anos.

Kumar *et al.* (2020) concluíram que os materiais de isolamento podem ser categorizados em convencionais, modernos e sustentáveis. Geralmente a condutividade térmica dos isoladores de última geração são os mais baixos entre os três tipos de isolamento. No entanto, esses materiais possuem o inconveniente de apresentar o custo do ciclo de vida muito elevado, em comparação com outros tipos. Os materiais sustentáveis têm capacidade volumétrica mais alta em comparação com os demais tipos, o que pode atrasar e minimizar o pico de temperatura interna e reduzir o risco de superaquecimento durante o período quente, no verão. Os materiais sustentáveis, porém, têm o inconveniente de serem mais combustíveis, se comparados com os outros e, portanto, representam mais ameaça em caso de incêndio. Considerando essas alegações, para este estudo foram escolhidos, para as estratégias, materiais convencionais para o isolamento das paredes.

Além disso, diversas pesquisas apontam que a implementação de PCM em paredes leves contribui para o aumento da inércia térmica e, conseqüentemente, reduz o pico de temperatura interna (Oliveira, 2023; Almeida *et al.*, 2022; Zavrl *et al.*, 2022; Brito, 2015, Saffari *et al.*, 2017; Sarihi *et al.*, 2021). Mi *et al.* (2016) analisaram que a aplicação de materiais de mudança de fase em edifícios tem grande significância na redução do consumo de energia, diminuindo temperaturas, diminuindo as oscilações de temperatura e mantendo as cargas internas longe da temperatura de pico. Foram propostos três materiais de mudança de fase para a simulação do edifício, apresentados na tabela 3.17.

Tabela 3.17 – Especificação dos Materiais de Mudança de fase (PCMs) utilizados na simulação computacional.

Símbolo	Material	Intervalo de fusão e pico de temperatura (°C)	Intervalo de solidificação e pico de temperatura	Capacidade de Armazenamento de calor (Kj/Kg)	Calor específico (KJ/kg.k)	Condutividade em ambas as fases (W/(m.k)	Densidade em estado sólido (Kg/l)	Densidade em estado líquido (Kg/l)
P1	RT25HC	22/26 e 25	26/22 e 25	210	2	0,2	0,88	0,77
P2	RT28HC	27/29 e 28	29/27 e 27	250	2	0,2	0,88	0,77
P3	RT35HC	34/35 e 35	36/34 e 35	240	2	0,2	0,88	0,77

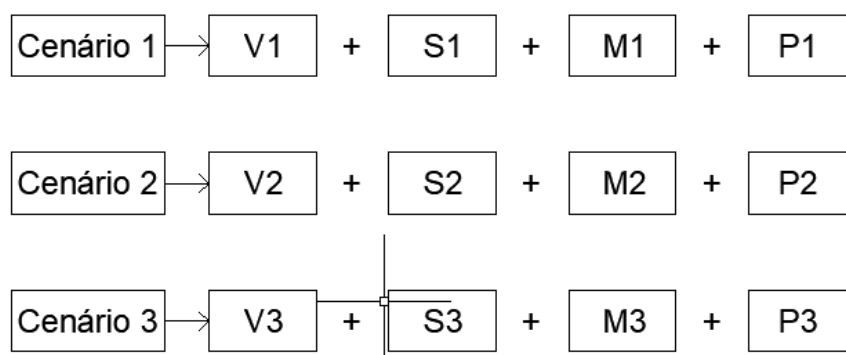
Fonte: Adaptado de Rubitherm Technologies GmbH (2024).

Embora os diversos estudos consultados tenham demonstrado uma redução considerável das cargas térmicas, ao empregar estratégias passivas, como as que foram descritas acima, outros estudos avaliam que os efeitos são mais consideráveis, quando se adotam estratégias conjuntas (Li *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2020; Raji *et al.*, 2016).

A redução da flutuação das temperaturas interiores, ao longo do dia, é um componente do estabelecimento do conforto térmico, visto que os usuários preferem mudanças mínimas de temperatura, mesmo quando estão dentro dos limites da zona de conforto (ASHRAE 55, 2020; Cicelsky e Meir, 2014)

Portanto, com base nas medidas destacadas dos estudos consultados, foram feitas combinações, para embasar novas simulações da edificação, relacionadas à alteração do envelope construtivo. É importante mencionar que o sistema de iluminação e de equipamentos (por exemplo, geladeiras, microondas) foi considerado com valores fixos porque não foi objeto de pesquisa de parâmetros. As combinações de fatores de projeto simulados são apresentadas na figura 3.24.

Figura 3.24 - Composição dos Cenários das simulações computacionais

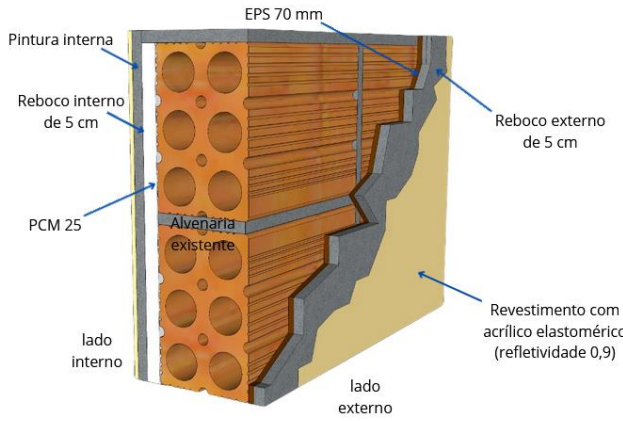
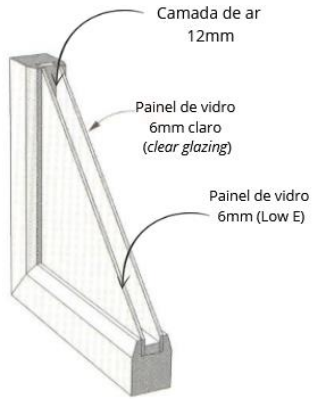


Fonte: Elaborado pela autora.

3.5.1.1 Cenário CEZ-1

Para o cenário CEZ-1 foram adotadas, como estratégias, o uso de vidro duplo formado por um painel de vidro, com espessura 6mm com baixa transmissão (*Low-e*) + 12 mm de camada de ar + painel de vidro, com espessura de 6 mm claro (*clear glass*); superfície externa com revestimento com acrílico elastomérico (refletividade 0,9); parede externa com isolamento térmico de poliestireno expandido (EPS), com espessura de 70mm; aumento da massa térmica com material de mudança de fase denominado RT25HC (PCM 25) na parede interna. A ilustração das estratégias adotadas para o cenário 1 (CEZ-1) é apresentada na tabela 3.18.

Tabela 3.18 - Componentes do cenário CEZ-1.

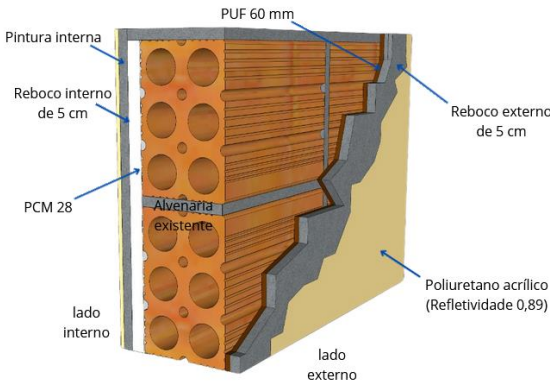
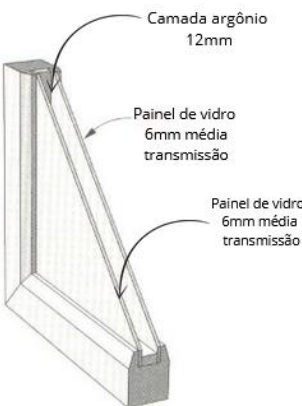
Cenário CEZ-1	
Paredes opacas	Paredes transparentes
	

Fonte: Elaborado pela autora.

3.5.1.2 Cenário CEZ-2

Para o cenário CEZ-2 as estratégias adotadas foram sistema de envidraçamento composto por painel de vidro duplo, com espessura de 6 mm, com média transmissão (*Low-e*) + 12 mm de camada preenchida com argônio + vidro, com espessura de 6 mm claro; superfície externa com revestimento com poliuretano acrílico (refletividade 0,89); parede externa com Isolamento térmico de Espuma de Poliuretano (PUF), com espessura de 60 mm; e aumento da massa térmica com material de mudança de fase denominado RT28HC (PCM 28), na face interna da parede externa. A tabela 3.19 informa as estratégias adotadas para o cenário 2 (CEZ-2).

Tabela 3.19 - Componentes do cenário CEZ-2.

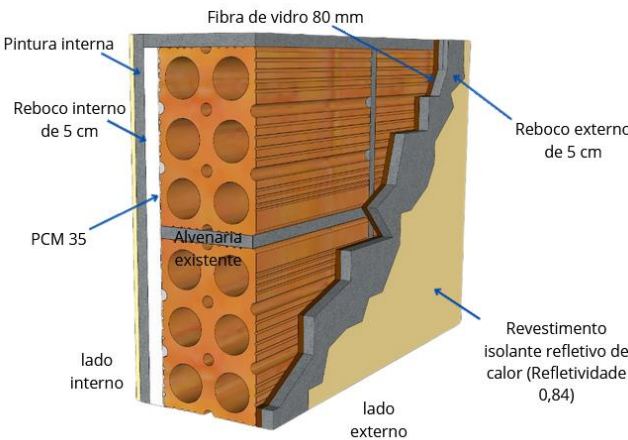
Cenário CEZ-2	
Paredes opacas	Paredes transparentes
	

Fonte: Elaborado pela autora.

3.5.1.3 Cenário CEZ-3

Para o CEZ-3 foram adotadas as seguintes propriedades: sistema de envidraçamento com vidro duplo formado por painel, com espessura de 3 mm e transmissão seletiva (*Low-e*) igual a 0,04 , camada de 13 mm preenchida com argônio e outro vidro de 3mm claro com baixo SGHC; além disso, superfície externa com revestimento isolante refletivo de calor, com refletividade 0,84, parede externa com isolamento com fibra de vidro, espessura de 80 mm e aumento da massa térmica com material de mudança de fase RT35HC (PCM 35) na face interna da parede externa. A tabela 3.20 informa os componentes do cenário 3 (CEZ-3).

Tabela 3.20 - Componentes do cenário CEZ-3.

Cenário CEZ- 3	
Paredes opacas	Paredes transparentes
	

Fonte: Elaborado pela autora.

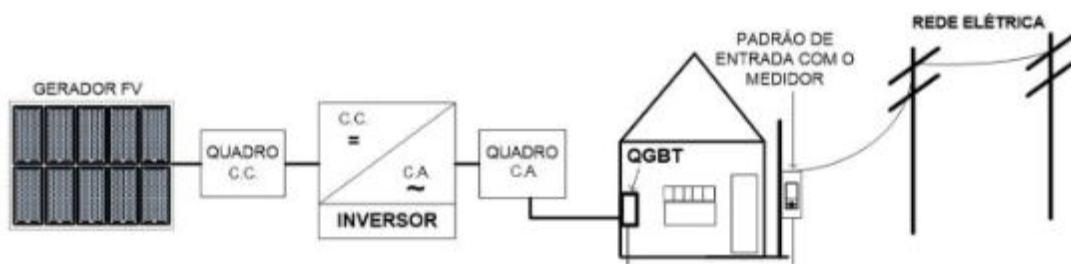
3.5.2 Cenários propostos de integração de fontes de energias renováveis no edifício

O aproveitamento da energia solar fotovoltaica é uma maneira importante de lidar com a eficiência energética, a redução da emissão de carbono e com os impactos das mudanças climáticas. Além disso, o Estado de Goiás está inserido no chamado cinturão do sol, ou seja, nessa região há grande oferta de energia solar tanto por sua latitude quanto pelas condições climáticas (INPE, 2017). A cidade de Goiânia, por sua localização e condição climática, apresenta uma estação seca, que favorece a geração de energia fotovoltaica (FV), visto que a nebulosidade é um dos fatores que mais influenciam na geração dessa energia.

Após analisar mais detalhadamente o projeto da usina solar de telhado existente na edificação, considerou-se a possibilidade de fazer um *retrofit* no sistema fotovoltaico existente, visando a maior potência da usina instalada, com base nos estudos desenvolvidos por Myint *et al.* (2025), segundo os quais, projetos solares passivos, geradores de energia eficientes e sistemas de energia renovável contribuem significativamente para atingir a meta de energia e carbono líquido zero no ambiente construído.

Um sistema de geração fotovoltaica conectado à rede da concessionária de energia elétrica é denominado Sistema Fotovoltaico conectado à rede (SFCR). Este sistema é composto por um bloco gerador (módulos fotovoltaicos) e um bloco de potência (inversores, controladores de carga e sistema de proteção e seccionamento) (Teles, 2017), conforme está esquematizado na figura 3.25.

Figura 3.25 – Configuração básica de um sistema fotovoltaico conectado à rede.



Fonte: Teles (2017).

Nesta etapa da pesquisa foram propostos dois novos cenários buscando utilizar fontes de energia limpa ou renováveis, existentes em abundância na natureza e reduzir as emissões de carbono do edifício. Sabe-se que os painéis solares perdem eficiência com o passar do tempo. Calcula-se que os painéis solares usados atualmente perdem entre 6 e 10% de eficiência depois de 10 anos. Apesar da perda anual ser ínfima, alguns fabricantes atestam que os módulos podem permanecer com mais de 80% da eficiência original, ao final de 25 anos. Após esse período, o produto pode continuar a funcionar, mas com uma qualidade comprometida (Olsen, 2020).

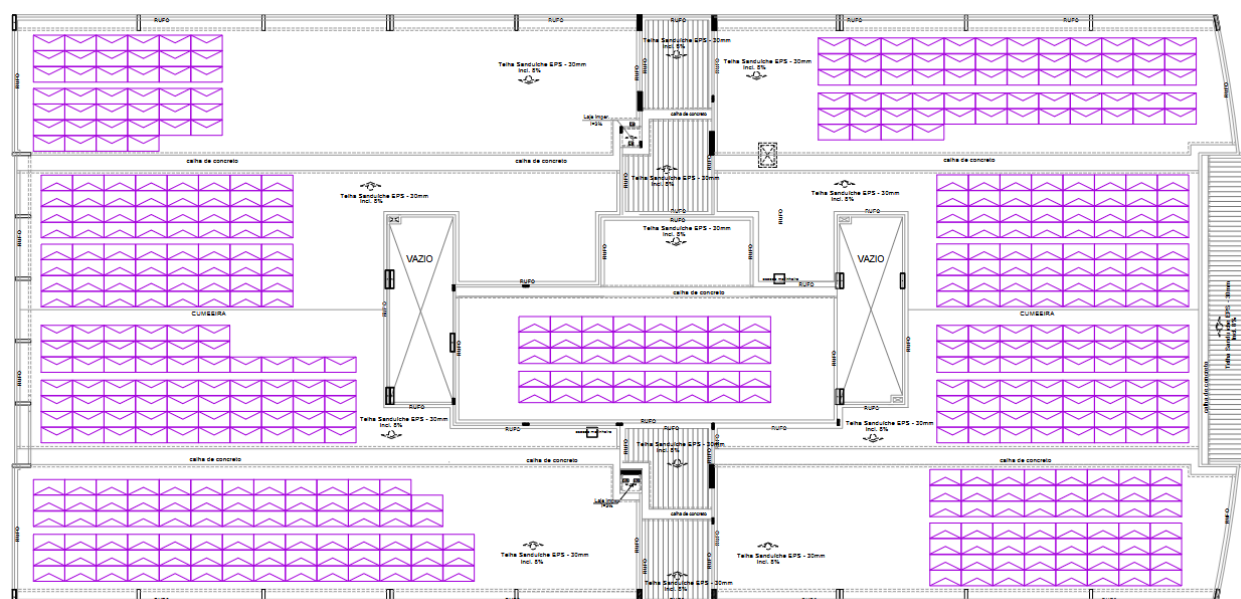
3.5.2.1 Cenário CEZ-4

Como tratado anteriormente, o SFV é formado por equipamentos com a função de converter a energia solar em eletricidade e, por estarem conectados à rede de distribuição de energia elétrica da concessionária, em momentos em que não há produção de energia, é possível utilizá-la da distribuidora e, em casos de excesso de produção, é possível receber créditos de energia por esta produção própria. O sistema SFV da edificação existente entrou em operação no ano de 2021. A energia gerada pelo sistema é acompanhado pelo software *SolarView* que gera gráficos de consumo.

A usina atual do fórum cível ocupa uma área de 1.157,20 m² e é composta de dois inversores *Sungrow*, do tipo *String*¹² (SG110CX e SG 50CX) e 526 módulos fotovoltaicos *Canadian Ku Max CS3U-360P* e tem 160 kW de potência de corrente alternada dos inversores (CA) e 189,36 kW de potência em corrente contínua (CC). Os inversores são equipamentos responsáveis por transformar a eletricidade, produzida pelos módulos, de corrente contínua para alternada, de forma que seja possível a sua utilização na edificação. A quantidade de inversores depende da capacidade da usina e do tamanho do sistema instalado.

A figura 3.26 apresenta a planta do SFV existente na cobertura da edificação. O inversor 1 (*Sungrow* SG110CX) tem 20 entradas e em cada entrada há 20 módulos interligados em série, totalizando 360 módulos. O inversor 2 (*Sungrow* SF 50CX) possui 8 entradas, sendo que, nas entradas de 1 a 6, há 21 módulos conectados em série e nas entradas 7 e 8, há 20 módulos por entrada, totalizando 166 módulos.

Figura 3.26 – Planta da Cobertura com a indicação da localização das placas fotovoltaicas.



Fonte: Arquivo TJGO.

¹² Os inversores do tipo *string* conectam todos os painéis fotovoltaicos em série;

O sistema atualmente gera uma média de 24.029,19 kWh de energia, por mês, tendo obtido cerca de 270 mil kWh, no ano de 2023, e cerca de 260 mil kWh, em 2024. Como os painéis solares perdem eficiência, com o passar do tempo, estima-se que tenham perdido entre 6 e 10% pois estão instalados há mais de 10 anos.

A figura 3.27 apresenta uma vista das placas instaladas no telhado e o local de instalação dos dois inversores do tipo *Sungrow* (inversor 1 – SG110CX e inversor 2 – SG50CX), no barrilete da edificação.

Figura 3.27 - Vista da usina solar e os dois inversores localizados no barrilete da edificação existente.



Fonte: Elaborado pela autora.

O comissionamento de usinas solares tem como foco principal garantir a operação segura e eficiente de determinado sistema, visando também identificar se a geração de energia alcança os níveis esperados. Através do comissionamento também é possível simular cenários para maximizar a geração de energia, indicando ações para *retrofit* de usinas solares. Atualmente existem diversos *softwares* gratuitos para a simulação de usinas solares, como o curso solar da USP, o *SolarEdge*, ou o aplicativo *Payback Solar* – WEG.

Para o presente estudo foi desenvolvida uma simulação por meio do programa *SolarEdge Designer*. O programa oferece imagens de satélite, em alta definição, modelagem 3D assistida por inteligência artificial e detecção de telhado, permitindo uma imagem clara e exata do telhado. Ele utiliza um mapa de irradiância e análise de sombreamento, sendo possível identificar o posicionamento ideal para os módulos solares. A figura 3.28 mostra a imagem aérea da cobertura da edificação, onde estão posicionadas as placas fotovoltaicas.

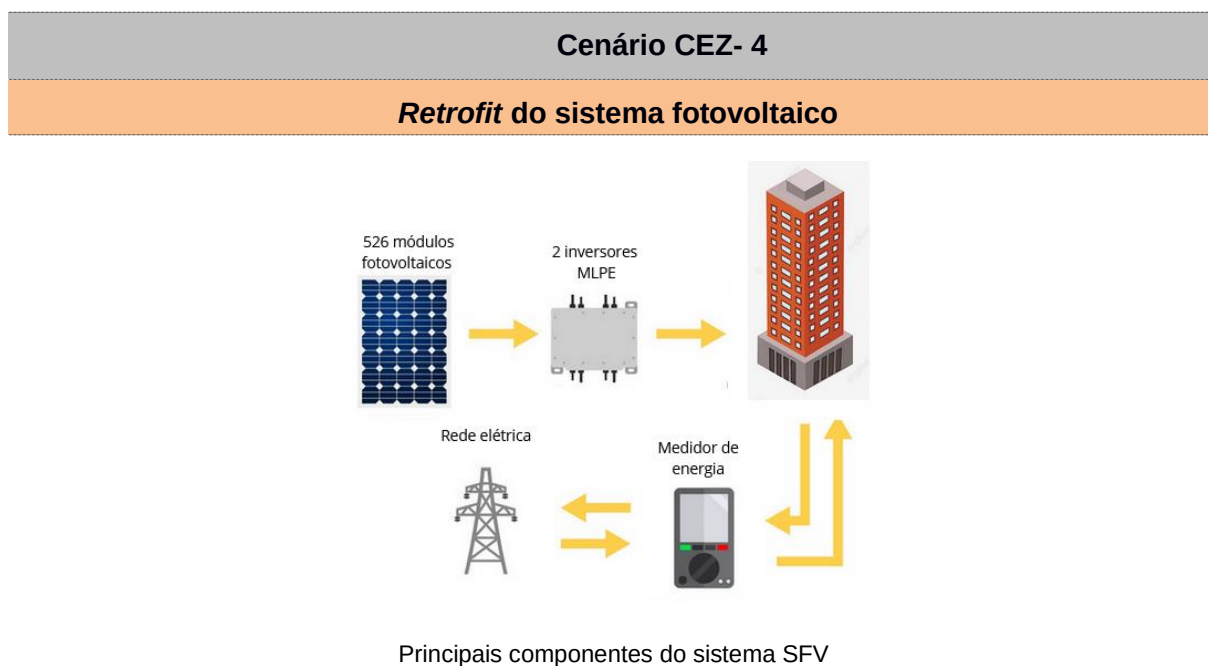
Figura 3.28 - Imagem aérea da cobertura do edifício avaliado com as placas do sistema solar fotovoltaico ligado à rede.



Fonte: Elaborado pela autora.

A tabela 3.21 apresenta as estratégias adotadas para a definição do cenário denominado CEZ-4, onde foi proposto o *retrofit* da usina existente, aproveitando-se os módulos fotovoltaicos e acrescentando novos módulos compostos por inversores do tipo MLPE (*SolarEdge SE75K*), os quais permitem a operação individual de cada módulo.

Tabela 3.21 - Componentes do Cenário CEZ-4



Principais componentes do sistema SFV

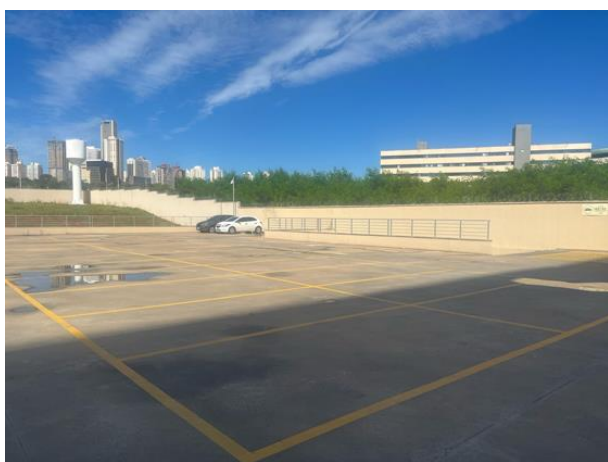
Fonte: Elaborado pela autora.

Os atuais inversores operam em conjunto, sendo assim, quando um módulo é sombreado ou apresenta sujidade, toda a rede ligada a esse inversor apresenta redução, ou falha, na geração de energia. Com o inversor aqui proposto, mais moderno, a operação individual possibilita que apenas a placa que sofre sombreado, ou sujidade, não funcione, sendo que o restante do sistema continua funcionamento normalmente.

3.5.2.2 Cenário CEZ-5

O cenário CEZ-5 também considerou o *retrofit* da instalação SFV existente, sendo então composto pelo cenário CEZ-4 acrescido de um sistema de *carpots* solares para a geração de energia solar fotovoltaica. Ao cenário 4 foi acrescentada a execução de coberturas de vagas de garagens no amplo estacionamento do edifício existente, com placas do tipo *carpots* solares, que podem proteger os veículos dos raios solares, ao mesmo tempo em que geram energia limpa. A figura 3.29 apresenta as vagas de estacionamento atualmente existentes no prédio e uma maquete eletrônica para a demonstração da presente proposta, com a criação de vagas cobertas por placas solares fotovoltaicas.

Figura 3.29 – Vista do estacionamento descoberto existente e a proposta de criação do cenário CEZ-5 com vagas cobertas por *carpots* solares além do que foi inserido no cenário 4.



Fonte: autora.



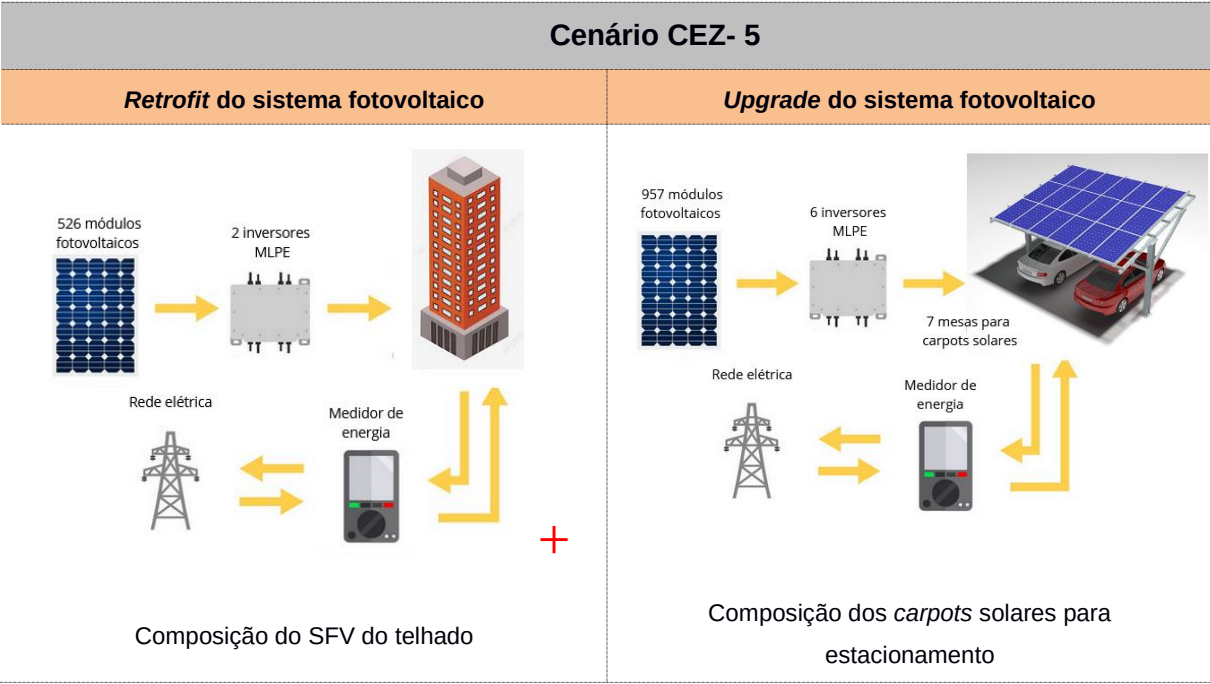
Fonte: HenanTianfon Energy¹³

Os chamados *carpots* solares são compostos por uma estrutura de estacionamento coberta com painéis solares fotovoltaicos que geram energia elétrica. Esses sistemas apresentam a vantagem de proteger os veículos, contribuir para a sustentabilidade e a redução da emissão de CO₂ ao gerar energia limpa. O *carpot* solar não possui telhas, ou outro tipo de telhado convencional, mas, sim, módulos fotovoltaicos que captam energia solar.

¹³ <https://portuguese.solar-mountingsystem.com/sale-11415596-off-grid-steel-carport-shed-solar-energy-panel-mounting-systems.html>

A tabela 3.22 apresenta o esquema da estratégia proposta para o cenário CEZ-5 que é composto pelo mesmo retrofit do cenário CEZ-4, onde foram mantidos os módulos fotovoltaicos existentes com acréscimo de novos inversores do tipo MLPE, além de placas nas vagas de garagem cobertas.

Tabela 3.22 - Cenário CEZ-5 proposto com adição de novas placas solares e instalação de vagas de garagem cobertas por *carpots* solares (retrofit + upgrade do SFV).



Fonte: Elaborado pela autora.

3.5.3 Cenário proposto para alteração no cronograma de uso da edificação

O alto consumo de energia em edifícios não se deve apenas ao seu projeto físico e construção. Fatores incertos, como o preço da energia e o comportamento dos ocupantes, particularmente, a forma como as pessoas usam os sistemas de energia também é um fator crítico, demonstrando oportunidades de melhoria no uso da energia no interior das edificações. Nos últimos anos, a coleta e o processamento de dados de ocupação tornaram-se questões emergentes, visto que podem afetar, direta ou indiretamente, diversas operações energéticas em edifícios. A aplicação de métodos baseados em análise de dados permite explorar as potencialidades do conhecimento relacionado à ocupação, para aprimorar a gestão de energia de edifícios pois podem afetar os resultados de pesquisas de forma perceptível (Toosi *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2025).

Conforme já tratado no item 3.3.1.1 (dados de localização e clima), as condições de altas temperaturas da cidade de Goiânia e o fato de a edificação contar com ambientes sem ventilação natural, demandam o uso do ar-condicionado durante todo o ano e durante todo o período do expediente, que ocorre de segunda a sexta-feira, de 7h às 19 h. Isso resulta em um consumo

substancial de energia, reforçando a importância do esforço para o uso mais eficiente da energia da edificação.

O funcionamento do sistema de ar-condicionado da edificação é regulado pelo Decreto Judiciário TJGO Nº 2.151/2023 (TJGO, 2023) que estabelece que o sistema de ar central deve ser programado para funcionar entre 7h e 19 hs, nos dias úteis, sendo desligado aos sábados, domingos e feriados, salvo situações especiais. Além disso, o decreto estabelece que a temperatura de funcionamento dos sistemas centrais de ar será de 23°C, com uma variação de 2°C, ou seja, poderá variar de 21°C a 25°C.

O sistema de ar-condicionado da edificação funciona de três formas diferentes: o VRF (*Variable Refrigerant Flow*) que está instalado nas salas técnicas que precisam de refrigeração constante, mesmo nos finais de semana e à noite; o sistema central de ar/água (CAG - Central de Água Gelada), que atende principalmente as salas de trabalho; e o sistema *Split*, que é utilizado nos finais de semana e feriados, nas salas das audiências de custódia, onde trabalham cerca de 50 pessoas, em regime de plantão. Os dados mostram que há uma alta demanda proveniente da refrigeração dos ambientes de trabalho, que é o sistema central (CAG) e opera todos os dias da semana, das 7h às 19h.

Considerando que as condições de uso da edificação são dependentes do comportamento dos usuários, foi proposto o cenário denominado CEZ-6, buscando a otimização energética do edifício pela possibilidade da não utilização do sistema central de refrigeração nos períodos de ponta, que inicia às 18h e termina às 20h59 dos dias úteis, isto é, de segunda a sexta-feira, exceto feriados. O estudo desse cenário vislumbra, ainda, alcançar as metas do Plano de Logística Sustentável, visando combater o desperdício de energia elétrica e o Plano de Descarbonização do Poder Judiciário do Estado de Goiás que está em consonância com as metas do Conselho Nacional de Justiça e o Programa Justiça Carbono Zero, com o objetivo de alcançar a neutralidade de carbono até o ano de 2030 (CNJ, 2024).

Deve-se considerar ainda que, após a pandemia de COVID19, com a completa digitalização dos processos e o funcionamento do Poder Judiciário em regime de plantão, a cultura em torno do trabalho remoto redefiniu normas e hábitos relacionados ao serviço público para a tipologia de edifício aqui avaliada. A extensão do horário de expediente presencial já não apresenta a importância de tempos anteriores, quando os processos eram físicos e as unidades judiciárias precisavam ficar abertas, devido ao cumprimento de atos processuais que eram somente na modalidade presencial.

A fixação do horário do expediente é matéria inserida no poder de autogestão dos tribunais, sendo possível por deliberação colegiada e ato normativo. A Lei 11.419/2006 (Brasil, 2006), que regula a informatização do processo judicial, em seu artigo 10º, estabelece que quando o ato processual precisar ser praticado em prazo determinado, serão consideradas

tempestivas as petições feitas até as 24h00 do último dia do prazo. Portanto, o funcionamento nesse horário se dá somente pela via digital.

Sendo assim, com o conhecimento dos fatores que geram alto consumo, da existência de alternativas para o cumprimento dos atos processuais que agora também se fazem por via digital, certos hábitos adquiridos que sobrecarregam a rede de energia poderão ser revistos pelos tomadores de decisão. A política institucional da edificação poderá alterar o funcionamento da edificação de maneira mais otimizada, redefinindo as necessidades de atuação presencial em determinados horários.

Quanto ao fornecimento de energia, o edifício avaliado pertence ao grupo A, denominado de alta tensão, subgrupo A4, com modalidade verde. Este grupo deve fazer contrato prévio com a concessionária, de acordo com a demanda prevista. Sendo assim, a instituição deve concordar com as tarifas cobradas que, no caso do grupo A, é constituída pelas tarifas de energia (TE) e pela tarifa de uso do sistema de distribuição (TUSD), tendo estas valores diferentes para a demanda contratada para os horários de ponta e fora de ponta.

Como exemplo, cita-se a resolução nº 3.279/2023, de 17 de outubro de 2023 (Brasil, 2023a), que homologou o Reajuste Tarifário Anual de 2023, válido de 22/10/2023 a 21/10/2024 referente à concessionária de energia da cidade, a Equatorial Goiás Distribuidora de Energia S.A. A tabela 3.23 destaca os valores para o grupo e sub-grupo do edifício avaliado no ano de 2023 a 2024. Nesta tabela é possível observar que o valor da tarifa de uso do sistema de distribuição (TUSD) e da tarifa de energia (TE) para o horário de ponta tem valores muito acima dos demais.

Tabela 3.23 – Tarifas de aplicação e base econômica para o Grupo A4, modalidade verde (Equatorial GO) conforme resolução 3.279/2023 (Brasil, 2023a).

Valores em vigor de 22/10/2023 a 21/10/2024			
	TUSD		TE
	R\$/kW	R\$/MWh	R\$/MWh
Demanda	25,22	0,00	0,00
Ponta	0,00	1.571,74	421,04
Fora ponta	0,00	97,83	268,50

Fonte: Resolução Homologatória nº 3.279/2023 (Brasil, 2023a).

Os valores dessas tarifas são definidos pela ANEEL, conforme análise dos custos e condições de mercado, a análise das tarifas em relação a outras empresas semelhantes, no exterior, a eficácia da empresa, a necessidade de conseguir tarifas mais justas e um retorno satisfatório para os empresários (Brasil, 2025).

As tarifas foram reajustadas, em média, em 3,54%, em 2023, e 4,55%, em 2024. Além de apresentar preços mais elevados, nos horários de ponta, quando a carga de energia está no pico, e devido à falta de chuvas, foi necessário, de outubro a dezembro de 2024, que o governo acionasse as usinas termelétricas para manter a geração de energia sem interrupções. No período, com o acionamento de mais termelétricas, o custo da energia aos consumidores foi aumentado, com o acionamento das bandeiras tarifárias mais elevadas (CNN BRASIL, 2024).

A tabela 3.24 apresenta as resoluções homologatórias e os percentuais de aumento dos anos de 2019 a 2024 da Concessionária Equatorial, em Goiânia.

Tabela 3.24 - Reajustes tarifários na Concessionária Equatorial Energia Goiás.

Ano	Motivo	Ato Regulatório	Efeito médio ao consumidor
2019	Reajuste Tarifário	Resolução Homologatória nº 2.791/2019	-3,90%
2020	Reajuste Tarifário	Resolução Homologatória nº 2.791/2019	4,28%
2021	Reajuste Tarifário	Resolução Homologatória nº 2.963/2021	16,45%
2022	Reajuste Tarifário	Resolução Homologatória nº 3.130/2022	7,22%
2023	Reajuste Tarifário	Resolução Homologatória nº 3.279/2023	3,54%
2024	Reajuste Tarifário	Resolução Homologatória nº 3.407/2024	4,33%

Fonte: Equatorial Energia (2025).

Os postos tarifários são aplicados aos dias úteis, já nos fins de semana e feriados nacionais, todas as horas são consideradas como fora de ponta. O horário (posto) de ponta é o período diário de três horas consecutivas em que as tarifas têm um valor tarifário diferenciado do horário de ponta. O horário (posto) fora corresponde ao período diário composto pelas horas consecutivas e complementares ao horário de ponta, em que as tarifas de energia elétrica têm um valor menor, em relação ao período de ponta. Para o grupo A, o horário fora ponta compreende o período de 21h às 17h59 min (dia seguinte), e o horário de ponta compreende o período de 18h às 20h59 min.

3.5.3.1 Cenário CEZ-6

Sendo assim, a estratégia do cenário CEZ-6 considera alterar o horário de uso da edificação, fazendo com que ela tenha menor tempo de uso de ar-condicionado no período denominado de ponta, quando a tarifa é maior. Para isso, foi proposto desligar o sistema HVAC uma hora mais cedo, isto é, às 18h.

Considerando a resolução homologatória nº 3.407 (Brasil, 2024c), de 15 de outubro de 2024, em que houve reajuste tarifário, em 2024, a tabela 3.25 apresenta os valores praticados

pela concessionária de energia da cidade, de 22 de outubro de 2024 a 21 de outubro de 2025, utilizados no presente cenário.

Tabela 3.25 – Tarifas vigentes de Aplicação e base econômica para o Grupo A4, Modalidade verde (Equatorial GO).

Valores em vigor de 22/10/2024 a 21/10/2025			
	TUSD	TE	
	R\$/kW	R\$/MWh	R\$/MWh
Demanda	27,09	0,00	0,00
Ponta	0,00	1.686,32	418,22
Fora ponta	0,00	97,89	256,34

Fonte: Resolução Homologatória nº 3.407/2024 (Brasil, 2024c).

Nas modalidades tarifárias do Grupo A, aplicam-se os horários de ponta e fora ponta. Os postos tarifários são definidos por distribuidora, no seu processo de revisão tarifária periódica, de acordo com a Resolução Normativa (REN) nº 1000/2021 e os Procedimentos de Regulação Tarifária – Proret (BRASIL, 2022).

A Tabela 3.25 apresenta os valores atualizados pagos atualmente pela edificação, conforme a Resolução Homologatória nº 3.407/2024 (Brasil, 2024c) que revisou os valores a serem cobrados pelo funcionamento da energia elétrica da edificação.

Para o grupo A, o horário fora ponta compreende o período de 21h às 17h59 min (dia seguinte) e o horário de ponta compreende o período de 18h às 20h59 min. Sendo assim, a estratégia do cenário CEZ-6 considera uma alteração no uso da edificação, fazendo com que ela não consuma energia no período considerado de ponta. Para isso, será considerado que o sistema HVAC seja desligado uma hora mais cedo, isto é, às 18h.

Essa alternativa é uma proposta que não impactaria em custos da edificação, mas apenas no comportamento dos usuários, diminuindo o longo período em que a edificação permanece com o sistema HVAC em funcionamento.

3.6 AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE CARBONO

Avaliar as emissões embutidas ao longo do ciclo de vida das edificações torna-se uma abordagem indispensável para compreender, buscar estratégias e reduzir os impactos ambientais no setor da construção, especialmente diante da crescente demanda por práticas mais sustentáveis. Ao propor a avaliação dessas emissões, utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), buscou-se contribuir para o avanço das discussões científicas, oferecendo

subsídios técnicos que possam orientar políticas públicas, práticas construtivas mais alinhadas às metas climáticas, aos ODS (ONU, 2024) e a transição para um modelo econômico de baixo carbono.

No presente estudo foram quantificadas as emissões embutidas na edificação, na fase construtiva, utilizando dados de orçamentos e também dados reais da fase operacional do edifício, que considera o consumo efetivo das etapas, uso e manutenção, como uso de energia e de água. Na prática, a obtenção de dados reais de um edifício de grande porte é uma grande contribuição para obtenção de indicadores de emissões.

O estudo de caso se concentra em uma tipologia de edificação pública do Poder Judiciário, de grande porte, localizada em Goiânia, abrangendo na fase pré-uso, como fundação, estrutura, envoltória, vedações internas e acabamentos. Essa abordagem permite uma avaliação ampla do impacto ambiental resultante da construção, oferecendo uma perspectiva valiosa sobre as emissões de carbono associadas. Além disso, na fase de uso do edifício, dados do impacto operacional para a fase B6 e B7, uso de energia e uso de água, respectivamente, foram coletados.

Desse modo, os resultados desta investigação almejam estabelecer parâmetros que possam servir como *benchmarks* e metas de carbono para edificações brasileiras, com características semelhantes às apresentadas no presente trabalho, promovendo a escolha de materiais sustentáveis já na fase de projeto e medidas de uso de menor impacto. Embora muitos países já tenham implementado regulamentações com metas de carbono para edificações, grande parte dessas metas está centrada na fase de projeto (UNEP, 2022).

A metodologia de ACV vem sendo amplamente utilizada pelo setor da construção, com aplicação em diversos estudos que investigam o perfil ambiental das edificações, em busca de soluções para mitigar e controlar os impactos, ao longo do ciclo de vida das edificações (Chan *et al.*, 2022).

De acordo com a NBR 14040 (ABNT, 2014), a condução de uma ACV compreende quatro fases básicas, cada uma com suas subdivisões, sendo elas: a definição do escopo, análise do Inventário de Ciclo de Vida (ICV), Avaliação do Inventário de Ciclo de Vida (AICV) e interpretação dos resultados, conforme apresentados na tabela 3.26.

Tabela 3.26 - Fases para a condução da ACV de acordo com a NBR 14040.

1ª Fase	Definição do Objetivo e escopo
2ª Fase	Análise do Inventário de Ciclo de Vida (ICV).
3ª Fase	Avaliação do Inventário de Ciclo de Vida (AICV).
4ª Fase	Interpretação dos Resultados.

Fonte: Adaptado da ABNT (2014).

O fluxo metodológico dessa etapa foi dividido em quatro fases, correspondentes às fases da ACV apresentada na NBR 14040. Para cada fase, além das etapas apresentadas na norma, foram adicionadas etapas pertinentes e necessárias para a aplicação da ACV neste estudo.

A primeira fase é composta pela definição do objetivo e escopo da ACV, que inicia com a definição geográfica da área de estudo, a definição da tipologia edilícia a ser analisada, critérios para definição da edificação. O principal critério para definição da edificação a ser analisada foi a liberação do acesso aos dados, identificação das características das partes da edificação, sendo selecionados os materiais de maior representatividade para cada elemento da edificação, coleta dos dados da edificação necessários para alimentar o ICV, a partir do projeto executivo, do orçamento e dados *in loco*, na fase operacional. Posteriormente foram definidos os estágios do ciclo de vida abrangidos pelo estudo, unidade funcional adotada, categorias de impacto analisadas no estudo, bases de dados e *software* utilizados para o inventário de ciclo de vida.

A segunda fase da metodologia se constitui do Inventário de Ciclo de Vida, no qual foi utilizada uma planilha com a caracterização de cada material, sua unidade e a categoria de impacto analisada. Nele é inserido o quantitativo de cada material obtido por meio da coleta dos dados do orçamento, ou *in loco*, os fatores de impacto para cada material, de acordo com a categoria de impacto em estudo, a unidade e a fonte de cada fator de impacto. São utilizadas fórmulas para cálculo dos resultados e as emissões incorporadas nos estágios avaliados.

Na terceira fase são gerados os resultados em $\text{kgCO}_2\text{-eq/m}^2$ e $\text{kgCO}_2\text{-eq/m}^2\text{/ano}$. Aqui, os resultados em $\text{kgCO}_2\text{-eq}$ obtidos na fase 2 são divididos pela área total da edificação para obter os resultados em $\text{kgCO}_2\text{-eq/m}^2$ de área construída e a vida útil considerada. Foi levantado o *benchmark* relacionado para a interpretação dos resultados. Finalmente, na quarta fase, são analisados os resultados, identificando os pontos críticos do Ciclo de Vida da edificação.

3.6.1 Base de dados e metodologia utilizada

Priorizou-se o uso de Declarações Ambientais de Produto (DAP) de origem brasileira, quando possível, no presente estudo. O SIDAC (Sistema de informação do Desempenho Ambiental da Construção) é um sistema também nacional, que permite calcular indicadores de

desempenho ambiental de produtos de construção, com base em dados brasileiros e nos conceitos da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (SIDAC, 2022).

Devido à ausência de DAPs para alguns materiais inventariados, também foi utilizada a base de dados *Ecoinvent*, que é um recurso global internacionalmente reconhecido para dados ambientais e que conta com alguns dados brasileiros, ou internacionais, caso necessário.

O *Ecoinvent* é uma ferramenta estruturada pelo Instituto Federal Suíço para pesquisas e testes de materiais, em parceria com o governo suíço, que organiza banco de inventários de ciclo de vida. Os inventários contêm as informações de quantidade de produtos e sistemas, descrevem as entradas e saídas de materiais, substâncias e energias de todas as etapas necessárias para a produção do produto, ou sistema – extração, manufatura, transporte, disposição de resíduos, consumo de energia, etc.

Recentemente foram incluídos na base de dados Ecoinvent cerca de três mil materiais nacionais, e esta pesquisa utilizou esses dados do potencial de aquecimento global extraídos do referido programa para os materiais da construção do contexto brasileiro, quando existentes. No caso de ausência de dados nacionais, foram adotados valores a partir de dados da literatura. Librelotto e Jalali (2008) ressaltam a importância de estudos para coleta de dados nacionais.

A metodologia de avaliação utilizada abordou exclusivamente as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), segundo os princípios estabelecidos pela NBR 14.040, que define a estrutura geral para a condução da Análise do Ciclo de Vida (ACV), no Brasil. Além disso, o estudo é complementado pela EN 15.978 (CEN, 2011), que fornece diretrizes específicas para a aplicação da ACV em produtos de construção, com ênfase na quantificação das emissões de GEE. A combinação dessas normas garante uma abordagem consistente e padronizada, permitindo uma avaliação precisa do impacto ambiental da edificação, ao longo de seu ciclo de vida.

Os resultados da quantificação da emissão de GEEs da produção de cada material (EP), ou etapa na fase de pré-uso, ou uso, são obtidos a partir da somatória dos principais materiais empregados no orçamento ou no consumo, multiplicados pelos seus respectivos fatores de carbono (FC), aplicando-se a equação:

$$EP = \sum_{i=0}^t (QM_i \times FC_i) \quad \text{(Equação 6)}$$

onde:

EP = Emissão de GEEs da produção dos materiais (kgCO₂-eq)

QM_i = Quantitativo do material “i” empregado ou consumido.

FC_i = Fator de carbono do material “i” (kgCO₂-eq/unidade material).

Para todos os materiais foi possível encontrar um fator de impacto, seja no EPDs, *Ecoinvent* ou Sidac, dando preferência para fatores brasileiros ou globais.

3.6.2 Vida útil e unidade declarada

De acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2021), que trata dos requisitos gerais de desempenho para edificações habitacionais, a Vida Útil de Projeto (VUP) é um conceito que deve ser considerado em termos de durabilidade e desempenho dos materiais e sistemas utilizados nas edificações. Para edifícios habitacionais, a norma estabelece que a VUP é de 40 a 60 anos. Este período reflete o tempo durante o qual se espera que a edificação mantenha suas características funcionais e estruturais, sem a necessidade de reformas substanciais. Sendo assim, este estudo seguirá em conformidade com a norma brasileira e adotará o VUP de 50 anos.

Neste estudo, a unidade de comparação adotada é a Unidade Declarada, conforme especificado na norma DS/EN15804:2012 + A2:2019. Tal unidade é empregada na ACV de edificações para expressar o desempenho ambiental de um produto, ou serviço, quando não se considera o ciclo de vida completo, como no caso desta pesquisa, que analisa apenas as fases de produto e construção.

Diante do exposto, a unidade declarada adotada neste estudo é de 1m² de área construída da edificação em análise. Com base nos procedimentos metodológicos descritos, envolvendo a simulação computacional dos cenários definidos, a coleta de dados no edifício e a consolidação dos indicadores de desempenho energético e ambiental, estabelece-se o alicerce necessário para a etapa analítica desta pesquisa. No próximo capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações e medições realizadas, com ênfase na interpretação dos dados de consumo de energia, água, gás e geração de resíduos, bem como na avaliação comparativa dos cenários propostos e suas respectivas emissões de carbono, considerando tanto a fase orçamentária quanto a fase operacional do edifício. Essa análise visa evidenciar o potencial de estratégias sustentáveis para a melhoria do desempenho ambiental da edificação em estudo e auxiliar na tomada de decisões de novos projetos com características similares.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados das avaliações de desempenho energético e ambiental da edificação. A ferramenta de simulação computacional foi adotada com o objetivo de obter o consumo energético da edificação no estado em que se encontra atualmente.

Na sequência foram propostos cenários para melhoria da eficiência energética da edificação, com dados extraídos da literatura que direcionaram a escolha das estratégias passivas para novas simulações de desempenho energético. Foram considerados para efeito de avaliação, a alteração da composição do envelope construtivo, a análise da influência das energias renováveis na edificação e a influência da alteração do cronograma de uso da edificação.

Além disso, dados reais de consumo na fase operacional do edifício foram coletados apresentando os indicadores de consumo energético durante um período de 5 anos. Os dados foram utilizados para a determinação dos indicadores de consumo energético para a pesquisa, servindo como importante ferramenta de cálculo de consumo, permitindo traçar metas para minimizar gastos ou para melhorias para novas construções com características semelhantes às aquelas aqui adotadas.

O desempenho ambiental da edificação foi avaliado com a utilização da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), aplicada de acordo com as etapas contidas na metodologia e os resultados obtidos de acordo com os potenciais impactos ambientais gerados para cada cenário de estudo. Foram quantificadas as emissões embutidas na edificação na fase construtiva, utilizando dados de orçamentos e também dados reais da fase operacional do edifício, que considera o consumo efetivo das etapas uso e manutenção, como uso de energia e de água.

Ao final, são avaliadas as melhores estratégias do ponto de vista do desempenho energético e ambiental da edificação.

4.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS

O desempenho energético da edificação está associado à sua eficiência energética e serve como um parâmetro para compreender o consumo energético ao longo do ano. A avaliação do desempenho energético dos edifícios baseia-se em diversos critérios que consideram tanto a quantidade quanto a qualidade de energia utilizada. Entre os critérios qualitativos, estão as tipologia e características arquitetônicas, os sistemas operacionais do edifício (como HVAC, elevadores e bombas) e o comportamento dos ocupantes. Já os indicadores quantitativos consistem em dados numéricos que se referem a várias características técnicas do edifício.

Para avaliar o desempenho energético, foi calculado inicialmente o consumo total de energia da edificação no estado em que se encontra hoje. Os resultados foram expressos em kWh/ano (Quilowatt hora por ano), abrangendo a energia elétrica usada para serviços de energia

(iluminação e equipamentos) e aquecimento e resfriamento de ambientes (HVAC). Em relação ao HVAC, os resultados são divididos em resfriamento (*chiller*) e equipamentos de circulação de ar (bombas e ventiladores).

O total de energia consumida anualmente é a soma dos gastos com iluminação, equipamentos e climatização. Os elementos do projeto, como, por exemplo, o tipo da fachada, a orientação em relação ao sol, o tipo de vidro e outros fatores, juntamente com uma alta carga de equipamentos e iluminação, podem aumentar a temperatura interna do espaço e influenciar diretamente o uso do ar-condicionado.

O conhecimento dos dados sobre o desempenho energético permite a formulação de objetivos de redução do consumo de energia e, conseqüentemente, a melhoria da eficiência energética do edifício. Para melhorar o desempenho energético de um edifício é preciso agir sobre o seu consumo de energia.

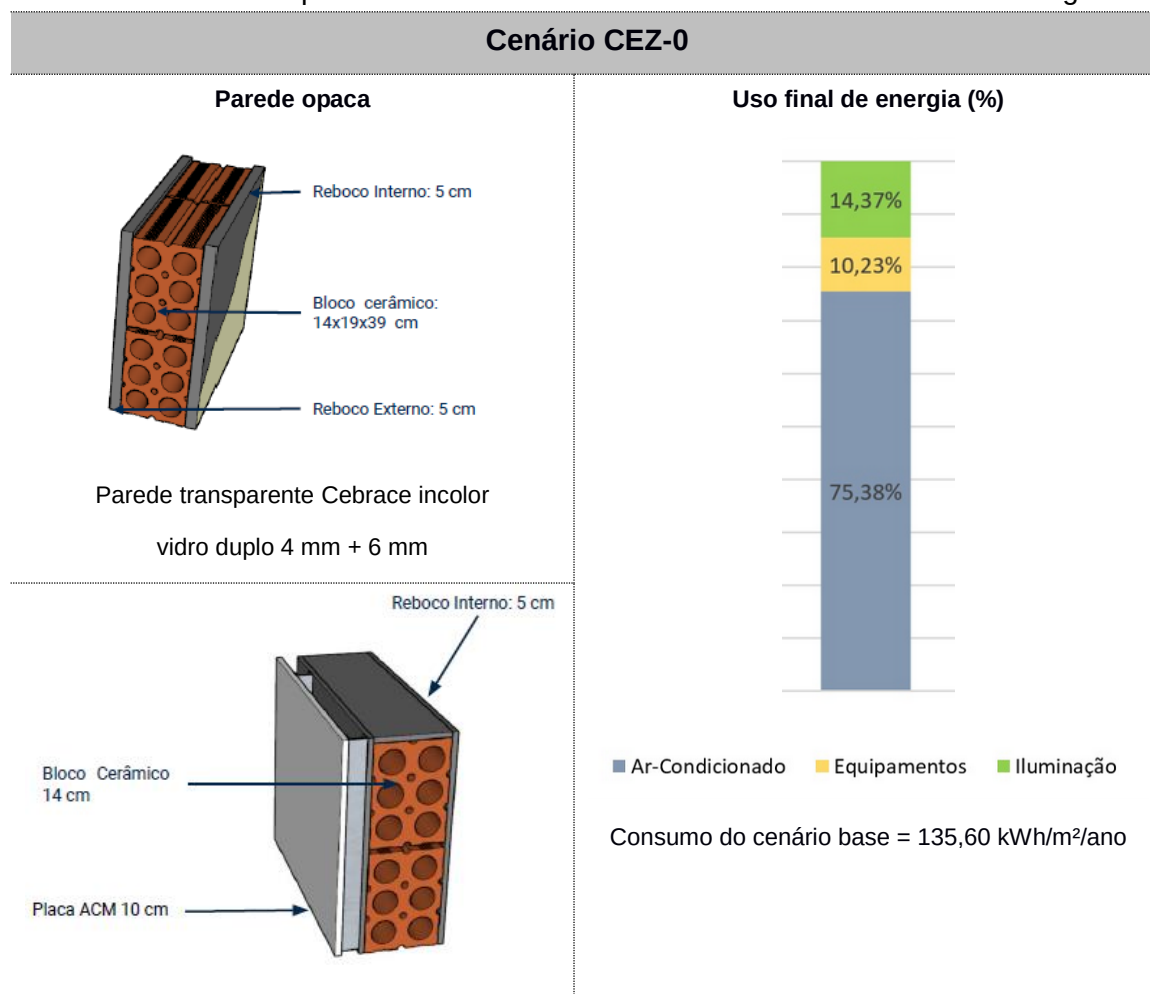
4.2.1 Análise de desempenho energético do modelo padrão

O caso base foi modelado a partir do levantamento dos projetos de arquitetura e complementares do edifício, além das características de uso e ocupação, sistema de funcionamento dos equipamentos e cronograma de uso que foram levantados no local, conforme descritos no capítulo 3 desta Tese.

O edifício objeto de estudo possui uma área total de 40.706,25 m², sendo que desta área, o quantitativo de 33.595,32 m² são condicionados e 7.110,93 m² não são condicionados. Além disso, possui três sistemas de condicionamento de ar: condicionamento geral das salas de trabalho: Sistema Central de Água Gelada (CAG); condicionamento de salas técnicas: Sistema VRF (*Variable Refrigerant Flow*) e condicionamento de salas de trabalho do plantão: Sistema do tipo *Split* (individual). Portanto, pode ser considerado que a refrigeração artificial da edificação funciona como um sistema de modo misto de condicionamento de ar.

A análise do consumo de energia do edifício padrão obtida por meio da simulação no programa *EnergyPlus*, descrita como CEZ-0, mostra que a edificação consome um total de 5.519.867,37 kWh/ano. Deste consumo, a maior parte (75,38%) resulta do sistema de ar condicionado (refrigeração, ventiladores e bombas), seguido pelo consumo da iluminação dos ambientes (14,37%) e dos demais equipamentos (10,23%), presentes no interior do edifício, conforme apresentado na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Componentes do cenário CEZ-0 e resultados do consumo energético.



Classe	Consumo (kWh)
Resfriamento	2.645.519,76
Iluminação interna	793.330,29
Equipamentos	564.889,17
Ventiladores	992.717,23
bombas	523.440,92
Total por usos finais	5.519.867,37

Fonte: Elaborado pela autora.

A energia total consumida para o cenário CEZ-0 foi de 135,60 kWh/m²/ano, ou, ainda, 19.871.522,53 MJ/ano ou 488,16 MJ/m²/ano.

Os resultados obtidos para o cenário base são equiparados aos resultados obtidos por Al-Tamimi (2022) para um edifício público de escritórios da cidade de Najran (Arábia Saudita), que obteve 76% do consumo total de eletricidade dedicado à refrigeração. Os equipamentos e a iluminação representaram 12,8% e 10,4% respectivamente.

Para efeito de comparação do desempenho energético obtido, foram consultados estudos de *benchmarking* de consumo de energia elétrica desenvolvida por diversos autores.

Borgstein e Lamberts (2014) desenvolveram uma metodologia de *benchmarking* de consumo de energia elétrica para agências bancárias por intermédio de análise de regressão linear utilizando dados de consumo de energia elétrica, auditorias energéticas e correções climática. Para essa análise foram utilizados dados de 7980 observações, contendo área útil, consumo de energia e localização das agências de três bancos diferentes, embora não houvessem dados de operação, usuários, características arquitetônicas das edificações, sendo observado que um consumo de energia eficiente é de 105 kWh/m²/ano.

O Conselho Brasileiro de Construção Sustentável desenvolveu um *benchmarking* para escritórios corporativos. A tipologia foi definida como possuindo área condicionada próxima a 100% de sua área útil da torre, com predominância de sistemas centrais de ar condicionado, utilizando água gelada e VRFs, no qual foi observado que um consumo de energia eficiente para essa tipologia é de 75 kWh/m²/ano (CBCS, 2021).

Veloso (2017) avaliou o consumo de energia elétrica de torres de escritório para a cidade de Belo Horizonte. Na análise foram utilizadas 101 edificações, com área bruta superior a 1000 m² e com o mínimo de 3 andares. Para o desenvolvimento desse *benchmarking*, foram utilizados dados medidos de consumo de energia dos anos de 2012 a 2014 obtidos da concessionária de energia elétrica e os projetos arquitetônicos das edificações. Os valores encontrados no *benchmarking* mostraram que os edifícios que utilizam 100% de ar condicionado apresentaram um consumo médio EUI (Intensidade de Uso de Energia) de 127 kWh/m²/ano, e nos edifícios que funcionam no modo misto o consumo foi de 57 kWh/m²/ano.

Considerando os dados dos trabalhos mencionados o cenário avaliado possui grande consumo de energia. Sendo assim, para avaliar o percentual de redução de consumo por meio de estratégias passivas, foram propostos cenários utilizando dados obtidos na literatura para locais de clima quente, tal como o clima de Goiânia.

Chen *et al.* (2022) identificaram três grupos de fatores que influenciam interna e externamente na eficiência energética das edificações. Primeiramente, a melhoria das características do edifício para reduzir a demanda de energia (por exemplo, otimização do formato do edifício, orientação e isolamento). Em segundo lugar, o uso de equipamentos e tecnologias de eficiência energética (como exemplo, armazenamento térmico, resfriamento evaporativo e uso de energias renováveis) e em terceiro, os autores citam o comportamento dos ocupantes (por exemplo, acesso a intervenções de controle e atitudes comportamentais).

Yoshino *et al.* (2017) identificaram que o uso da energia em edificações é influenciado principalmente por seis fatores classificados em técnicos e físicos que não podem ser alterados ou são dificilmente alterados, como o clima, o envelope construtivo e os equipamentos; e aqueles

influenciados pela ação humana que podem ser alterados com o edifício em funcionamento, que são a operação e a manutenção do edifício, o comportamento do usuário e as condições ambientais internas.

Em consonância com literatura consultada, foram propostas medidas de otimização para o edifício base, por meio de seis cenários de estudo, descritos na Tabela 4.2. Três cenários contemplam a alteração da composição do envelope (CEZ-1, CEZ-2 e CEZ-3), dois cenários se referem à integração da energia renovável na edificação (CEZ-4 e CEZ-5) e, ainda, o cenário CEZ-6 é baseado no comportamento dos usuários, visando analisar a influência da alteração de cronograma de uso da edificação. Cinco dos cenários citados envolvem a intervenção estrutural da edificação, por meio um retrofit e um dos cenários envolve somente a intervenção operacional.

Tabela 4.2 – Cenários propostos e tipo de intervenção.

Cenário	Descrição	Tipo de intervenção
CEZ-1	Alteração na composição do envelope	estrutural
CEZ-2	Alteração na composição do envelopeenvelope	estrutural
CEZ-3	Alteração na composição do envelope	estrutural
CEZ-4	Atualização sistema fotovoltaico	estrutural
CEZ-5	Ampliação do sistema fotovoltaico	estrutural
CEZ-6	Alteração do cronograma de uso	operacional

Fonte: Elaborado pela autora.

Para todas as medidas de otimização, a taxa de ocupação e o consumo relacionado aos equipamentos (EQ) e iluminação (IL) foram mantidos como obtidos no cenário-base.

Em razão das condições climáticas do local em que se encontra o edifício em análise e devido ao fato de que a ocupação ocorre apenas durante o dia (de segunda a sexta-feira, no intervalo das 7h às 19h), não houve necessidade de consumo para aquecimento em qualquer uma das situações examinadas. Assim, o ar condicionado foi utilizado exclusivamente em sua função de refrigeração.

4.2.2 Análise da influência do envelope construtivo

Grande parte dos estudos consultados considerou o envelope construtivo como um dos fatores mais influentes em termos de ganho solar pela edificação, pois este serve como limite entre o exterior e os ambientes internos. Além disso, segundo o IPCC (2022), a intervenção no envelope é vista como uma ação eficiente para a mitigação das emissões de gases de efeito

estufa (GEE). Com o mesmo entendimento, Gupta e Deb (2022) consideram que a envolvente da edificação é a chave determinante dos impactos ambientais do edifício, afetando o desempenho térmico e as cargas de resfriamento dos edifícios em regiões de clima tropical.

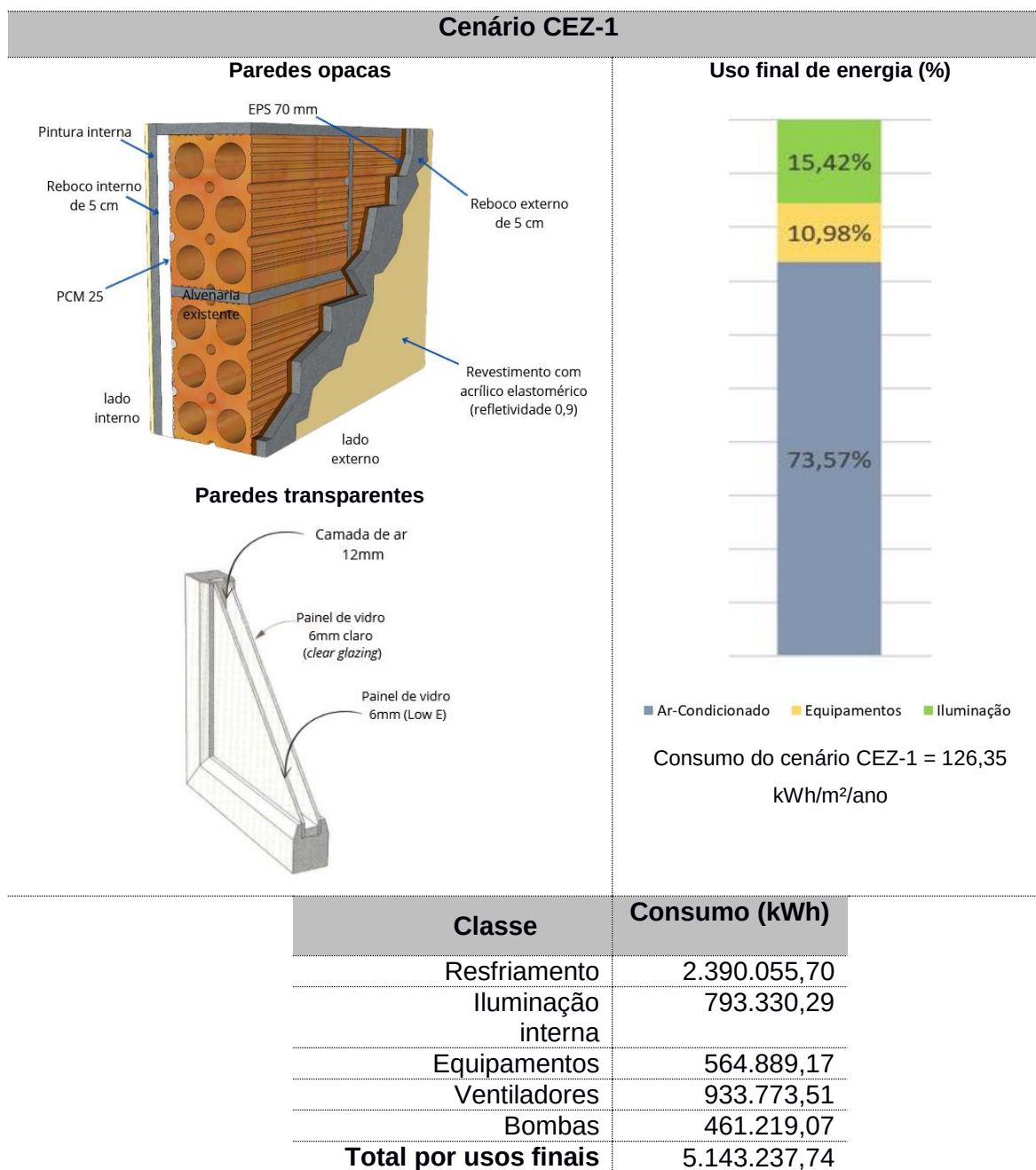
Para verificar a influência do envelope construtivo no consumo de energia do edifício, foram simuladas três tipos de composição para o envelope da edificação (cenários CEZ-1, CEZ-2, CEZ-3). O desempenho térmico é avaliado através da aplicação material isolante térmico, material para o aumento da massa térmica, revestimento externo refletor e alteração do sistema de envidraçamento. Para os cenários do estudo foram mantidas a composição da parede constituída de bloco cerâmico de 15 cm e reboco interno e externo com 5 cm de espessura e a parede com placas de ACM.

4.2.2.1 Cenário CEZ-1

Para o cenário CEZ-1 foram adotadas como estratégias o uso de vidro duplo formado por um painel de vidro com espessura 6 mm com baixa transmissão (*Low-e*) + 12 mm de camada de ar + painel de vidro com espessura de 6 mm claro (*Clear Glass*); superfície externa com revestimento com acrílico elastomérico (refletividade 0,9); parede externa com isolamento térmico de poliestireno expandido (EPS), com espessura de 70 mm; aumento da massa térmica com material de mudança de fase denominado RT25HC (PCM 25) na parede interna.

O resumo das estratégias adotadas e o resultado da simulação energética obtida no cenário CEZ-1 são apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Componentes do cenário CEZ-1 e resultados do consumo energético.



Fonte: elaborado pela autora.

A simulação computacional para o cenário denominado CEZ-1 resultou em um valor total de energia consumida de 5.143.237,74 kWh/ano. Deste consumo, a maior parte resulta do sistema de ar condicionado (refrigeração, ventiladores e bombas), seguido pelo consumo dos demais equipamentos e da iluminação artificial, presentes no interior do edifício, para os quais foram atribuídos valores fixos.

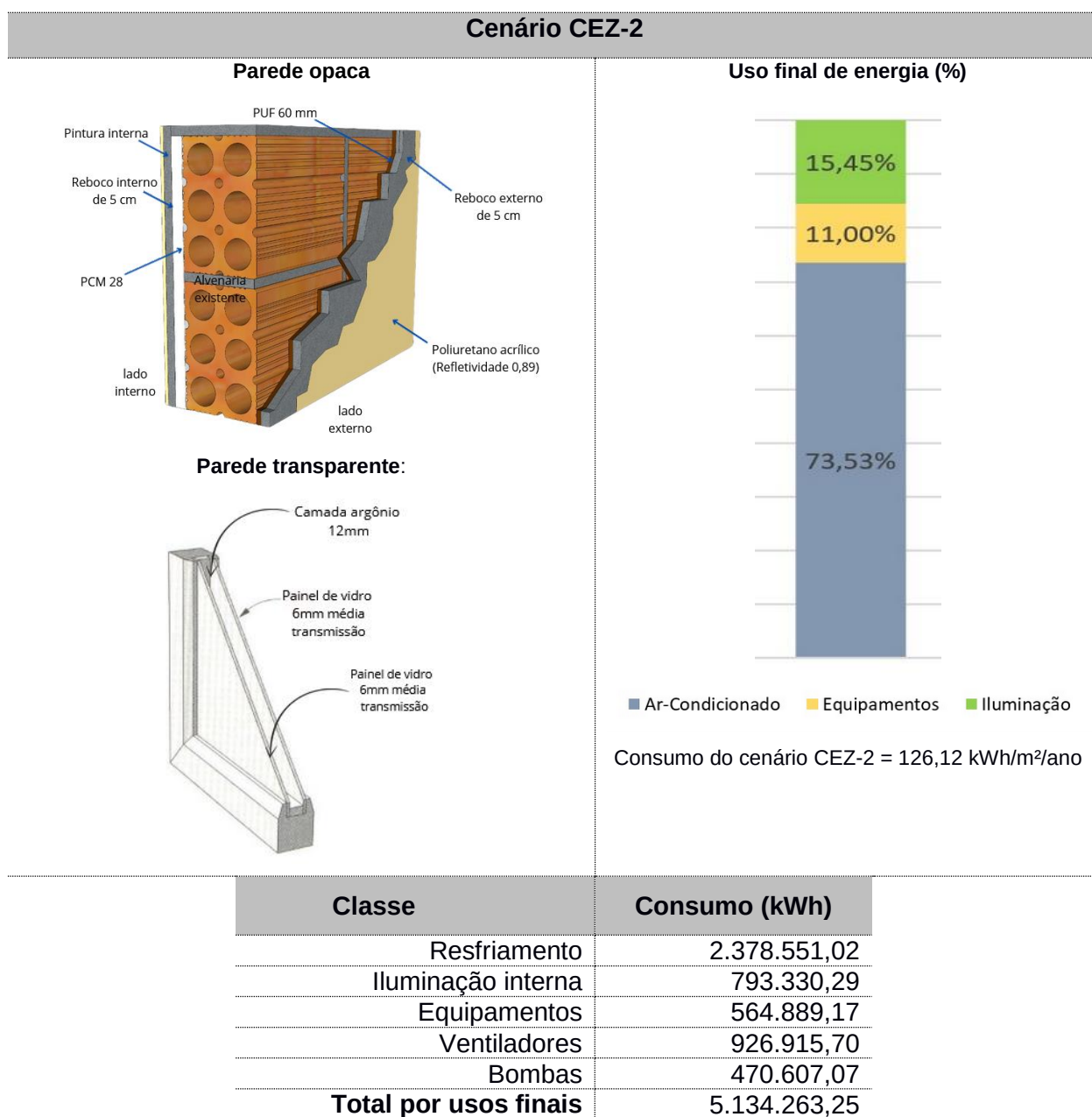
O incremento do isolamento térmico do envelope com uma camada de poliestireno expandido nas paredes externas da edificação proporcionou uma melhoria na eficiência energética se comparado com o cenário CEZ-0.

4.2.2.2 Cenário CEZ-2

Para o cenário CEZ-2 as estratégias adotadas foram sistema de envidraçamento composto por painel de vidro duplo com espessura 6 mm com média transmissão (*Low-e*) + 12 mm de camada preenchida com argônio + vidro com espessura de 6 mm claro; superfície externa com revestimento com poliuretano acrílico (refletividade 0,89); parede externa com Isolamento térmico de Espuma de Poliuretano (PUF), com espessura de 60 mm; e aumento da massa térmica com material de mudança de fase denominado RT28HC, na face interna da parede externa.

A tabela 4.4 apresenta um resumo das estratégias adotadas e o resultado da simulação energética obtida no cenário CEZ-2.

Tabela 4.4 – Componentes do cenário CEZ-2 e resultados do consumo energético.



Fonte: Elaborado pela autora.

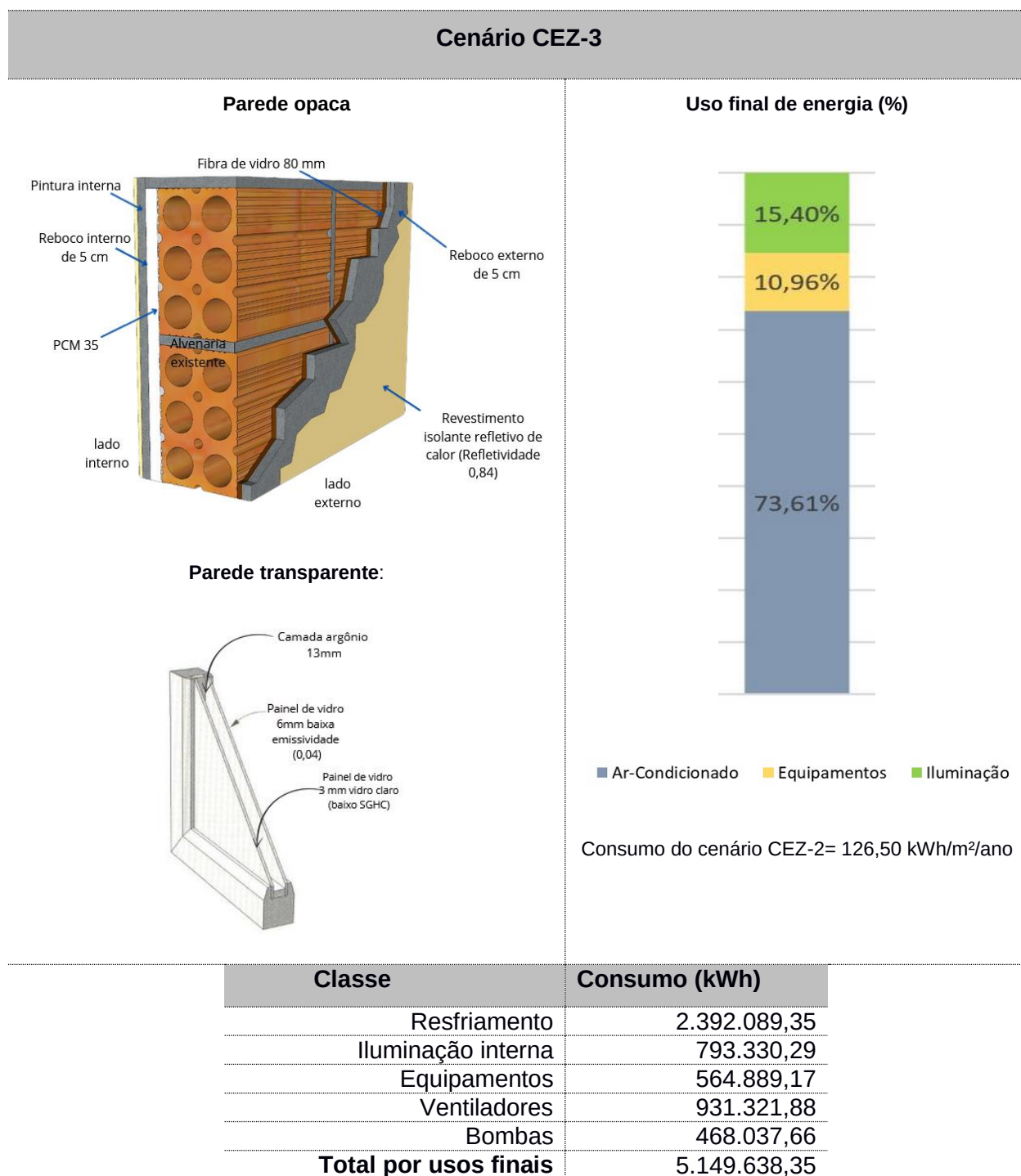
A simulação computacional para o cenário denominado CEZ-2 resultou em um valor total de energia consumida de 5.134.263,25 kWh/ano, apresentando melhoria na eficiência energética da edificação em 6,98% e reduziu o consumo em 9,25 kWh/m²/ano.

4.2.2.3 Cenário CEZ-3

Para o CEZ-3, foram adotadas as seguintes propriedades: sistema de envidraçamento com vidro duplo formado por painel com espessura de 3 mm com transmissão seletiva (*Low-e* = 0,04), camada de 13 mm preenchida com argônio e outro vidro de 3 mm claro com baixo SGHC; além disso, superfície externa com revestimento isolante refletivo de calor, com refletividade 0,84, parede externa com isolamento com fibra de vidro, com espessura de 80 mm e aumento da massa térmica com material de mudança de fase RT35HC (PCM 35) na face interna da parede externa.

Os resultados da simulação computacional para o cenário CEZ-3 resultaram em um valor total de energia consumida de 5.149.638,35 kWh/ano. A tabela 4.5 apresenta os componentes utilizados e os resultados do consumo energético para o cenário CEZ-3.

Tabela 4.5 – Componentes do cenário CEZ-3 e resultados do consumo energético.



Fonte: Elaborado pela autora.

A simulação computacional para o cenário denominado CEZ-3 resultou em um valor total de energia consumida de 5.149.638,35 kWh/ano, apresentou melhoria na eficiência energética da edificação em 6,70% e reduziu o consumo em 9,09 kWh/m²/ano.

4.2.2.4 Avaliação geral dos cenários de reabilitação do envelope construtivo

Os cenários CEZ-1, CEZ-2 E CEZ-3 foram avaliados através da simulação computacional, com diferentes combinações. As estratégias consideraram as alterações das propriedades do

envidraçamento das paredes transparentes do envelope, dada a sua influência na quantidade de calor solar transmitido pela envolvente do edifício, perdas de calor, propriedades de isolamento térmico e visibilidade de transmissão da luz. O estudo considerou também a alteração da refletância solar do revestimento da superfície do edifício, dada a importância deste aspecto para bloquear a entrada de energia solar e inibir a condução de calor solar para dentro da edificação. Adicionalmente foi considerada melhoria do isolamento térmico das paredes do edifício uma vez que ajuda a restringir a transferência de calor e a diminuir as perdas térmicas no edifício. E ainda foi considerado o aumento da massa térmica, tendo em vista a importância de diminuir a grande amplitude térmica da região.

Com as estratégias citadas foram desenvolvidas novas simulações para conhecimento da energia necessária para o resfriamento do ambiente, considerando-se os consumos relacionados à iluminação e equipamentos fixos, com os valores obtidos na simulação do modelo base. Os resultados são apresentados na tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Resultados das simulações energéticas para os cenários propostos.

Cenários de alteração do envelope construtivo						
Comparação do consumo de energia anual						
	Consumo total (kWh.ano)	Iluminação	Equipamentos	Climatização	Percentual sobre a situação atual	Consumo kWh/m ²
Padrão	5.519.867,37			4.161.677,91	100%	135,60
Cenário 1	5.143.237,74			3.785.048,28	- 6,82%	- 9,25
Cenário 2	5.134.263,25	793.300,29	564.889,17	3.776.073,79	- 6,98%	- 9,48
Cenário 3	5.149.638,35			3.791.448,89	- 6,70%	- 9,10

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir das simulações computacionais realizadas, o consumo anual de energia antes estimado de 5.519.867,37 kWh para o modelo padrão (CEZ-0) passou a ser, no cenário 1 (CEZ-1), de 5.143.237,74 kWh; no cenário 2 (CEZ-2), o consumo anual de energia estimado pela simulação computacional foi de 5.134.263,25 kWh; e no cenário 3 (CEZ-3) o consumo anual estimado pela simulação computacional foi de 5.149.638,35 kWh. Dessa forma, nota-se que o menor consumo de energia anual estimado para o edifício ocorre quando aplicadas as configurações do cenário 2 (CEZ-2).

É possível verificar nestes cenários, como as estratégias (isolamento térmico, vidros de alta performance, revestimento de fachada e massa térmica) podem influenciar nos ganhos de calor da edificação e, conseqüentemente, no seu consumo energético.

Materiais de isolamento são incorporados na construção com o objetivo de diminuir as demandas de energia de aquecimento/resfriamento e melhorar o conforto térmico interior em edifícios (Kumar *et al.*, 2020; Belatrache *et al.*, 2023). A espuma de poliuretano é um material versátil, devido à sua morfologia e ampla gama de propriedades mecânicas, podendo ser facilmente sintetizado com técnicas mínimas e pode ser aplicado em uma ampla gama de tipos de

superfície devido às suas características essenciais de ligação com vários substratos, bem como à sua característica autossustentável que não requer adesivo adicional. Além disso, apresentam peso leve, fácil manuseio, custo-benefício, eficiência energética e sustentabilidade (Somarathma *et al.*, 2018).

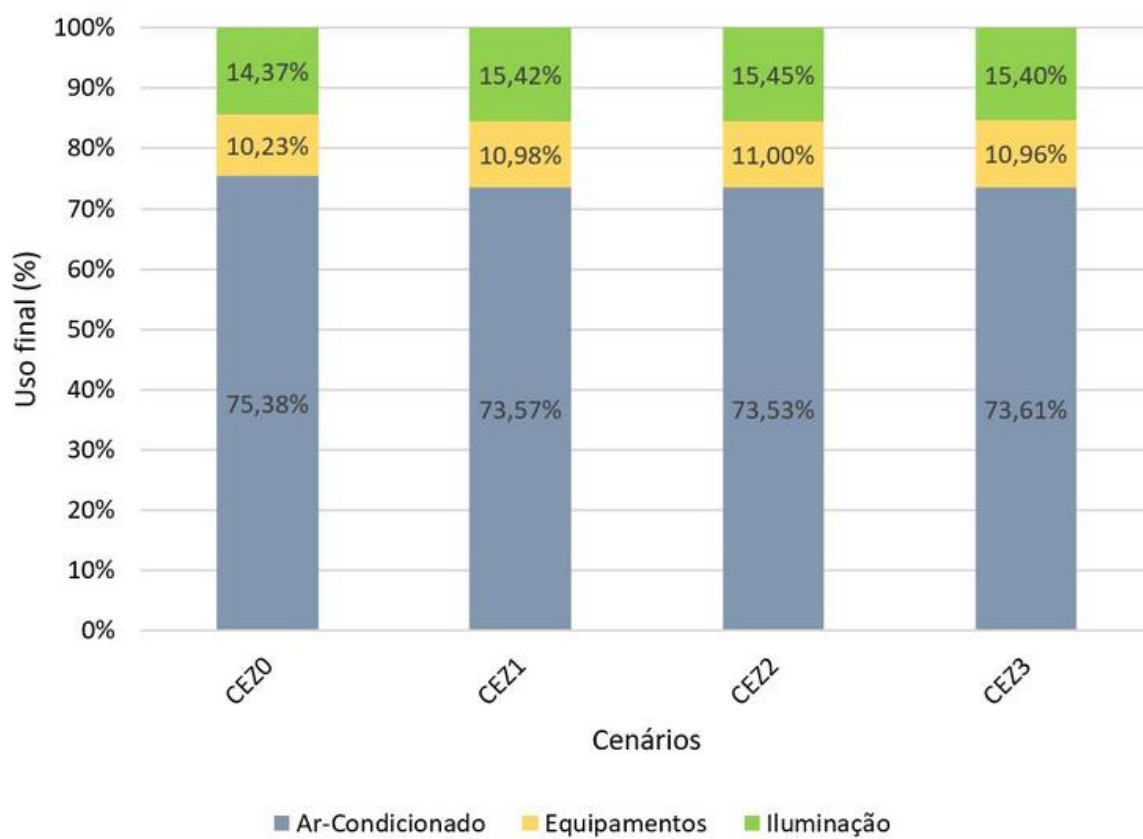
O cenário CEZ-2 foi o que apresentou a maior redução no gasto de energia, alcançando 9,48 kWh/m²/ano e redução do uso de energia em 6,98%. Este cenário CEZ-2 contemplou a substituição do tipo do envidraçamento da fachada frontal por um vidro duplo, sendo que, entre os dois painéis de vidro, foi colocado o gás argônio. Esse gás é incolor, inodoro e não tóxico e não tem efeito na penetração da luz visível. A estanqueidade do gás argônio é de 1,7836 Kg/m³ (a uma temperatura de 0°C), sendo maior do que a estanqueidade do ar e, assim, preencher o espaço entre os vidros com gás argônio no lugar de ar pode reduzir a condutividade térmica do gás e reduzir a convecção de calor (Ruparathna *et al.*, 2016). O vidro *Low-e*, utilizado na face externa do sistema de envidraçamento, é uma película fina de uma ou mais camadas de metal ou óxido de metal revestido na superfície do vidro para garantir transmitância da luz visível e alta refletividade à luz infravermelha. No verão, o vidro de baixa radiação pode garantir luz visível suficiente para atingir o interior e, ao mesmo tempo, bloquear uma grande quantidade de radiação infravermelha, reduzindo, de forma significativa, as trocas de calor internas e externas. No inverno, o vidro de baixa radiação reflete a radiação térmica gerada por equipamentos elétricos internos, instalações de aquecimento e o corpo humano, retornando-a para aquecer o ambiente (Kolokotsa *et al.*, 2011).

Foi proposto também, para o cenário CEZ-2, a adição de PCM 28 (*Phase Change Material*), pois estudos como Saffari *et al.* (2017), apontam que a integração de PCM em paredes e telhado do edifício em climas quentes e seco é um método eficaz para melhorar a eficiência energética dos edifícios. Benaddi *et al.* (2024) observaram que o aumento da massa térmica em clima semiárido quente demonstrou ser uma estratégia vantajosa, representando 20,5% da melhoria da condição de conforto térmico, e em 22,3%, quando comparado com a ventilação natural em uma escola em Marrocos.

Para o revestimento externo, foi considerado o poliuretano acrílico com refletividade 0,89. Conforme a pesquisa de Souza *et al.* (2024), a aplicação de película reflexiva como barreira radiante tem potencial para a redução da energia de resfriamento em edifícios, especialmente nos trópicos, aprimorando as propriedades ópticas. O emprego de superfícies de alta refletância reduz a absorção de calor solar, diminuindo assim o uso de energia de resfriamento.

A figura 4.1 apresenta o consumo energético total para os cenários de estudo, em kWh/ano, e demonstra a proporção de cada gasto energético (ar condicionado, iluminação e equipamentos).

Figura 4.1 – Consumo energético total, em kWh/ano, para os cenários CEZ-0, CEZ-1, CEZ-2 e CEZ-3.

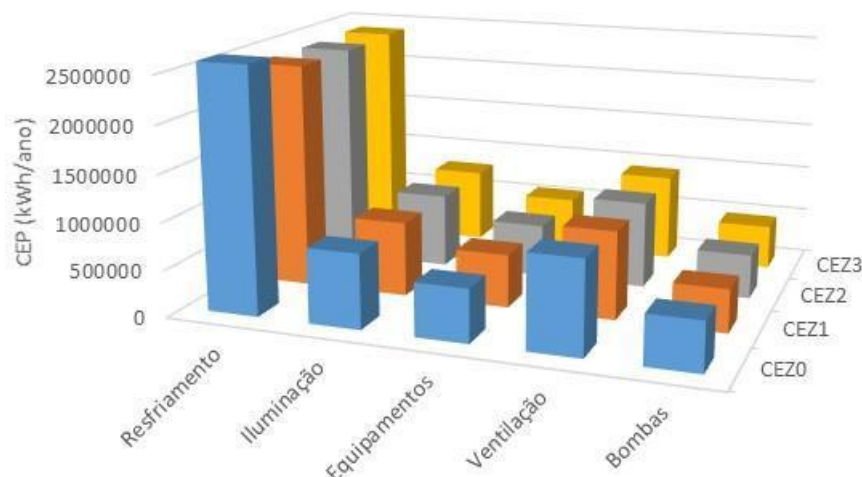


Fonte: Elaborado pela autora.

Todas as estratégias testadas conduzem a redução do gasto energético da edificação, sendo que o cenário 2 (CEZ-2) demonstrou ser o mais eficiente.

Devido às particularidades da otimização, optou-se por realizar uma estimativa de influência das variáveis nos resultados relacionados ao desempenho energético. No edifício padrão CEZ-0, a média do CEP (consumo energia) foi agrupada a fim de verificar seus respectivos impactos (Figura 4.2).

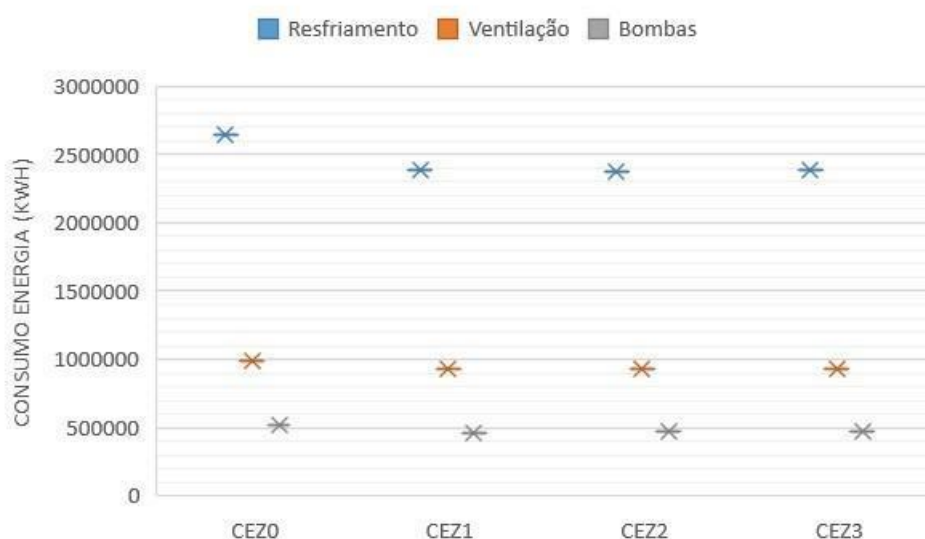
Figura 4.2 – Consumo de energia por categorias e cenários estudados.



Fonte: Elaborado pela autora.

As variáveis iluminação interna e equipamentos não foram objeto de comparação no presente estudo. Foram considerados como dados fixos, conforme obtidos na simulação do modelo padrão. A figura 4.3 apresenta o consumo de energia para os itens avaliados, mostrando que o gasto com resfriamento é bem expressivo quando comparado com ventilação e bombas.

Figura 4.3 – Consumo de energia relacionada aos cenários propostos e seus efeitos no consumo de energia primária para o resfriamento, ventilação e bombas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados demonstram que a energia consumida pelas fontes de resfriamento tem um percentual elevado, o que deixa clara a importância de adotar estratégias de eficiência energética.

No estudo desenvolvido por Esbati *et al.* (2019) para uma edificação de Teerã com 5 pavimentos e área construída de 7.956,00 m², os autores relatam ter obtido uma redução de 119.721 kWh/m²/ano e 8% de economia de energia com o uso de PCM nas paredes da edificação.

Nematchoua *et al.* (2020) indicaram que é possível reduzir o consumo energético fazendo modificações cautelosas nas características da envoltória da edificação. A melhoria do isolamento térmico, a massa térmica adequada, a consideração da emissividade do revestimento externo e a melhoria das propriedades do envidraçamento demonstraram reduzir o consumo energético da edificação em 12% em edifícios de escritórios sob climas tropicais costeiros de Madagascar com a estratégia de utilizar o isolamento térmico (poliestireno expandido, 5 cm) combinado com o PCM (7 cm).

A redução no consumo energético relacionada à alteração do envelope pode ser atribuída à limitação das variáveis do projeto por ser um *retrofit* e também tendo em vista que a edificação já possui sombreamento em 3 fachadas, estando, portanto, protegida dos raios solares nessas fachadas. Com a adoção das medidas relatadas, a edificação ainda teria classificação no nível C conforme *benchmarking* de Veloso (2017) com relação à eficiência energética.

Sendo assim, mais estratégias passivas deverão ser adotadas para a diminuição do consumo da edificação. Na sequência, considera-se a possibilidade de atualizar e ampliar o sistema fotovoltaico e a alteração de horário do expediente da edificação.

4.2.3 Avaliação das estratégias com energia renovável

A opção de incluir a produção de energia renovável com o uso de painéis solares em construções é respaldada pelo fato de que, como uma forma de energia sustentável, melhora a resistência e a adaptabilidade do prédio frente aos efeitos das mudanças climáticas, como fenômenos climáticos severos, interrupções no fornecimento de eletricidade e elevações de temperatura, oferecendo uma fonte de energia estável que pode minimizar a vulnerabilidade e aumentar a flexibilidade do sistema elétrico (Fernandes *et al.*, 2024; Hamooleh *et al.*, 2024).

A incorporação de fontes de energia renovável, como os sistemas solares fotovoltaicos (SFV), em projetos de construção tem o potencial de elevar a eficiência energética e diminuir as emissões de carbono durante a operação, especialmente quando combinada com materiais de construção que promovam a eficiência energética e estratégias para melhorar a eficiência do envelope construtivo (Hamooleh *et al.*, 2024; Myint *et al.*, 2025).

O aumento no consumo de energia de fontes não renováveis agrava o problema do dióxido de carbono. Myint *et al.* (2025) indicam que projetos solares passivos, geradores de energia eficazes e sistemas de energia renovável são fatores cruciais para alcançar os objetivos de energia e emissões líquidas zero no setor da construção, acrescentando que é importante que os sistemas de energia renovável se alinhem com os recursos regionais (solar e eólico, por exemplo).

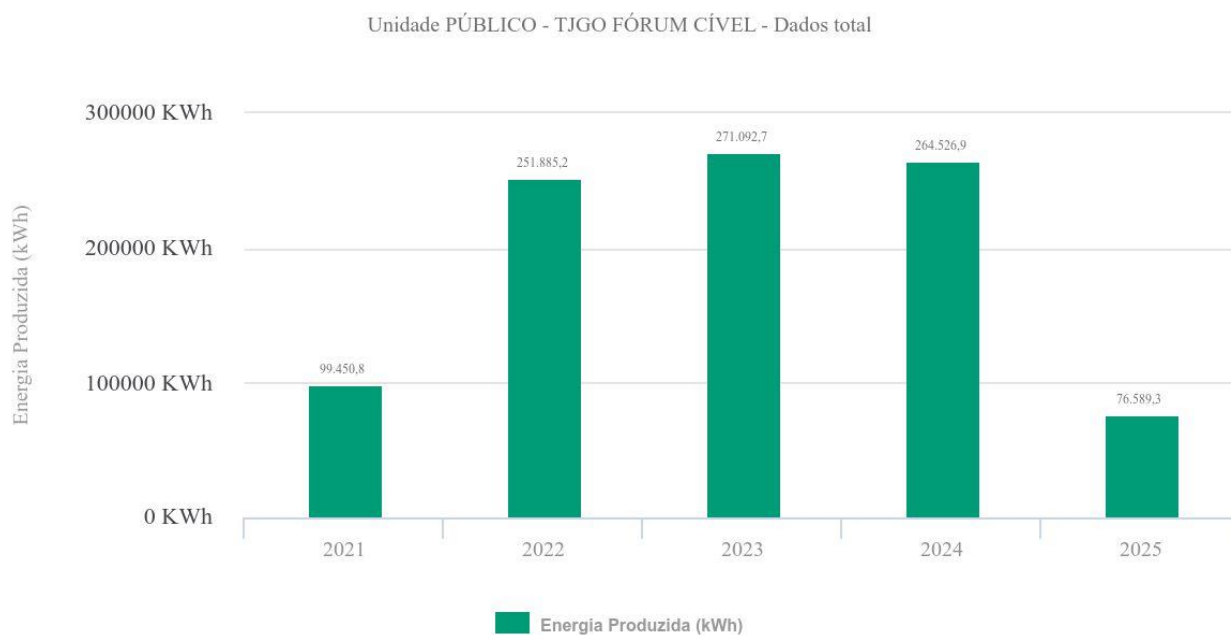
Para dimensionar o projeto de energia solar fotovoltaica, é importante considerar vários fatores, como as perdas do sistema, a sombra que o local pode receber, a inclinação dos módulos fotovoltaicos, a posição em relação ao sol, a localização geográfica e as perdas de temperatura. Além disso, há outros aspectos elétricos e climáticos que podem ser complexos de prever sem um banco de dados meteorológico confiável (Oliveira, 2017). Uma vez que são vários elementos a serem analisados, o uso de softwares pode ser muito útil para o dimensionamento do sistema, pois estes conseguem levar em conta as situações mencionadas anteriormente (De Paula *et al.*, 2022).

Considerando que o Brasil, e em especial o estado de Goiás, tem reconhecido potencial solar e após uma análise minuciosa do projeto e da produção de energia do sistema solar instalado no telhado da edificação, foi identificada a viabilidade de realizar um *retrofit* no sistema fotovoltaico já existente, visando um incremento na geração de energia da usina instalada. Foi observado ainda que existem locais disponíveis na área do edifício avaliado para o aumento da capacidade instalada.

4.2.3.1 Cenário CEZ-4

O edifício avaliado possui um sistema solar fotovoltaico (SFV) em operação desde 2021. A energia gerada entre os anos 2021 a 2025, são apresentadas na figura 4.4. O software SolarView faz o acompanhamento da produção de energia. Os dados podem ser gerados por hora, por dia, por mês e por ano. Observa-se que o ano de 2023 foi o de maior geração de energia. Nesse ano foi gerado um total de 271.092,7 kWh/ano.

Figura 4.4 – Energia produzida pelo sistema fotovoltaico do edifício avaliado, em kWh, por ano.



Fonte: SolarView.

Para o presente cenário foi proposta a substituição dos inversores por modelos otimizados, conforme apresentado na metodologia. A principal diferença entre os inversores do tipo *string* que atualmente estão em funcionamento e MLPE é que os inversores do tipo MLPE permitem que cada painel solar opere de forma independente, maximizando o desempenho de todo o sistema, enquanto o inversor *string* conecta todos os painéis em série, sendo que uma sujeira ou sombreamento parcial pode comprometer a produção de energia de todo o sistema.

Recentemente as normas relativas aos sistemas fotovoltaicos passaram por atualizações e incorporações significativas, especialmente no que diz respeito à segurança contra incêndios das instalações em corrente contínua e alternada. A ABNT NBR 17193 foi publicada em 2025 e trata da segurança contra incêndios em instalações fotovoltaicas em relação ao uso em edificações e a Nota Técnica 44 (CBM-GO, 2025), que entrou em vigor também em 2025, trata da segurança em sistemas fotovoltaicos, sendo obrigatória para edificações comerciais, públicas e multifamiliares com grande fluxo de pessoas.

Considerando as normas citadas, foi proposta a melhoria da geração de energia da usina existente através da simulação do cenário denominado CEZ-4. Este cenário contemplou o *retrofit* na instalação, consistente em manter as 526 placas existentes, substituir os inversores do tipo *Sungrow* (inversor *string*) por inversores do tipo *SolarEdge* (inversor MLPE¹⁴) com otimizadores.

São 526 módulos e as placas fotovoltaicas certificadas pelo INMETRO, apresentando eficiência de 18,40% e nota “A” e suas células são protegidas por uma resistente camada de vidro temperado de 3,2 mm, contornados por moldura em alumínio. Estes módulos têm 25 anos de

¹⁴ MLPE é a sigla para Module-Level Power Electronics, ou seja, eletrônicos de potência em nível de módulo.

garantia de potência de saída linear e 12 anos de fabricação do produto (Canadian, 2024). O medidor de energia que quantifica a energia injetada na rede elétrica também será mantido.

No contexto da simulação, os inversores existentes foram substituídos por inversores do tipo MLPE (*SolarEdge* SE75K) que possibilitam a operação individual de cada módulo. Para atender ao requisito 4.2.4 da NBR 17193¹⁵, os módulos foram afastados 2 metros a cada 16 metros lineares de módulo solar. A figura 4.5 apresenta a reestruturação do SFV e como ficaria a disposição dos módulos após o *retrofit*, além disso, estão indicadas a inclinação e o azimute.

Figura 4.5 – Reestruturação do sistema fotovoltaico do cenário CEZ-4.



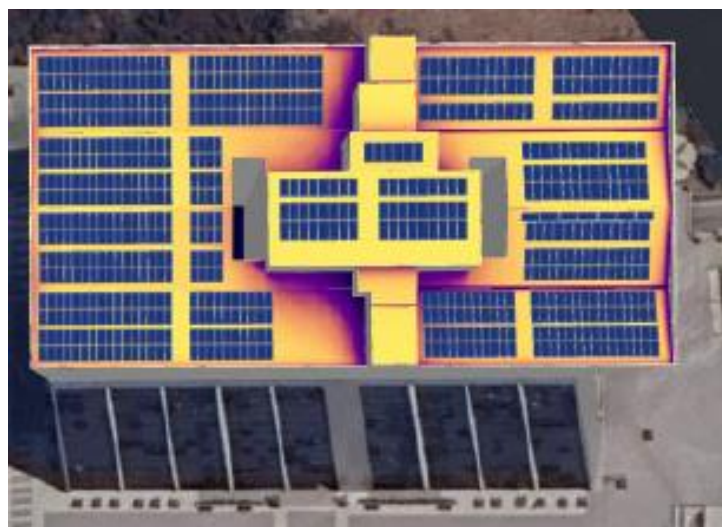
Fonte: *SolarEdge*.

A simulação indicou que o sistema poderá se tornar mais eficiente ao aumentar a produção de energia passando de 264.526,90 Wh para 314.480,00 Wh por mês. Isso representa um acréscimo de 18,88% na capacidade de geração do sistema fotovoltaico existente.

A figura 4.6 apresenta o mapa da irradiância solar, no qual as áreas mais próximas da cor lilás indicam a maior presença de sombras, assim, observa-se que as áreas de sombras são reduzidas.

¹⁵ A NBR 17193:2025 define requisitos e especificações para a segurança contra incêndios em sistemas fotovoltaicos instalados em edificações.

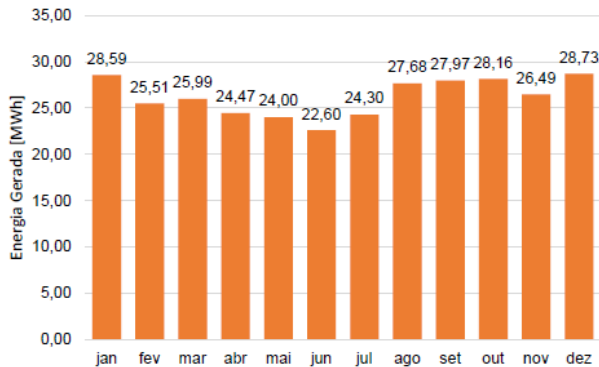
Figura 4.6 – Mapa da irradiância solar do edifício avaliado.



Fonte: SolarEdge.

A tabela 4.7 apresenta o sistema proposto para o cenário CEZ-4 e a energia gerada e os principais resultados obtidos com o cenário.

Tabela 4.7 – Sistema proposto para o cenário CEZ-4 e a energia gerada.

Cenário CEZ-4																											
Retrofit do sistema fotovoltaico  ▪ Conservação das 526 placas existentes ▪ Acréscimo de 8 inversores e de 264 otimizadores ▪ 189,36 kWp potência instalada ▪ 150,00 kw potência máxima alcançada	Gráfico da Simulação da geração de energia do retrofit (kWh/mês)  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Mês</th> <th>Energia Gerada [MWh]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>jan</td><td>28,59</td></tr> <tr><td>fev</td><td>25,51</td></tr> <tr><td>mar</td><td>25,99</td></tr> <tr><td>abr</td><td>24,47</td></tr> <tr><td>mai</td><td>24,00</td></tr> <tr><td>jun</td><td>22,60</td></tr> <tr><td>jul</td><td>24,30</td></tr> <tr><td>ago</td><td>27,68</td></tr> <tr><td>set</td><td>27,97</td></tr> <tr><td>out</td><td>28,16</td></tr> <tr><td>nov</td><td>26,49</td></tr> <tr><td>dez</td><td>28,73</td></tr> </tbody> </table> ▪ Geração anual de energia 314. 480,00 kWh/ano; ▪ 18,88% de aumento da geração de energia ▪ 5,70% de redução no consumo de energia elétrica	Mês	Energia Gerada [MWh]	jan	28,59	fev	25,51	mar	25,99	abr	24,47	mai	24,00	jun	22,60	jul	24,30	ago	27,68	set	27,97	out	28,16	nov	26,49	dez	28,73
Mês	Energia Gerada [MWh]																										
jan	28,59																										
fev	25,51																										
mar	25,99																										
abr	24,47																										
mai	24,00																										
jun	22,60																										
jul	24,30																										
ago	27,68																										
set	27,97																										
out	28,16																										
nov	26,49																										
dez	28,73																										

Fonte: Elaborado pela autora.

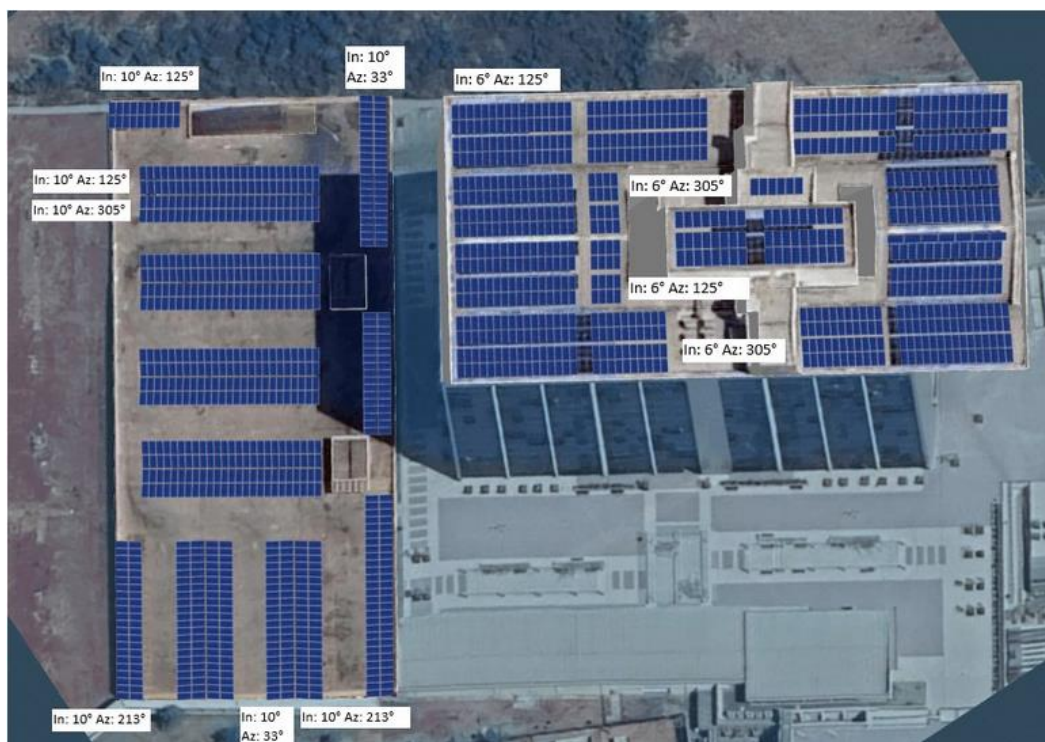
Com relação ao consumo total de energia da edificação (5.519.857,37 kWh), a energia gerada pelo cenário CEZ-4 representa uma redução no consumo de energia de 5,7%.

4.2.3.2 Cenário CEZ-5

O cenário CEZ-5 considera todas as ações desenvolvidas para o cenário CEZ-4, ou seja, para o sistema solar fotovoltaico instalado no telhado, mantendo os módulos existentes (526 módulos), substituindo os dois inversores existentes, do tipo *Sungrow* (inversor *string*) por inversores do tipo *SolarEdge* (inversor MLPE¹⁶) com otimizadores, conforme apresentado na metodologia e ainda propõe inserir placas no estacionamento do edifício, para cobrir os carros e gerar energia. Além disso, este cenário considera o acréscimo de placas para cobertura de vagas de estacionamento no terreno do edifício avaliado. São os chamados *carpots* solares. Para tanto, foi necessário o acréscimo de 957 módulos fotovoltaicos (DAH DHN-72X16-585w), 6 inversores solares *SolarEdge* (SE75K), 480 otimizadores¹⁷ (P1200) e 7 mesas para carpot solares a serem utilizados para abrigo de veículos na ampla área de estacionamento existente no local.

O software de simulação previu a melhor inclinação para as placas otimizando o a irradiação solar. As inclinações e azimutes das instalações são apresentadas na figura 4.7.

Figura 4.7– Inclinação das placas do cenário CEZ-5 e azimute adotado.



Fonte: *SolarEdge*.

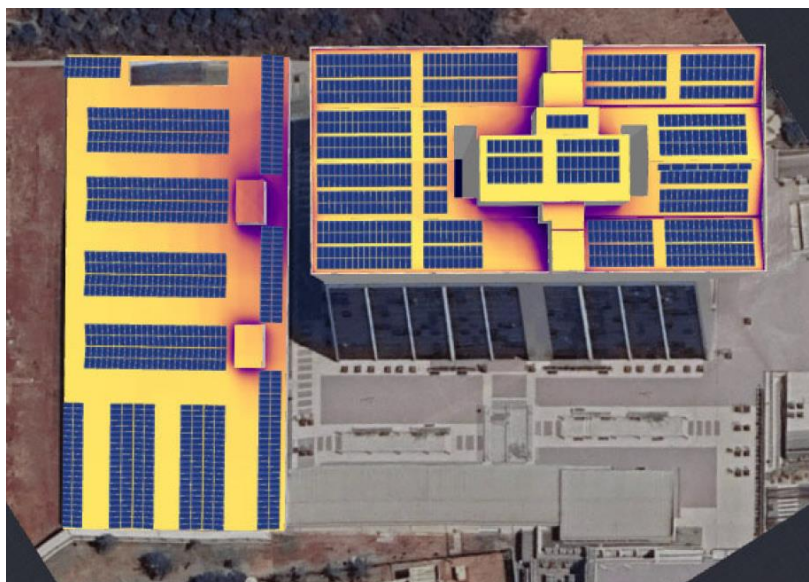
¹⁶ MLPE é a sigla para Module-Level Power Electronics, ou seja, eletrônicos de potência em nível de módulo.

¹⁷ Os otimizadores servem para aumentar a eficiência e a produção de energia de um sistema fotovoltaico.

A placa solar especificada (DAH DHN 72 x16/DG) é certificada pelo INMETRO, possui módulo de vidro temperado 2mm com película antireflexo nos dois lados, moldura com liga de alumínio anodizado. Esse módulo se caracteriza por aumentar a geração de energia em 5 a 25% em relação às placas já existentes na edificação. As dimensões da placa são 2278 x 1134 x 30 mm (AxLxPx) e pesa 32 kg, tem 15 anos de garantia de produto e 30 anos de garantia de potência linear). Esse cenário totaliza 749,21 kWp de módulo solar e 560 kW de inversores.

A figura 4.8 apresenta o mapa de irradiância do edifício e do estacionamento, considerando o acréscimo das placas para as vagas de garagem cobertas. As áreas onde se observa a presença de cores próximas ao lilás indicam maior presença de sombras, ou seja, há pouca sombra na área simulada.

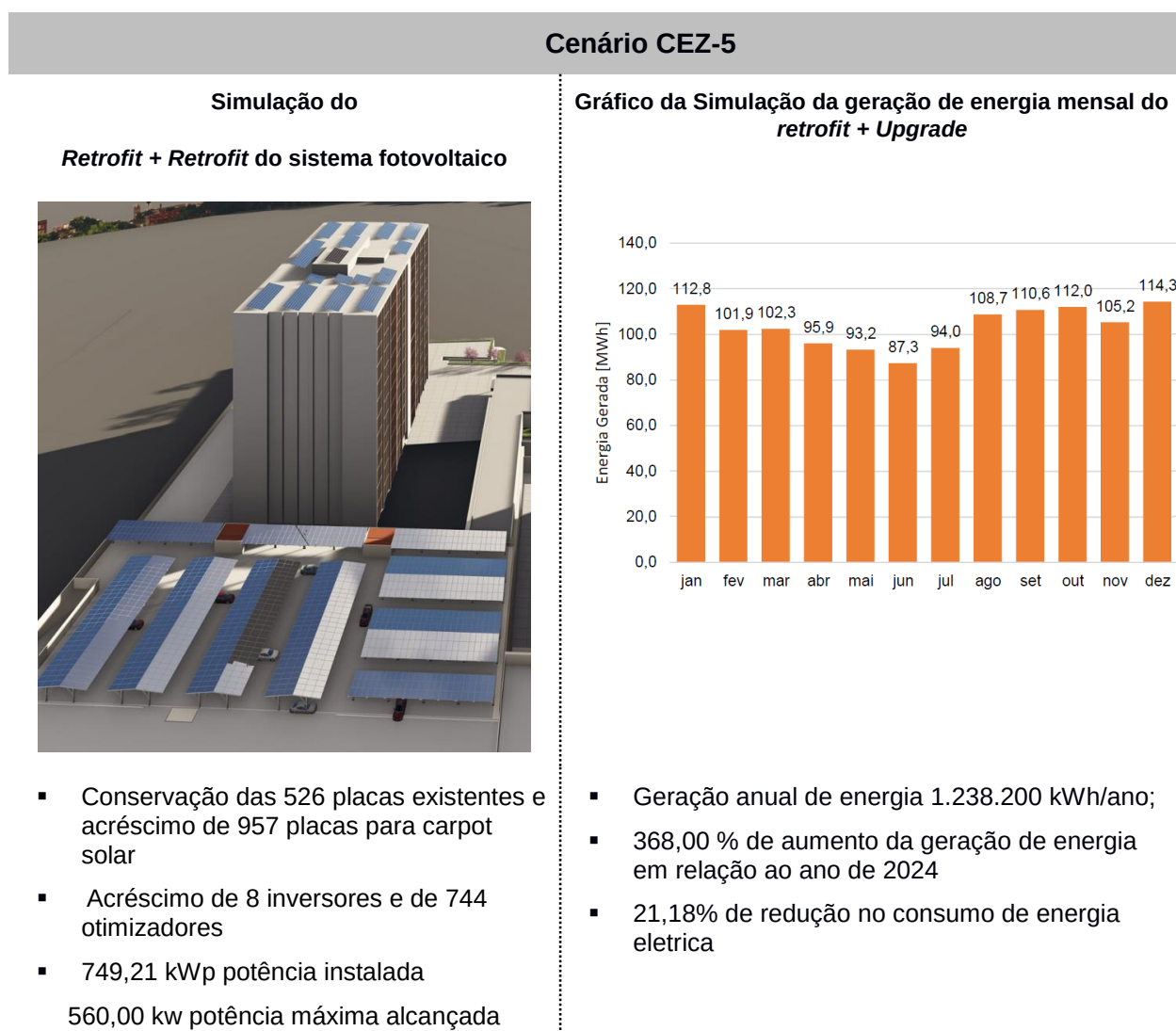
Figura 4.8 – Mapa de irradiância para o cenário CEZ-5.



Fonte: SolarEdge.

A tabela 4.8 apresenta a reestruturação do SFV e o upgrade com a instalação de carpot solares para o cenário proposto e os resultados da geração de energia obtida pela simulação computacional.

Tabela 4.8 - Sistema proposto para o cenário CEZ-5 e a energia gerada.



Fonte: Elaborado pela autora.

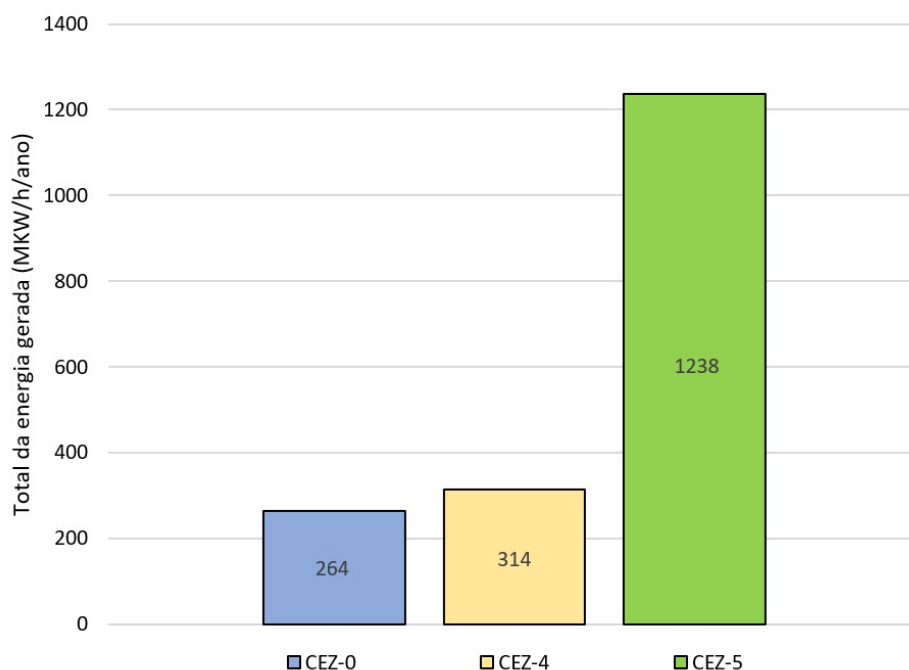
O valor obtido para a geração de energia para o cenário CEZ-5 foi de 1.238.200 kWh/ano, o que representa quase cinco vezes a geração de energia do sistema fotovoltaico do edifício avaliado no ano de 2024 e a redução de 22,43% de consumo com a energia elétrica da edificação.

4.2.3.3 Avaliação dos cenários de integração de energias renováveis

Observa-se, pelos resultados das simulações, que é grande o potencial de geração de energia fotovoltaica na edificação. O cenário CEZ-4, composto por placas fotovoltaicas com novos inversores, gerou um acréscimo de 18% de energia limpa quando comparado com a geração de 2024 e o cenário CEZ-5, composto pelo *retrofit* da usina existente e acréscimo dos painéis com painéis solares utilizando os estacionamentos laterais do edifício, propondo o uso de *carports* solares, gerou uma melhoria de mais de 4,5 vezes em relação à geração de energia obtida no ano de 2024.

Os resultados da simulação da utilização de placas solares fotovoltaicas como uma alternativa de eficiência energética com menor impacto ambiental, proposta na presente pesquisa, são apresentados na figura 4.9. Nela encontra-se a geração de energia atual, medida no edifício, no ano de 2024 (denominada de CEZ-0) em comparação com os resultados para os cenários CEZ-4 e CEZ-5.

Figura 4.9 - Geração de energia, em MKWh, obtida para o cenário CEZ-0 e para os cenários 4 (CEZ-4) e 5 (CEZ-5) com acréscimo de SFV, inclusive no estacionamento.



Fonte: Elaborado pela autora.

Considerando que o sistema fotovoltaico depende da irradiação, das condições dos painéis solares e das corretas decisões de projeto, a escolha do cenário CEZ-5 foi bastante assertiva para a região bioclimática 6, onde o edifício está localizado, na cidade de Goiânia. Os resultados mostraram que a região é favorável para a captação dos raios solares por meio dos painéis fotovoltaicos propostos.

4.2.4 Avaliação do cenário da alteração de uso da edificação

As intervenções comportamentais são fatores importantes para a eficiência energética da edificação, contribuindo para uma grande variância no consumo de energia elétrica devido aos comportamentos de uso altamente variados.

Ascione *et al.* (2020) constataram que o comportamento dos ocupantes de uma edificação afetam no consumo energético, foi proposto um novo cenário, que considera alterações de uso, principalmente nos horários de trabalho. Os pesquisadores identificaram, através de um *retrofit* em

uma edificação residencial em Nápolis, que os hábitos dos ocupantes pode reduzir a conveniência das renovações.

Meng *et al.* (2020) consideram que edifícios públicos apresentam grandes variações no fluxo de pessoas em ambientes internos e cenários complexos, dessa forma, apresentam um potencial mais significativo de economia de energia e redução das emissões.

Destaca-se que o fluxo de pessoas na edificação avaliada é altamente variável e que o expediente ocorre das 7h00 às 19h00, onde os servidores trabalham 7 horas por dia, conforme estabelecido com a chefia imediata. O atendimento ao público inicia às 12h00 e encerra às 18h00. De acordo com dados do TJGO (2025) sobre o teletrabalho dos magistrados que atuam na edificação, cerca de 60% faz atividades presenciais na edificação três vezes por semana e cerca de 40% dos magistrados trabalham presencialmente, todos os dias da semana.

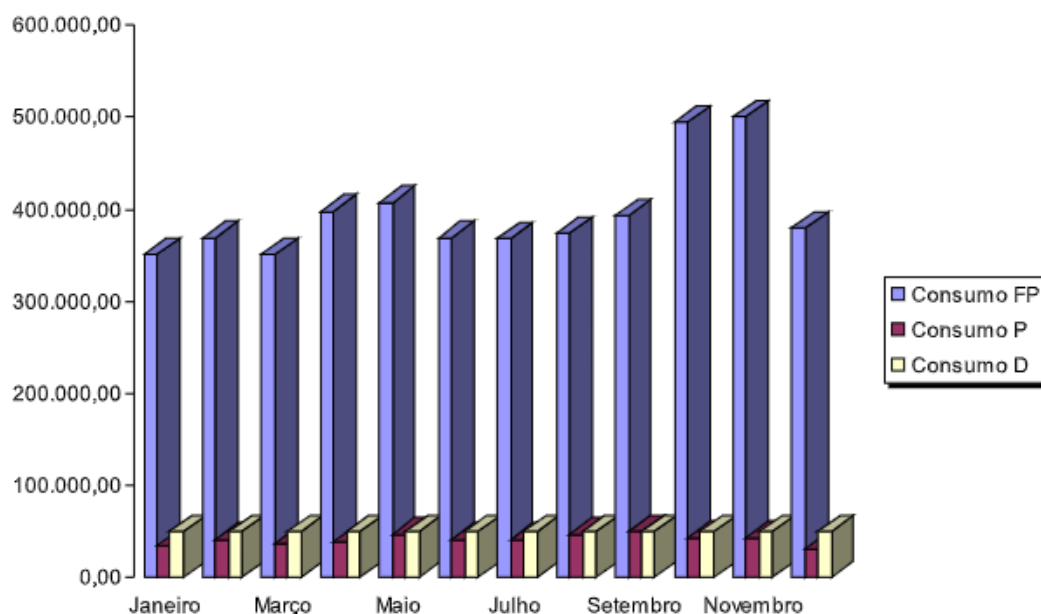
Observa-se que após a pandemia de Covid-19, os casos de teletrabalho total ou em sistema de rodízio cresceram bastante e continua sendo feito no Tribunal de Justiça do Estado de Goiás. Esse fato, corrobora com a afirmação de Meng *et al.* (2020) de que os edifícios públicos apresentam grandes variações no fluxo de pessoas, o que pode alterar os dados coletados.

4.2.4.1 Cenário CEZ-6

O cenário CEZ-6 proposto consiste em alterar os horários de uso da edificação, sendo proposto desligar o sistema de ar condicionado central às 18h00. Foi proposto a alteração do horário de funcionamento da edificação, considerando a redução dos horários em que a energia tem valores mais elevados. Esta opção é uma proposta que não impacta em custos da edificação, mas apenas no comportamento dos usuários.

Os dados sobre os tipos de tarifa de consumo no edifício avaliado foram extraídos do programa Minerva, criado pela equipe técnica do TJGO, para acompanhamento das medições de energia elétrica e água. A figura 4.10 apresenta os dados relativos ao consumo mensal do horário fora de ponta (FP), do horário de ponta (P) e demanda (D), em kWh, no ano de 2024.

Figura 4.10 – Consumo de energia elétrica mensal do edifício avaliado, em kWh, nos horários fora de ponta (FP) e de ponta (P), em 2024.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os dados mostram que a edificação consumiu uma média de 495.714,24 kWh/ano no período de ponta (P), isto é, no período de 18h00 às 21h00, o que representou um consumo médio de 8,48% do total de energia elétrica. Contudo, esse gasto corresponde a 27,48% do valor total pago da fatura, demonstrando que o valor da tarifa no horário de ponta é alto. A tabela 4.9 apresenta os valores de consumo para cada horário estabelecido, sendo estes: fora de ponta, ponta ou demanda, além do percentual de consumo, o valor pago pelo consumo e o percentual do valor pago, respectivamente.

Tabela 4.9 – Consumo, em kWh/ano, percentual de consumo, valor pago e percentual do valor pago na tarifa de 2024.

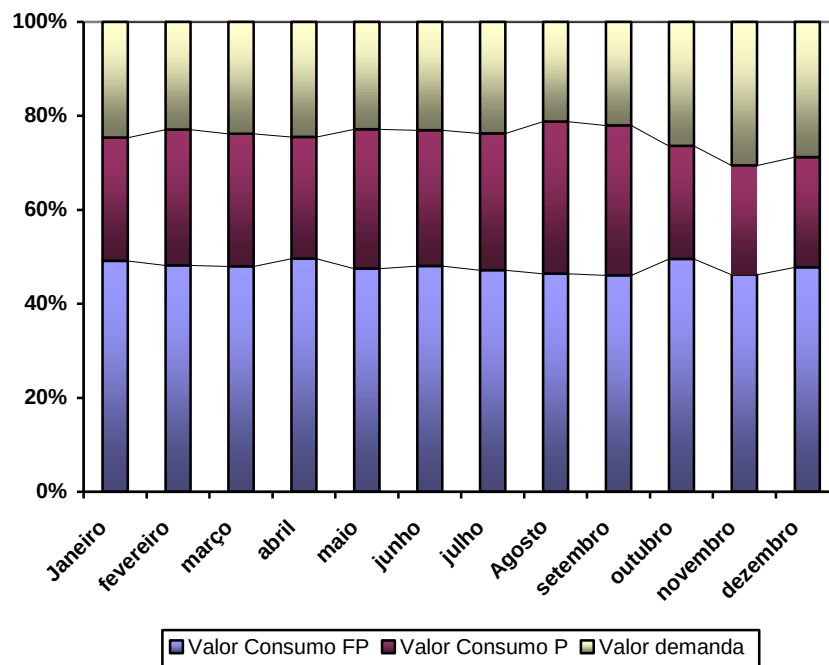
	(kWh/ano)	Percentual do consumo	Valor (R\$)	Percentual do valor pago
Consumo Fora Ponta (FP)	4.754.274,00	81,35%	1.835.296,71	47,77%
Consumo Ponta (P)	495.714,24	8,48%	1.055.971,99	27,48%
Consumo Demanda (D)	594.216,00	10,17%	950.580,13	24,75%
Consumo Total	5.844.204,24	100,00%	3.841.826,12	100,00%

Fonte: Elaborado pela autora.

A energia consumida no horário fora de ponta representa 81,35% do consumo, mas em valor pago, representa 47,77%, enquanto a energia consumida no horário de ponta representa 8,48% do consumo, mas em valores pagos, representa 27,48%. Dessa forma, é possível identificar que o horário de pico onera muito o valor relativo à fatura mensal de energia da

edificação. Os valores representativos do consumo Fora Ponta (FP), Ponta (P) e demanda estão apresentados na figura 4.11.

Figura 4.11 - Consumo medido e valores pagos da edificação no ano de 2024.



Fonte: Elaborado pela autora.

Como o horário de atendimento ao público da edificação ocorre apenas das 12h00 às 18h00 horas, embora o horário de funcionamento seja de 7h00 às 19h00, o cenário CEZ-6 considerou reduzir em 1 hora no horário onde a tarifa é mais cara, horário de ponta (P), o funcionamento do edifício.

Foi proposto que o sistema HVAC seja desligado uma hora mais cedo, isto é, às 18h00, remanejando os serviços que são realizados no horário de ponta para horários fora de ponta, fazendo um uso mais eficiente do período que o edifício está com todos os seus sistemas em funcionamento.

Os dados da simulação computacional obtidos para o cenário base (CEZ-0) mostraram que o funcionamento do ar condicionado corresponde a 75,38% do total de energia elétrica consumida anualmente. Sendo assim, pode-se considerar que do total de 495.714,24 kWh/ano consumidos no horário de ponta (P), aproximadamente 373.669,39 kWh/ano são provenientes do uso do sistema de ar condicionado.

Assim, no horário de ponta será computado apenas o consumo da iluminação e dos equipamentos. O total consumido no horário de ponta, diminuindo o consumo do ar condicionado que é de 373.669,39 kWh/ano, resulta em cerca de 122.044,85 kWh/ano. Dessa forma considerando a redução do valor do consumo com o ar condicionado, a fatura passará de R\$

3.841.826,12 para R\$ 3.045.834,45, o que representa uma redução de 20,71% do valor total da fatura de energia elétrica da edificação, conforme análise apresentada na tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Cálculo do consumo de energia economizado para o cenário CEZ-6, relativo à redução no funcionamento do ar condicionado.

			Valor (R\$) (kWh)	Valor (R\$) (kWh/ano)	Valor (R\$) total
Total do cenário CEZ-0	Fora Ponta	4.754.274,00	0,39	1.835.296,71	3.841.826,12
	Ponta	495.714,24	2,13	1.055.971,99	
	Demanda e impostos	594.216,00	1,60	951.456,45	
		5.844.204,24			
Cenário CEZ-6	Consumo FP	4.754.274,00		1.835.296,71	3.045.834,45
	Consumo P	495.714,24		1.055.971,99	
	Consumo relativo ao ar condicionado (75,38%)	- 373.669,39		-795.991,67	
	Consumo relativo (EQ+IL)	122.044,85		259.980,32	
	Demanda e impostos	594.216,00		951.456,45	
	Total	5.470.534,85			
Redução CEZ-6		- 6,39%			20,71%

Fonte: Elaborado pela autora.

Como resultado da implementação dessa estratégia, com a redução de uma hora diária do tempo de funcionamento do sistema de ar condicionado do edifício, haverá uma redução de 20,71% de economia na fatura de energia e uma redução do consumo energético de 6,39% em relação ao cenário padrão CEZ-0.

Este tipo de estratégia de gerenciamento de energia, aliada ao controle dos sistemas da edificação representa uma oportunidade eficaz para explorar a análise de dados preditivos a fim de otimizar a sua operação.

4.2.5 Avaliação geral dos cenários propostos

Com o objetivo de caracterizar o desempenho energético do edifício de uso público avaliado, o edifício foi modelado para o desenvolvimento da simulação computacional com o programa *Revit Architecture*. Em seguida, visando à reabilitação da edificação com foco na

eficiência energética, foram considerados cenários para as simulações, que estão resumidos na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Resumo das estratégias de estudo adotadas para os diferentes cenários.

Cenário	Variáveis de projeto	Alteração simulada	Tipo de intervenção / software utilizado
CEZ-1	Alteração da composição do envelope	- Paineis compostos por vidro 6 mm com baixa transmissão (<i>Low-e</i>) + 12 mm de camada de ar + 6 mm claro (<i>Clear Glass</i>); - Superfície externa com revestimento com acrílico elastomérico (refletividade 0,9); - Parede externa com isolamento térmico de poliestireno expandido (EPS), 70 mm; - Aumento da massa térmica com material de mudança de fase denominado RT25HC (PCM 25) na parede interna.	Estrutural 
CEZ-2	Alteração da composição do envelope	- Paineis compostos 6 mm com média transmissão (<i>Low-e</i>) + 12 mm de camada preenchida com argônio + vidro com espessura de 6 mm claro; - Superfície externa com revestimento com poliuretano acrílico (refletividade 0,89); - Parede externa com Isolamento térmico de Espuma de Poliuretano (PUF), com espessura de 60 mm; - Aumento da massa térmica com material de mudança de fase denominado RT28HC, na face interna da parede externa.	Estrutural 
CEZ-3	Alteração da composição do envelope	- Paineis de vidro duplo formado por painéis com espessura de 3 mm com transmissão seletiva (<i>Low-e</i> = 0,04), camada de 13 mm preenchida com argônio e outro vidro de 3 mm claro com baixo SGHC; - Superfície externa com revestimento isolante refletivo de calor, com refletividade 0,84; - Parede externa com isolamento com fibra de vidro, com espessura de 80 mm; - Aumento da massa térmica com material de mudança de fase RT35HC (PCM 35) na face interna da parede externa.	Estrutural 
CEZ-4	Atualização do sistema fotovoltaico	- Retrofit do sistema fotovoltaico existente; - Conservação das 526 placas existentes; - Acréscimo de 8 inversores e de 264 otimizadores.	Estrutural 
CEZ-5	Atualização e ampliação do sistema fotovoltaico	Retrofit e Upgrade do Sistema fotovoltaico existente; - Conservação das 526 placas existentes e acréscimo de 957 placas para carpot solar; - Acréscimo de 8 inversores e de 744 otimizadores.	Estrutural 
CEZ-6	Alteração do cronograma de uso da edificação	Alteração no cronograma de uso do sistema de climatização da edificação.	Operacional 

Fonte: Elaborado pela autora.

Para minimizar os ganhos de calor pela envoltória do edifício, foram consideradas estratégias que comprovaram, de acordo com trabalhos consultados na fase de revisão bibliográfica, eficiência energética do envelope construtivo para regiões de clima quente.

Dessa forma, três variáveis de projeto foram consideradas para a modificação do envelope original da edificação: redução da absorvância solar das paredes, criação de isolamento térmico para as paredes, aumento da massa térmica das paredes e redução do fator solar das áreas envidraçadas sem sombreamento.

Com relação à possibilidade de aumento da geração de energia solar, foi considerada a alteração no sistema de energia renovável existente da edificação e ampliação com a instalação de carports solares e ainda a alteração no cronograma de uso da edificação com base na análise da gestão da eficiência no uso da energia elétrica na edificação.

A influência dos parâmetros relacionados ao envelope construtivo foram simulados por meio do *software EnergyPlus*. A influência da atualização e ampliação do sistema fotovoltaico existente foram simuladas por meio do *software SolarEdge*. E a alteração do cronograma de uso foi simulada com o *software Minerva*.

Após o desenvolvimento das estratégias de estudo, foi possível constatar que os cenários apresentam potencial para a redução do consumo de energia, para o aumento da geração de energia renovável na edificação e ajuste no sistema de climatização para uma gestão mais eficiente do consumo de energia elétrica na edificação.

Os três primeiros cenários (CEZ-1, CEZ-2 e CEZ-3) abordaram estratégias para a eficiência do envelope construído, que é um importante fator de ganho de calor solar. Os cenários CEZ-4 e CEZ-5 abordaram o aprimoramento e ampliação do sistema fotovoltaico da edificação. O melhor desses cenários, o CEZ-5, abrange o *retrofit* do sistema fotovoltaico existente na cobertura e a instalação de um sistema de geração do tipo *carpot* para cobertura do estacionamento de veículos com placas fotovoltaicas. O cenário CEZ-6 considerou a restrição do horário de funcionamento do sistema HVAC da edificação, isto é, em uma hora ao dia, no horário de ponta, visando a otimização da gestão do consumo energético na edificação.

Os cenários que apresentaram os melhores resultados foram os cenários CEZ-2, CEZ-5 e CEZ-6, onde adotando ações passivas, foi possível a redução do consumo de energia elétrica na edificação em torno de 34,55%.

Para calcular a redução total em termos de consumo em kWh/m²/ano deve-se considerar a área construída da edificação que é de 40.706,25 m². Considerando o consumo atual é de 135,60 kWh/m²/ano a redução seria de 9,48 kWh/m²/ano para o cenário CEZ-2, de 30,41 kWh/m²/ano para o cenário CEZ-5 e de 9,17 kWh/m²/ano para o cenário CEZ-6. Somando a redução de energia alcançada com as estratégias propostas para os cenários CEZ-2, CEZ-5 e CEZ-6 tem-se

uma redução aproximada de 49,06 kWh/m²/ano. Assim, a edificação passaria de um consumo de 135,60 kWh/m²/ano para 86,54 kWh/m²/ano, conforme apresentado na tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Economia de energia, em percentual, para os cenários propostos em relação ao cenário padrão (CEZ-0).

	Cenário	Consumo anual	Consumo (kWh/m ² /ano)	
	CEZ-0	5.519.867,37	135,60	
	Cenário	Economia (kWh/ano)	Economia (%)	Economia (kWh/m ² /ano)
Cenários de estudo	CEZ-1	- 376.629,63	6,82%	- 9,25
	CEZ-2	- 385.604,12	6,98%	- 9,48
	CEZ-3	- 370.229,02	6,70%	- 9,10
	CEZ-4	- 314.480,00	5,60%	- 7,72
	CEZ-5	- 1.238.200,00	21,18 %	- 30,41
	CEZ-6	- 373.669,39	6,39 %	- 9,17
	CEZ-2+CEZ-5+CEZ-6	- 1.997.473,51	34,55 %	- 49,06
	Nova situação	Consumo anual com as melhores estratégias (em kWh/ano)	Consumo (kWh/m ² /ano) com as melhores estratégias	
	CEZ-0	3.522.393,86	86,54	

Fonte: Elaborado pela autora.

Considerando o *benchmarking* de Veloso (2017) apresentado no capítulo 2, a redução gerada pelas melhores estratégias desses três cenários estudados, representaria que a edificação passaria da classificação nível C para a classificação nível B.

Para a classificação dos resultados em termos de nível de eficiência das estratégias quanto ao consumo energético, foi utilizada a tabela 4.13. Sendo que o nível A é o mais eficiente e o nível E, o menos eficiente.

Tabela 4.13 – Classificação dos resultados em termos de nível de eficiência da estratégia quanto aos indicadores de sustentabilidade.

	Nível A
	Nível B
	Nível C
	Nível D
	Nível E

Fonte: Elaborado pela autora.

A tabela 4.14 apresenta os resultados dos cenários e as reduções relativas a cada um deles, classificando o nível de eficiência em A até E.

Tabela 4.14 – Cenários de estudo propostos e resultados, em percentual, de economia de energia gerados em relação ao cenário padrão (CEZ-0).

Cenário	Descrição	Tipo de intervenção	Economia de energia (kWh/ano)	Economia de energia (%)	Redução consumo (kWh/m²/ano)
CEZ-1	Alteração na composição do envelope	estrutural	-376.629,63	6,82%	- 9,25
CEZ-2	Alteração na composição do envelope	estrutural	-385.604,12	6,98%	- 9,48
CEZ-3	Alteração na composição do envelope	estrutural	-370.229,02	6,70%	- 9,10
CEZ-4	Atualização do sistema fotovoltaico	estrutural	-314.480,00	5,69%	- 7,72
CEZ-5	Ampliação do sistema fotovoltaico	estrutural	-1.280.200,00	21,18%	- 30,41
CEZ-6	Alteração do cronograma de uso do sistema de climatização HVAC	operacional	-363.755,10	6,39%	- 9,17

Fonte: Elaborado pela autora.

O cenário mais eficiente em termos de alteração do envelope construtivo possibilitou uma redução de 6,98% no uso de energia. A integração de fontes renováveis mostrou um impacto mais significativo, atingindo 21,18% de economia de energia. A alteração do cronograma de uso do sistema de climatização (HVAC) proporcionou a redução de uso de energia em 6,39%.

4.3 DADOS OPERACIONAIS DO EDIFÍCIO

A energia operacional corresponde à quantidade de energia consumida para acionamento de todos os sistemas prediais, necessários para atender às demandas ou necessidades dos edifícios, em termos de conforto térmico, lumínico e operações diárias.

Dados de consumo energético do edifício foram coletados buscando obter o seu consumo operacional. Os dados foram utilizados para a determinação dos indicadores de consumo energético da edificação, servindo como importante ferramenta de análise do consumo, permitindo traçar metas para reduzir o consumo ou o desempenho de novas construções com características semelhantes as aqui adotadas.

4.3.1 Consumo elétrico

A figura 4.12 apresenta o consumo de energia, em KWh, dos anos 2017 a 2024 do edifício avaliado, considerando a energia consumida, que corresponde a uma média de 4.307.354,87 kWh/ano para os anos citados. Isso equivale a uma média de 105 kWh/m².ano de consumo médio.

Figura 4.12 – Consumo elétrico do edifício avaliado.



Fonte: Elaborado pela autora.

Segundo o Veloso (2017), o consumo de energia elétrica em edifícios comerciais de todas as edificações da amostra da pesquisa é de 40,25 kWh/m²/ano a 100,63 kWh/m²/ano. A partir dessa informação para edifício comercial, pode-se observar que o edifício possui alto consumo de energia.

4.3.1.1 Indicador de consumo elétrico

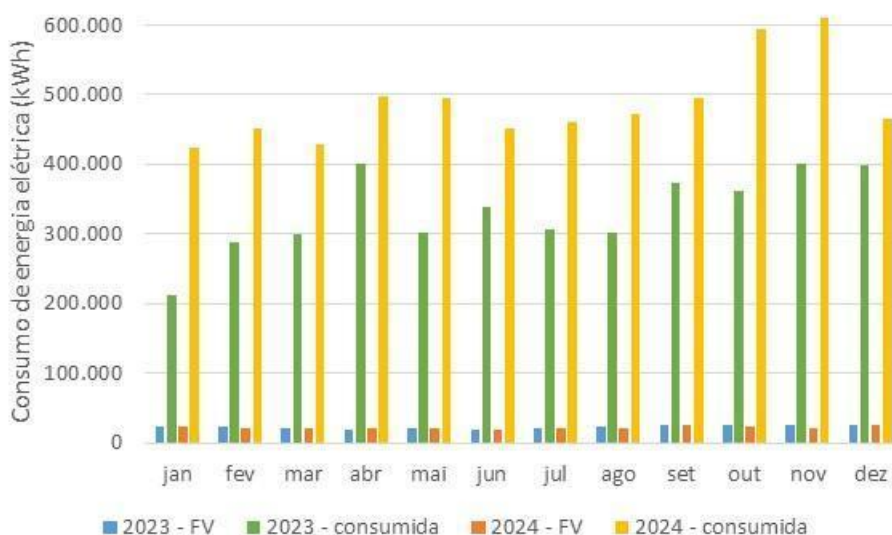
O consumo médio de energia, em KWh, dos anos 2017 a 2024 baseado em dados reais foi de 4.307.354,87 kWh/ano, que corresponde a 105 kWh/m²/ano, ou, ainda, a 15.506.477,53 MJ/ano, ou 380,94 MJ/m²/ano.

O consumo médio de energia, considerando uma população diária média de 2030 pessoas, composta por servidores, estagiários e públicos, temos um consumo elétrico per capita de 2.121,84 kWh/ano/pessoa e 5,79 kWh/dia/pessoa.

4.3.1.2 Comparação entre consumo de energia e energia gerada pela usina fotovoltaica

A figura 4.13 apresenta o consumo de energia, em KWh, dos anos 2023 e 2024 do edifício avaliado, considerando o total de energia gerada pela usina fotovoltaica (FV) e a energia consumida.

Figura 4.13 – Consumo e geração de energia (SFV) nos anos de 2023 e 2024.

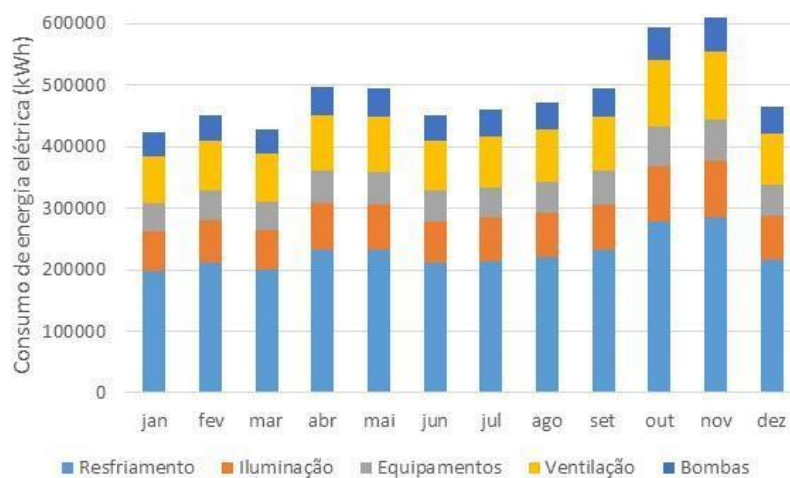


Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se observar que, em 2023, a energia gerada pelo sistema fotovoltaico foi de 268.730,40 KWh e o total consumido foi de 3.984.211,00 KWh, o que corresponde a 6,75% do consumo e, no ano de 2024, foram produzidos pelo sistema fotovoltaico 264.526,90 kWh e consumidos 5.844.204,24 KWh, o que equivale a um total de 4,53% do consumo do edifício.

Considerando os indicadores obtidos na simulação computacional realizada para o cenário base do presente estudo, obteve-se que o percentual médio de consumo de energia corresponde a 47,92% para resfriamento, 14,37% para iluminação, 10,23% para equipamentos, 17,98% para ventilação e 9,48% para bombas. Assim, a figura 4.14 apresenta o consumo de energia, considerando esses percentuais, para o consumo real do edifício existente no ano de 2024.

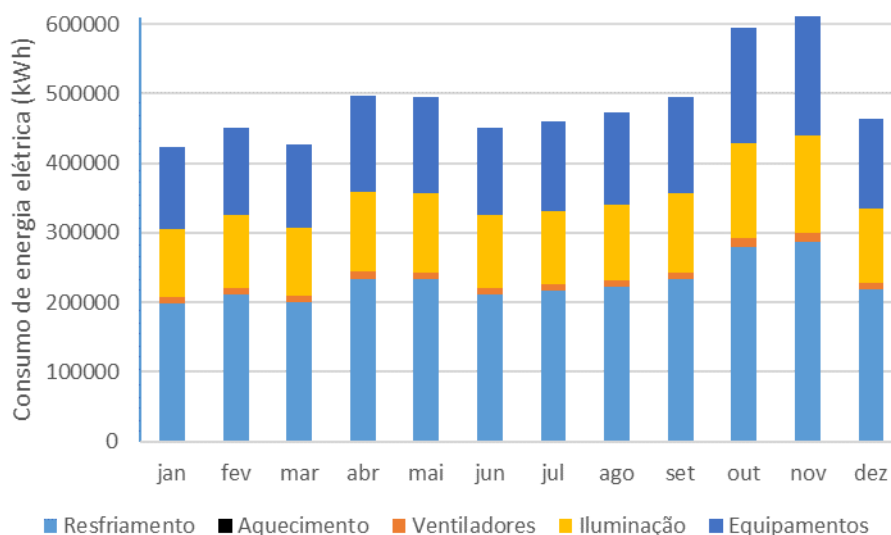
Figura 4.14 - Consumo de energia elétrica, em kWh/ano, em 2024 do edifício avaliado por usos finais de energia.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados obtidos são semelhantes ao consumo de energia obtido por Costa (2020) para edifícios comerciais de referência, onde o resfriamento corresponde a 47% do consumo de energia, aquecimento 0%, ventiladores a 2%, iluminação a 23% e equipamentos a 28%. Na figura 4.15 apresenta-se o consumo de energia elétrica em kWh do ano de 2024 do edifício avaliado.

Figura 4.15 – Consumo mensal de energia elétrica por usos finais no ano de 2024.

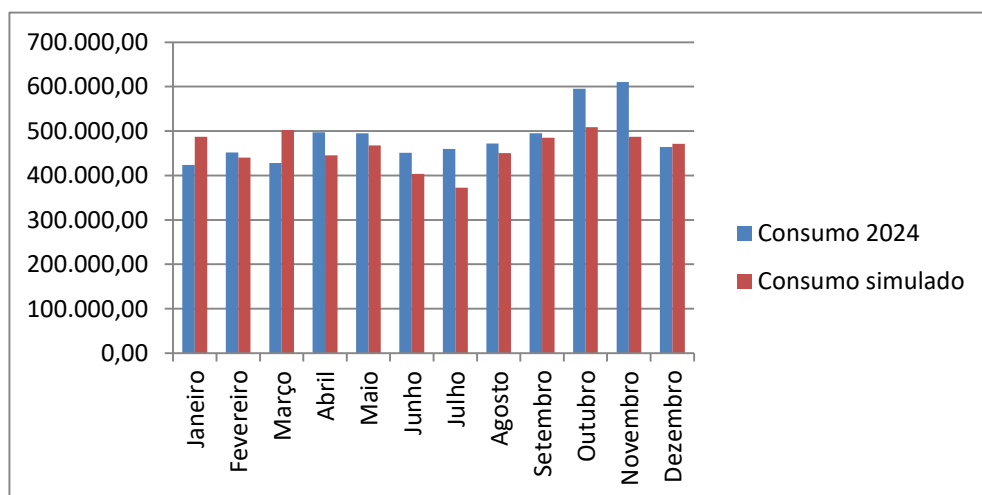


Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.1.3 Comparação entre dados reais com a simulação computacional (CEZ-0)

Os dados foram utilizados para comparação com os dados das simulações propostas e os reais. Foi considerada a necessidade energética anual por unidade de área útil da edificação. A figura 4.16 apresenta os resultados do cenário CEZ-0 e o consumo elétrico obtido no ano de 2024.

Figura 4.16 - Dados mensais do consumo elétrico no ano de 2024 e simulado para o cenário CEZ-0.



Fonte: Elaborado pela autora.

Percebe-se que o maior consumo ocorreu nos meses de outubro e novembro, quando acontecem os preparativos e a Semana Nacional da Conciliação. As temperaturas em junho e julho são mais baixas, na cidade de Goiânia e, no gráfico, esses meses são os de menor consumo. O consumo de dezembro e janeiro também são menores, tendo em vista que as férias forenses correspondem às datas entre 20 de dezembro e 6 de janeiro, quando, na edificação, apenas os serviços de plantão ficam em funcionamento.

4.3.2 Consumo água

A tabela 4.15 apresenta o consumo de água, em m³, dos anos 2017 a 2024 do edifício avaliado, que corresponde a uma média de 18402,38 m³/ano.

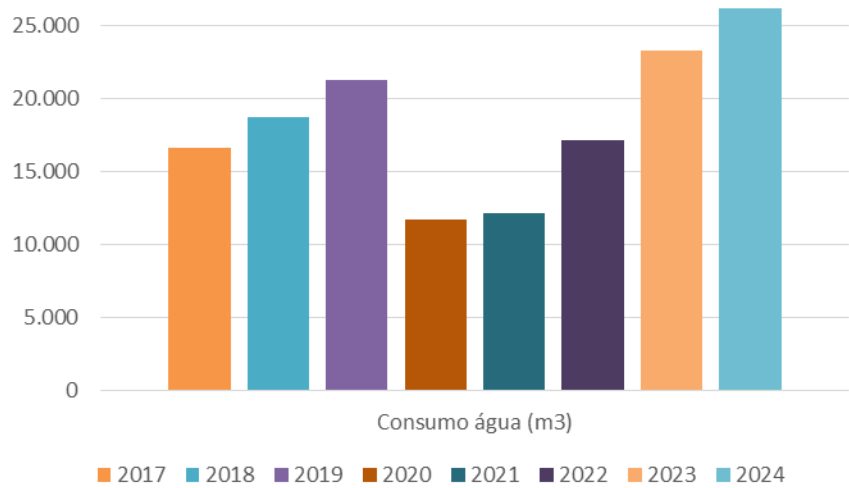
Tabela 4.15 – Consumo de água (m³) da edificação (2017 a 2024).

ANO	MÊS											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2017	685	1.401	1.112	1.067	1.408	2.078	1.695	1.622	1.498	1.457	1.229	1.380
2018	769	1.410	1.556	1.577	1.761	1.762	1.797	1.934	1.870	1.577	1.355	1.394
2019	894	1.512	1.328	1.673	1.824	2.118	2.296	2.045	2.154	1.903	1.905	1.634
2020	1.056	1.682	1.484	396	520	714	967	933	932	896	1.006	1.146
2021	632	861	563	489	695	1.059	1.335	1.310	1.253	1.117	1.470	1.417
2022	630	1.326	1.176	1.192	1.606	1.293	1.610	1.677	2.003	1.978	1.377	1.271
2023	681	1.998	1.875	1.755	1.951	2.079	1.965	2.250	2.498	2.194	2.032	1.994
2024	1.148	2.034	2.424	2.296	2.634	2.530	2.492	2.261	2.475	2.380	1.651	1.870

Fonte: Arquivo TJGO.

A figura 4.17 apresenta os valores médios anuais de consumo de água, em m³, entre 2017 e 2024 do edifício avaliado. Pode-se observar uma redução significativa nos anos 2020 e 2021, devido à pandemia e o retorno gradual para o trabalho presencial.

Figura 4.17 – Consumo de água (m³) da edificação (2017 a 2024).



Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.2.1 Indicador de consumo de água

O consumo de água médio obtido foi de 18402,38 m³/ano. Considerando que o edifício avaliado possui 40.706,25 m² temos um indicador de consumo de água de 0,45 m³/m²/ano. A densidade da água é aproximadamente 1000 kg/m³ assim, temos um consumo de 18.402.375 kg.

O consumo médio de água por pessoa, tendo uma população estimada diária de 2003 pessoas, resulta em um consumo de 9,06 m³/ano/pessoa.

4.3.3 Consumo de gás

A tabela 4.16 apresenta o consumo de gás, em kg, dos anos 2022 a 2024 do edifício avaliado, correspondente a uma média de 10.132,66 kg/ano.

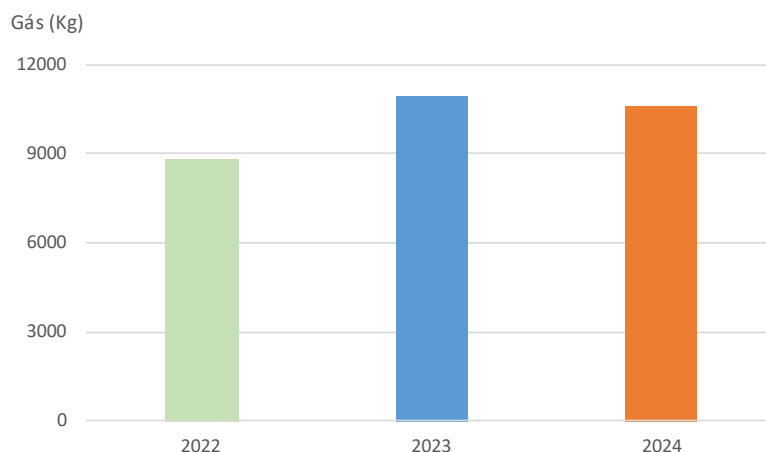
Tabela 4.16 – Consumo de gás nos anos 2022 a 2024 do edifício avaliado.

Tipo gás	2022	2023	2024
P-13	210	197	239
P-20	7	12	7
P-45	110	123	142
Granel	986	2606	1013

Fonte: Elaborado pela autora.

O consumo de gás do edifício avaliado na fase de uso e operação para copas e outras demandas energéticas, entre os anos de 2022 e 2024, é apresentado na figura 4.18. Observa-se que no ano 2022 foram utilizados 8806 kg de gás, 10.942 kg em 2023 e, no ano de 2024, o consumo foi de 10.650 kg.

Figura 4.18 - Consumo de gás do edifício avaliado entre os anos 2022 a 2024.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.3.1 Indicador de consumo de gás

O gás utilizado é do tipo GLP (gás liquefeito de petróleo); para padronizar a análise, o consumo de gás é convertido para energia, em megajoules (correspondente a 46 MJ/kg), e o consumo no ano 2022 foi de 405.076 MJ, de 503.332 MJ em 2023 e, no ano de 2024, foi de 489.900 MJ.

O poder calorífico do GLP é de 46 MJ/kg, ou 0,046 GJ/kg, perfazendo portanto, um total de 466,10 GJ/ano de consumo. Considerando a área do edifício correspondente a 40.706,25 m² temos um consumo de 0,229 kg/m²/ano.

O consumo médio de gás, avaliado per capita, sendo este estimado em 2030 pessoas/dia, resultou em um consumo de 0,23 GJ/ano/pessoa.

4.3.4 Quantidade de resíduo gerado

O resíduo gerado no edifício avaliado é composto por embalagens, orgânicos e outros, foi obtido pelo número de containers (1000 litros) utilizados, ao longo do ano, conforme apresentado na figura 4.19.

Figura 4.19 – Imagem dos containers utilizados no edifício avaliado.



Fonte: autora.

Considerando que cada container pesa, em média, cerca de 200 kg (de resíduo) e um total de 2170,36 containers por ano, baseado em dados de 2021 a 2014, temos 43.4072,70 kg de resíduo gerado por ano.

4.3.4.1 Indicador de resíduo gerado

O indicador de resíduos gerados pelo edifício foi de 434,07 toneladas/ano ou, ainda, um total de 10,66 kg/m²/ano. O resíduo gerado, por pessoa, considerando uma população total diária média de 2003 pessoas resultou em um indicador de 0,21 toneladas/ano/pessoa.

4.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL

Os edifícios requerem energia para o seu funcionamento ao longo de toda a vida útil, portanto avaliações ambientais devem ser projetadas e desenvolvidas considerando o consumo de energia, a exploração de recursos naturais e primários de energia e as emissões de poluentes em uma perspectiva do ciclo de vida (Cellura *et al.*, 2014).

A adoção da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica abrangente para verificar os impactos ambientais associados, no caso da presente pesquisa, à construção e na fase operacional, identificando os pontos críticos e as oportunidades de melhoria para reduzir os impactos da edificação no meio ambiente.

A aplicação da ACV permite entender como cada fase é afetada pelas escolhas tecnológicas e com isso, a aplicação pode ser abordada e aprimorada, se necessário. Tal abordagem representa a base para avaliar as melhorias que podem ser feitas ao longo do ciclo de vida de um edifício para aprimorar sua qualidade e sustentabilidade (Ingrao *et al.*, 2018).

Alguns pesquisadores indicam que a energia operacional é responsável pela maior parte do consumo energético (80-90%) ao longo do ciclo de vida da construção, seguida pela energia embutida (10-20%), enquanto as fases de demolição e outras têm um impacto pequeno ou irrelevante (Ramesh *et al.*, 2010; Ingrao *et al.*, 2018; Antunes e Ghisi, 2021). No entanto, segundo Metz *et al.* (2007), em edifícios tradicionais, em países em desenvolvimento, a energia incorporada pode ser alta comparada à energia de operação.

4.4.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

De modo geral, a energia do ciclo de vida de um edifício pode ser dividida em energia incorporada e energia operacional (Ingrao *et al.*, 2018). A energia incorporada refere-se à energia utilizada na construção e nos materiais construtivos durante todo o ciclo de produção, manutenção, demolição e eliminação final. A energia operacional é utilizada para manter a operação do ambiente interno através de diversos processos, tais como aquecimento, resfriamento, iluminação e funcionamento de equipamentos (Dixit *et al.*, 2012).

O carbono é quantificado por meio de um indicador denominado CO₂-eq, que significa dióxido de carbono equivalente. Essa é uma medida padronizada, reconhecida mundialmente, que quantifica a emissão de gases de efeito estufa (GEE) em relação à quantidade equivalente de CO₂, levando em consideração o potencial de aquecimento global (GWP) de cada gás ao longo de um período de 100 anos (Caldas, 2020).

Observando o desafio de planejar edifícios alinhados com o compromisso de mitigação das mudanças climáticas, foi avaliada a emissão incorporada de GEE no edifício público objeto deste estudo, nas fases pré-uso e operacional. Considerou-se o impacto das decisões de projeto, utilizando dados do orçamento do edifício e na fase operacional, informados pela administração.

4.4.1.1 Definição do objetivo e escopo

A primeira fase da ACV consiste em definir os principais objetivos do estudo e os antecedentes que justificam o seu desenvolvimento. Além disso, uma parte importante desta fase é a definição da Unidade funcional (UF) e dos limites do sistema de análise, de forma a ser consistente com o objetivo e o escopo traçados e ainda, melhor representar o sistema sob investigação, facilitar a coleta de dados e permitir comparações com produtos e sistemas similares. Outra etapa importante que deve ser desenvolvida nesta fase é a definição da vida útil do edifício (Ingrao *et al.*, 2018).

O presente trabalho objetiva examinar os possíveis impactos ambientais de diferentes cenários relacionados às soluções de renovação da envoltória de um edifício público na cidade de Goiânia. Conforme mostrado anteriormente, esses cenários incluem combinações de diversos

parâmetros relacionados à envoltória construtiva, abrangendo novos recursos para isolamento térmico, revestimentos externos, melhorias na massa térmica e aperfeiçoamento dos vidros.

O escopo desta etapa do trabalho é estimar o carbono incorporado e o carbono operacional da edificação para um ciclo de vida de 50 anos, considerando estratégias para a eficiência energética simulada para estimar o consumo de energia, garantindo-se as mesmas condições de conforto interno atuais, através de sistema de condicionamento de ar artificial.

De acordo com o que foi definido no RTQ-C e buscando garantir a equivalência nas funções e desempenhos exigidos nas análises de ciclo de vida comparativas, todos os casos foram analisados levando em conta os mesmos padrões de uso e ocupação, as mesmas densidades de cargas internas e as mesmas faixas de temperatura do ar.

As fases analisadas são as etapas de pré-uso (A1-5) e uso (B6-7) do ciclo de vida do edifício objeto de estudo. Os estágios de fim de vida (C) e de beneficiamento (D) que tratam dos processos de desmantelamento, transporte e descarte de materiais, recuperação e reciclagem não foram avaliados, considerando ainda que estes equivalem a menos de 3% do ciclo de vida da edificação (Tavares, 2006, Paulsen e Sposto, 2013, Pedroso, 2015). No presente estudo a unidade funcional adotada é 1 m² e a vida útil adotada é de 50 anos. A tabela 4.17 apresenta as principais informações da ACV desenvolvida.

Tabela 4.17 – Informações para a condução da ACV neste estudo.

Metodologia de avaliação	NBR 14.040, apoiada pela EN 15.978
Estágios do ciclo de vida abrangidos	1ª Fase – Produto e construção: A1 – A5 (do berço ao canteiro de obras)_ 2ª Fase – Operação do edifício (B6-B7) e ações de <i>retrofit</i> da edificação (B5)
Partes analisadas da edificação	1) Fundação; 2) Estrutura 3) Envoltória; 4) Partições internas; 5) Acabamentos internos.
Método de quantificação dos materiais	Quantitativo de materiais obtidos no orçamento da obra e dados de consumo concedidos pela administração da Instituição
Base de dados utilizadas	Ecoinvent, DAP, SIDAC, dados preferencialmente brasileiros
Software utilizado para ICV	Tabulação dos dados
Vida útil do edifício	50 anos (ASBEA, 2015; NBR 15575, 2013)
Unidade funcional	1 m ²
Categoria de impacto	Potencial de Aquecimento Global (GWP) kg CO ₂ -eq

Fonte: Elaborado pela autora.

A tabela 4.18 especifica as partes do edifício avaliadas: fundação, estrutura, envoltória, partições internas e acabamentos internos. Na fundação foram contabilizados o concreto usinado, a armadura de aço CA-50; na etapa estrutura consideraram-se o concreto usinado, o aço CA-50 utilizado nas barras, tela soldada nervurada e malha pré-fabricada; na envoltória consideraram-se o vidro e o alumínio, a argamassa, o cimento e os blocos de concreto; nas partições internas foram considerados os blocos de concreto, tijolos cerâmicos, a argamassa; e nos acabamentos internos, os elementos básicos, pintura PVA e acrílica, massa PVA.

Tabela 4.18 - Materiais considerados na edificação avaliada.

Elemento da Edificação	Materiais Quantificados
Fundação	Concreto usinado Fck = 25 MPa, concreto usinado Fck = 30 MPa, concreto usinado Fck = 40 MPa, armadura em aço CA-50
Estrutura	Concreto usinado, aço, madeira compensada resinada para forma de concreto
Envoltória	Vidro, alumínio, granito, argamassa, cimento, bloco de concreto, revestimento cerâmico
Partição interna	Gesso acartonado, tijolo cerâmico, portas
Acabamentos internos	Chapisco e emboço em paredes, regularização de piso, revestimento porcelanato, piso em granito, pintura e emassamento

Fonte: Elaborado pela autora.

4.4.1.2 Avaliação do ciclo de vida (ACV) da fundação e da estrutura

Avaliou-se o impacto das mudanças climáticas, ou potencial de aquecimento global (PAG), (em inglês, *Global Warming Potential* – GWP-kg CO₂ equivalente) para realizar o cálculo da ACV, com uso de dados obtidos nos bancos de inventários Ecoinvent e da literatura, focando em dados brasileiros, quando existentes.

Os resultados obtidos para a avaliação do ciclo de vida para os estágios de A1 a A3 da fundação e da estrutura do edifício, definida pela emissão de carbono embutida em cada elemento da edificação, são apresentados na tabela 4.19 a 4.30.

A tabela 4.19 apresenta dos dados de projeto por material para os elementos fundação e fator de impacto e a tabela 4.20 apresenta os resultados do ICV das emissões de GEE embutidas para os elementos fundação por material e somatória total.

Tabela 4.19 – Dados de projeto por material para os elementos fundação e fator de impacto.

Material- FUNDAÇÃO						
Material	Descrição	Dados de Projeto		Mudanças climáticas (GWP)		
	Material	Qtd. dados de projeto	Unidade	Fator de impacto	Unidade	Fonte
Concreto	Concreto usinado fck= 40MPa	1.125,30	m³	305,00	kgCO ₂ eq/m³	EPD Votorantim Cimentos Brasil (2023-2028) kg/m³ = 2.384,00
Concreto	Concreto usinado fck= 30MPa	153,85	m³	287,65	kgCO ₂ eq/m³	Ecoinvent – Concrete, 30 Mpa (BR) concrete production, 30 Mpa, ready-mix, with cement limestone 6-10% / Cut-off
Concreto	Concreto usinado fck= 25MPa	2.628,45	m³	254,67	kgCO ₂ eq/m³	Ecoinvent – Concrete, 25 Mpa (BR) concrete production, 25 Mpa, ready-mix, with cement limestone 6-10% / Cut-off
Aço	Aço CA-50	125.578,50	Kg	1.620,00	kgCO ₂ eq/m³	EPD ArcelorMittal Brasil 2019
		125,58	ton			

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4.20 – Resultados do ICV das emissões de GEE embutidas para os elementos fundação por material e somatória total.

Material	Descrição material	Mudanças climáticas (GWP)					
		RESULTADO DADOS DE PROJETO		Unidade		PARTICIPAÇÃO NAS EMISSÕES (%)	
Concreto	Concreto usinado Fck= 40MPa		343.216,50		kgCO ₂ eq		27,23%
Concreto	Concreto usinado Fck= 30MPa		44.254,95		kgCO ₂ eq		3,51%
Concreto	Concreto usinado Fck= 25MPa		669.387,36		kgCO ₂ eq		53,11%
Aço	Armadura Aço CA-50		203.437,17		kgCO ₂ eq		16,14%
TOTAL – Elemento fundação			1.260.295,98		kgCO ₂ eq		100%

O total das emissões do elemento fundação foi de 1.260.295,98 kgCO₂-eq, sendo o concreto o maior emissor, correspondente a 83,86%.

A tabela 4.21 apresenta dos dados de projeto por material para o elemento estrutura e o fator de impacto referente ao item.

Tabela 4.21 – Dados de projeto por material para o elemento estrutura e fator de impacto.

Material	Descrição Material	Dados de Projeto		Mudanças climáticas (GWP)		
		Qtd. dados de projeto	Unidade	Fator de impacto	Unidade	Fonte
Concreto	Concreto usinado Fck= 40MPa	9581,50	m³	305,00	kgCO ₂ eq/m³	EPD Votorantim Cimentos Brasil (2023-2028) kg/m³ = 2.384,00
Aço	Aço CA-50 e 60 e tela soldada	1.196.946,65	Kg	1.620,00	kgCO ₂ eq/m³	EPD ArcelorMittal Brasil 2019
		1.196,95	ton			
Forma	Madeira e= 12 mm	87.062,50	m³	2,22	kgCO ₂ eq/m³	ECOINVENT 2023
		1.044,75	m³			
Concreto	Concreto usinado Fck= 30MPa	2.781,95	m³	287,6500	kgCO ₂ eq/m³	Ecoinvent – Concrete, 30 Mpa (BR) concrete production, 30 Mpa, ready-mix, with cement limestone 6-10% \ Cut-off

Fonte: Elaborado pela autora.

A tabela 4.22 apresenta os resultados do ICV das emissões de GEE embutidas para os elemento estrutura por material e somatória total

Tabela 4.22 – Resultados do ICV das emissões de GEE embutidas para o elemento Estrutura por material e somatória total.

Material	Descrição Material	Mudanças climáticas (GWP)					
		RESULTADO DADOS DE PROJETO		Unidade		PARTICIPAÇÃO NAS EMISSÕES (%)	
Concreto	Concreto usinado Fck= 40Mpa		2.922.357,50		kgCO ₂ eq		51,60%
Aço	Aço CA-50 e CA-60 e tela soldada		1.939.053,57		kgCO ₂ eq		34,23%
Forma	Madeia e = 12 mm		2.322,16		kgCO ₂ eq³		0,04%
Concreto	Concreto usinado Fck= 30Mpa		800.227,92		kgCO ₂ eq		14,13%
TOTAL – Elemento estrutura			5.663.961,15		kgCO ₂ eq		100%

Fonte: Elaborado pela autora.

O total das emissões do elemento estrutura foi de 5.663.961,15 kgCO₂-eq, sendo o concreto o maior emissor, correspondente a 65,73%, tendo as emissões atribuídas ao concreto ultrapassado 3,7 milhões de kgCO₂-eq. O aço, segundo maior emissor dos materiais analisados do elemento Estrutura, apresentou um total de quase 2 milhões de kgCO₂-eq.

A visão das emissões por material na fase de projeto é essencial, para avaliar o impacto ambiental gerado por uma edificação específica. Tal abordagem é fundamental para viabilizar, em um futuro próximo, a concepção de edificações com emissões reduzidas e maior alinhamento às metas de sustentabilidade ambiental.

4.4.1.3. Avaliação do ciclo de vida para a envoltória do edifício

A envoltória da edificação é caracterizada principalmente por seu sistema de fachada conforme descrito no capítulo 3. As tabelas 4.23 e 4.24 apresentam os dados de projeto para os elementos da envoltória do edifício e seu fator de impacto.

Tabela 4.23 – Dados de projeto por material para os elementos da envoltória e fator de impacto.

MATERIAL	DESCRIÇÃO MATERIAL	DADOS DE PROJETO		MUDANÇAS CLIMÁTICAS (GWP)		
		Qtd. DADOS DE PROJETO	Und.	FATOR DE IMPACTO	Und.	FONTES
Vidro	vidro liso, mini boreal, laminado, divisória de vidro	4.844,000	m²	24,200	kgCO ₂ eq/m²	EPD Brasil Cebrace Vidros de Proteção Solar 2022 - 2027
Alumínio/vidro	Structural Glassing - estrutura em alumínio anodizado com vidro laminado	981,810	m²	30,300	kgCO ₂ eq/m²	EPD Brasil Cebrace Vidros de Proteção Solar (2022 - 2027)
Alumínio	esquadria alumínio (linha suprema alcoa) - maximo ar	3.261,985	m²	2,661	kgCO ₂ eq/ton	ABAL Brasil 2010
		32.819.850,000	cm²			
		9.845.955,000	cm²			
		26.584,079	kg			
		26,584	ton			
Alumínio	Fixa, veneziana, correr, abrir tipo veneziana e Termobrise 335 Hunter Douglas ou equivalente - cor bronze	8.309,160	m²	2,661	kgCO ₂ eq/ton	ABAL Brasil 2010
		83.091.600,000	cm²			
		24.927,480	cm²			
		67.304,196	kg			
		67,304	ton			
Granito	Granito	1.800,380	m²	0,963	kgCO ₂ eq/kg	Ecoinvent 2023
		36,008	m³			
		94.735,996	kg			
Argamassa pré-fabricada	REBOCO EXTERNO: Argamassa de Projeção ARV III - Saco 40kg Espessura: 2cm Densidade:1700kg/m³ Conforme ficha técnica Votorantim	1.718,400	m²	155,000	kgCO ₂ eq/ton	EPD Brasil Votorantim Argamassa ARV III (GWP - 100 anos) 2024
		34,368	m³			
		1.700,000	kg/m³			
		58.425,600	kg			
		58,426	ton			
Cimento	REGULARIZAÇÃO DA FACHADA: Cimento Toda Obra CPIIF32. Saco 50kg. Usado para Regularização da Fachada (Rendimento médio saco 50kg: 35m²).	16.537,180	m²	682,000	kgCO ₂ eq/ton	EPD Votorantim Cimentos 2024
		23.624,543	kg			
		23,625	ton			
Bloco de concreto	Bloco de Concreto 9x19x39 cm (área da face:0,0741m²)	361,500	m²	0,067	kgCO ₂ eq/kg	Ecoinvent BR 2023
		48.760,000	kg			
Revestimento Cerâmico	Pastilha cerâmica Atlas 5x5cm Branca (m² por caixa: 1,41 Peso por caixa: 17,2kg)	280,000	m²	3,370	kgCO ₂ eq/m²	ANFACER Brasil 2016
		3.415,603	kg			

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4.24 – Resultados do ICV das emissões de GEE embutidas para os elementos da Envoltória por material e somatória total.

MATERIAL	DESCRIÇÃO MATERIAL	DADOS DE PROJETO		MUDANÇAS CLIMÁTICAS (GWP)		
		Qtd. DADOS DE PROJETO	Und.	RESULTADO DADOS DE PROJETO	Und.	PARTICIPAÇÃO NAS EMISSÕES POR MATERIAL
Vidro	vidro liso, mini boreal, laminado, divisória de vidro	4.844,000	m²	117.224,800	kgCO ₂ eq	43,767%
Alumínio/vidro	Structural Glassing - estrutura em alumínio anodizado com vidro laminado	981,810	m²	29.748,843	kgCO ₂ eq	11,107%
Alumínio	esquadria alumínio (linha suprema alcoa) - maximo ar	3.281,985	m²	70,740	kgCO ₂ eq	0,026%
		32.819.850,000	cm²			
		9.845.955,000	cm³			
		26.584,079	kg			
		26,584	ton			
Alumínio	Fixa, veneziana, correr, abrir tipo veneziana e Termobrise 335 Hunter Douglas ou equivalente - cor bronze	8.309,160	m²	179,096	kgCO ₂ eq	0,067%
		83.091.600,000	cm²			
		24.927.480	cm³			
		67.304,196	kg			
		67,304	ton			
Granito	Granito	1.800,380	m²	91.228,736	kgCO ₂ eq	34,061%
		36,008	m³			
		94.735,996	kg			
Argamassa pré-fabricada	REBOCO EXTERNO: Argamassa de Projeção ARV III - Saco 40kg Espessura: 2cm Densidade: 1700kg/m³ Conforme ficha técnica Votorantim	1.718,400	m²	9.055,968	kgCO ₂ eq	3,381%
		34,368	m³			
		1.700,000	kg/m³			
		58.425,600	kg			
		58,426	ton			
Cimento	REGULARIZAÇÃO DA FACHADA: Cimento Toda Obra CPIIF32. Saco 50kg. Usado para Regularização da Fachada (Rendimento médio saco 50kg: 35m²).	16.537,180	m²	16.111,938	kgCO ₂ eq	6,016%
		23.624,543	kg			
		23,625	ton			
Bloco de concreto	Bloco de Concreto 9x19x39 cm (área da face:0,0741m²)	361,500	m²	3.275,468	kgCO ₂ eq	1,223%
		48.760,000	kg			
Revestimento Cerâmico	Pastilha cerâmica Atlas 5x5cm Branca (m² por caixa: 1,41 Peso por caixa: 17,2kg)	280,000	m²	943,600	kgCO ₂ eq	0,352%
		3.415,603	kg			

Fonte: Elaborado pela autora.

O total das emissões do elemento envoltória foi de 267.839,19 kgCO₂-eq, sendo o vidro o maior emissor, correspondente a 43,77%, tendo as emissões atribuídas ao vidro ultrapassado 117 mil kgCO₂-eq. O granito foi o segundo maior emissor dos materiais analisados, apresentando um total de quase 100 mil kgCO₂-eq.

4.4.1.4 Avaliação do ciclo de vida para as partições internas do edifício

As partições internas da edificação também foram analisadas neste estudo, considerando que desempenham um papel significativo na contabilização das emissões GEEs, devido ao elevado volume de materiais construtivos envolvidos. Além de serem elementos essenciais para a compartimentação dos espaços, as divisórias desempenham um papel crucial na sustentabilidade da edificação, dado o impacto ambiental dos materiais empregados.

Foi utilizado o sistema de drywall, adotado pela sua leveza, praticidade e agilidade de execução, bem como o método mais tradicional e robusto, como tijolo cerâmico em suas partições internas. As tabelas 4.25 e 4.26 apresentam dos dados de projeto por material para as partições internas, fator de impacto e os resultados da ICV.

Tabela 4.25 – Dados de projeto por material para as partições internas e fator de impacto.

QUANTITATIVO DE MATERIAIS				CATEGORIA DE IMPACTO		
MATERIAL	DESCRIÇÃO MATERIAL	DADOS DE PROJETO		MUDANÇAS CLIMÁTICAS (GWP)		
		Qtd. DADOS DE PROJETO	Und.	FATOR DE IMPACTO	Und.	FONTE
gesso acartonado	parede dry wall	219.091,91	kg	0,336	kgCO ₂ eq/kg	Ecoinvent Gypsum plasterboard {RoW} production
Tijolo Cerâmico	tijolo ceramico	3.267.347,36	kg	0,235	kgCO ₂ eq/kg	Ecoinvent Calcined Clay BR 2023
Portas	Portas pronta 80x210	936,00	Und.	1,350	kgCO ₂ eq/m²	EPD kastamonu Door Panel Turquia (2026)
	Portas pronta 70x210 -	183,00	Und.			
	***Portas (1,8x2,1 + 1,6	72,45	m²			
	x 2,1 + 1 x 2,1 + 0,9 x 2,1)	1.803,06	m²			

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4.26 – Resultados do ICV das emissões de GEE embutidas para as partições internas por material e somatória total.

MATERIAL	DESCRIÇÃO MATERIAL	MUDANÇAS CLIMÁTICAS (GWP)		
		RESULTADO DADOS DE PROJETO	Und.	
gesso acartonado	parede dry wall	73.523,58	KgCO ₂ eq	
Tijolo Cerâmico	tijolo ceramico	768.480,10	kgCO ₂ eq	
Portas	Portas pronta 80x210 Portas pronta 70x210 - ***Portas (1,8x2,1 + 1,6 x 2,1 + 1 x 2,1 + 0,9 x 2,1)	2.434,13	KgCO ₂ eq	

Fonte: Elaborado pela autora.

O total das emissões do elemento partições internas é de 770.914,23 kgCO₂-eq, sendo o tijolo cerâmico o maior emissor, alcançando 768 mil kgCO₂-eq.

4.4.1.5 Avaliação do ciclo de vida para os acabamentos internos do edifício

Os acabamentos internos da edificação foram incluídos, considerando seu potencial estratégico para a redução das emissões, ao longo do ciclo de vida da construção. Muitos dos acabamentos, como porcelanatos, revestimentos cerâmicos, pedras naturais e pinturas, têm um impacto ambiental significativo.

Esse impacto decorre tanto dos processos de fabricação, que muitas vezes envolvem altos níveis de consumo energético e emissões de poluentes, quanto do transporte, especialmente quando esses materiais percorrem longas distâncias entre a fábrica e o canteiro de obras. A utilização de recursos naturais, como as pedras e o elevado consumo de energia na produção de revestimentos cerâmicos e porcelanatos, agravam ainda mais a pegada ecológica da construção. As tabelas 4.27 e 4.28 apresentam dos dados de projeto por material para os acabamentos internos, fator de impacto e os resultados da ICV.

Tabela 4.27 – Dados de projeto por material para os acabamentos internos e fator de impacto.

QUANTITATIVO DE MATERIAIS					CATEGORIA DE IMPACTO		
APLICAÇÃO	MATERIAL	DADOS DE PROJETO			MUDANÇAS CLIMÁTICAS (GWP)		
		DESCRIÇÃO MATERIAL	Qtd. DADOS DE PROJETO	Und.	FATOR DE IMPACTO	Und.	FONTE
MATERIAIS GERAIS	Chapisco e emboço em paredes	Chapisco (e=0,5 cm)	267,44	m3	384,600	kgCO ₂ eq/m³	SIDAC Argamassa dosada em obra 1:3 (2027)
		Emboço (e= 1,5 cm)	802,31	m3			
PISO	regularização piso	Massa pré-fabricada para contrapiso	31.300,30	m²	151,000	kgCO ₂ eq/ton	EPD Brasil Votorantim Argamassa 2024 (GWP - 100 anos)
			1.314,61	ton			
	Revestimento Porcelanato	Porcelanato	4.110,450	m²	11,600	kgCO ₂ eq/m2	EPD Porcelain tiles - Graniser Ceramics Global 2027
	Granito	Granito piso (e=1,5cm)	1.157.693,930	kg	0,963	kgCO ₂ eq/kg	Ecoinvent 2023
PINTURA	Pintura	Tinta acrilica	98.041,98	m²	2,980	kgCO ₂ eq/m2	EPD Sherwin-Williams Global (2021 - 2026)
	Emassamento	Massa corrida PVA	63.665,13	kg	0,662	kgCO ₂ eq/kg	EPD IsomatAcrylic Render 2019-2028

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4.28 – Resultados do ICV das emissões de GEE embutidas para os acabamentos internos por material e somatória total.

QUANTITATIVO DE MATERIAIS					RESULTADOS	
APLICAÇÃO	MATERIAL	DADOS DE PROJETO			MUDANÇAS CLIMÁTICAS (GWP)	
		DESCRIÇÃO MATERIAL	Qtd. DADOS DE PROJETO	Und.	RESULTADO DADOS DE PROJETO	Und.
MATERIAIS GERAIS	Chapisco e emboço em paredes	Chapisco (e=0,5 cm)	267,44	m3	411.425,850	kgCO ₂ -eq
		Emboço (e= 1,5 cm)	802,31	m3		
PISO	regularização piso	Massa pré-fabricada para contrapiso	31.300,30	m²	198.506,503	kgCO ₂ -eq
			1.314,61	ton		
	Revestimento Porcelanato	Porcelanato	4.110,450	m²	47.681,220	kgCO ₂ -eq
	Granito	Granito piso (e=1,5cm)	1.157.693,930	kg	1.114.834,473	kgCO ₂ -eq
PINTURA	Pintura	Tinta acrílica	98.041,98	m²	292.165,100	kgCO ₂ -eq
	Emassamento	Massa corrida PVA	63.665,13	kg	42.146,316	kgCO ₂ -eq

Fonte: Elaborado pela autora.

O total das emissões do elemento acabamentos internos é de 2.106.759,76 kgCO₂-eq, sendo o piso de granito o maior emissor, alcançando cerca de 1,1 milhões de kgCO₂-eq e, em segundo lugar, o chapisco e emboço das paredes, com cerca de 400 mil kgCO₂-eq.

4.4.1.6 Avaliação da energia operacional - fase de uso

A etapa de uso está relacionada às etapas operacional. O consumo de energia na etapa operacional é resultado da utilização da energia elétrica e água para o funcionamento dos aparelhos eletrônicos, gás para a cocção de alimentos e os resíduos gerados pela edificação. Neste estudo foi levantado o fator de consumo de energia operacional (FEO) baseado nas contas de energia, água, gás e resíduos gerados, comuns em edifícios com características semelhantes,

obtidos através de dados das concessionárias. Calculado o consumo de energia mensal, em kWh, foi transformado no consumo anual (MJ) e, ao final, o consumo total, para a vida útil de 50 anos.

A tabela 4.29 apresenta os quantitativos para o consumo de água, energia elétrica e gás e a geração de resíduo, obtidos na etapa operação do edifício avaliado e os fatores de impacto associados a cada item, sendo o gás obtido por dados brasileiros e os demais pela base de dados *Ecoinvent*.

Tabela 4.29 – Dados de consumo reais por etapa e fator de impacto.

ETAPA	MATERIAL	QUANTITATIVO DADOS REAIS		Mudanças climáticas (GWP)		
		Qtd. dados de projeto	Unidade	Fator de impacto	Unidade	Fonte
ÁGUA	Consumo de água	18.402.375,00	Kg	0,000194	kgCO ₂ eq/kg	Ecoinvent – Tap water (BR) tap water production, conventional treatment Cut-off, U
ELETRICIDADE	Energia elétrica	4.307.354,87	kWh	0,219730	kgCO ₂ eq/kWh	Ecoinvent – Eletricidade, médium voltage {BR-Mid-Western grid} Market for eletricidade, médium voltage cut-off, U
GÁS	Gás GLP	466,10	GJ	63,10000	kgCO ₂ eq/GJ	CETESB – Gás liquefeito de petróleo (GLP) – período 1990 – 2008
RESÍDUO	Resíduo sólido urbano	434.072,70	Kg	0,9517466	kgCO ₂ eq/KG	Ecoinvent – Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill cut-off, U

Fonte: Elaborado pela autora.

O edifício obteve um consumo anual médio de 4.307.354,87 KWh, que equivale a 15.506,48 GJ/ano. Fazendo uma estimativa de consumo para uma vida útil de 50 anos da edificação, teríamos um consumo energético total de 775.323,87 GJ. Considerando que o edifício possui uma área total de 40706,25 m² temos um total de 19,05 GJ/m² em 50 anos.

O indicador de CO₂ equivalente, o qual contempla todos os gases de efeito estufa, a partir de uma equivalência de valores, é apresentado na tabela 4.30, obtido pela multiplicação entre o quantitativo pelo fator de impacto da etapa.

Tabela 4.30 – Resultados do indicador de CO₂ equivalente para a etapa de uso.

		Mudanças climáticas (GWP)		
ETAPA	Material	Fator de impacto	Unidade	Fonte
ÁGUA	Consumo de água	3.566,50	kgCO ₂ -eq	Ecoinvent – Tap water (BR) tap water production, conventional treatment Cut-off, U
ELETRICIDADE	Energia elétrica	946.457,03	kgCO ₂ -eq	Ecoinvent – Eletricidade, médium voltage {BR-Mid-Western grid} Market for eletricity, médium voltage cut-off, U
GÁS	Gás GLP	29.410,91	kgCO ₂ -eq	CETESB – Gás liquefeito de petróleo (GLP) – período 1990 – 2008
RESÍDUO	Resíduo sólido urbano	413.127,21	kgCO ₂ -eq	Ecoinvent – Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill cut-off, U
TOTAL		1.392.561,65	kgCO₂-eq / ano	

Fonte: Elaborado pela autora.

O total das emissões da fase de uso é de 1.392.561,65 kgCO₂-eq por ano, sendo o consumo de energia elétrica o maior emissor, alcançando aproximadamente 946 mil kgCO₂-eq. O fator de emissão para o gás GLP é de 63,1 kgCO₂-eq/GJ o que corresponde ao fator de impacto ambiental em emissões de gases de efeito estufa de 29.410,91 kgCO₂-eq.

4.4.1.7 Análise de *Benchmarking*

O *benchmarking*, no contexto de emissões em edificações, refere-se ao estabelecimento de valores de referência que permitem avaliar e comparar o desempenho ambiental de construções, ao longo de seu ciclo de vida. Esses valores são fundamentais para orientar práticas mais sustentáveis, identificando limites aceitáveis e metas desafiadoras para redução de impactos ambientais, como as emissões de gases de efeito estufa. Eles oferecem um panorama para alinhar projetos às exigências de mitigação climática e, usualmente, utilizam a unidade de medida kgCO₂-eq/m² para comparação de valores (IEA / EBC, 2023).

As emissões de CO₂ foram avaliadas na fase pré-uso e na fase operacional do edifício. Os resultados das emissões embutidas, apresentados na tabela 4.31, também identificadas como

potencial de aquecimento global (PAG), obtidos em kgCO₂eq foram divididos pela área construída da edificação, correspondente a 40.706,25 m², gerando assim resultados em kgCO₂eq/m².

Tabela 4.31 – Emissões embutidas de carbono na fase pré-uso.

	KgCO₂.eq	KgCO₂.eq /m²	%
Concreto	4.779.444,23	117,41	47,12
Aço	2.142.490,74	52,63	21,12
Forma	2.322,16	0,06	0,02
Vidro	117.224,80	2,88	1,16
Alumínio/vidro	29.748,84	0,73	0,29
Alumínio	249,84	0,01	0,00
Granito	91.228,74	2,24	0,90
Argamassa pré-fabricada	9.055,97	0,22	0,09
Cimento	16.111,94	0,39	0,16
Bloco de concreto	3.275,47	0,08	0,03
Revestimento cerâmico	943,60	0,02	0,01
Gesso acartonado	73.523,58	1,81	0,72
Tijolo cerâmico	768.480,10	18,88	7,58
Portas	2.434,13	0,06	0,02
Chapisco e emboço de paredes	411.425,85	10,11	4,06
Regularização de piso	198.506,50	4,88	1,96
Revestimento porcelanato	47.681,22	1,17	0,47
Granito piso	1.114.834,47	27,39	10,99
Pintura	292.165,10	7,18	2,88
Emassamento	42.146,32	1,03	0,42
Total	10.143.293,60	249,18	100,00

Fonte: Elaborado pela autora.

O edifício avaliado foi construído em sistema tradicional, composto por estrutura de concreto, esquadrias de vidro e alumínio, paredes predominantemente em tijolo cerâmico, piso em maior parte de granito. Os sistemas construtivos foram especificados com base no desempenho térmico mínimo exigido na ABNT NBR 15575-4 (2022). A partir da avaliação foi possível concluir que o concreto apresentou maior emissão de CO₂, correspondente a 117,41 kgCO₂/m². Esse item é responsável pela emissão de 47,12% da fase pré-uso avaliada.

A produção de cimento é uma atividade que emite grandes quantidades de gases de efeito estufa. Para reduzir a pegada de carbono o uso de cimentos de baixo carbono ou com adições, otimização estrutural e uso de materiais pré-moldados ou alternativos seria algumas estratégias.

Caldas *et al.* (2016) avaliaram o consumo de energia e emissões de CO₂ de quatro sistemas de fachadas para habitações de interesse social no Brasil: *light steel framing*, parede de concreto moldada no local, blocos de concreto estruturais e blocos cerâmicos estruturais. A metodologia utilizada foi a Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) e a Avaliação do Ciclo de Vida de Emissões de CO₂ (ACVCO₂) nas etapas de extração, processamento e manutenção dos sistemas. O sistema de parede de concreto foi o que apresentou menor consumo de energia, igual a 189,4 MJ/m², e emissões de CO₂ de 28,6 kgCO₂/m².

O relatório denominado *Benchmarking and target-setting for the life cycle-based environmental performance of buildings* (IEA / EBC, 2023a), apresenta diversas métricas de diferentes estudos, todas com o objetivo de comparar os valores das emissões de carbono das edificações em kgCO₂-eq/m².ano. Dentre essas métricas estão o SIA 2040 (Suíça) que sugere o valor de 10 a 12 kgCO₂-eq/m².ano para edifícios novos e reformados. A pesquisa de Chastas *et al.* (2018) identificou uma faixa de emissões de carbono incorporadas em edificações residenciais entre 179,3 kgCO₂-eq/m² e 1050 kgCO₂-eq/m², considerando um ciclo de vida de 50 anos, o valor foi de 12 kgCO₂-eq/m².ano.

Trazendo para a realidade brasileira, um dos pioneiros nos estudos em ACVE é Tavares (2006) que avaliou o consumo de energia em todas as etapas do ciclo de vida da edificação. Em sua pesquisa, verificou que 70% da energia utilizada na manufatura dos principais materiais construtivos brasileiros provêm de fontes fósseis não renováveis. Para isso, se faz necessário o entendimento dos fluxos energéticos, a fim de compreender a maneira como se consomem os recursos (Costa e Kos, 2021).

Diversas pesquisas utilizam a ACVE como ferramenta, mas estão voltadas a quantificar o consumo energético e/ou emissões de CO₂ em matérias-primas ou sistemas construtivos, com recorte principalmente na etapa do pré-uso. Librelotto e Jalali (2008) analisaram os impactos ambientais causados pelo setor da construção civil, pela Análise do Ciclo de Vida (ACV) em dois prédios residenciais localizados na cidade de Cruz Alta - RS, desenvolvendo um fator denominado GBTool que permite considerar o CO₂ incorporado nos materiais, uma preocupação em países de clima frio (com grande demanda por aquecimento, durante períodos relativamente longos) e/ou que tenham matrizes energéticas fortemente centradas no uso de combustíveis fósseis (razões pelas quais eles têm compromissos rigorosos firmados no Protocolo de Kyoto). O estudo evidenciou a aplicabilidade do sistema *GBTool*, contribuindo com mais um elemento de informação sobre sistemas de avaliação da Construção Sustentável.

Teodoro (2017) avaliou o consumo de energia embutida nas edificações, observando que ele chega a 40% do seu ciclo de vida energético. Foi avaliado um condomínio residencial em Campo Grande-MS, segundo seu ciclo de vida energético, considerando dois cenários diferentes em relação à eficiência energética na etapa de transporte. Obteve-se um consumo de energia embutida inicial por unidade de área de 4,99 GJ/m² para o cenário 1, onde a eficiência do consumo foi por tipo de veículo de transporte de cargas apresentado no Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por veículos automotores rodoviários; e 5,52 GJ/m² para o cenário 2, que baseou-se no consumo anual de energia do setor de transportes e no total de carga transportada no Brasil, com participações de energia não renovável de 61,2% e 64,2%, respectivamente. No cenário 1 a etapa de fabricação dos materiais respondeu por 96,1% do consumo de energia embutida, o transporte por 3,2% e a construção com 0,7%, enquanto no cenário 2 foi de 86,8%, 12,6% e 0,6%, respectivamente. Os resultados mostraram a importância de incluir a energia

embutida como critério de eficiência energética para reduzir o consumo de energia no setor das edificações.

Na fase operacional algumas abordagens incluem: eficiência energética com sistemas passivos e ativos para redução do consumo de energia; energia renovável com instalação de sistemas fotovoltaicos para suprir a demanda elétrica; gestão de resíduos; e uso eficiente de água que podem reduzir o consumo de água tratada, que tem um impacto energético relevante.

A Tabela 4.32 apresenta os resultados das emissões embutidas (EE) de carbono na fase de uso da edificação, em Goiânia, resultando em valores de 23,25 KgCO₂/m² para o consumo de energia elétrica, o que representou 67,96% da emissão para essa fase.

Tabela 4.32 – Emissões embutidas de carbono na fase operacional.

	KgCO ₂ .eq	KgCO ₂ .eq /m ²	Percentual
Água	3.566,50	0,09	0,26
Eleticidade	946.457,03	23,25	67,96
Gás	29.410,91	0,72	2,11
Resíduo	413.127,21	10,15	29,67

Fonte: Elaborado pela autora.

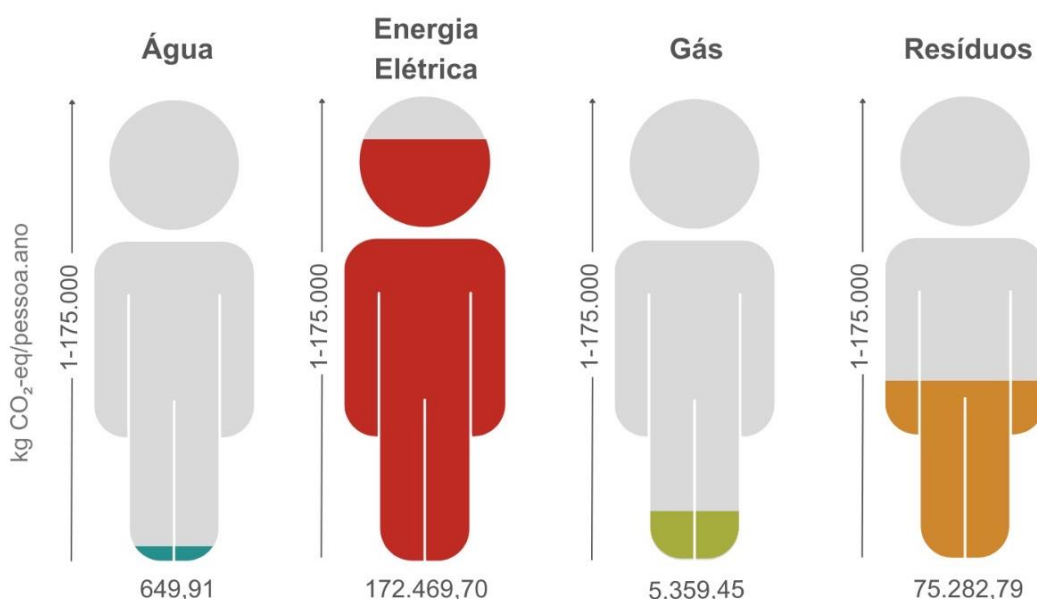
Na fase operacional, considerando os dados obtidos pelo consumo real do edifício entre 2021 a 2024 mostraram um consumo de 1.392.561,65 kgCO₂-eq ou ainda, 34,21 kgCO₂-eq/m² por ano.

A mitigação efetiva das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor de edifícios requer uma compreensão completa dos fatores que influenciam as emissões ao longo do ciclo de vida dos edifícios, particularmente em locais onde são esperadas grandes adições ao estoque de edifícios. Atualmente, existe uma lacuna no conhecimento sobre o que afeta as emissões de GEE de edifícios localizados em climas mais quentes. Krych *et al.* (2021) avaliaram as emissões de edifícios de escritórios brasileiros para 1000 variações de edifícios na amostra, segundo análise do ciclo de vida. A análise de regressão multivariada permitiu o estudo da sensibilidade dos resultados a 10 parâmetros, influenciando a operação do edifício, projeto e outros. As emissões variaram de 20 a 106 kgCO₂-eq/m² por ano. O consumo de energia elétrica, o clima e a eficiência de resfriamento foram os parâmetros mais impactantes, mas o tempo de serviço dos componentes do edifício também foi significativo.

Para a população média estimada do edifício, considerando os servidores, estagiários e público, que totalizam 2030 pessoas/dia, as emissões de carbono foram de 695,24 kgCO₂-eq/pessoa/dia, ou ainda, 253.761,86 kgCO₂-eq/pessoa/ano, sendo a energia elétrica responsável pela emissão na fase operacional de 472,52 kgCO₂-eq/pessoa/dia.

As emissões de carbono na fase operacional do edifício são as emissões de gases com efeito estufa que ocorrem durante o uso do edifício. As emissões causadas pelo consumo de energia para operar o edifício, obtidas por pessoa/ano, são equivalentes a 649,91 kgCO₂-eq/pessoa.ano para o consumo de água, de 172.469,70 kgCO₂-eq/pessoa.ano para o consumo de energia elétrica, um total de 5.359,45 kgCO₂-eq/pessoa.ano para o gás e ainda, para o resíduo o equivalente a 75.282,79 kgCO₂-eq/pessoa.ano. Os resultados estão apresentados na figura 4.20.

Figura 4.20 – Emissão de gases do efeito estufa na fase de uso, em kgCO₂-eq/pessoa.ano para o edifício avaliado, considerando dados reais.



A partir dos resultados observados, nota-se a importância na elaboração dos planos de redução do consumo elétrico, responsável por cerca de 70% das emissões nessa fase, seguido pelos resíduos, correspondentes a quase 30% das emissões.

No Brasil, a emissão operacional de edifícios está fortemente ligada ao consumo de eletricidade, que, apesar de ser majoritariamente renovável (hidrelétrica, solar e eólica), ainda inclui fontes fósseis. Algumas referências indicam que edifícios comerciais as emissões ficam entre 30 a 80 kgCO₂eq/m²/ano, dependendo da eficiência energética; edifícios residenciais entre 10 a 40 kgCO₂eq/m²/ano, com variação conforme o padrão de consumo; e edifícios altamente eficientes podem ter valores abaixo de 10 kgCO₂eq/m²/ano, com uso de energia renovável no local (Maciel, 2016).

Esses valores podem ser refinados com base nos fatores de emissão da eletricidade do Brasil, que variam ao longo do ano. O fator médio da matriz elétrica brasileira costuma ficar entre 0,05 e 0,1 kgCO₂eq/kWh, mas pode aumentar em períodos de estiagem, quando há mais uso de termelétricas, conforme informações do Sistema Interligado Nacional do Brasil para inventários

(Brasil, 2024a). Os fatores de emissão médios de CO₂ para energia elétrica a serem utilizados em inventários tem como objetivo estimar a quantidade de CO₂ associada a uma geração de energia elétrica determinada. Ele calcula a média das emissões da geração, levando em consideração todas as usinas que estão gerando energia.

4.4.1.8 Análise geral das emissões de carbono do edifício avaliado

Com a crescente preocupação em relação ao consumo dos recursos ambientais e gasto energético foram avaliados o consumo de carbono incorporado e operacional do edifício avaliado.

Segundo Myint *et al.* (2025) o carbono incorporado é aquele consumido pelos materiais de construção e renovação, bem como a energia consumida durante para a execução dos processos de construção, renovação e demolição. Os autores identificaram também que o carbono incorporado é influenciado pelos materiais empregados, o tipo e função da edificação, localização, orientação, estrutura, transporte, demolição e processos de reutilização/ reciclagem do edifício.

Já o carbono operacional é o decorrente da energia consumida para o funcionamento e manutenção regulares dos edifícios, e este é influenciado pelo projeto da envoltória, pelos materiais de isolamento, sistemas de ventilação, utilização de energia renovável, localização, orientação e altura do edifício, estrutura e comportamento dos usuários (Myint *et al.*, 2025).

A energia é consumida em todo o ciclo de vida nos edifícios, isto é, desde a produção das matérias-primas, construção, passando pelo uso, operação, manutenção e renovação até sua demolição. Os materiais utilizados na construção civil e na fabricação dos sistemas prediais, passam por um longo ciclo de extração, manufatura e transporte até o local da construção. Ferro, aço, alumínio, cobre, cimento, vidro, cerâmicos são todos materiais energo-intensivos na sua fabricação (Fukuoka *et al.*, 2024).

De acordo com a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), ações para abordar a eficiência energética dos edifícios para reduzir as emissões é essencial para atingir as metas do Acordo de Paris (PNUMA, 2021). A COP 26 (Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas de 2021) também destaca o papel crucial que os edifícios desempenham na ação climática e enfatiza que o ambiente construído deve reduzir suas emissões em 50% até 2030 e que todo o estoque de novos edifícios deve ser líquido zero em operações.

Tudo isto está em concordância com a avaliação de que os edifícios são responsáveis por uma parcela significativa de mais de um terço da procura global de energia e por mais de 35% das emissões globais de carbono relacionadas com a energia (PNUMA, 2021) .

As emissões do carbono incorporado dos materiais utilizados na construção do edifício (concreto, aço, vidro, alumínio, etc.) apresentam uma durabilidade compatível com uma vida útil

de 50 anos. Concreto e aço são os que apresentam maiores emissões, no início da vida útil do edifício, bem como o granito. A partir do levantamento do consumo energético das fases avaliadas, a tabela 4.33 apresenta os resultados da emissão de carbono (medida em KgCO₂eq) baseado nos dados do edifício.

Tabela 4.33 - Emissão de carbono (medida em KgCO₂eq) do edifício avaliado.

Componente	Emissão CO ₂ (1 ano)	Percentual (1 ano)	Emissão CO ₂ (50 anos)	Percentual (50 anos)
Carbono Incorporado (CI)				
Concreto	4.779.444,23	47,12	238.972.211,50	37,81
Aço	2.142.490,74	21,12	107.124.537,00	16,95
Forma	2.322,16	0,02	116.108,00	0,02
Vidro	117.224,80	1,16	5.861.240,00	0,93
Alumínio/vidro	29.748,84	0,29	1.859.302,50	0,29
Alumínio	249,84	0,00	12.492,00	0,00
Granito	91.228,74	0,90	4.561.437,00	0,72
Argamassa pré-fabricada	9.055,97	0,09	452.798,50	0,07
Cimento	16.111,94	0,16	805.597,00	0,13
Bloco de concreto	3.275,47	0,03	204.716,87	0,03
Revestimento cerâmico	943,60	0,01	78.790,60	0,01
Gesso acartonado	73.523,58	0,72	9.190.447,50	1,45
Tijolo cerâmico	768.480,10	7,58	96.060.012,50	15,20
Portas	2.434,13	0,02	152.133,12	0,02
Chapisco e emboço de paredes	411.425,85	4,06	20.571.292,50	3,25
Regularização de piso	198.506,50	1,96	16.575.292,75	2,62
Revestimento porcelanato	47.681,22	0,47	3.981.381,87	0,63
Granito piso	1.114.834,47	10,99	55.741.723,50	8,82
Pintura	292.165,10	2,88	60.916.423,35	9,64
Emassamento	42.146,32	0,42	8.787.507,72	1,39
Total	10.143.293,60	100,00	632.025.445,78	100,00
Carbono fase operacional (CO)				
Consumo água	3.566,50	0,26	178.325,00	0,26
Energia elétrica	946.457,03	67,97	47.322.851,50	67,97
Gás GLP	29.410,91	2,11	1.470.545,50	2,11
Resíduo sólido	413.127,21	29,67	20.656.360,50	29,67
Total	1.392.561,65	100 %	69.628.082,50	100%

Fonte: Elaborado pela autora.

Para obter o total da emissão de carbono incorporado para estimativa de 50 anos foi utilizado o fator de reposição dos materiais e componentes para cada sistema do edifício utilizando os valores propostos por Caldas *et al.* (2016), apresentados na tabela 4.34.

Tabela 4.34 – Determinação da vida útil de projeto (VUP) e fator de reposição.

Sistemas da Edificação	VUP (Fonte)	Fator de Reposição
Estrutura	50 ABNT NBR 15575-1 (4)	1,00
Vedação vertical externa	40 ABNT NBR 15575-1 (4)	1,25
Vedação vertical interna ¹	30 Palacio (14)	2,50
Pintura externa	12 Tavares (19)	4,17
Pintura interna	8 Tavares (19)	6,25
Estrutura cobertura	30 Tavares (19)	1,67
Telhas	20 ABNT NBR 15575-1 (4)	2,50
Pisos internos	30 Tavares (19)	1,67
Esquadrias externas	40 Paulsen e Sposto (20)	1,25
Esquadrias internas	40 Paulsen e Sposto (20)	1,25
Hidrossanitário ²	45 Tavares (19)	1,11

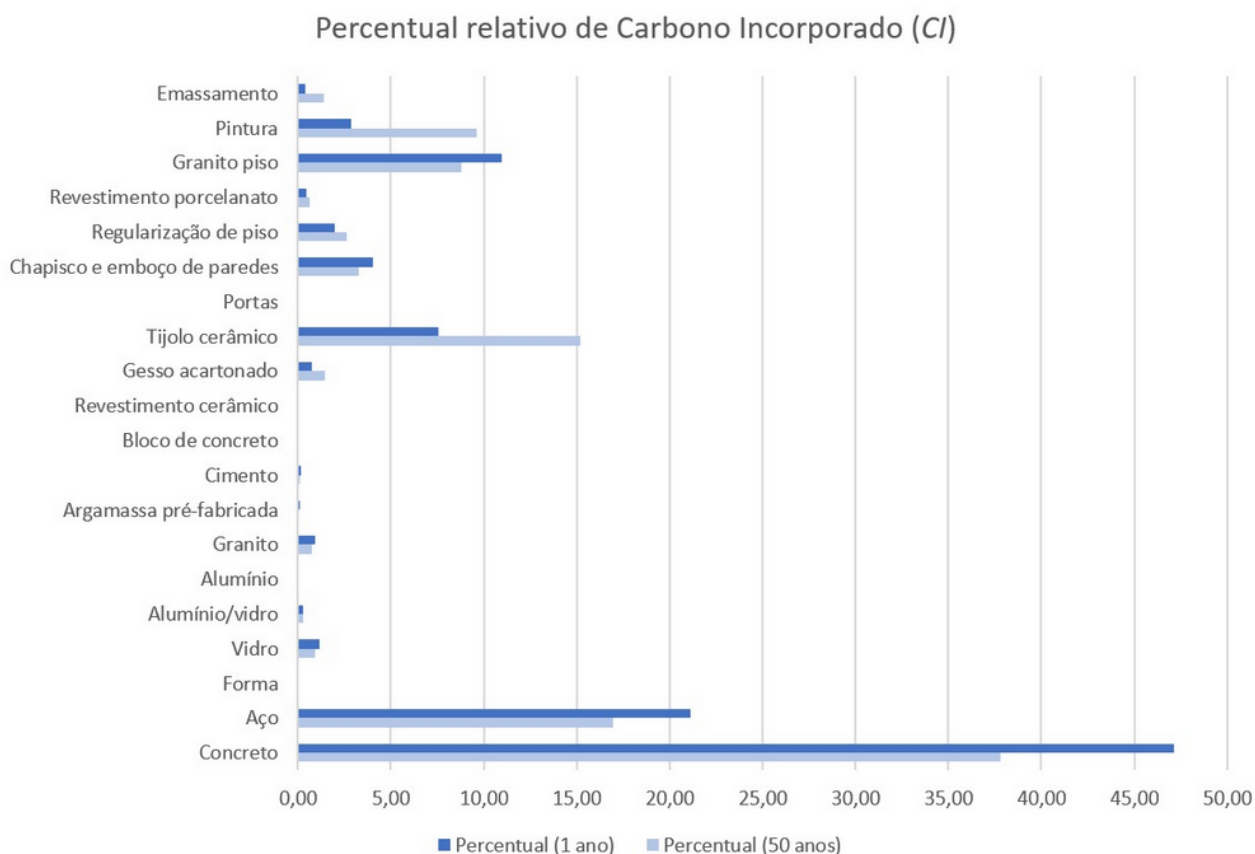
Fonte: Caldas *et al.* (2016).

Materiais como o piso porcelanato e a pintura acrílica demandam energia de manutenção, por exemplo, cujos valores estão associados ao fator de reposição e vida útil de projeto (VUP), correspondendo ao mínimo obrigatório, sugerida pelo guia da ASBEA, baseado nos dados da ABNT NBR 15575-1 (2021). Assim, ao longo dos 50 anos de vida útil, haverá aproximadamente 4 trocas de piso e 6 repinturas externas. A durabilidade e vida útil dos materiais estão relacionadas com a necessidade de reposição, levando em consideração as medidas previstas na NBR 15575.

Em relação à etapa de manutenção, ela foi obtida pelo cálculo da substituição dos materiais, que dependem do plano de manutenção, no qual são estimados intervalos para o procedimento de manutenção. Os intervalos foram adotados com base na NBR 15575 que define uma vida útil de projeto (VUP) mínima para os sistemas da edificação. Os valores adotados e o fator de reposição para 50 anos, apresentado na tabela 4.35, conforme dados propostos por Caldas *et al.* (2016). O fator de reposição foi calculado pela divisão da vida útil adotada e o tempo de substituição. Foi adotado que a estrutura e a fundação não receberão manutenção durante a vida útil da habitação.

A Figura 4.21 apresenta a análise geral do carbono incorporado do edifício avaliado, em percentual, para um ano e estimado para uma vida útil de 50 anos, onde observa-se que o maior consumo é do concreto, seguido pelo aço e tijolo cerâmico.

Figura 4.21 – Percentual de carbono incorporado do edifício avaliado em 1 ano e, estimado, para uma vida útil de 50 anos.



Fonte: Elaborado pela autora.

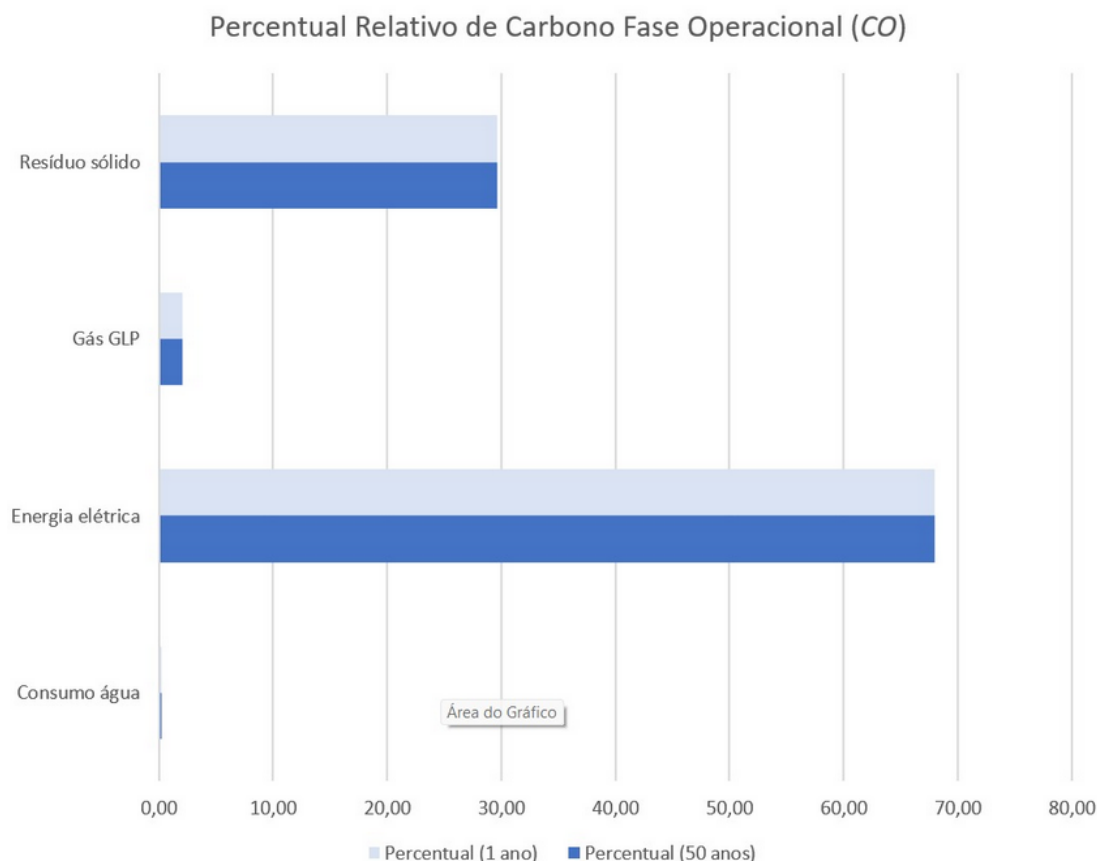
Em termos de participação dos materiais, o concreto e o aço foram os mais impactantes, seguindo a tendência observada por Röck *et al.* (2022). Pode-se observar que esse percentual é mais significativo para o concreto por ano do que quando avaliado para a vida útil de 50 anos, onde, outros elementos do sistema construtivo necessitam de manutenção antes da vida útil prevista no presente estudo como o piso e a pintura.

Mulya *et al.* (2024) avaliaram a descarbonização de edifícios de escritórios de grande altura pela análise do ciclo de vida de carbono, tendo observado que o carbono operacional tem emissões maiores do que as incorporadas com base em um período de 30 anos, que o transporte pode contribuir com mais de 50% do carbono incorporado em um material e que projetos inovadores de energia fotovoltaica integrada em edifícios compensam 15,9% da energia do edifício.

Na fase operacional, o consumo de energia é bastante expressivo, sendo as emissões vindas da iluminação, equipamentos e, principalmente, do resfriamento, devido à natureza da

zona bioclimática do edifício, que são os maiores emissores. A figura 4.22 apresenta a análise geral, em percentual, das emissões de carbono operacional do edifício avaliado para o período anual e para uma vida útil de 50 anos.

Figura 4.22 – Emissão de carbono operacional, em percentual, para 1 ano e 50 anos.



Os resultados mostram que a energia elétrica é responsável pela emissão de quase 68% da fase operacional, tendo impacto significativo nessa fase do edifício. Considerando a zona bioclimática do edifício localizado em Goiânia com clima predominante tropical com estação seca, localizado na zona bioclimática 6, que apresenta uma temperatura média anual de aproximadamente 23,4°C, os resultados apontam para a necessidade elevada de climatização artificial no edifício. Analisar o edifício como um todo é imprescindível para alcançar a melhoria da eficiência energética.

Observa-se pela figura 4.22 que se nenhuma ação para a melhoria da eficiência energética for implementada na edificação, o consumo de energia elétrica apresentará o mesmo perfil em 50 anos. As ações devem levar em conta que alguns ambientes da edificação não possuem comunicação com o exterior e a climatização é a única forma de ventilação do ambiente, dependendo dessa forma de ventilação por todo o período de duração do expediente.

A redução da pegada de carbono em edifícios pode ser feita através da escolha de materiais sustentáveis, uso de energia renovável e implementação de técnicas de eficiência

energética. O uso de materiais com menor impacto ambiental, como concreto ecológico, aço reciclado e madeira certificada bem como, priorizar materiais reciclados, de origem renovável ou com baixa energia incorporada, como bambu, palha e terra crua são estratégias excelentes, principalmente para novos edifícios, onde a especificação dos materiais construtivos faz parte das definições pré-projeto.

O uso de energia renovável como a solar fotovoltaica ou eólica podem minimizar as emissões de carbono. Estratégias como implementar elementos passivos para conforto térmico, como brises e ventilação natural; captar água da chuva; tratar água quando possível; uso de paisagismo com vegetação densa; e reduzir a irrigação são exemplos eficiência na utilização dos recursos.

O estudo relaciona o uso de energia e as emissões de carbono do edifício público, considerando o carbono incorporado e a energia operacional e os métodos e abordagens usados no projeto arquitetônico atual comparando-o com novos cenários, visando reduzir o carbono incorporado.

Arslan *et al.* (2023) observaram que considerar a pré-fabricação do processo de construção é uma forma de melhorar os resultados na análise do ciclo de vida. Embora as emissões do ciclo de vida do edifício pré-fabricado tenham atingido 1076 kgCO₂eq /m², ele ainda apresentou melhor desempenho quando comparado com outros modelos. Os resultados também revelam que a indústria da construção não está pronta para fornecer dados realistas sobre o processo de pré-fabricação para testar suas vantagens em comparação com métodos de construção convencionais. Portanto, incluir a pré-fabricação no processo de construção de uma nova construção ou de um projeto de reforma é um passo importante para reduzir as emissões de carbono em edifícios em pelo menos 10%.

A participação do carbono incorporado nos materiais na pegada de carbono dos edifícios varia entre 25% e 45% nos edifícios novos que cumpram com os requisitos mínimos de desempenho energético ou com os requisitos dos edifícios com necessidades quase nulas de energia, respectivamente, e cerca de 20% em edifícios existentes (Röck *et al.*, 2020).

No caso em estudo, as emissões de gases de efeito estufa associadas a fase de pré-uso totalizaram 249,18 kgCO₂-eq/m² e observou-se que 47,12% dessas emissões estão associadas ao uso do concreto.

4.5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Esta tese avaliou os impactos de algumas variáveis de projeto na eficiência energética através de um estudo de caso de um edifício público na cidade de Goiânia, que faz parte da zona bioclimática 6, através de simulações computacionais, coleta de dados *in loco*, apresentação de indicadores na fase operacional do edifício e análise das emissões de carbono.

Nesta etapa da pesquisa são reunidos os resultados referentes às etapas anteriores: avaliação de desempenho energético e ambiental. Foram propostos três cenários para melhorar a eficiência energética do envelope do edifício, mantendo os mesmos fatores como população, carga de equipamentos e iluminação artificial. O melhor cenário avaliado com relação à composição do envelope construtivo foi o CEZ-2 que indica a redução de 6,98% de energia.

Com relação à estratégia de aprimoramento e ampliação do sistema fotovoltaico, o cenário CEZ-5, contribui para a redução do consumo de energia ao gerar energia na própria edificação através do *retrofit* da usina existente na cobertura da edificação e o acréscimo de *carpot* solares na área do estacionamento, prevendo maior área para geração de energia por meio das coberturas das vagas de garagem, contribuindo ainda para a proteção dos veículos. Esse cenário gerou uma economia de energia de 21,18% em relação ao cenário padrão CEZ-0.

O cenário CEZ-6 apresenta uma alternativa para a redução do uso de energia após a análise de gestão da eficiência do consumo de energia, considerando a alteração do cronograma de uso da edificação, resultando em melhoria de 6,39% em relação ao cenário padrão CEZ-0.

As combinações das estratégias são apresentadas nas tabelas 4.35, 4.36 e 4.37.

Tabela 4.35 – Combinação das estratégias de redução de energia –

Cenários CEZ-1, CEZ5 e CEZ-6

Cenário	Descrição	Tipo de intervenção	Economia de energia (%)	Redução do consumo energético (kWh/m ² /ano)
CEZ-1	Alteração na composição do envelope	estrutural	6,82%	-9,25
CEZ-5	Ampliação do sistema fotovoltaico	estrutural	21,18%	-30,41
CEZ-6	Alteração do cronograma de uso	operacional	6,39%	-9,17
Economia possível com os 3 cenários			34,39%	-48,83 kWh/m²/ano

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4.36 – Combinação das estratégias de redução de energia –

Cenários CEZ-2, CEZ5 e CEZ-6

Cenário	Descrição	Tipo de intervenção	Economia de energia (%)	Redução do consumo energético (kWh/m ² /ano)
CEZ-2	Alteração na composição do envelope	estrutural	6,98%	-9,48
CEZ-5	Ampliação do sistema fotovoltaico	estrutural	21,18%	-30,41
CEZ-6	Alteração do cronograma de uso	operacional	6,39%	-9,17
Economia possível com os 3 cenários			34,55%	-49,06 kWh/m²/ano

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 4.37 – Combinação das estratégias de redução de energia–
Cenários CEZ-3, CEZ5 e CEZ-6

Cenário	Descrição	Tipo de intervenção	Economia de energia (%)	Redução do consumo energético (kWh/m²/ano)
CEZ-3	Alteração na composição do envelope	estrutural	6,70%	-9,10
CEZ-5	Ampliação do sistema fotovoltaico	estrutural	21,18%	-30,41
CEZ-6	Alteração do cronograma de uso	operacional	6,39%	-9,17
Economia possível com os 3 cenários			34,27%	-48,68 kWh/m²/ano

Fonte: Elaborado pela autora.

Pelas tabelas 4.35, 4.36 e 4.37 é possível verificar que a redução do consumo de energia total pela adoção de conjuntos de estratégias variou entre 34,37 e 34,55%. A maior redução foi a obtida a partir da combinação dos cenários CEZ-2 + CEZ-5 + CEZ-6 possibilitando a redução de 34,55% do consumo anual de energia da edificação.

O consumo da edificação atual é de 135,60 kWh/m² e, portanto, pertencente à categoria de nível C em termos de eficiência energética, adotando o modelo proposto por Veloso (2017). As estratégias obtidas podem gerar economia, reduzindo o consumo anual de 48,83 a 49,06.

Tabela 4.38 – Resumo das Combinações dos cenários para redução do consumo de energia.

Redução do consumo por metro quadrado		
Cenário base		135,60 kWh/m²
Cenário	Redução (kWh/m²)	ReduçãoTotal (kWh/m²)
CEZ-1+CEZ5+CEZ6	- 48,83	86,77
CEZ-2+CEZ5+CEZ6	-49,06	86,54
CEZ-3+CEZ5+CEZ6	-48,68	86,92

Fonte: Elaborado pela autora.

Portanto a edificação passaria a consumir de 86,92 a 86,54 kWh/m². Com essa redução, o nível de eficiência da edificação, passaria ao nível B, considerado o *benchmarking* das edificações com modo misto de condicionamento de ar de Veloso (2017). O resumo da redução de energia dos cenários é apresentado nas tabelas 4.39 a 4.41

Tabela 4.39: Total da economia de energia cenários CEZ-1, CEZ-5 e CEZ-6.

Cenário	Descrição	Tipo de intervenção	Economia de energia kWh/ano
CEZ-1	Alteração na composição do envelope	estrutural	376.629,63
CEZ-5	Ampliação do sistema fotovoltaico	estrutural	1.238.200,00
CEZ-6	Alteração do cronograma de uso	operacional	373.669,39
Economia possível com os melhores cenários de estudo			1.998.499,02

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4.40: Total da economia de energia cenários CEZ-2, CEZ-5 e CEZ-6

Cenário	Descrição	Tipo de intervenção	Economia de energia kWh/ano
CEZ-2	Alteração na composição do envelope	estrutural	385.604,12
CEZ-5	Ampliação do sistema fotovoltaico	estrutural	1.238.200,00
CEZ-6	Alteração do cronograma de uso	operacional	373.669,39
Economia possível com os melhores cenários de estudo			1.997.473,51

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4.41: Total da economia de energia cenários CEZ-3, CEZ-5 e CEZ-6.

Cenário	Descrição	Tipo de intervenção	Economia de energia kWh/ano
CEZ-3	Alteração na composição do envelope	estrutural	370.229,02
CEZ-5	Ampliação do sistema fotovoltaico	estrutural	1.238.200,00
CEZ-6	Alteração do cronograma de uso	operacional	373.669,39
Economia possível com os melhores cenários de estudo			1.982.098,41

Fonte: Elaborado pela autora.

Sendo assim, com a adoção da combinação das estratégias dos cenários, a edificação teria uma economia de 1.982.098,41 a 1.997.473,51kWh em um ano.

Por outro lado, a Avaliação do Ciclo de Vida da edificação apresentou resultados das emissões de carbono pela edificação para as fases pré-uso (carbono incorporado) e fase de uso (carbono operacional). A etapa pós-uso não foi objeto deste estudo. No entanto, diversos autores

estimam que a participação desta etapa seja de aproximadamente 3% (Tavares, 2006, Paulsen e Sposto, 2013; Pedroso, 2015), sendo este indicador utilizado para simulação de resultados.

A tabela 4.42 apresenta as emissões de carbono obtidas pela ACV da edificação ao longo do ciclo de vida de duas etapas de avaliação: pré-uso (carbono incorporado), uso (carbono operacional) e pós-uso (estimado).

Tabela 4.42: Resumo da emissão de carbono (medida em KgCO₂eq) do edifício avaliado.

Emissão de carbono, em KgCO ₂ eq				
	1 ano	%	50 anos	%
Etapa pré-uso	10.143.293,60	85,36	632.025.445,78	87,90
Etapa operacional	1.392.561,65	11,72	69.628.082,50	9,68
Etapa pós uso	346.075,65	2,92	17.303.782,50	2,42
Total de emissões	11.881.930,90	100,00	718.957.311,00	100,00

Fonte: Elaborado pela autora.

As emissões de CO₂ da fase pré-uso representam o percentual de 85,36% e em 50 anos, esse percentual foi calculado em 87,90%, o que ocorre pela necessidade de manutenções, substituições e renovações. Por outro lado, o percentual de emissão de carbono de fase operacional, representa anualmente 11,72% e no decorrer de 50 anos, tende a diminuir, ficando em 9,68%. A fase de pós-uso também apresentou redução no cenário de vida útil da edificação passando do percentual de 2,92% para 2,42%.

Dessa forma, é possível inferir que os resultados da pesquisa diferem dos resultados obtidos por Ramesh *et al.* (2010) e de Asdrubali *et al.* (2013) que apontam que a emissão de carbono incorporado da fase de pré-uso representa o quantitativo percentual de 10 a 20% de todo o ciclo de vida e o carbono operacional representa 80-90%. No caso deste estudo, a emissão de carbono incorporado representa quase 90% e a emissão de carbono operacional representa menos de 10%, conforme demonstrado na tabela 4.42. No entanto, os resultados se alinham com a informação extraída dos estudos de Metz *et al.* (2007) que afirmam que, para edifícios tradicionais em países em desenvolvimento, a energia incorporada pode ser alta se comparada à energia de operação, uma vez que a energia da etapa operacional é baixa nestes países.

Com a adoção das estratégias dos melhores cenários CEZ-2, CEZ-5 e CEZ-6 representam uma economia de energia de 49,06%. Com relação às estratégias que visaram a redução das emissões operacionais da edificação, é preciso considerar o impacto da implantação dessas estratégias e a influência na emissão de carbono operacional no ciclo de vida da edificação.

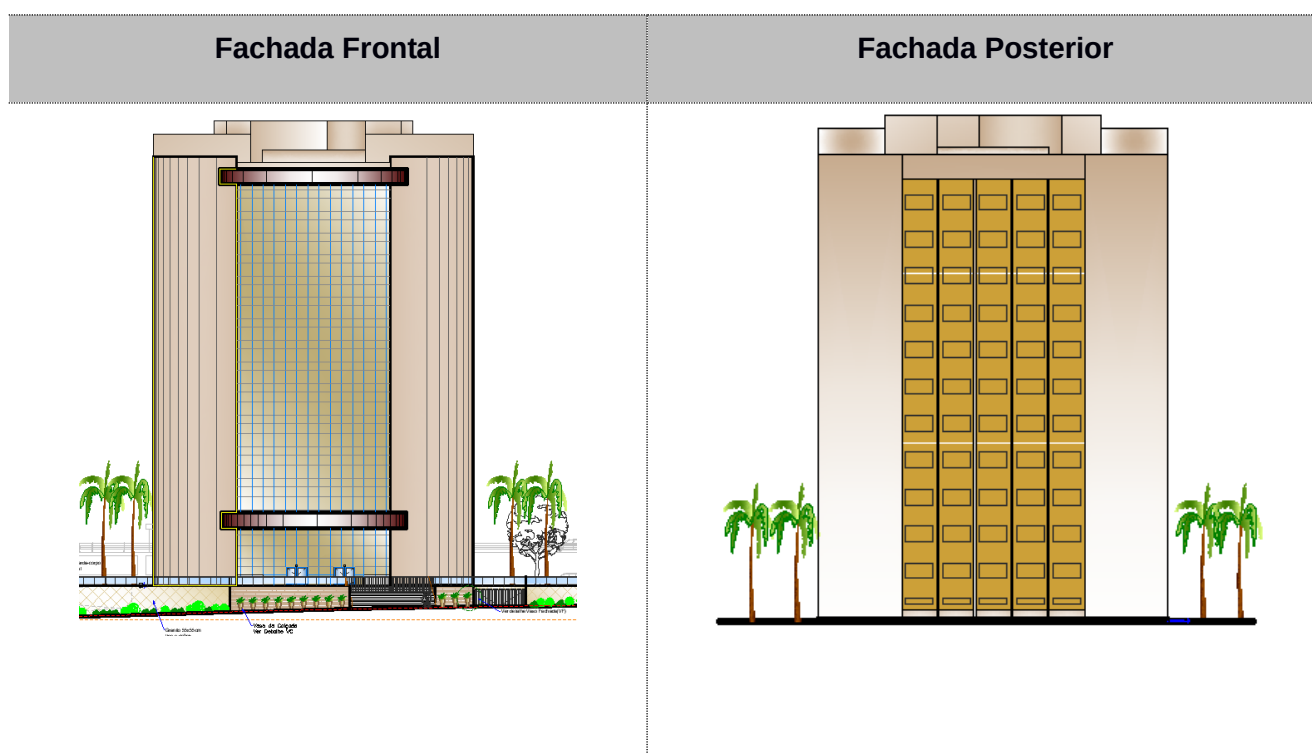
Através de uma ACV simplificada foram calculadas as emissões CO₂ dos cenários de estudos (CEZ-1, CEZ-2, CEZ-3, CEZ-4, CEZ-5) que consistem em modificações estruturais, que

consomem materiais. O objetivo é avaliar o desempenho ambiental de cada sistema testado anteriormente.

Com base na descrição dos componentes utilizados em cada cenário, foi determinada a quantidade de materiais necessários para implementar as estratégias. Assim, no quesito materiais, foram calculados os consumos de matéria-prima utilizando dados primários. No quesito energia considerou-se a referência da energia embutida (EE) nos materiais de construção de diversas fontes, especificadas em cada tabela. Já para o aspecto das emissões de CO₂ foram estimadas com base em dados de fontes consultadas, também especificadas nas tabelas.

A implantação das estratégias considerou a área de fachada da edificação estudada conforme o projeto arquitetônico (Figuras 4.23 e 4.24).

Figura 4.23 - Fachadas frontal e posterior da edificação.



Fonte: Acervo TJGO.

O cálculo do material do sistema de envidraçamento considerou a substituição do vidro frontal, cuja área foi calculada em 831,32 m².

O envelope opaco foi contabilizado excluindo-se as áreas já protegidas por sombreamento solar (brezes metálicos), como se pode observar no centro da fachada posterior e em quase a totalidade das fachadas laterais. A área a receber as estratégias foi calculada em 2.894,04 m².

Figura 4.24 - Fachadas laterais.

Fachadas Laterais



Fonte: Acervo TJGO.

Na tabela 4.43 estão resumidas as informações dos cenários CEZ-1, CEZ-2 e CEZ-3 que alteram a composição do envelope, relativas à área, espessura de aplicação dos materiais, volume, peso específico e o peso total de cada um dos materiais empregados. Os dados de peso específico foram obtidos através de várias fontes, conforme identificado na tabela 4.43.

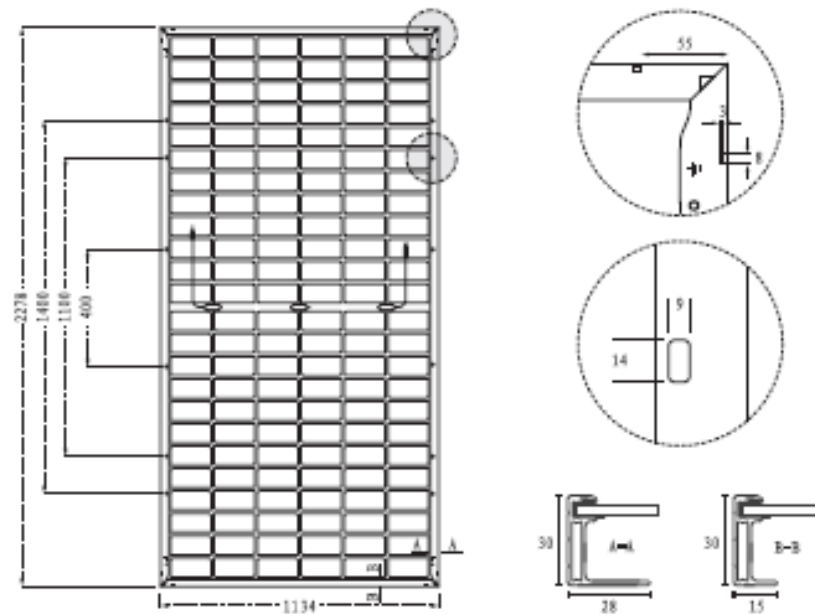
Tabela 4.43 - Cálculo do consumo de matérias-primas para os cenários CEZ-1, CEZ-2 e CEZ-3 .

Quantitativo dos materiais						
Cenário CEZ-1						
Tipo de material	Quant. (m2)	Espessura (m)	Volume (m³)	Peso específico Kg/m³	Kg	Fonte
Painel de vidro duplo (2 x 6mm)	831,32	0,012	9,975	2.500 x 2	49.875,00	Sucrana
Revestimento com acrílico elastomérico (refletividade 0,9);	2.894,04	0,00060	1,736	1070	1.857,52	Sucrana
Isolamento térmico de poliestireno expandido (EPS), 70 mm;	2.894,04	0,007	20,25	55	1.113,75	Tavares (2006)
PCM 25	2.894,04	0,005	14,47	900	13.023,18	Kuznik e Virgone (2009)
Cenário CEZ-2						
Tipo de material	Quant. (m2)	Espessura (m)	Volume (m³)	Peso específico Kg/m³	Kg	Fonte
Painel de vidro duplo (2 x 6mm)	831,32	0,012	9,975	2.500,00 x 2	49.875,00	Sucrana
Revestimento externo com pintura poliuretano acrílico	2.894,04	0,00060	1,736	1.070,00	1.857,97	Sucrana
Espuma de poliuretano	2.894,04	0,006	17,364	35	607,74	Galvão <i>et al.</i> (2015) Tavares (2006)
PCM 28	2.894,04	0,005	14,47	900	13.023,18	Kuznik e Virgone (2009)
Cenário CEZ-3						
Tipo de material	Quant. (m2)	Espessura (m)	Volume (m³)	Peso específico Kg/m³	Kg	Fonte
Painel de vidro duplo (2 x 3mm)	831,32	0,006	4,987	2500 x 2	24.939,60	Sucrana
Revestimento isolante refletivo de calor, com refletividade 0,84,	2.894,04	0,0006	1,764	1.070,00	1.857,97	Sucrana
Parede externa com isolamento com fibra de vidro, com espessura de 80 mm	2.894,04	0,008	23,15	32	740,87	Tavares (2006)
PCM 35	2.894,04	0,005	14,47	900	13.023,18	Kuznik e Virgone (2009)

Fonte: elaborado pela autora.

Para o cálculo do material a ser empregado na estratégia CEZ-5, que contempla o *retrofit* e o *upgrade* do sistema fotovoltaico existente, foi adotado, para efeito do cálculo, o tamanho da placa e o percentual de cada material que compõe a placa conforme apresentado na figura 4.25, com a dimensão da placa de 2,278 x 1,134 m.

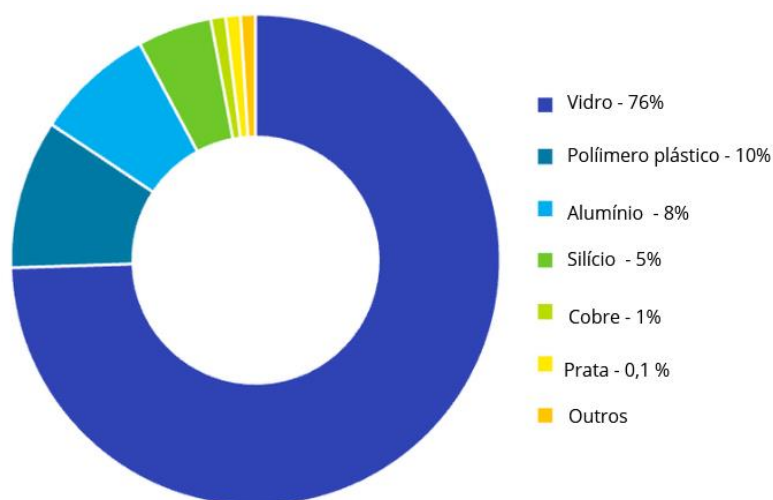
Figura 4.25 – Detalhe da placa fotovoltaica adotada na simulação (DHN-72x16 / DG).



Fonte: DAH-Solar.

O percentual do material que compõe cada placa fotovoltaica é apresentado na figura 4.26.

Figura 4.26 - Composição de materiais da placa solar fotovoltaica utilizada no presente estudo.



Fonte: Institute for Sustainable Futures (2019) e Union of Concerned Scientists (2022).

Para a estrutura do *carpot* solar, em aço galvanizado a fogo, para a instalação da cobertura em placas fotovoltaicas, foi considerado o modelo conforme a figura 4.27.

Figura 4.27 - Estrutura para *carpot* em aço galvanizado.



Fonte: NZI estruturas

Sendo assim, pelo peso da placa de 32 Kg e o peso a ser utilizado para o aço galvanizado, equivalente a 27 toneladas para a estrutura do *carpot* solar, foi possível calcular o percentual de participação de cada material no cálculo da quantidade de materia-prima, conforme apresentado na tabela 4.44.

Tabela 4.44: Cálculo do consumo de matérias-primas do cenário CEZ-5.

Cálculo da quantidade de materiais necessários						
Tipo de material	Quant. (m2)	Espessura (m)	Volume (m³)	Peso específico Kg/m³	Kg	Fonte
Cenário CEZ-5						
Vidro duplo	2,278 x 1,134 (placa) 2,57 m² x 957 placas 2.459,49	0,002*	4,91	2500**	12.297,45	*DAH Solar **Sucrana
Polímero plástico		-			1.618,08	
Alumínio		-			1,294,46	
Silício		-			809,04	
Cobre		-			161,80	
Aço - chapa galvanizada para a estrutura dos <i>Carpots</i> solares		-			27.000,00	NZI estruturas

Fonte: Elaborado pela autora.

Utilizando os dados da quantidade de material necessário, obtido na tabela 4.44, foi calculada a energia embutida em cada insumo, conforme apresentado na tabela 4.45 para os cenários CEZ-1, CEZ-2 e CEZ-3.

Tabela 4.45 – Energia embutida dos materiais presentes nos cenários CEZ-1, CEZ-2 e CEZ-3.

Cenário CEZ-1			
Material	Massa total (kg)	EE (MJ/kg)	EE total (MJ)
Painel de vidro duplo (2 x 6mm)	49.875,00	26,20	1.306.835,04
Superfície externa com revestimento com acrílico elastomérico (refletividade 0,9)	1.857,52	61,00	49.451,00
Isolamento térmico de poliestireno expandido (EPS), 70 mm	1.113,75	112,00*	124.740,00
PCM 25	13.023,18	52,00	677.205,36
Total do cenário CEZ-1			2.158.231,40
Cenário CEZ-2			
Material	Massa total (kg)	EE (MJ/kg)	EE total (MJ)
Painel de vidro duplo (2 x 6mm)	49.875,00	26,20	1.306.835,04
Revestimento externo com pintura poliuretano acrílico	1.857,97	61,00	49.451,00
Espuma de poliuretano	607,74	74,00	44.972,76
PCM 28	13.023,18	52,00	677.205,36
Total do Cenário CEZ-2			2.078.464,16
Cenário CEZ-3			
Material	Massa total (kg)	EE (MJ/kg)	EE total (MJ)
Painel de vidro duplo (2 x 3mm)	24.939,60	26,20	653.417,52
revestimento isolante refletivo de calor, com refletividade 0,84,	1.857,97	61,00	113.336,17
Parede externa com isolamento com fibra de vidro, com espessura de 80 mm	740,87	768	568.988,16
PCM 35	13.023,18	52,00	677.205,36
Total do Cenário CEZ-3			2.012.947,21

Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de *Tavares (2006).

Os dados de energia embutida para o cenário CEZ-1 foi de 2.158.231,40 MJ; para o cenário CEZ-2 foi de 2.078.464,16; e para o cenário CEZ-3 foi de 2.012,947,21 MJ.

O cálculo da energia embutida para o cenário CEZ-5 é apresentado na tabela 4.46. Não foi possível obter dados para o elemento silício.

Tabela 4.46 – Energia embutida para os materiais do cenário CEZ-5.

Cenário CEZ-5			
Material	Massa total (kg)	EE (MJ/kg)	EE total (MJ)
Placas fotovoltaicas			
Vidro 2mm	12.297,45	26,20	322.193,19
Polímero plástico	1.618,08	135,00	218.440,80
Alumínio	1,294,46	210,00	271.836,60
Silício	809,04	----	---
Cobre	161,80	75,00	12.135,00
Total EE (MJ) das placas fotovoltaicas			824.605,59
Estrutura para Carpot (Aço Chapa Galvanizada)	27.000,00	33,80	912.600,00
Total do Cenário CEZ-5			1.737.205,59

Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de *Tavares (2006).

Para o cenário CEZ-5 a energia embutida foi calculada em 1.737.205,59 MJ. Com isso, é possível observar que o cenário que apresenta a menor energia embutida é o cenário CEZ-5, que contempla o upgrade e o retrofit do sistema solar fotovoltaico da edificação conforme apresentado na Tabela 4.47 e o cenário que tem a maior energia embutida é o cenário CEZ-1.

Tabela 4.47 – Total de energia embutida nos materiais dos cenários de estudo.

Total de energia embutida		Nível de eficiência	
Cenário	EE total (MJ)		
CEZ-1	2.158.231,40		Nível A
CEZ-2	2.078.464,16		Nível B
CEZ-3	2.012.947,21		Nível C
CEZ-5	1.737.205,39		Nível D
			Nível E

Fonte: Elaborado pela autora.

Para o cálculo das emissões de CO₂, são apresentadas na tabela 4.48 as emissões de CO₂ de cada insumo dos cenários CEZ-1, CEZ-2 e CEZ-3, bem como as fontes de dados consultadas.

Tabela 4.48 – Cálculo da emissão dos materiais dos cenários CEZ-1, CEZ-2 e CEZ-3.

Cenário CEZ-1			
Material	Massa total (T)	Emissão (Kg CO ₂ /t)	Emissões totais de Kg CO ₂
Painel de vidro duplo (2 x 6mm)	49,87	1.790,00**	89.267,30
Revestimento com acrílico elastomérico (refletividade 0,9);	1,857	4.170,00**	7,74
Isolamento térmico de poliestireno expandido (EPS), 70 mm;	1,113	3.090,00**	3.439,17
PCM 25	13,023	1.529,00*	19.912,16
Total do cenário CEZ-1			112.626,37
Cenário CEZ-2			
Material	Massa total (T)	Emissão (Kg CO ₂ /t)	Emissões totais de Kg CO ₂
Painel de vidro duplo (2 x 6mm)	49,87	1.790,00*	89.267,30
Revestimento externo com pintura poliuretano acrílico	1,857	2.040,00**	3.788,28
Espuma de poliuretano	0,607	2.770,00**	1.681,39
PCM 28	13,023	1.529,00*	19.912,16
Total do cenário CEZ-2			114.649,13
Cenário CEZ-3			
Material	Massa total (T)	Emissão (Kg CO ₂ /t)	Emissões totais de Kg CO ₂
Painel de vidro duplo (2 x 3mm)	24,93	1.790,00**	44.624,70
Revestimento isolante refletivo de calor, com refletividade 0,84,	1,857	2.040,00**	3.788,28
Parede externa com isolamento com fibra de vidro, com espessura de 80 mm	0,740	780,00**	577,20
PCM 35	13,023	1.529,00*	19.912,16
Total do cenário CEZ-3			68.902,34

Fonte: Elaborado pela autora, baseado em *De Gracia *et al.* (2010) **Cinark (2025).

As emissões de CO₂ de cada insumo do cenário CEZ-5 são apresentadas na tabela 4.49, bem como as fontes de dados consultadas.

Tabela 4.49 – Cálculo da emissão dos materiais do cenário CEZ-5.

Cenário CEZ-5			
Material	Massa total (T)	Emissão (Kg CO ₂ /t)	Emissões totais de Kg CO ₂
Placas fotovoltaicas			
Vidro 2mm	12,29	1.790,00	21.999,10
Polímero plástico	1,61	3.090,00	4.974,90
Alumínio	1,29	1.600,00	2.064,00
Silício	8,09	----	-----
Cobre	0,16	1.520,00	243,20
Estrutura para <i>carpot</i> (aço chapa galvanizada)	27,00	690,00	18.630,00
			47.911,20

Fonte: Cinark. Elaborado pela autora.

Sendo assim, foi possível observar que o cenário que apresenta a menor emissão de CO₂ pelos materiais é o cenário CEZ-5 com 47.911,20 Kg CO₂-eq, seguido pelo cenário CEZ-3, com 68.902,34 KgCO₂-eq e os cenários CEZ-1 e CEZ-2 que são os maiores emissores, respectivamente, com 112.626,37 e 114.649,13 KgCO₂-eq (Tabela 4.50).

Tabela 4.50 – Resultados da emissão de carbono pelos materiais dos cenários de estudo.

Total de Carbono incorporado		Nível de eficiência	
Cenário	Kg CO ₂ -eq		
CEZ-1	112.626,37		Nível A
CEZ-2	114.649,13		Nível B
CEZ-3	68.902,34		Nível C
CEZ-5	47.911,20		Nível D
			Nível E

Fonte: Elaborado pela autora.

Com relação ao carbono incorporado, ao analisar os resultados, o cenário de alteração do envelope responsável por emitir menos carbono é o cenário CEZ-3, em grande parte devido ao sistema de envidraçamento, que nos outros dois cenários foram usados painéis de vidro duplo 6 mm e no cenário CEZ-3 os vidros possuem espessura de 3 mm cada. A comparação entre os cenários e o total de carbono incorporado com a adoção dos melhores cenários pode ser observada na tabela 4.51.

Tabela 4.51 – Resultados carbono incorporado na composição dos cenários.

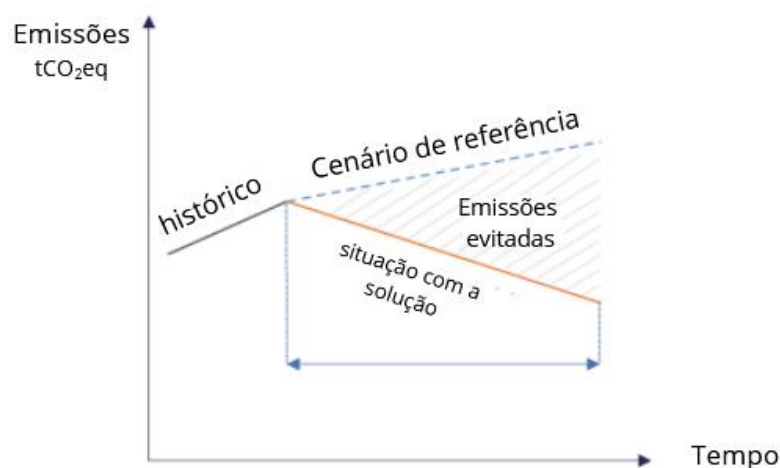
Resumo do cálculo de carbono incorporado		
Cenários	Total de emissão de CO ₂	
Estratégias de reabilitação arquitetônica cenários 1 e 5	160.537,57 KgCO ₂ eq	
Estratégias de reabilitação arquitetônica cenários 2 e 5	162.560,33 KgCO ₂ eq	
Estratégias de reabilitação arquitetônica cenários 3 e 5	116.813,54 KgCO ₂ eq	Melhor cenário

Fonte: Elaborado pela autora.

Existem diversas ferramentas e métricas disponíveis para mensurar a eficácia das iniciativas sugeridas, além de apoiar a tomada de decisões fundamentadas em análises relacionadas ao desempenho ambiental e energético. Um dos indicadores significativos é o cálculo das emissões evitadas, que visa avaliar a influência da redução de CO₂ equivalente. De maneira simplificada, emissões evitadas referem-se à quantidade de poluentes que seriam liberados se determinada ação ou intervenção não fosse implementada.

De acordo com o guia do *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD, 2023), entender as emissões evitadas, além das emissões de gases de efeito estufa (GEE) relacionadas, pode ajudar no planejamento e na tomada de decisões em longo prazo, oferecendo uma visão mais completa do impacto climático das escolhas e soluções arquitetônicas. Um dos objetivos de analisar as emissões evitadas é entender e direcionar esforços para promover as mudanças necessárias em todo o sistema, com o intuito de acelerar a descarbonização. O conceito de emissões evitadas é representado na figura 4.28.

Figura 4.28 - Definição de emissões evitadas.



Fonte: WBCSD (2023).

As emissões evitadas podem ser definidas como o impacto positivo nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) gerado por uma solução, quando comparado a um cenário alternativo onde essa solução não seria aplicada. Em outras palavras, uma emissão evitada representa a diferença entre as emissões de GEE que ocorrem ou ocorrerão com a solução e aquelas que teriam ocorrido sem ela, no cenário de referência. Para essa análise, as emissões de GEE tanto da solução quanto do cenário de referência serão avaliadas ao longo do ciclo de vida. As emissões evitadas se enquadram principalmente na categoria de contabilidade de intervenção.

O cálculo das emissões evitadas em uma estratégia de descarbonização envolve a comparação das emissões de um cenário de base. O cenário base (consumo real), conforme os indicadores de consumo da edificação com relação à eletricidade, foi calculado em 4.037.354,87 kWh/ano. Esse quantitativo gera 946.457,03 KgCO₂eq, demonstrando o impacto de aquecimento global relacionado à energia consumida na edificação em um ano.

Se forem adotadas as estratégias dos cenários 2, 5 e 6, o consumo de eletricidade passará a ser de 2.319.795,75 kWh/ano, podendo-se considerar que serão evitadas 436.726,36 KgCO₂eq ao ano devido a essa redução no consumo de energia, conforme detalhado na tabela 4.52.

Tabela 4.52 – Resultados do cálculo do carbono operacional no caso de implantação dos cenários CEZ-2, CEZ-5 E CEZ-6.

Carbono operacional relativo à eletricidade						
	Quantitativo	Unidade	Fator de impacto	Unidade	Carbono operacional	Unidade
Cenário Base (Eletricidade)	4.307.354,87	kWh/ano	0,219730*	kgCO ₂ eq/kWh	946.457,03	KgCO ₂ eq
Adoção dos cenários 2, 5 e 6	- 1.997.473,51	kWh/ano	0,219730*	kgCO ₂ eq/kWh	- 438.904,85	KgCO ₂ eq
Carbono operacional relativo à eletricidade (1 ano)	2.309.881,36	kWh/ano	0,219730*	kgCO ₂ eq/kWh	507.550,23	KgCO ₂ eq
Carbono Operacional relativo à eletricidade em 50 anos						
Cenário Base (Eletricidade)					47.322.851,50	KgCO ₂ eq
Adoção dos cenários 2, 5 e 6 (50 anos)				Redução em 50 anos	- 21.836,318,00	KgCO ₂ eq
					25.486.533,50	KgCO ₂ eq

Fonte: * Ecoinvent. Elaborado pela autora.

Como se pode observar que, em 50 anos, seriam evitadas, com as estratégias adotadas no cenário 2, 5 e 6 juntos, a emissão de 21.836,31 kgCO₂eq.

4.6 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

Nesta etapa da pesquisa, denominada otimização multiobjetivos, foi possível unir os resultados referentes às duas etapas anteriores: análise do desempenho energético e análise do desempenho ambiental. Como recorte da pesquisa, foram considerados, então, os três cenários de alteração do envelope construtivo (CEZ-1, CEZ-2 e CEZ-3), o cenário de integração de energia solar fotovoltaica (CEZ-5) e o cenário de avaliação da gestão da eficiência do uso da energia e do comportamento dos usuários (CEZ-6). O cenário CEZ-4 foi desconsiderado por já estar incluído no cenário CEZ-5.

No âmbito da otimização foram considerados os indicadores de consumo de energia por metro quadrado e as emissões de CO₂. Para efeito de comparação, foram tomados os resultados de cada cenário de estudo, em termos de redução da utilização da energia elétrica (em kWh/ano),

quantidade de energia embutida (EE) para a produção dos materiais utilizados na implantação dos cenários (em MJ), quantidade de emissão de CO₂ para a produção dos materiais necessários para a implantação dos cenários (em KgCO₂eq) e quantidade de emissões evitadas (em KgCO₂eq), ao ano. Para efeito de cálculo do carbono incorporado, o cenário CEZ-6 não foi considerado tendo em vista que é apenas uma mudança no cronograma de uso, não se fazendo necessária a utilização de materiais. Sendo assim, o cenário CEZ-6 é considerado apenas com relação ao cálculo do carbono operacional.

A tabela 4.53 apresenta uma escala em função dos valores obtidos em cada cenário. Essa classificação permite a comparação do desempenho dos cenários entre si, em função do nível de eficiência relativo aos indicadores de sustentabilidade (energéticos e ambientais), sendo divididos em 5 cores. Os valores mais favoráveis são representados pela cor verde (níveis A e B), os menos favoráveis com as cores laranja e vermelha (níveis D e E), e os valores intermediários (nível C) são representados pela cor amarela.

Tabela 4.53 – Classificação dos resultados em termos de nível de eficiência da estratégia quanto aos indicadores de sustentabilidade.

	Nível E
	Nível D
	Nível C
	Nível B
	Nível A

Fonte: Elaborado pela autora.

A tabela 4.54 reúne os resultados das análises relacionadas à redução de energia (kWh/ano), a energia embutida para a produção de materiais (KgCO₂eq), a emissão de CO₂ para a produção dos materiais (MJ) e as emissões evitadas (KgCO₂eq). Os resultados apresentam as situações mais favoráveis em termos de redução do consumo de energia e redução de emissões de gases de efeito estufa, sendo estes classificados em termos de nível de eficiência da estratégia quanto aos indicadores de sustentabilidade.

Tabela 4.54 – Classificação dos resultados quanto aos indicadores de sustentabilidade.

Cenário				
Cenário	Redução de energia (kWh/ano)	Energia embutida (MJ)	Emissão de CO ₂ para produção dos materiais (KgCO ₂ eq)	Emissões evitadas (KgCO ₂ eq) por ano
Cenário CEZ-1	- 376.629,63	2.158.231,40	112.626,37	82.756,82
Cenário CEZ-2	- 385.604,12	2.078.464,16	114.649,13	84.728,79
Cenário CEZ-3	-370.229,02	2.012.947,21	68.902,34	81.350,42
Cenário CEZ-5	-1.238.200,00	1.737.205,39	47.911,20	272.069,68
Cenário CEZ-6	373.669,39	----	----	82.106,37

Fonte: Elaborado pela autora.

Com relação ao cálculo da energia embutida, observa-se que o melhor cenário, ou seja, o que menos consome energia embutida, é o cenário CEZ-5, que considera o *retrofit* e o *up-grade* do sistema solar fotovoltaico, resultando em 1.737.205,39 MJ. Este também é o melhor cenário, em termos de economia de energia, tendo em vista que, com ele, foi prevista uma geração de energia de 1.238.200,00 kWh por ano. Essa energia, pelo fato de o sistema fotovoltaico ser interligado à rede (*on-grid*), representa a energia, em kWh produzida, que será descontada do consumo.

Com relação aos parâmetros do envelope construtivo, o melhor cenário, em termos de menos energia embutida, foi o cenário CEZ-3, com 2.012.947,21 MJ, correspondente ao cenário que contempla menos quantidade de vidro, ou seja, os vidros utilizados são menos espessos do que o dos outros cenários.

Quanto à emissão de carbono pelos materiais adotados nas estratégias, pode-se perceber que o cenário CEZ-5 foi o que apresentou o melhor resultado, com 47.911,20 KgCO₂-eq, enquanto o cenário CEZ-3, apresentou o segundo melhor resultado, com 68.902,34 KgCO₂-eq, influenciado, principalmente, pela utilização de menor quantidade de vidro. Em termos de emissão de carbono, o pior cenário foi o CEZ-2, que apresentou o melhor resultado em economia de energia. Com relação à emissão de CO₂ entre os cenários que contemplam a alteração do envelope, o cenário CEZ-2 representou 66,39% de aumento em relação ao cenário CEZ-3. No entanto, em termos de economia de energia, o cenário CEZ-3 apresentou uma diferença mínima, ou seja, em torno de 0,28%.

Pode-se considerar que a quantidade de vidro nos cenários impactou nos resultados finais, portanto, considerando os resultados da análise ambiental e energética, apresenta-se mais viável a escolha do cenário CEZ-3 entre os cenários que alteraram a composição do envelope, tendo em vista o menor impacto e a quantidade de energia economizada.

Pela tabela de classificação do nível de eficiência das estratégias, o cenário CEZ-6, por não necessitar da produção de materiais para a sua implementação, e, conseqüentemente, não apresentar energia embutida e nem emissões de CO₂, é um cenário bastante favorável, apesar de apresentar uma das menores taxas de redução de consumo de energia e a menor redução de emissões. Além disso, é um cenário que pode ser adotado, em combinação com as demais estratégias. A sua implementação depende apenas da mudança do horário de desligamento do ar condicionado. A tabela 4.55 classifica os cenários conforme as faixas de benefícios de sustentabilidade avaliados, considerando os níveis e cores propostos na tabela 4.53.

Tabela 4.55 – Classificação dos cenários em faixas de benefícios em sustentabilidade.

			Cenário CEZ-1	
			Cenário CEZ-2	
			Cenário CEZ-3	
	Cenário CEZ-5			
		Cenário CEZ-6		

Fonte: Elaborado pela autora.

O cenário CEZ-5 (*upgrade* e *retrofit* da usina solar fotovoltaica ligada na rede) é o cenário mais favorável, em termos de economia de energia e emissões evitadas. Para a sua implementação, existe consumo de materiais e, portanto, apresenta energia embutida e emissão de CO₂ para a produção de materiais. Este se apresenta como o melhor cenário, visto que a energia embutida na produção dos materiais para a sua implementação pode ser compensada com o menor consumo de energia e de emissões, ao longo do ciclo de vida do edifício.

Entre os cenários que consideraram a alteração do envelope construtivo (CEZ-1, CEZ-2 e CEZ-3), pela classificação acima, ficaram no mesmo nível de sustentabilidade. Para o desempate, esses cenários foram novamente avaliados, em termos de redução de energia (kWh/ano) para um e cinquenta anos, consumo de energia (MJ) e materiais (kgCO₂eq) e emissões evitadas (kgCO₂eq) para um e cinquenta anos, conforme apresentados na tabela 4.56.

Tabela 4.56 – Comparação do nível de sustentabilidade entre os cenários CEZ-1, CEZ-2 e CEZ-3.

	Redução de energia (1 ano) (kWh/ano)	Redução de energia (50 anos) (kWh)	Energia embutida (MJ)	Emissão de CO ₂ para produção materiais (KgCO ₂ eq)	Emissões evitadas (1 ano) KgCO ₂ eq	Emissões evitadas (50 anos) KgCO ₂ eq
Cenário CEZ-1	- 376.629,63	- 18.831.481,50	2.158.231,40	112.626,37	82.756,82	4.137.841,00
Cenário CEZ-2	- 385.604,12	- 19.280.206,00	2.078.464,16	114.649,13	84.728,79	4.236.439,50
Cenário CEZ-3	- 370.229,12	- 18.511.451,00	2.012.947,21	68.902,34	81.350,42	4.067.521,00

Fonte: Elaborado pela autora.

Com a nova avaliação do nível de sustentabilidade, tem-se a classificação apresentada na tabela 4.57.

Tabela 4.57 – Classificação dos cenários em faixas de benefícios em sustentabilidade

			Cenário CEZ-1	
Cenário CEZ-2				
			Cenário CEZ-3	

Fonte: Elaborado pela autora.

Dessa forma, o cenário CEZ-2 foi o que apresentou melhores resultados, em termos de sustentabilidade, em grande parte influenciada pela maior redução de consumo de energia da edificação e foi o mais vantajoso, em nível de sustentabilidade, para a edificação.

Tendo em vista a possibilidade de adoção de 3 cenários combinados, um para a alteração do envelope, um para a implantação de energia solar e o outro de adequação do cronograma de uso, a tabela 4.58 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.58 – Contabilização dos resultados relacionados à combinação dos melhores cenários

Carbono incorporado e operacional dos cenários CEZ-2, CEZ-5 e CEZ-6				
	Redução de energia (kWh/ano)	Energia embutida (MJ)	Emissão de CO ₂ para produção dos materiais (KgCO ₂ eq)	Emissões evitadas (KgCO ₂ eq) por ano
Cenário CEZ-2	385.604,12	2.078.464,16	114.649,13	84.728,79
Cenário CEZ-5	1.238.200,00	2.561.815,38	77.284,26	272.069,68
Cenário CEZ-6	373.669,39	-----	-----	82.106,37
Total em 1 ano	1.997.473,51	4.640.279,54	191.933,39	438.904,84
Total em 50 anos	99.873.675,50	----	-----	21.945.242,00

Fonte: Elaborado pela autora.

Assim, é possível reduzir o uso de eletricidade em 1.997.473,51 kWh/ano e 99.873.675,50 kWh, em cinquenta anos. A análise indica que é possível evitar a emissão de 438.904,84 KgCO₂eq e 21.945.242,00 KgCO₂eq., em um ano e em cinquenta anos, respectivamente.

Considerando o resultado da ACV, com relação ao carbono incorporado e ao carbono operacional, estimando o carbono da etapa pós-uso em 3%, conforme referências bibliográficas (Tavares, 2006, Paulsen e Sposto, 2013; Pedroso, 2015), pode-se fazer a estimativa dos novos percentuais da edificação. Os cálculos são apresentados na tabela 4.59.

Tabela 4.59 – Cálculo do percentual de carbono das fases pré-uso, uso e fim de vida.

Emissão de carbono em KgCO₂eq				
	1 ano	%	50 anos	%
Cálculo do carbono incorporado				
Carbono incorporado etapa pré-uso cenário-base	10.143.293,60	85,36	632.025.445,78	87,90 %
Estratégias CEZ-2, CEZ-5 e CEZ-6	+ 191.933,39		+ 191.933,39	
Cenário base + estratégias	10.335.227,00		632.217.379,00	90,27%
Cálculo do carbono operacional				
Carbono etapa operacional	1.392.561,65	11,72	69.628.082,50	9,68 %
Estratégias CEZ-2, CEZ-5 e CEZ-6	- 438.904,84		- 21.945.242,00	-31,51%
Carbono operacional + estratégias	953.656,81		47.682.840,50	6,80 %
Estimativa do carbono para etapa pós uso				
Carbono etapa pós uso	346.075,65	2,92	17.303.782,50	2,42 %
Carbono etapa pós uso + estratégias	338.666,56		20.397.227,60	2,93 %
Cálculo do total de emissões da edificação				
Total de emissões Cenário base	11.881.930,90	100	718.957.310,78	100
Total de emissões Cenário base + estratégias	11.627.550,30	100	700.297.447,10	100
Redução	254.380,60	- 2,14%	18.659.863,68	2,59%

Fonte: Elaborado pela autora.

O carbono operacional corresponde à quantidade de energia consumida para acionamento de todos os sistemas prediais, necessários para atender às demandas, ou necessidades dos edifícios, em termos de conforto térmico, lumínico e operações do dia a dia. Os dados coletados na fase de uso do edifício resultaram nos indicadores de energia correspondente a 105 kWh/m²/ano; de água de 0,45 m³/m²/ano; de gás de 0,2489 kg/m²/ano e de resíduos de 10,66 kg/m²/ano.

Na análise das emissões embutidas (EE) de carbono, na fase de uso da edificação, os resultados foram de 23,251 KgCO₂/m² para o consumo de energia elétrica, o que representou 67,97% da emissão para essa fase.

O consumo de energia elétrica na edificação, que representa o maior emissor de gases de efeito estufa, na fase operacional, gera 946.457,03 KgCO₂eq por ano. Se for considerada a redução de 34,55% do consumo, pode-se inferir que as emissões de gases de efeito estufa também reduzirão, na mesma proporção, passando a ser de, aproximadamente, 507.550,23 KgCO₂eq/ano, reduzindo em 50 em mais de 21 milhões de KgCO₂eq. A tabela 4.60 apresenta a contabilização das emissões de CO₂ para o carbono operacional.

Tabela 4.60 - Contabilização de carbono incorporado considerando os melhores cenários

Emissão de carbono em KgCO ₂ eq				
	1 ano	%	50 anos	%
Cálculo do carbono incorporado				
Carbono incorporado etapa pré-uso cenário-base	10.143.293,60	85,36	632.025.445,78	87,90 %
Estratégias CEZ-2, CEZ-5 e CEZ-6	+ 191.933,39			
Cenário base + estratégias	10.335.227,00		632.217.379,00	90,27%

Fonte: Elaborado pela autora.

O carbono operacional corresponde à quantidade de energia consumida para acionamento de todos os sistemas prediais, necessários para atender às demandas ou necessidades dos edifícios, em termos de conforto térmico, lumínico e operações do dia a dia. Os dados coletados na fase de uso do edifício resultaram nos indicadores de energia correspondente a 105 kWh/m²/ano; de água de 0,45 m³/m²/ano; de gás de 0,2489 kg/m²/ano; e de resíduos de 10,66 kg/m²/ano.

Na análise das emissões embutidas (EE) de carbono na fase de uso da edificação, os resultados foram de 23,251 KgCO₂/m² para o consumo de energia elétrica, o que representou 67,97% da emissão para essa fase.

O consumo de energia elétrica na edificação, que representa o maior emissor de gases de efeito estufa na fase operacional, gera 946.457,03 KgCO₂eq por ano. Se for considerada a redução de 34,55% do consumo de energia, pode-se inferir que as emissões de gases de efeito estufa também reduzirão na mesma proporção, passando a ser de aproximadamente 507.550,23 KgCO₂eq/ano, reduzindo em 50 em mais de 21 milhões de KgCO₂eq. A tabela 4.61 apresenta a contabilização das emissões de CO₂ para o carbono operacional.

Tabela 4.61 - Contabilização de carbono, em KgCO₂eq, na fase operacional.

Carbono fase operacional (CO) – Cenários CEZ-2, CEZ-5 e CEZ-6					
Componente	Emissão CO₂ (1 ano) Cenário CEZ-0	% (1 ano)	Emissão CO₂ (1 ano)	% (50 anos)	Emissão CO₂ (50 anos) kgCO₂eq
Consumo água	3.566,50	0,26	3.566,50	0,37	178.325,00
Energia elétrica	946.457,03	67,97	507.550,23	53,22	25.377.511,50
Gás GLP	29.410,91	2,11	29.410,91	3,08	1.470.545,40
Resíduo sólido	413.127,21	29,67	413.127,21	43,33	20.656.360,50
Total	1.392.561,65	100 %	953.654,85	100 %	47.682.742,40

Fonte: Elaborado pela autora.

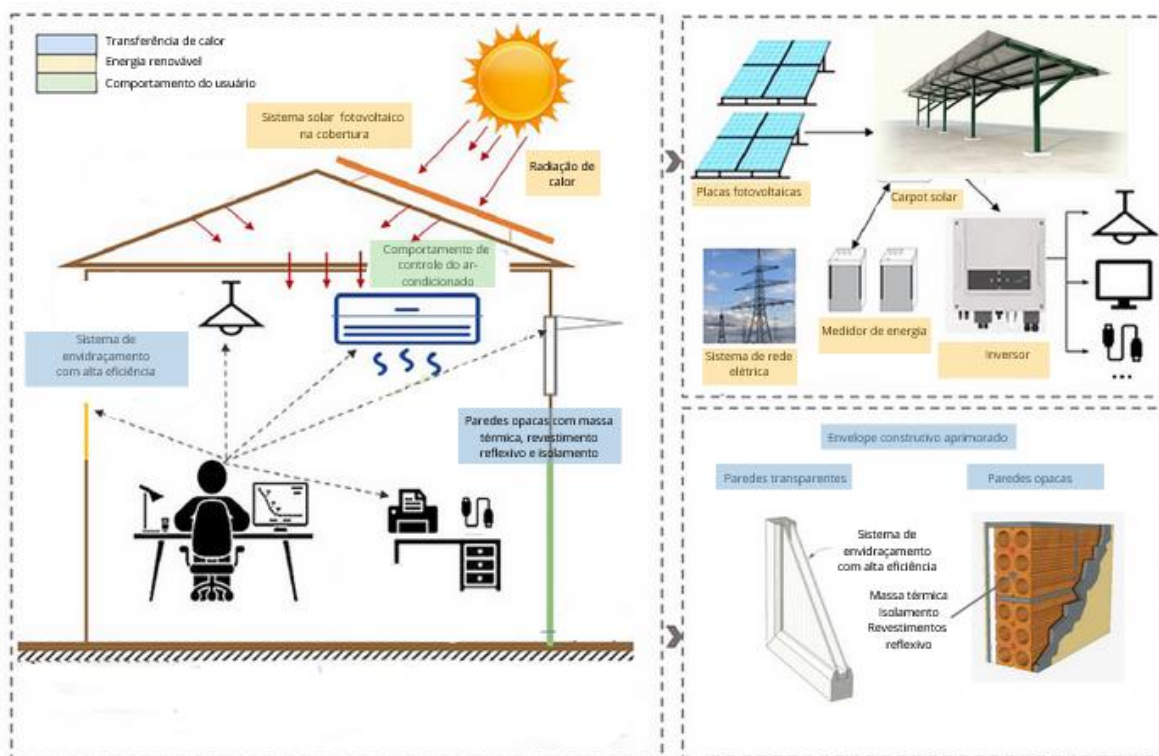
Dessa forma, é possível, com a adoção das estratégias passivas dos cenários CEZ-2, CEZ-5 e CEZ-6, que a emissão de gases de efeito estufa, devido ao consumo de energia elétrica pela edificação, passe de 946.457,03 KgCO₂eq para 507.550,23 KgCO₂eq, e de 67,97 % para 53,22 % das emissões geradas na fase operacional. Sendo assim, com a adoção das melhores estratégias, a edificação deixará de emitir 21.945.340,10 KgCO₂eq, em 50 anos.

Relativamente à influência da mudança dos parâmetros do envelope construtivo, notou-se que os índices de sustentabilidade avaliados possuem impactos aproximados, em que os cenários com menores consumos energéticos também foram os que apresentaram menores impactos ambientais. Os demais cenários avaliados, relacionados ao aprimoramento e implantação de energia renovável na edificação e a alteração do cronograma de uso, contribuíram com a redução do consumo e apresentam impactos classificados com bons índices de sustentabilidade. A combinação desses cenários causa influência direta no consumo de energia do edifício avaliado e essa redução, contribui para a redução do carbono operacional, durante o ciclo de vida da edificação, que foi estimado em 50 anos.

De acordo com os cenários apresentados, pode-se afirmar que investir em eficiência energética deve fazer parte do processo de requalificação energética das edificações, mas é primordial que se leve em consideração estes estudos na fase de projeto, tendo em vista a influência da eficiência energética nos seus impactos ambientais. Dessa forma, é possível criar e requalificar edifícios que consumam menos energia e emitam menos gases de efeito estufa, ao longo de toda a sua vida útil.

Considerando os temas abordados neste estudo, conclui-se que a demanda por eletricidade nas edificações pode ser reduzida usando estratégias de eficiência energética. Para isso é imprescindível analisar as características da construção, em especial, a composição do envelope construtivo e sua influência no consumo de energia com o objetivo de reduzir a transferência de calor do ambiente externo para o interno e assim, reduzir também a intensidade de uso do ar condicionado. Essa estratégia mostrou benefícios na requalificação da edificação. No entanto, na fase de projeto pode trazer ainda mais benefícios por não gerar retrabalhos. A figura 4.29 exibe um esquema gráfico dos resultados obtidos nesta tese.

Figura 4.29 – Parâmetros de influência no desempenho energético e ambiental das edificações avaliados nesta pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora.

O esquema gráfico da figura 4.29 mostrou ainda que a geração de energia solar na própria edificação, para injetá-la na rede elétrica, e assim compensar no consumo da energia elétrica, se mostrou eficiente na fase de operação da edificação. A adoção e o aprimoramento de fontes de energia renovável, que geram energia localmente e são conectadas à rede, representam uma contribuição positiva significativa.

E ainda, as estratégias de alterações na gestão do uso da edificação na fase de operação, com modificações pontuais, são de fácil implantação, sem a necessidade do emprego de materiais, que podem contribuir também com a redução no consumo e consequentemente, na redução da emissão de gases de efeito estufa pela edificação.

A pesquisa também revelou a importância das simulações computacionais termo-energéticas para avaliar escolhas arquitetônicas e construtivas. Da mesma forma, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é crucial para compreender os impactos das decisões em construção e tecnologia. Por fim, a utilização de um método de otimização multiobjetivo é vital para embasar a tomada de decisões.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES



Este trabalho teve como foco a avaliação do potencial de redução do consumo de energia elétrica e das emissões de CO₂, em uma edificação existente. Para isso, foi empregada uma abordagem de otimização multiobjetivo, considerando diversas variáveis como a composição do envelope construtivo, a integração de energias renováveis e a modificação do cronograma de uso. Ferramentas de simulação computacional e Avaliação do Ciclo de Vida foram essenciais nesse processo.

Para realizar essa avaliação, foram levantadas as características físicas da edificação, incluindo as propriedades termofísicas dos materiais do envelope, temperaturas internas, padrões de ocupação e detalhes técnicos dos sistemas de ar-condicionado e outros equipamentos. Esses dados foram inseridos no *software* de simulação energética EnergyPlus e, posteriormente, comparados com dados reais de consumo, coletados, ao longo de cinco anos da fase de uso do edifício.

A análise do desempenho energético revelou que o resfriamento da edificação é o principal responsável pelo consumo, representando expressivos 75,38% do total. Esse dado sublinha a urgência de implementar estratégias focadas na redução da energia utilizada para climatização.

Para mitigar o consumo energético elevado, foram propostos cenários que envolveram a alteração do envelope construtivo, o aprimoramento do sistema de energia solar fotovoltaica e a modificação do cronograma de uso da edificação. Simulações foram realizadas tanto para o modelo original quanto para as versões modificadas, com cada estratégia, explorando opções de design passivo, como isolamento térmico, tipos de envidraçamento, massa térmica e revestimento externo.

As estratégias de alteração do envelope resultaram em uma redução de consumo de energia entre 6,7% e 6,98%. Embora essa porcentagem possa não parecer alta, à primeira vista, ela se torna significativa, ao se considerar que a edificação já apresentava um bom desempenho energético e possuía proteção solar (brises), em três de suas fachadas.

Dois cenários de integração de energia renovável foram avaliados: um cenário envolveu um retrofit no sistema fotovoltaico existente, com mais de 10 anos, pela substituição dos inversores e painéis solares mais eficientes. Essa intervenção resultou em um acréscimo de 18% de energia limpa. Outro cenário propôs a ampliação do sistema de geração de energia renovável, utilizando os estacionamentos laterais do edifício, para a instalação de *carports* solares (estruturas que protegem veículos e geram eletricidade) e o alcançou um aumento de 469% na geração de energia limpa, em comparação com os valores atuais. A simulação estima que o Cenário CEZ-5 pode gerar aproximadamente 1.238,20 MWh, anualmente, o que supriria cerca de 21% do consumo total da edificação, que, em 2024, foi de 5.844,20 MWh.

Outro cenário avaliou a modificação do cronograma de uso da edificação (Cenário CEZ-6) evidenciando o poder da análise de dados na gestão energética. Os dados de ocupação revelaram oportunidades significativas para compreender e otimizar a presença de ocupantes, levando a economias substanciais de energia, sem o consumo de materiais.

Os cenários que apresentaram os melhores resultados globais foram o CEZ-2, CEZ-5 e CEZ-6. Ao adotar as estratégias mais eficientes, todas incluindo ações passivas, é possível alcançar uma redução de, aproximadamente, 34,38%, no consumo de energia elétrica do edifício, o que se traduz em uma economia anual de 1.987.559,12 kWh.

Todas as variáveis analisadas influenciaram o consumo de energia, sublinhando a importância de uma análise detalhada das características físicas, de uso e ocupação da edificação para otimizar a redução de energia.

Do ponto de vista do desempenho ambiental, medido principalmente pelo Potencial de Aquecimento Global (emissões de CO₂), foi possível identificar os cenários com maior e menor impacto. Em relação às fases do Ciclo de Vida (pré-uso e uso), observou-se que a fase de pré-uso (construção) foi responsável por cerca de 90% das emissões de CO₂, em média, superando a fase operacional.

Isso significa que, embora as estratégias adotadas possam reduzir o carbono operacional, o carbono incorporado para implementar essas estratégias tende a aumentar, devido ao consumo de energia e materiais.

A energia operacional refere-se a toda a energia consumida para o funcionamento dos sistemas de um edifício, englobando desde o conforto térmico e lumínico até as operações diárias. Com base em dados reais do edifício analisado, foi possível quantificar o consumo energético operacional do ar-condicionado, iluminação e outros equipamentos.

Os resultados revelaram que a energia elétrica é responsável por quase 68% das emissões, na fase operacional, impactando significativamente esta etapa do ciclo de vida do edifício. Dada a localização do prédio, em Goiânia, uma zona bioclimática 6 com clima tropical seco e temperatura média anual de, aproximadamente, 23,4°C, a necessidade de climatização artificial é elevada. Essa constatação reforça que uma análise abrangente do edifício, como um todo, foi essencial para alcançar uma maior eficiência energética.

As emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) associadas à fase de produção dos materiais confirmaram que o concreto e o aço são os principais contribuintes. Já na fase operacional, o consumo elétrico é o maior gerador de emissões de GEE, provavelmente influenciado pelas demandas de resfriamento impostas pelo clima.

Este estudo estabelece uma conexão entre o uso de energia e as emissões de carbono do edifício-caso, contrastando os impactos de carbono da energia operacional com os impactos da

energia/carbono incorporados. Além disso, explora métodos e abordagens, para reduzir o carbono incorporado tanto em projetos arquitetônicos atuais quanto em novos cenários.

O processo de otimização multiobjetivo gerou um conjunto de soluções ideais que podem ser aplicadas em projetos de requalificação, ou em novos projetos. Comparado ao caso base, todos os cenários propostos demonstraram um potencial de redução no consumo de energia que variou entre 5,69% e 21,18%. Isso evidencia que a tomada de decisões pode ser substancialmente aprimorada, com base em informações sólidas e análises aprofundadas.

No contexto da otimização multiobjetivo, ficou evidente que o desempenho ambiental está intrinsecamente ligado ao consumo e à eficiência energética. O cenário CEZ-5, que envolveu o retrofit e upgrade do sistema solar fotovoltaico, alcançou o maior nível de sustentabilidade. Este cenário se destacou pela significativa quantidade de energia gerada e pelo baixo impacto dos materiais utilizados, resultando em maior economia de energia e emissões evitadas. Por outro lado, o cenário CEZ-6, que não requer consumo de material, teve desempenho inferior, em termos de economia e emissões. O cenário CEZ-2 se sobressaiu na adequação do envelope construtivo, proporcionando maior economia de energia e impactando positivamente as emissões evitadas. Assim, os melhores cenários demonstram uma combinação de parâmetros que influenciam tanto o âmbito energético quanto o ambiental, alinhando-se com as discussões iniciais do estudo.

A principal conclusão é que investir em pequenas melhorias no envelope, durante a reabilitação oferece benefícios consideráveis. No entanto, projetar um envelope construtivo eficiente desde a construção inicial é muito mais vantajoso para criar um ambiente interno agradável e, ao mesmo tempo, eficiente, em termos energéticos e ambientais.

A classificação dos cenários, em níveis de sustentabilidade (A a E), baseada em faixas de consumo/redução de energia e emissões, deixou claro que, para obter os melhores resultados, é preciso priorizar alternativas que reduzam o uso de energia, pois isso tem uma relação direta com a emissão de carbono.

Em relação ao funcionamento do edifício, confirma-se que grandes economias de energia e reduções de GEE podem ser alcançadas com soluções de *design* passivo adaptadas ao clima local. Do ponto de vista ambiental, a economia de energia é substancial e pode impulsionar a transição da política institucional para uma abordagem de baixo carbono.

Em síntese, os resultados das análises integradas confirmam que a combinação dos parâmetros estudados influencia diretamente os âmbitos ambiental e energético. Este estudo reitera a importância da eficiência energética, na arquitetura, para alcançar a descarbonização dos edifícios. Integrar a eficiência energética desde as etapas iniciais do projeto garante construções com menor consumo e, conseqüentemente, menos emissões de carbono, ao longo de seu ciclo de vida. Essa perspectiva vai além da economia financeira, focando no impacto ambiental das

edificações, com o investimento direcionado para a energia não consumida e as emissões que podem ser evitadas.

A abordagem do trabalho fornece orientação e referência para a redução do consumo de energia e emissão de carbono, ao longo dos estágios de projeto, operação e manutenção das edificações, contribuindo com projetos e requalificações mais eficientes, especialmente em edifícios com a mesma tipologia. O estudo destaca, também, como a integração de soluções de energia renovável, como os painéis fotovoltaicos, pode impulsionar significativamente a eficiência energética e reduzir as emissões operacionais de carbono. Esse impacto é ainda mais pronunciado, quando combinado com o uso de materiais de construção eficientes e estratégias para aprimorar o envelope construtivo e o gerenciamento eficaz da edificação.

Para aprofundar as análises deste estudo, sugerem-se algumas direções para pesquisas futuras, como expandir a análise para outros tipos de edificações. Considerando que o desempenho energético teve um grande impacto nos resultados ambientais, é importante replicar a metodologia em diferentes tipologias de edifícios, para verificar a generalização das conclusões em diversos contextos.

Além disso, é possível explorar *retrofits* em sistemas mecânicos de climatização e de iluminação, com a instalação de sistemas de controle e automação. Essas intervenções são frequentemente mais simples de aplicar em edifícios em funcionamento e podem gerar ganhos significativos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADITYA, L.; MAHHIA, T.M.I.; RISMANCHI, B.; NG, H.M.; HASAN, H.S.C.; METSELAAR, O.M.; ADITIYA, H.B.; A review on insulation materials for energy conservation in buildings, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, 2017, p. 1352-1365, ISSN 1364-0321, Junho, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117302484>. Acesso em 15.05.2024.

ADLY, Bassent; EL-KHOULY, Tamir. Combining retrofitting techniques, renewable energy resources and regulations for residential buildings to achieve energy efficiency in gated communities. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 13, n. 6, p. 101772, 2022. ISSN 2090-4479. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101772> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447922000831>, acesso em 20.05.2024.

ALMEIDA, F. da S.; BRANDALISE, M. P.; MIZGIER, M. O Materiais de mudança de fase como sistema de resfriamento passivo em habitações de interesse social pré-fabricadas leves. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 13, p. e022027, 2022. Publicado em outubro, 2022. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v13i00.8666777>. Acesso em: 10.10.2024.

ALONSO, C.; MARTÍN-CONSUEGRA, F.; OTEIZA, I.; ASENSIO, E.; PÉREZ, G.; MARTÍNEZ, I.; FRUTOS, B.; Effect of façade surface finish on building energy rehabilitation, **Solar Energy**, V. 146, 2017, P. 470-483, ISSN 0038-092X. Publicado on line em abril, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17301706>. Acesso em 30.04.2024.

AL-TAMIMI, N.; Building Envelope Retrofitting Strategies for Energy-Efficient Office Buildings in Saudi Arabia. **Buildings** 2022, 12, 1900. Publicado on line em novembro, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings12111900>. Acesso em 20.05.2024.

AL-YASIRI, Q.; SZABÓ, M.; Phase change material coupled building envelope for thermal comfort and energy-saving: Effect of natural night ventilation under hot climate, **Journal of Cleaner Production**, Volume 365, 2022, 132839, ISSN 0959-6526. Publicado on line em setembro, 2022. Disponível em: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622024349>). Acesso em 04.04.2024.

ANTUNES, Lucas Niehuns; GHISI, Enedir. Análise do ciclo de vida energético de edificações: atualização do estado da arte. in: Encontro nacional de conforto no ambiente construído, 16., 2021. **Anais [...]. [S. l.]**, 2021. p. 1253–1262. Publicado em outubro, 2021. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/4480>. Acesso em: 11.04.2025.

ANSAH, M.K. CHEN, X.; YANG, H.; LU, L.; LAM, P.T.I.; Developing an automated BIM-based life cycle assessment approach for modularly designed high-rise buildings, **Environmental Impact Assessment Review**, Volume 90, 2021, 106618, ISSN 0195-9255. Publicado on line em setembro, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925521000688>. Acesso em 20.02.2024.

ARSLAN, D.; SHARPLES, S.; MOHAMMADPOURKARBASI, H.; KHAN-FITZGERALD, R. Carbon Analysis, Life Cycle Assessment, and Prefabrication: A Case Study of a High-Rise Residential Built-to-Rent Development in the UK. **Energies**, 16, 973. Publicado em janeiro, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16020973>. Acesso em 20.03.2024.

ARUTA, G.; ASCIONE, F.; BIANCO, N.; IOVANE, T.; MAURO, G. M.; A responsive double-skin façade for the retrofit of existing buildings: Analysis on an office building in a Mediterranean climate, **Energy and Buildings**, Volume 284, 2023, 112850, ISSN 0378-7788. Publicado em abril, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778823000804>. Acesso em 20.03.2024.

ASADI, e.; SILVA, M.G.; ANTUNES, C.H.; DIAS, L.; Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application, **Energy and Buildings**, V. 44, 2012, P. 81-87, ISSN 0378-7788. Publicado on line em janeiro, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811004609>. Acesso em 20.04.2024.

ASCIONE, Fabrizio. Energy conservation and renewable technologies for buildings to face the impact of the climate change and minimize the use of cooling, **Solar Energy**, V. 154, 2017, Pages 34-100, ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.022>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17300427>. Acesso em 24.04.2025.

ASCIONE, F.; BIANCO, N.; De MASI, F.; MAURO, G. M.; VANOLI, G. P.; Energy retrofit of educational buildings: Transient energy simulations, model calibration and multi-objective optimization towards nearly zero-energy performance, **Energy and Buildings**, Volume 144, 2017, Pages 303-319, ISSN 0378-7788. Publicado em junho, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817310307>. Acesso em 23.04.2024.

ASCIONE, F.; BIANCO, N.; MAURO, G. M.; VANOLI, G. P.; A new comprehensive framework for the multi-objective optimization of building energy design: Harlequin, **Applied Energy**, Volume 241, 2019, p. 331-361, ISSN 0306-2619. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191930426X> . Acesso em 04.04.2024.

ASCIONE, F.; BIANCO, N.; De MASI, F.; MASTELLONE, M.; MAURO, G. M.; VANOLI, G. P.; The role of the occupant behavior in affecting the feasibility of energy refurbishment of residential buildings: Typical effective retrofits compromised by typical wrong habits, **Energy and Buildings**, V. 223, 2020, 110217, ISSN 0378-7788, Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778820306393>. Acesso em 01.04.2025.

ASCIONE, F.; BIANCO, N.; IOVANE, T.; MASTELLONE, M.; MAURO, G. M.; The evolution of building energy retrofit via double-skin and responsive façades: A review, **Solar Energy**, Volume 224, 2021, Pages 703-717, ISSN 0038-092X. Publicado on line em agosto, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X2100520X>. Acesso em 04.04.2024.

ASDRUBALI, F.; BALDASSARRI, C.; FTHENAKIS, V.; Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings, **Energy and Buildings**, V. 64, 2013, P. 73-89, ISSN 0378-7788. Publicado em setembro, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813002545>. Acesso em 02.02.2024.

ASHRAE 14 (2002) - AMERICAN SOCIETY OF HEATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 14, 2002**. ASHRAE Guideline – Measurement of Energy and Demand Savings. Disponível em: https://webstore.ansi.org/preview-pages/ASHRAE/preview_ASHRAE+Guideline+14-2002.pdf

ASHRAE 140 (2014) - AMERICAN SOCIETY OF HEATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 140, 2014** – Method of Test for Evaluating Building Performance Simulation Software. ASHRAE 140 (2014)

ASHRAE 55 (2020) - AMERICAN SOCIETY OF HEATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 55, 2020** – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE 55 (2020).

ASHRAE 90.1 (2022) - AMERICAN SOCIETY OF HEATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 90.1, 2022** – Energy Standard for Sites and Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. ASHRAE 90.1 (2022)

ASHRAE 62.1 (2022) - AMERICAN SOCIETY OF HEATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 62.1, 2022** – Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2014) **NBR ISO 14040/2014**. Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura, 2014. ABNT NBR ISO 14040 / 2014. ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2021) **NBR 15575/2021**. Edificações habitacionais – Desempenho. ABNT NBR 15575 / 2021. ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2022). Desempenho Térmico de edificações. **NBR 15220/2022**. ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT, 2025 - **NBR 17193 / 2025** – Segurança contra incêndios em instalações fotovoltaicas – Requisitos e especificações de projetos – Uso em edificações. ABNT, 2025.

AUTODESK (2023) Revit. Disponível em: <https://www.autodesk.com/br/products/revit/overview>

AZARI, R. Integrated energy and environmental life cycle assessment of office building envelopes, **Energy and Buildings**, Volume 82, 2014, Pages 156-162, ISSN 0378-7788. Publicado on line em outubro, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814005234> Acesso em 04.04.2025.

BADEA, N.; BADEA, G.V; Life cycle analysis in refurbishment of the buildings as intervention practices in energy saving, **Energy and Buildings**, Volume 86, 2015, p. 74-85, ISSN 0378-7788. Publicado on line em janeiro, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778814008664>. Acesso em abril, 2025.

BELATRACHE, D.; BENTOUBA, S.; ZIOUI, N.; BOUROUIS, MAHMOUD. Energy efficiency and thermal comfort of buildings in arid climates employing insulating material produced from date palm waste matter, **Energy**, V. 283, 2023, 128453, ISSN 0360-5442. Publicado em novembro, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223018479>. Acesso em 02.02.2024.

BELIZARIO-SILVA, F.; OLIVEIRA, L.S.; REIS, D.C.; PATO, G.T.G.; MARINHO, A.C.; DEGANI, L.M.; CALDAS, L.R.; PUNHAGUI, K.R.G.; PACCA, S.A.; JOHN, V.M.; The Sidac system: Streamlining the assessment of the embodied energy and CO₂ of Brazilian construction products, **Journal of Cleaner Production**, Volume 421, 2023, 138461, ISSN 0959-6526. Publicado on-line em outubro, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623026197>. Acesso em 03.02.2025.

BENADDI, F.Z.; BOUKHATTERN, L.; TABARES-VELASCO, P.C.; Multi-objective optimization of building envelope components based on economic, environmental, and thermal comfort criteria, **Energy and Buildings**, V. 305,

2024, 113909, ISSN 0378-7788. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778824000252>. Acesso em 25.04.2025.

BERARDI, U.; GARAI, M.; MORSELLI, T.; Preparation and assessment of the potential energy savings of thermochromic and cool coatings considering inter-building effects, **Solar Energy**, V. 209, 2020, P. 493-504, ISSN 0038-092X. Publicado on line em outubro, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20309580>. Acesso em 20.03.2024.

BESSA, V.M.T.; **Contribuição à metodologia de avaliação das emissões de dióxido de carbono no ciclo de vida das fachadas de edifícios de escritórios**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

BHAMARE, D.K.; RATHOD, M.K.; BANERJEE, J.; Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art, **Energy and Buildings**, V. 198, 2019, P. 467-490, ISSN 0378-7788. Publicado on line em setembro, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778819300210>. Acesso em 15.04.2024.

BORGSTEIN, E.H. ; LAMBERTS, R.; HENSEN, J.L.M. Evaluating energy performance in non-domestic buildings: A review, **Energy and Buildings**, V. 128, 2016, P. 734-755, ISSN 0378-7788. Publicado em setembro, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816306144>. Acesso em 02.02.2024.

BRASIL, 2001. **Lei 10.295, de 17 de outubro de 2001**. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10295.htm. Acesso em 04.04.2024.

BRASIL, 2009. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009**. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC. Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm , acesso em 04.04.2025.

BRASIL, 2006. **Lei nº 11.419, de 19 de dezembro de 2006**. Dispõe sobre a informatização do processo judicial; altera a Lei nº 5.869, de 11 de janeiro de 1973 – Código de Processo Civil; e dá outras providências. Publicada no D.O.U. em 20.12.2006. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/l11419.htm. Acesso em 20.03.2023.

BRASIL, 2010a. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**, disponível em: https://www.pbenedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/Port372-2010_RTQ_Def_Edificacoes-C_rev01.pdf. Acesso em 04.04.2024.

BRASIL, 2010b. **Regulamento Técnico da Qualidade para o nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**, disponível em <https://www.pbenedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/RTQR.pdf>. Acesso em 04.04.2024.

BRASIL / ANEEL, 2016. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Por dentro da conta de luz**: informação de utilidade pública/ 7ª ed. Brasília: BRASIL/ANEEL, 2016. Disponível em: https://www.arce.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/53/2017/09/cartilha-aneel-por-dentro-da-conta-de-luz_2016.pdf, acesso em 15/04/2025.

BRASIL / ANEEL, 2021. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Nota Técnica nº 99/2021-SGT/ANEEL**. 24 de maio de 2021. Disponível em: https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/consultas-publicas?p_p_id=participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_idDocumento=43611&p_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_tipoFaseReuniao=fase&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_jspPage=%2Fhtml%2Fpp%2Fvisualizar.jsp. Acesso em 24.03.2025.

BRASIL, 2019. **Decreto nº 9.864, de 27 de junho de 2019**. Regulamenta a Lei 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dispõe sobre o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética.

BRASIL, 2021. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 1.000/2021**. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica. Publicado em dezembro, 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>.

BRASIL, 2022. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Postos Tarifários**. Disponível em <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas/entenda-a-tarifa/postos-tarifarios>. Acesso em 20.04.2024.

BRASIL, 2022a. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de Regulação tarifária** – Proret. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/proret>. Acesso em 21.04.2024.

BRASIL, 2023. Planalto. **Atualização da meta climática**. Disponível em <https://www.gov.br/planalto/pt-br/agenda-internacional/missoes-internacionais/cop28/ndc-do-brasil>, acesso em 24.04.2024.

BRASIL, 2023a. Ministério das Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução 3.279/2023**. Homologa o resultado da Revisão Tarifária Periódica – RTP de 2023 da Equatorial Goiás Distribuidora de Energia S.A. – Equatorial GO, as Tarifas de Energia – TE e as Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição – TUSD. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20233279ti.pdf>. Acesso em 20.04.2024.

BRASIL, 2024. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2034**. Brasília: MME/EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034>, acesso em 24.04.2025.

BRASIL, 2024a. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Atlas da Eficiência Energética**. Relatório de indicadores. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-857/Atlas%20da%20Efici%C3%Aancia%20Energ%C3%A9tica%20Brasil%202024.pdf>, acesso em abril, 2025.

BRASIL, 2024b. Ministério de Minas e Energia. **Geração de energia solar alcança dois novos recordes no mês de junho**. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202407/geracao-de-energia-solar-alcanca-dois-novos-recordes-no-mes-de-junho>, acesso em abril, 2025.

BRASIL, 2024c. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução 3.407, de 15 de outubro de 2024**. Homologa o resultado do Reajuste Tarifário Anual de 2024, as Tarifas de Energia – TE e as Tarifas e Uso do Sistema de Distribuição – TUSD referentes à Equatorial Goiás Distribuidora de Energia S.A. – Equatorial GO. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20243407ti.pdf>. Acesso em 20.02.2025.

BRASIL, 2025. Ministério de Minas e Energia. Secretaria Nacional de Energia Elétrica. **Perguntas Frequentes**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/secretaria-nacional-energia-eletrica/perguntas-frequentes>. Acesso em 20.03.2025.

BRASIL, 2025a. Ministério do Meio Ambiente. **iNDC (Contribuição Nacionalmente Determinada)**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/grupo-executivo-sobre-mudanca-do-clima/grupo-executivo-sobre-mudan%C3%A7as-clim%C3%A1ticas/item/10570-indc-contribui%C3%A7%C3%A3o-nacionalmente-determinada.html>, acesso em abril, 2025.

BRASIL, 2025b. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Tarifas**. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas>. Acesso em 20.04.2025.

BRITO, A. C. **Contribuição da inércia térmica na eficiência energética de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Acesso em 04.04.2024.

BRITO, A.C.; AKUTSU, M.; SALLES, E.M.; CASTRO, G.M.; Características térmicas de materiais de mudança de fase adequados para edificações brasileiras. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 125-145.. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Publicado on line em jan./mar. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100128>. Acesso em 03.03.2024.

BRUGNERA, R.R. **Análise Integrada de Desempenho Energético, Impacto Ambiental e Custo**: Estudo de Soluções de Fachada para Edifícios de Escritórios no Brasil. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Carlos. Instituto de Arquitetura e Urbanismo. São Carlos, 2018. Acesso em 03.03.2024.

BÜLOW-HÜBE, Helena. (2001). **Energy-Efficient Window Systems** – Effects on Energy Use and Daylight in Buildings. Lund University, Lund Institute of Technology. Department of Construction and Architecture Division of Energy and Building Design. Tese (Doutorado em Arquitetura e Energia). Disponível em: http://www.ebd.lth.se/fileadmin/energi_byggnadsdesign/images/Publikationer/Rapport_TABK-01-1022_Helena.pdf. Acesso em 26.04.2024.

CABEZA, L. F., CHÂFER, M., & MATA, É. (2020). Comparative Analysis of Web of Science and Scopus on the Energy Efficiency and Climate Impact of Buildings. **Energies**, 13(2), 409. Publicado on line em janeiro, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13020409>. Acesso em : 25.04.2025.

CABEZA, L.F.; RINCÓN, L.; VILARIÑO, V.; PÉREZ, G.; CASTELL, A.; Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review, **Renewable and Sustainable Energy**

Reviews, V. 29, 2014, P. 394-416, ISSN 1364-0321. Publicado on line em janeiro, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113005777>. Acesso em 20.10.2024.

CALDAS, L.R. **Como calcular a pegada de carbono de uma edificação**. ArchDaily Brasil. Publicado on line em julho, 2020. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/943023/como-calcular-a-pegada-de-carbono-de-uma-edificacao>. Acesso em 10.03.2025.

CANADIAN SOLAR, 2024. **Produtos e soluções**. Disponível em <https://www.csisolar.com/br/module/>, acesso em 03.03.2025.

CALDAS, L. R. **Avaliação do Ciclo de Vida Energético e de Emissões de CO2 de uma Edificação Habitacional Unifamiliar de Light Steel Framing**. 174p. (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2016). Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília-DF, 2016.

CALDAS, L. R.; SPOSTO, R. M.; LOPES, A. M. S.; TAVARES, W. C. Avaliação do ciclo de vida energético (acve) e do desempenho térmico de uma habitação de light steel framing com o uso de diferentes tipos de isolantes térmicos. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 11, n. 2, 2016. DOI: 10.5216/reec.V11i2.37863. Publicado on-line em março, 2016. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/37863>. Acesso em: 22 abr. 2025.

CÂNDIDO, C. D. .; DORNELLES, K. A. .; LUKIANTCHUKI, M. A. Impacto da absorvância no conforto térmico em três zonas bioclimáticas. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 14, n. 00, p. e023003, 2023. DOI: 10.20396/parc.v14i00.8668202. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8668202>. Acesso em: 13.10. 2023.

CAPOZZOLI, A.; PISCITELLI, M. .; GORRINO, A.; BALLARINI, I.; CORRADO, V.; Data analytics for occupancy pattern learning to reduce the energy consumption of HVAC systems in office buildings, **Sustainable Cities and Society**, Volume 35, 2017, Pages 191-208, ISSN 2210-6707. Disponível em: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670717301464>, Acesso em 10.04.2025.

CARLO, J.C. **Desenvolvimento de metodologia de avaliação da eficiência energética do envoltório de edificações não-residenciais**. 2008. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Acesso em 05.05.2024.

CASTRO, A.P.A.S.; **Análise da refletência de cores de tintas através da técnica espectrofotométrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Unicamp. Campinas, São Paulo, 2003.

CARPINO, C.; BRUNO, R.; CARPINO, V., ARCURI, N.; Improve decision-making process and reduce risks in the energy retrofit of existing buildings through uncertainty and sensitivity analysis, **Energy for Sustainable development**, V. 68, 2022, P. 289-307, ISSN 0973-0826. Publicado on line em junho, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082622000540>. Acesso em 10.04.2025.

CBCS, 2021. Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. **Plataforma de Cálculo de Benchmarking Energético de Edifícios Públicos**. Disponível em: <https://plataformadeo.cbcs.org.br/edificio-publico/>. Acesso em 20.02.2024.

CBM-GO 2025 – Nota Técnica 44/2025: Segurança em sistemas fotovoltaicos. **Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás**, 2025.

CELLURA, M., FONTANA, M., LONGO, S., MILONE, D., MISTRETTA, M., (2014). Energy and Environmental Assessment of Retrofit Actions on a Residential Building. In: Salomone, R., Saija, G. (eds) **Pathways to Environmental Sustainability**. Springer, Cham. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-03826-1_13. Acesso em 20.03.2024.

CEN, 2011. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION **CEN 15978:2011** BRE Global Methodology For The Environmental Assessment Of Buildings Using EN 15989:2011; Publicado on line em disponível em janeiro, 2018. Disponível em: https://www.greenbooklive.com/filelibrary/EN_15804/PN326-BRE-EN-15978-Methodology.pdf. Acesso em 30.01.2025.

CEN, 2013. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN 15804: 2013**. Sustainability of construction works: environmental product declarations: core rules for the product category of construction products. Brussels, 2013. Publicado em abril, 2014. Disponível em: <https://files.bregroup.com/bre-co-uk-file-library-copy/filelibrary/Materials/BRE-EN-15804-PCR-PN514.rev-0.1.pdf> . Acesso em 30.01.2025.

CHAN, A.L.S.; CHOW, T.T. ; FONG, K.F. ; LIN, Z.; Investigation on energy performance of double skin façade in Hong Kong, **Energy and Buildings**, Volume 41, Issue 11, 2009, Pages 1135-1142, ISSN 0378-7788. Publicado on

line em novembro, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778809001182>, acesso em 24.04.2024.

CHAN, Y.H.; ZHANG, Y.; TENNAKOON, T.; FU, S.C.; CHAN, K.C.; TSO, C.Y.; YU, K.M.; WAN, M.P.; HUANG, B.L.; YAO, S.; QIU, H. H.; CHAO, C.Y.; *Potential passive cooling methods based on radiation controls in buildings*, **Energy Conversion and Management**, Volume 272, 2022, 116342, ISSN 0196-8904. Publicado on line em novembro, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890422011207>. Acesso em 03.05.2024.

CHASTAS, P.; THEODOSIOU, T.; KONTOLEON, K.J.; BIKAS, D.; Normalising and assessing carbon emissions in the building sector: A review on the embodied CO₂ emissions of residential buildings, **Building and Environment**, V. 130, 2018, P. 212-226, ISSN 0360-1323. Publicado em fevereiro, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132317306005>. Acesso em 20.04.2024.

CHEN, S.; LIU, J.; ZHANG, Q.; TENG, F.; MCLELLAN, B.C.; A critical review on deployment planning and risk analysis of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) toward carbon neutrality, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, V. 167, 2022, 112537, ISSN 1364-0321. Publicado em outubro, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122004373>. Acesso em 25.04.2025.

CHOW, T.; LI, C.; LIN, Z. Innovative solar Windows for cooling-demand climate. **Solar Energy Materials & Solar Cells** 94 (2010) 212 – 226. doi:10.1016/j.solmat.2009.09.004. Publicado em fevereiro, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024809003225>. Acesso em 03.03.2024.

CHUNG, W.; HUI, Y.V.; LAM, Y.M. Benchmarking the energy efficiency of commercial buildings, **Applied Energy**, Volume 83, Issue 1, 2006, Pages 1-14, ISSN 0306-2619. Publicado em janeiro, 2026. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261904002028>. Acesso em 04.04.2025.

CICELSKY, A.; MEIR, I.A.; Parametric analysis of environmentally responsive strategies for building envelopes specific for hot hyperarid regions, **Sustainable Cities and Society**, Volume 13, 2014, p. 279-302, ISSN 2210-6707. Publicado on line em outubro, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670714000195>. Acesso em 20.02.2024.

ÇILDIR, A. S.; KÖKTÜRK, G.; TOKUÇ, A.; Design approaches for retrofitting offices to reach nearly zero energy: A case study in the Mediterranean climate, **Energy for Sustainable Development**, V. 58, 2020, p. 167-181, ISSN 0973-0826. Publicado on-line em outubro, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082620302854>. Acesso em 05.04.2024.

CINARK, 2025. **Center for Industriel Arkitektur**. The Royal Danish Academy and Vandkunsten Architects. The construction material pyramid. Disponível em: https://www.materialepyramiden.dk/?utm_medium=website&utm_source=archdaily.com.br. Acesso em 20.02.2023.

Climate-Data. 2025. **Clima Goiânia** (Brasil) Disponível em: <https://pt.climate-data.org/americas-do-sul/brasil/goias/goiania-2191/>. Acesso em abril, 2025.

CONSELHO NACIONAL DE JUSTIÇA (CNJ) 2021. **Resolução 400/2021**, 16/06/2021, redação dada pela Resolução 550/2024 e pela Resolução 594/2024. Disponível em: <https://atos.cnj.jus.br/files/compilado2157212025020567a3dec157955.pdf>. Acesso em 25.04.2025.

CONSELHO NACIONAL DE JUSTIÇA (CNJ) 2024. Conselho Nacional de Justiça. **8º Balanço da Sustentabilidade do Poder Judiciário**. Disponível em: <https://www.cnj.jus.br/wp-content/uploads/2024/06/8o-balanco-da-sustentabilidade-do-poder-judiciario-11062024.pdf>, acesso em 25.04, 2025.

CNJ, 2024. Conselho Nacional de Justiça. **Resolução 594, de 8 de novembro de 2024**. Institui o Programa Justiça Carbono Zero e altera a resolução CNJ nº 400/2021. Disponível em <https://atos.cnj.jus.br/files/original144529202411136734bb89548b2.pdf>, acesso em 23.04.2025.

CNN BRASIL, 2024. **Governo vê necessidade de acionamento “mais intenso” de termelétricas até dezembro**. Medida visa atender demanda dos horários de ponta, quando carga de energia está no pico. Disponível em <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/macroeconomia/governo-ve-necessidade-de-acionamento-mais-intenso-de-termeletricas-ate-dezembro/>, acesso em 05.04.2025.

COLLINGE, W.O.; LANDIS, A.E.; JONES, A.K.; SCHAEFER, L.A.; BILEC, M.M.; Dynamic life cycle assessment: framework and application to an institutional building, **The International Journal of Life Cycle Assessment**. (2013) 18:538–552. Publicado on line em março, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0528-2>. Acesso em 15.03.2025.

COPIELLO, S.; GABRIELLI, L.; BONIFACI, P.; Evaluation of energy retrofit in buildings under conditions of uncertainty: The prominence of the discount rate, **Energy**, Volume 137, 2017, Pages 104-117, ISSN 0360-5442,

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.159>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217311179>; Acesso em 10.04.2025.

CORREIA, C.M.A.; AMORIM, C.N.D.; SANTAMOURIS, M.; Use of passive cooling techniques and super cool materials to minimize cooling energy and improve thermal comfort in Brazilian schools, **Energy and Buildings**, Volume 312, 2024, 114125, ISSN 0378-7788, Publicado on line em junho, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877882400241X>. Acesso em 20.10.2024.

COSTA, Simone; KOS, Darja. Aplicação da metodologia de avaliação do ciclo de vida energético a uma residência em Belém-PA. **Paranoá**, [S. l.], v. 14, n. 30, 2021. DOI: 10.18830/issn.1679-0944.n.30. Publicado on line em maio, 2021. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/paranoa/article/view/34889>. Acesso em: 23.05. 2024.

DABOUS, S.A.; IBRAHIM, T.; SHAREEF, S.; MUSHTAHA, E.; ALSYOUF, I.; Sustainable façade cladding selection for buildings in hot climates based on thermal performance and energy consumption, **Results in Engineering**, V. 16, 2022, 100643, ISSN 2590-1230. Publicado on line em dezembro, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123022003139>. Acesso em 20.04.2024.

DE GRACIA, A.; RINCÓN, L.; CASTELL, A.; JIMÉNEZ, M.; BOER, D.; MEDRANO, M.; CABEZA, L.F.; Life Cycle Assessment of the inclusion of phase change materials (PCM) in experimental buildings, **Energy and Buildings**, volume 42, Issue 9, 2010, Pages 1517-1523, ISSN 0378-7788, Publicado em setembro, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810001143>. Acesso em 03.04.2025.

DIAMOND, S. C.; HUNN, B.D. Comparison of doe-2 computer program simulations to metered data for seven commercial building. **ASHRAE Transactions**, v. 87, p. 982-993, 1981. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscar.html?task=detalhes&id=W1486884293>. Acesso em 20.10.2024.

DIXIT, M.K.; FERNÁNDEZ-SOLÍS, J.L; LAVY, S.; CULP, C.H.; Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 16, Issue 6, 2012, Pages 3730-3743, ISSN 1364-0321, Publicado em agosto, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112002043>. Acesso em 30.01.2024.

DORNELLES, K. A.; CARAM, R. M.; SICHIERI, E. P. Absortância solar e desempenho térmico de tintas frias para uso no envelope construtivo. **Paranoá**, [S. l.], v. 7, n. 12, 2014. DOI: 10.18830/issn.1679-0944.n12.2014.12212. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/paranoa/article/view/10685>. Acesso em: 10.04.2025.

Ecoinvent, 2025. (version 3.11). Disponível em: <https://ecoinvent.org/>.

ENERGYPLUS, Disponível em: <https://energyplus.net/downloads>

ELIOPOULOU, E.; MANTZIOU, E.; Architectural Energy Retrofit (AER): An alternative building's deep energy retrofit strategy, **Energy and Buildings**, V. 150, 2017, P. 239-252, ISSN 0378-7788. Publicado on line em setembro, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881731561X>. Acesso em 20.04.2024.

ELOTEFY, H.; ABDELMAGID, K.S.S.; MORGHANY, E.; AHMED, T.M.F.; Energy-efficient Tall Buildings Design Strategies: A Holistic Approach, **Energy Procedia**, V. 74, 2015, P. 1358-1369, ISSN 1876-6102. Publicado on line em agosto, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215015507>. Acesso em 10.03.2024.

EPDB, 2002/91. Diretiva europeia de desempenho energético de Edifícios - **Diretiva 2002/91/CE**. (2002). relativa ao desempenho energético dos edifícios. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/ALL/?uri=CELEX%3A32002L0091>. Acesso em 20.04.2024.

EPDB, 2010/31 – Diretiva europeia de desempenho energético de Edifícios. **Diretiva 2010/31/UE**. (2010). Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). Obtido de <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32010L0031&from=EN>;

EPBD, 2015 – **Diretiva europeia de desempenho Energético de Edifícios**. L'Union sociale pour l'habitat, "Directive européenne Efficacité énergétique des bâtiments (EPBD). Etat d'avancement de la transcription dans les pays européens," 2015. [Online]. Available: www.union-habitat.org.

EQUATORIAL ENERGIA, 2025. **Valor de tarifas e serviços**. Disponível em: <https://go.equatorialenergia.com.br/valor-de-tarifas-e-servicos/>. Acesso em 20.04.2025.

EU 244/2012 - EU Commission. Commission Delegated Regulation **EU 244/2012** of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2012/244/oj/eng

FAHKSTEDT, O.; RASMUSSEN, F.N.; TEMELJOTOV-SALAI, A.; HUANG, L.; ANDRÉ, B.; Building renovations and life cycle assessment - A scoping literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, V. 203, 2024, 114774, ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114774> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032124005008>. Acesso em 20.03.2025.

FEREIDANI, N.A.; RODRIGUES, E.; GASPAR, A.R.; A review of the energy implications of passive building design and active measures under climate change in the Middle East, **Journal of Cleaner Production**, V. 305, 2021, 127152, ISSN 0959-6526. Publicado on line em julho, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127152>. Acesso em 20.04.2024.

FERNANDES, Antônio Manuel Corado Pombo. **Arquitetura e sombreamento**: parâmetros para a região climática de Goiânia. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Programa de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura – PROPAP, Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Goiânia, abril, 2007.

FERNANDES, M.S.; COUTINHO, B.; RODRIGUES, E.; The impact of climate change on an office building in Portugal: Measures for a higher energy performance, **Journal of Cleaner Production**, Volume 445, 2024, 141255, ISSN 0959-6526, Publicado em março, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652624007029>. Acesso em 23.04.2025.

FERREIRA, C. C.; SOUZA, H. A. de; ASSIS, E. S. de. Discussão dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos segundo as normas de desempenho térmico brasileiras. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 183- 200, jan./mar. 2017. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100131>. Acesso em 20.03.2025.

FORLIN, C.L.; ROSSI, F.A.; Estudo experimental sobre a influência teórica de módulos fotovoltaicos aplicados em fachadas em Curitiba, PR. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 25, e141460, jan./dez. 2025. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212025000100844>. Acesso em 03.04.2025.

FUKUOKA, R.; PACHECO, G.; BRIANTI, L.; GOMES, P.; LUZ, V.; GOUVEIA, V.; BRITO, G.; NALDI, L. **Guia Interativo de Eficiência Energética em Edificações** – Versão 02. SindusCon-SP. São Paulo, março, 2024. Disponível em: https://www.guiaenergiaedificacoes.com.br/wp-content/themes/sinduscon/pdfs/Guia_Compilado_Atualizado_V3.pdf. Acesso em 29.01.2025.

GALVÃO, Á. C. P.; FARIAS, A. C. M.; MENDES, J. U. L. obtenção e caracterização de espumas rígidas de poliuretano (pur) com pó de vidro sodo-cálcico (PV) do rejeito da lapidação Holos, vol. 5, 2015, pp. 104-118. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. Natal, Brasil. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=481547288011>

GAMERO-SALINAS, J.; MONGE-BARRIO, A.; KISHNANI, N.; LÓPEZ-FIDALGO, J.; SÁNCHEZ-OSTIZ, A.; *Passive cooling design strategies as adaptation measures for lowering the indoor overheating risk in tropical climates*, **Energy and Buildings**, Volume 252, 2021, 111417, ISSN 0378-7788. Publicado em dezembro, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821007015>. Acesso em 10.02.2024.

GAN, V. J.L.; DENG, M.; TSE, K.T.; CHAN, C.M.; LO, I.M.C.; CHENG, J.C.P.; Holistic BIM framework for sustainable low carbon design of high-rise buildings. **Journal of Cleaner Production**, V. 195, 2018, Pages 1091-1104, ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.272>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618316251>. Acesso em 14.04.2025.

GAN, J., LI, K., LI, X., MOK, E., HO, P., LAW, J., LAU, J., KWOK, R., & YAU, R. (2023). Parametric BIM-Based Lifecycle Performance Prediction and Optimisation for Residential Buildings Using Alternative Materials and Designs. **Buildings**, 13(4), 904. Publicado em março, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/4/904>. Acesso em 21.03.2025.

GARCIA, E. F. Energia solar fotovoltaica sua eficiência energética: quem tem a maior capacidade para geração x quem mais produz. **Revista FT**, Engenharias, Volume 29, Edição 143, 2025. Publicado em fevereiro, 2025. Disponível em: <https://revistافت.com.br/2025/02/page/45/> acesso em 04.04.2025.

GASPAR, P.L.; SANTOS, A. L.; Embodied energy on refurbishment vs. demolition: A southern Europe case study, **Energy and Buildings**, Volume 87, 2015, Pages 386-394, ISSN 0378-7788. Publicado em janeiro, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814009712>. Acesso em 20.02.2025.

GBC. 2023. Green Building Council – Brasil. **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para edificações**. Publicado em 24.24.2023. Disponível em: <https://www.gbcbrazil.org.br/avaliacao-do-ciclo-de-vida-acv-para-edificacoes/> . Acesso em 25.04.2025.

GHADERIAN, M.; VEYSI, F., Multi-objective optimization of energy efficiency and thermal comfort in an existing office building using NSGA-II with fitness approximation: A case study, **Journal of Building Engineering**, V. 41, 2021,102440,ISSN 2352-7102. Publicado on line em setembro, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221002977> . Acesso em 14.04.2024.

GILANI,G.; AMIM HOSSEINI, S.M.; PONS-VALLADARES, O.; LA FUENTE, A. An enhanced multi-criteria decision-making approach oriented to sustainability analysis of building facades: A case study of Barcelona, **Journal of Building Engineering**, V. 54, 2022, 104630, ISSN 2352-7102, disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104630>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022200643X>, acesso em abril, 2025.

GONÇALVES, J.C.S.; BODE,K. **Edifício Ambiental**. São Paulo, SP, BRASIL. Oficina de Textos, 2015.

GOUVEIA, P. **Caracterização dos impactes da envolvente no desempenho térmico dos edifícios**. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2008.

GUPTA,V.; DEB, C.; Energy retrofit analysis for an educational building in Mumbai, **Sustainable Futures**, V. 4, 2022, 100096, ISSN 2666-1888. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2022.100096>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666188822000302>. Acesso em 20.03.2024.

GUPTA, V.; DEB, C.; Envelope design for low-energy buildings in the tropics: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 186, 2023, 113650, ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113650> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123005075>. Acesso em 20.03.2024.

GUPTA, N.; TIWARI, G.N.; Review of passive heating/cooling systems of buildings. **Energy & Engineering**. V4, issue 5, 2016 p. 305 – 333. Publicado on line em outubro, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ese3.129>. Acesso em 12.02.2024.

HADDAD, J. A lei de eficiência energética e o estabelecimento de índices mínimos de eficiência energética para equipamentos no Brasil. SBPE. **Revista Brasileira de Energia**. Vol. 11, nº 1. Publicado em janeiro, 2005. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/issue/view/20> acesso em abril, 2025.

HAMDAOUI, S.; MAHDAOUI, M.; ALLOUHI, A.; EL ALAIJI, R. ; KOUKSOU,T.; El Bouardi, A. Energy demand and environmental impact of various construction scenarios of an office building in Morocco, **Journal of Cleaner Production**, volume 188, 2018, Pages 113-124, ISSN 0959-6526, Publicado on line em julho, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261830979X>. Acesso em 20.04.2025.

HAMOOLEH, M.B.; TORABI, A.; BAGHOOLIZADEH,M.; Multi-objective optimization of energy and thermal comfort using insulation and phase change materials in residential buildings,**Building and Environment**,Volume 262,2024,111774,ISSN 0360-1323, Publicado em agosto, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132324006164>. Acesso em 15.10.2024.

HAPPLE, G.; FONSECA, J.A.; SCHLUETER, A. A review on occupant behavior in urban building energy models, **Energy and Buildings**, volume 174, 2018, Pages 276-292, ISSN 0378-7788. Publicado on-line em setembro, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817333583>. Acesso em 30.01.2025.

HASHEMPOUR, N.; TAHERKHANI, R.; MAHDIKHANI, N., *Energy performance optimization of existing buildings: A literature review*, **Sustainable Cities and Society**, Volume 54, 2020, 101967, ISSN 2210-6707, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101967>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670719320566>

HE, Q.; HOSSAIN, U.; NG, T.S.; SKITMORE, M.; AUGENBROE, G. A cost-effective building retrofit decision-making model – Example of China’s temperate and mixed climate zones, **Journal of Cleaner Production**, V. 280, Parte 2, 2021, 124370,ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124370>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620344152>. Acesso em 15.04.2025.

HEE, W.J. ; ALGHOUL, M.A. ; BAKHTYAR, B. ; OMKALTHUM ELAYEB, M.A. SHAMERI, M.S. ALRUBAIH, K. SOPIAN, The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, V 42, 2015, P 323-343, ISSN 1364-0321. Publicado em fevereiro, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211400793X>. Acesso em 23.03.2024.

HOGELING, J, DERJANECZ,A. **The 2nd recast of the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)**, EU Policy News. Rehva J 2018 (April):71–2. Disponível em: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en. Acesso em 10.04.2025.

HU, Y.; HUANG, H.; WANG, H.; LI, C.; DENG, Y. Exploring cost-effective strategies for emission reduction of public buildings in a life-cycle, **Energy and Buildings**, V. 285, 2023, 112927,ISSN 0378-788. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112927>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778823001573>. Acesso em 16.03.2025.

HONG, T.; YAN, D.; D'OCA, S.; CHEN, C.; Ten questions concerning occupant behavior in buildings: The big picture, **Building and Environment**, V. 114, 2017, P. 518-530, ISSN 0360-1323. Publicado em março, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132316304851>, acesso em 04.04.2025.

HU, Y.J.; HUANG, H.; WANG, H.; LI, C.; DENG, Y.; Exploring cost-effective strategies for emission reduction of public buildings in a life-cycle, **Energy and Buildings**, Volume 285, 2023, 112927, ISSN 0378-7788. Publicado em abril, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778823001573>. Acesso em 15.03.2024.

HUANG, Y.; NIU, J.; CHUNG, T.; Comprehensive analysis on thermal and daylighting performance of glazing and shading designs on office building envelope in cooling-dominant climates, **Applied Energy**, V 134, 2014, P 215-228, ISSN 0306-2619. Publicado em dezembro, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914007910>. Acesso em 14.04.2024.

HUANG, H.; ZHOU, Y.; HUANG, R.; WU, H.; SUN, Y.; HUANG, G.; XU, T.; Optimum insulation thicknesses and energy conservation of building thermal insulation materials in Chinese zone of humid subtropical climate, **Sustainable Cities and Society**, Volume 52, 2020, 101840, ISSN 2210-6707. Publicado em janeiro, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221067071931457X>. Acesso em 10.03.2024.

IEA, 2022 – **CO₂ Emissions in 2022**: Growth in emissions lower than feared – International Energy Agency

IEA / EBC 2023 – International Energy Agency. Energy in Buildings and Communities. **EBC Annual Report 2023**. Technology Collaboration Programme. Published by AECOM Ltd on behalf of the International Energy. Disponível em: https://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annual_Report_2023.pdf. Acesso em 20.02.2024.

IEA / EBC 2023 a – International Energy Agency. Energy in Buildings and Communities. **Benchmarking and target-setting for the life cycle-based environmental performance of buildings**. Technology Collaboration Programme. Publicado em fevereiro, 2023. Disponível em: https://annex72.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_72_Benchmarking_for%20Environmental_Performance_of_Buildings_2023.pdf. Acesso em: 20.02.2024.

IHM, P.; PARK, L.; KRARTI, M.; SEO, D; Impact of window selection on the energy performance of residential buildings in South Korea, **Energy Policy**, Volume 44, 2012, Pages 1-9, ISSN 0301-4215. Publicado on line em maio, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.08.046>. Acesso em 06.04.2025.

IMAFIDON, O.J.; TING, D.S-K; Retrofitting buildings with Phase Change Materials (PCM) – The effects of PCM location and climatic condition, **Building and Environment**, Volume 236, 2023, 110224, ISSN 0360-1323. Publicado on line em maio, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110224>. Acesso em 05.03.2024.

INATOMI, T. A. H.; Udaeta, M. E. M. Análise dos impactos ambientais na produção de energia dentro do planejamento integrado de recursos. (CORI - UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas, Ed.) In: **Workshop internacional Brasil-Japão: Implicações regionais e globais em energia, meio ambiente e desenvolvimento sustentável**, 3., 2005, Campinas. Anais. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: https://scholar.google.com.br/citations?view_op=view_citation&hl=pt-BR&user=xyGjcrQAAAAJ&citation_for_view=xyGjcrQAAAAJ:9yKSN-GCB0IC

INGRAO, C.; MESSINEO, A.; BELTRAMO, R.; YIGITCANLAR, T.; IOPPOLO, G.; How can life cycle thinking support sustainability of buildings? Investigating life cycle assessment applications for energy efficiency and environmental performance, **Journal of Cleaner Production** (2018), Disponível em: https://eprints.qut.edu.au/120628/1/QUT_eprints.pdf. Acesso em 20.02.2024.

INPE, 2017. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2017). **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2ª. Edição. São José dos Campos (2017). Disponível em: [http://doi.org/10.34024/97885170008980p.:il.\(EBOOK\)](http://doi.org/10.34024/97885170008980p.:il.(EBOOK)). Acesso 04.04., 2025.

INSTITUTE FOR SUSTAINABLE FUTURE (2019). **Responsible minerals sourcing for renewable energy**. Disponível em: https://earthworks.org/assets/uploads/2019/04/MCEC_UTS_Report_lowres-1.pdf. Acesso em 20.03.2024.

IPCC, 2018. INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC, 2018). **Sumário para formuladores de políticas**. Publicado em outubro, 2018. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_SPM_Portuguese.pdf

IPCC, 2022. INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC): **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental

Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926

IPCC, 2023. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC, 2023): **Summary for Policymakers**. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf Acesso em 20.04.2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2013). Programme on Energy in Buildings and Communities. **Total energy use in buildings**. Analysis and evaluation methods. Final Report Annex 53. Operating Agent: Emeritus Professor Hiroshi Yoshino. Graduate School of Engineering, Tohoku University Sendai, Japan. Publicado em novembro, 2013. Disponível em: https://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_53_Main_Report.pdf. Acesso em 15.03.2025.

ISO, 2011. (INTERNATIONAL STANDARTIZATION ORGANIZATION) **ISO 15686 -1:2011**. Edifícios e ativos construídos — Planejamento da vida útil Parte 1: Princípios gerais e estrutura. Publicado (Edição 2, 2011). Disponível em: https://www-iso-org.translate.goog/standard/45798.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc. Acesso em 20.02.2025.

IWARO, J.; MWASHA, A.; WILLIAMS, R.G.; ZICO, R.; An Integrated Criteria Weighting Framework for the sustainable performance assessment and design of building envelope, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 29, 2014, Pages 417-434, ISSN 1364-0321. Publicado em janeiro, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113006369>. Acesso em: 06.04. 2025.

JAIN, A.S.; SAIKIA, P.; RAKSHIT, D.; *Thermal energy performance of an academic building with sustainable probing and optimization with evolutionary algorithm*, **Thermal Science and Engineering Progress**, Volume 17, 2020, 100374, ISSN 2451-9049. Publicado em junho, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451904919301507>. Acesso em 02.02.2024.

JANKOBIC, L.; BHARADWAJ, P.; CARTA, S.; *How can UK housing projects be brought in line with net-zero carbon emission targets?* (no. November), **Front. Built Environ.** 7 (2021) 1–11, Publicado em novembro, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.754733>. Acesso em 20.03.2025.

JELLE, B.P; KALNÆS, S. E.; GAO, T. Low-emissivity materials for building applications: A state-of-the-art review and future research perspectives, **Energy and Buildings**, v. 96, 2015, p. 329-356, ISSN 0378-7788. Publicado em junho, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815002169>. Acesso em 02.02.2024.

JOUDI, A.; SVEDUNG, H.; CEHLIN, M.; RÖNNELID, M.; Reflective coatings for interior and exterior of buildings and improving thermal performance, **Applied Energy**, Volume 103, 2013, Pages 562-570, ISSN 0306-2619. Publicado em março, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912007258>. Acesso em 15.03.2025.

KANG, Y.; CUI, Y.; ZHANG, D.; XU, W.; PANG, F.; LU, S.; WU, J.; ZHAO, Y.; MAO, R.; Comprehensive photovoltaic system in roofs, opaque walls, and windows toward zero-energy buildings utilizing multi-objective optimization, **Journal of Building Engineering**, Volume 104, 2025, 112320, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112320>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710225005571>. Acesso em 15.04.2025.

KHAN, S.A.; ALAM, T.; KHAN, M.S.; Blecich, P.; Kamal, M.A.; Gupta, N.K.; Yadav, A.S. Life Cycle Assessment of Embodied Carbon in Buildings: Background, Approaches and Advancements. **Buildings** 2022, 12, 1944. Publicado em novembro, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/11/1944>. Acesso em 17.04.2025.

KOLOKOTSA, D.; ROVAS, D.; KOSMATOPOULOS, E. ; KALAITZAKIS, K.; A roadmap towards intelligent net zero- and positive-energy buildings, **Solar Energy**, Volume 85, Issue 12, 2011, Pages 3067-3084, ISSN 0038-092X. Publicado em dezembro, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X10002847>. Acesso em 17.03.2024.

KONSTANTINO, T.; PRIETO H., A. Environmental Design Principles for the Building Envelope and More __: Passive and Active Measures. In T. Konstantinou, N. Cukovic, & M. Zbasnik (Eds.), **Energy - Resources and Building Performance** (pp. 147-180). (Reviews of Sustainability and Resilience of the Built Environment for Education, Research and Design). Publicado on line. Disponível em: <https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/51464817/Chapter.pdf>. Acesso em 20.04.2024.

KONTOLEON, K. J.; SABOOR, S.; MAZZEO, D.; AHMAD, J.; ERDEM CUCE, Thermal sensitivity and potential cooling-related energy saving of masonry walls through the lens of solar heat-rejecting paints at varying orientations,

Applied Energy, Volume 329, 2023, 120264, ISSN 0306-2619. Publicado em janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922015215>. Acesso em 20.03.2024.

KRSTIĆ-FURUNDŽIĆ, A.; VUJOŠEVIĆ, M.; PETROVSKI, A.; Energy and environmental performance of the office building facade scenarios, **Energy**, V. 183, 2019, p. 437-447, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.231>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219311235>. Acesso em 20.05.2024.

KUMAR, A.; SUMAN, B.M.; *Experimental evaluation of insulation materials for walls and roofs and their impact on indoor thermal comfort under composite climate*, **Building and Environment**, Volume 59, 2013, p. 635-643, ISSN 0360-1323. Publicado em janeiro, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.09.023>. Acesso em 03.04.2025.

KUMAR, D.; ALAM, M.; ZOU, P.X.W.; SANJAYAN, J.G.; MEMON, R.A.; Comparative analysis of building insulation material properties and performance, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 131, 2020, 110038, ISSN 1364-0321. Publicado em outubro, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120303294>. Acesso em 03.04.2025.

KUMAR, D.; ALAM, M.; MEMON, R.A.; BHAYO, A.; A critical review for formulation and conceptualization of an ideal building envelope and novel sustainability framework for building applications, **Cleaner Engineering and Technology**, Volume 11, 2022, 100555, ISSN 2666-7908. Publicado em dezembro, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790822001604>, acesso em 02.04.2025.

KUZNIK, F.; VIRGONE, J. Experimental Investigation of Wallboard Containing Phase Change Material: Data for Validation of Numerical Modeling. **Energy and Buildings**, 2009, 41 (5), pp.561-570. Disponível em: <https://hal.science/hal-00567439v1/document>. Acesso em 20.02.2024.

LAMBERTS, R.; PEREIRA, F. O. R.; DUTRA, L. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3a edição ed. Rio de Janeiro: 2014. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf. Acesso em 30.01.2025.

LAMRHARI, D.; BENHAMOU, E.H.; B. Thermal behavior and energy saving analysis of a flat with different energy efficiency measures in six climates. **Build. Simul.** 11, 1123–1144 (2018). Publicado em setembro, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0467-3>. Acesso em 06.05.2025.

LATHA, P.K.; DARSHANA, Y.; VENUGOPAL, V.; Role of building material in thermal comfort in tropical climates – A review, **Journal of Building Engineering**, V. 3, 2015, p.104-113, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.06.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710215300024>. Acesso em: 23.03.2025.

LAUSSELET, C.; URREGO, J.P.F.; RESCH, E.; BRATTEBO, H.; Temporal analysis of the material flows and embodied greenhouse gas emissions of a neighborhood building stock. **Research and analysis**. 2020. Publicado em julho, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.13049>. Acesso em 4.12.2024.

LE DEN, X., STEINMANN, J., RÖCK, M., BIRGISDOTTIR, H., HORUP, L. H., TOZAN, B., SØRENSEN, A. (2022). Towards embodied carbon benchmarks for buildings in Europe: Summary report. Rambøll. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6397514>. Acesso em 20.02.2023.

LI, H.X.; LI, Y.; JIANG, B.; ZHANG, L.; WU, Z.; WU, X.; LIN, J.; Energy performance optimisation of building envelope retrofit through integrated orthogonal arrays with data envelopment analysis, **Renewable Energy**, v. 149, 2020, p. 1414-1423, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.143>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119316404>. Acesso em 4.12.2024.

LI, M.; CAO, S.; ZHU, X.; XU, Y.; Techno-economic analysis of the transition towards the large-scale hybrid wind-tidal supported coastal zero-energy communities, **Applied Energy**, Volume 316, 2022, 119118, ISSN 0306-2619. Publicado em junho, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922004998>. Acesso em 23.03.2023.

LI, T.; LIU, X.; ZHOU, W.; MA, J.; LI, Y.; GAO, J.; CHEN, M.; MAO, Q.; Optimizing building energy consumption through synchronization and asynchronization of occupancy and air-conditioning behavior, **Energy and Buildings**, Volume 331, 2025, 115409, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115409>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778825001392>. Acesso em 20.04.2025.

LIBRELOTTO, D.; JALALI, S. **Aplicação de uma Ferramenta de Análise do Ciclo de Vida em Edificações Residenciais** – Estudos de caso. Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil. Guimarães, Portugal, 2008. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/8436>. Acesso em 16.04.2024.

LINCZUK, V. C. C.; BASTOS, L. E. G. Otimização multiobjetivo orientada ao desempenho térmico para o projeto de edificações de baixo consumo de energia na Região Sul do Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 509-529, out./dez. 2020. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000400485>. Acesso em 03.04.2024.

LUO, X.; ZHANG, Y.; LU, J.; GE, J. *Multi-objective optimization of the office park building envelope with the goal of nearly zero energy consumption*, no. 1060, p. J. **Build. Eng.** 84 (2024) 108552. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108552>. Acesso em 23.01.2025.

MACIEL, M. A. D. **Levantamento de inventário de emissões de gases de efeito estufa em obra de indústria da construção civil em Maringá/PR**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Limpas). Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas do Centro Universitário de Maringá, Unicesumar, Maringá, 2016.

MAKA, A. O.M.; GHALUT, T.; ELSAYE, E.; The pathway towards decarbonisation and net-zero emissions by 2050: The role of solar energy technology, **Green Technologies and Sustainability**, Volume 2, Issue 3, 2024, 100107, ISSN 2949-7361. Setembro, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949736124000344>. Acesso em 20.04.2025.

MANNI, M.; NICOLINI, A. Multi-Objective Optimization Models to Design a Responsive Built Environment: A Synthetic Review, **Energies** 15 (2) (2022) 486. Publicado em janeiro, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15020486>. Acesso em 20.04.2025.

MARIANO, J.D'A. **Análise do potencial de geração de energia fotovoltaica para a redução dos picos de demanda e contribuição energética nas edificações da UFTPR**, em Curitiba. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). UFTPR, Curitiba, 2017.

MENDES, V.F.; CRUZ, A.S.; GOMES, A.P.; MENDES, J.C. *A systematic review of methods for evaluating the thermal performance of buildings through energy simulations*, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 189, Part A, 2024, 113875, ISSN 1364-0321. Publicado em janeiro, 2024. Disponível: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123007335>. Acesso em: 20.04.2025.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; CUNHA NETO, J.A.B. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, out./dez. 2005. ISSN 1415-8876 © 2005, Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Disponível em: <file:///C:/Users/cssffaria/Downloads/ambienteconstruido,+3.pdf>. Acesso em: 23.04.2025.

MENG, Y T. LI, G. LIU, S. XU, T. JI, Real-time dynamic estimation of occupancy load and an air-conditioning predictive control method based on image information fusion, **Building And Environment** 173 (2020). Publicado em maio, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132320300998>. Acesso em 02.02.2024.

MERRIAN-WEBSTER, 2025. Disponível em: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/benchmarking?src=search-dict-box>. Acesso em 20.04.2025.

METZ. B. et al. (Ed). Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. **Cambridge University Press**, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg3_full_report-1.pdf. Acesso em 23.03.2024.

MI, X.; LIU, R.; CUI, H.; MEMON, S.A.; XING, F.; LO, Y.; Energy and economic analysis of building integrated with PCM in different cities of China, **Applied Energy**, Volume 175, 2016, Pages 324-336, ISSN 0306-2619. Publicado em agosto, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916306262>. Acesso em: 20.04.2024.

MIRANDA, Mariana Maia de. **Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-22012013-112737/>. Acesso em: 20.04.2025.

MIRANDA, N.D.; RENALDI, R.; KHOSLA, R.; McCULLOCH, M.; Bibliometric analysis and landscape of actors in passive cooling research, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, V. 149, 2021, 111406, ISSN 1364-0321. Publicado em dezembro, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121006900>. Acesso em 12.03.2025.

MOSTAFAVI, F.; TAHSILDOOST, M.; ZOMORODIAN, Z.; Fatemeh Mostafavi, Mohammad Tahsildoost, ZahraSadat Zomorodian, Energy efficiency and carbon emission in high-rise buildings: A review (2005-2020), **Building**

and Environment, Volume 206, 2021, 108329, ISSN 0360-1323, Publicado em dezembro, 2021. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132321007265> , acesso em 15.04.2025.

MOUSAVI, S.; GIJÓN-RIVERA, M.; RIVERA-SOLORIO, C.I.; RANGEL, C.G.; Energy, comfort, and environmental assessment of passive techniques integrated into low-energy residential buildings in semi-arid climate, **Energy and Buildings**, Volume 263, 2022, 112053, ISSN 0378-7788. Publicado em maio, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778822002249>.

MULYA, K.S.; NG, W.L.; BIRÓ, K.; HO, W.S.; WONG, K.; Y.; WOON, K.S.; ,Decarbonizing the high-rise office building: A life cycle carbon assessment to green building rating systems in a tropical country, **Building and Environment**, Volume 255, 2024, 111437, ISSN 0360-1323. Maio/ 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132324002798>. Acesso em 23.02.2025.

MUNARIM, Ulisses. **Benefícios ambientais da preservação do patrimônio edificado**: Análise do ciclo de vida da reabilitação de edificações vs. nova construção. Tese de Doutorado (Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2014.

MYINT, N.N.; SHAFIQUE, M. Embodied carbon emissions of buildings: Taking a step towards net zero buildings, **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, 2024, e03024, ISSN 2214-5095. Março, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221450952400175X>. Acesso em 24.03.2025.

MYINT, N.N.; SHAFIQUE, M.; ZHOU, X.; ZHENG, Z. ; Net zero carbon buildings: A review on recent advances, knowledge gaps and research directions, **Case Studies in Construction Materials**, v. 22, 2025, e04200, ISSN 2214-5095. Janeiro, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04200>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509524013524>. Acesso em 24.03.2025.

NAZI, W.I.W.M.; WANG, Y.; CHEN, H; ZHANG, H.; ZHANG, X.; ROSKILLY, A. P.; Passive Cooling Using Phase Change Material and Insulation for High-rise Office Building in Tropical Climate. **Energy Procedia**, V. 142, 2017, P. 2295-2302, ISSN 1876-6102. Publicado em Dezembro, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217363956>. Acesso em 25.11.2025.

NEMATCHOUA, M.K.; NOELSON, J.C.V.; SAADI, I.; KENFACK, H.; ANDRIANAKARINJAKA, A.F.R.; NGOUMDOUM, D.F.; SELA, J.B.; REITER, S.; Application of phase change materials, thermal insulation, and external shading for thermal comfort improvement and cooling energy demand reduction in an office building under different coastal tropical climates, **Solar Energy**, V. 207, 2020, P. 458-470, ISSN 0038-092X. Publicado em dezembro, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20307246>. Acesso em 12.04.2024.

NEXO jornal, 2021. Expresso. **Como o Brasil pode cumprir suas metas climáticas em 3 frentes**. Marcelo Roubicek, 08 de novembro de 2021, atualizado em: 28/12/2023. Disponível em <https://www.nexojournal.com.br/expresso/2021/11/08/como-o-brasil-pode-cumprir-suas-metas-climaticas-em-3-frentes>. Acesso em 10.02.2025.

NEWBERRY, P.; HARPER, P.; NORMAN, J.; Carbon assessment of building shell options for eco self-build community housing through the integration of building energy modelling and life cycle analysis tools, **Journal of Building Engineering**, Volume 70, 2023, 106356, ISSN 2352-7102. Publicado em julho, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223005351>

NOROUZI, M.; HADDAD, A.N.; JIMÉNEZ, L.; HOSEINZADEH, S.; BOER, D.; *Carbon footprint of low-energy buildings in the United Kingdom: Effects of mitigating technological pathways and decarbonization strategies*, **Science of The Total Environment**, Volume 882, 2023, 163490, ISSN 0048-97. Publicado em julho, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723021095>. Acesso em 21.11.2024.

OLIVEIRA, L. G. M. **Avaliação de fatores que influenciam na estimativa da geração e operação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

OLIVEIRA, M. E. de; VIAJANTE, G. P. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO SETOR PÚBLICO COM VISTAS A ECONOMICIDADE E DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO: O CASO DO INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS. **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS**, [S. l.], 2024. DOI: 10.59627/cbens.2024.2444. Setembro, 2024. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/2444>. Acesso em: 16.04.2025.

OLIVEIRA, Matheus Menezes. **Investigação da influência dos materiais de mudança de fase no conforto térmico em modelo de escritório nos climas brasileiros**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Federal de Viçosa. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Viçosa, Minas Gerais, 2023;

OLSEN, Natasha. ArchDaily. Artigos. **O que acontece com um painel solar quando termina sua vida útil?** Publicado em 27 de setembro de 2020, disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/948299/o-que-acontece-com-um-painel-solar-quando-termina-sua-vida-util>. Acesso em 16.04.2024.

ONU, 2024. Organização das Nações Unidas – Brasil. **Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em 20.03.2024.

PAN, D.; YU, X.; ZHOU, Y.; Cradle-to-grave lifecycle carbon footprint analysis and frontier decarbonization pathways of district buildings in subtropical Guangzhou, China, **Journal of Cleaner Production**, Volume 416, 2023, 137921, ISSN 0959-6526. Setembro, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623020796>. Acesso em 03.04.2024.

PAN, Y.; ZHU, M.; LV, Y.; YANG, Y.; LIANG, Y.; YIN, R.; YANG, Y.; JIA X.; ZENG, F.; HUANG, S.; HOU, D.; XU, L.; YIN, R.; YUAN, X.; *Building energy simulation and its application for building performance optimization: A review of methods, tools, and case studies*, **Advances in Applied Energy**, Volume 10, 2023, 100135, ISSN 2666-7924 Publicado em junho, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666792423000148>. Acesso em 05.04.2024.

DE PAULA, J. F. S.; LIMA, G. P.; PRYM, G. C. S.; SILVA, J. L. S.; MELO, K. B.; BARROS, T. A. dos S. VILLALVA, M.G. Análise comparativa de desempenho de um sistema fotovoltaico simulado com as ferramentas PVSYS e SAM (System Advisor Model). **Anais do IX Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Florianópolis, 23 a 27 de maio de 2022.

PAULSEN, J.S.; SPOSTO, R.M. A life cycle energy analysis of social housing in Brasil: Case study for the program “MY HOUSE MY LIFE”. **Energy and Buildings**. V.57. P 95-102. 2013. Publicado em fevereiro, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812006056>. Acesso em 03.03.2024.

PEDROSO, G. M. P. **Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) de Sistemas de Vedação de Habitações**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

PEZESHKI, Z.; SOLEIMANI, A.; DARABI, A.; *Application of BEM and using BIM database for BEM: A review*, **Journal of Building Engineering**, Volume 23, 2019, Pages 1-17, ISSN 2352-7102 Publicado em maio, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710218309501>. Acesso em 03.04.2024.

PNUMA, 2021. **Relatório de status global de 2021 para edifícios e construção** | globalabc 2021. <https://globalabc.org/resources/publications/2021-global-status-report-buildings-and-construction> (acessado em 27 de março de 2022).

POMPONI, F.; POORANG, A.E.; PIROOZFAR, R.S.; ASHTON, P.; FARR, E.R.P.; Life cycle energy and carbon assessment of double skin façades for office refurbishments, **Energy and Buildings**, Volume 109, 2015, Pages 143-156, ISSN 0378-7788. Publicado em dezembro, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815302917>. Acesso em 20.04.2024.

PONS, Vinicius; STANESCU, George. Materiais com mudança de fase: análise de desempenho energético para o Brasil. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 8, n. 2, p. 127-140, jun. 2017. ISSN 1980-6809. Publicado em junho, 2023. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8650228/0>. Acesso em: 20.05.2023.

PRIETO HOCES, A. (2018). Coolfacade: Architectural integration of solar cooling strategies in the building envelope. **A+BE | Architecture and the Built Environment**, 8(29), 302. Publicado em novembro, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.7480/abe.2018.29.2775>. Acesso em 23.04.2024.

PROCEL, 2011. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Manual de Tarificação da Energia Elétrica**. Agosto, 2011. Disponível em: https://www.eletrica.ufpr.br/sebastiao/wa_files/te344%20aula%2009%20-%20manual%20de%20tarif%20en%20el%20-%20procel_epp%20-%20agosto-2011.pdf. Acesso em 20.04.2025.

PULGROSSI L. M.; SILVA, V.G.; Influência de regras de corte de inventário nos resultados de ACV de edificações. **PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 11, p. e020026, 2020. DOI: [10.20396/parc.v11i0.8658259](https://doi.org/10.20396/parc.v11i0.8658259). Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8658259>. Acesso em: 26 maio. 2025.

QIU, Z; WANG, J.; YU, B.; LIAO, L.; LI, J.; Identification of passive solar design determinants in office building envelopes in hot and humid climates using data mining techniques, **Building and Environment**, V.196, 2021, 107566, ISSN 0360-1323. Publicado em junho, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132320309331>. Acesso em 10.02.2024.

RAJI, B.; TENPIERIK, M. J.; DOBBELSTEEN, A.V. D. *An assessment of energy-saving solutions for the envelope design of high-rise buildings in temperate climates: A case study in the Netherlands*, **Energy and Buildings**, Volume 124, 2016, Pages 210-221, ISSN 0378-7788. Publicado em julho, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815303637>. Acesso em 20.02.2024.

RAMESH, T.; PRAKASH, R. SHUKLA, K.K.; Life cycle energy analysis of buildings: An overview, **Energy and Buildings**, Volume 42, Issue 10, 2010, Pages 1592-1600, ISSN 0378-7788, Publicado em outubro, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.007>. Acesso em 04.05.2024.

RAMOS, L.A.; DURANTE, L.C.; CALLEJAS, I.J.A.; Geração de eletricidade Abordando o Ciclo de Vida; Uma revisão Sistemática sob a Ótica da Sustentabilidade Ambiental. **Engineering and Science** 2017. Publicado em abril, 2017. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/4749/3185>; Acesso em 06.04.2025.

RODRIGUES, Mariana da Costa. (2022) **Arquitetura sustentável**. Soluções construtivas e valor arquitetônico. Dissertação (Mestrado integrado em Arquitetura). Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto.

ROSSO, F.; CIANCIO, V.; DELL'OLMO, J.; SALATA, F.; Multi-objective optimization of building retrofit in the Mediterranean climate by means of genetic algorithm application, **Energy and Buildings**, Volume 216, 2020, 109945, ISSN 0378-7788. Publicado em junho, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778819328683>. Acesso em 04.05.2024.

RUIZ, G. R.; BANDERA, C. F. (2017). Validation of Calibrated Energy Models: Common Errors. **Energies**, 10(10), 1587. Publicado em outubro, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/10/1587>. Acesso em 20.06.2024.

RUBITHERM® Technologies GmbH. Disponível em: <https://www.rubitherm.eu/en//index.html>. Acesso em 20.10.2024.

RUPARATHNA, R.; HEWAGE, K.; SADIQ, R.; Improving the energy efficiency of the existing building stock: A critical review of commercial and institutional buildings, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 53, 2016, Pages 1032-1045, ISSN 1364-0321, publicado em janeiro, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115010540>.

SAFFARI, M.; DE GRACIA, A.; FERNÁNDEZ, C.; CABEZA, L.F.; Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings, **Applied Energy**, Volume 202, 2017, Pages 420-434, ISSN 0306-2619. Publicado em setembro, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917306104>. Acesso em 04.04.2024.

SANTAMOURIS, M., Cooling the buildings – past, present and future. **Energy and Buildings**, V. 128, 2016, p. 617-638, ISSN 0378-7788. Setembro, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816306314>, acesso em 04.05.2024.

SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KARLESSI, T.; Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions, **Solar Energy**, Volume 85, Issue 12, 2011, P. 3085-3102, ISSN 0038-092X, Publicado em dezembro, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X10004020>. Acesso em 23.03.2024.

SARIHI, S.; SARADJ, F.M.; FAIZI, M.; A Critical Review of Façade Retrofit Measures for Minimizing Heating and Cooling Demand in Existing Buildings, **Sustainable Cities and Society**, volume 64, 2021, 102525, ISSN 2210-6707. Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720307411>. Acesso em 02.04.2024.

SEEG, 2025. Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. **Observatório do Clima**. Disponível em: <https://seeg.eco.br/#que>, acesso em 04.04.2025.

SENADO FEDERAL, 2024. **Projeto de lei 4.364 / 2023**. Altera a lei 12.187, de 29 de dezembro de 2009 (Política Nacional sobre Mudança do Clima) para incluir regras de consolidação e fomento à adoção de medidas para mitigação e para remoção de gases de efeito estufa. 2024. Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=2814804&filename=Ultimo%20Despacho%20-%20PL%204364/2023

SKETCHUP. Trimble Navigation. Disponível em: https://www.sketchup.com/pt-br?utm_source=google&utm_medium=paid_search&utm_campaign=SU_Brand_Search_BR.

SINGH, M.C.; GARG, S.N.; Energy rating of different glazings for Indian climates, **Energy**, Volume 34, Issue 11, 2009, Pages 1986-1992, ISSN 0360-5442. Publicado em dezembro, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544209003521>. Acesso em 30.04.2024.

SIDAC, 2022; BELIZARIO-SILVA, F. et al. **Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção** – Metodologia. 1ª edição. São Paulo: SIDAC, 2022. Disponível em: https://sidac.org.br/documentos/Sidac_Metodologia_v1.0.pdf.

SILVA, D. H. **Protocolos de Montreal e Kyoto**: pontos em comum e diferenças fundamentais. Revista Brasileira Política Internacional. 52 (2). Dez 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0034-73292009000200009>; acesso em 05.05.2025.

SILVA, H. L. N. DA. **Benchmarking de consumo energético em edifícios comerciais multiusuários de alto padrão na região metropolitana de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Energia). Universidade Federal do ABC, 2013.

SOKKA, L.; SINKKO, T.; HOLMA, A.; MANNINEN, K.; PASANEN, K.; RANTALA, M.; LESKINEN, P.; Environmental impacts of the national renewable energy targets – A case study from Finland, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, V. 59, 2016, P.1599-1610, ISSN 1364-0321. Publicado em junho, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211501388X>. Acesso em 02.02.2024.

SOMARATHNA, H.M.C.C.; RAMAN, S.N.; MOHOTTI, D.; MUTALIB, A.A.; BADRI, K.H.; The use of polyurethane for structural and infrastructural engineering applications: A state-of-the-art review, **Construction and Building Materials**, Volume 190, 2018, Pages 995-1014, ISSN 0950-0618. Publicado em novembro, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818323523>. Acesso em 23.02.2024.

SONG, Y.-L.; DARANI, K.S.; KHDAR, A.; ABU-RUMMAN, G.; KALBASI, R. A review on conventional passive cooling methods applicable to arid and warm climates considering economic cost and efficiency analysis in resource-based cities, **Energy Reports**, Volume 7, 2021, Pages 2784-2820, ISSN 2352-4847. Publicado em novembro, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721002742>. Acesso em 04.04.2024.

SONMEZ, N. O.; A review of the use of examples for automating architectural design tasks, **Computer-Aided Design**, Volume 96, 2018, Pages 13-30, ISSN 0010-4485. Publicado em março, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448517301781>. Acesso em 20.10.2024.

SOUZA, A.; FLORES-COLEN, I.; RAMOS, N.M.M.; Improving energy efficiency in Portuguese buildings: Retrofitting façades with high reflectance finishing coat, **Procedia Structural Integrity**, Volume 55, 2024, Pages 143-150, ISSN 2452-3216, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.02.019>. Acesso em 04.04.2025.

STEPHAN, A.; STEPHAN, L.; Achieving net zero life cycle primary energy and greenhouse gas emissions apartment buildings in a Mediterranean climate, **Applied Energy**, Volume 280, 2020, 115932, ISSN 0306-2619. Publicado em dezembro, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626192031391X>. Acesso em 03.03.2024.

SU, S.; LI, X.; ZHU, Y.; LIN, B.; Dynamic LCA framework for environmental impact assessment of buildings, **Energy and Buildings**, V. 149, 2017, P. 310-320, ISSN 0378-7788. Publicado em agosto, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816320898>. Acesso em 03.03.2025.

SYNNEFA, A.; DANDOU, A.; SANTAMOURIS, M.; TOMBROU, M.; (2008) On the use of Cool Materials as a Heat Island Mitigation Strategy. **Journal of applied Meteorology and Climatology**. P. 2846-2856. Publicado em março, 2008. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/47/11/2008jamc1830.1.pdf>. Acesso em 03.03.2024.

SUCRANA. **Tabela peso específico dos materiais**. Disponível em: <https://sucrana.com.br/tabelas/peso-especifico-materiais.pdf>. Acesso em 03.03.2025.

TAM, V.W.Y.; LE, ALMEIDA, L.; LE, K.; Energy-Related Occupant Behaviour and Its Implications in Energy Use: A Chronological Review. **Sustainability**, 2018, 10, 2635: doi:10.3390/su10082635; Publicado em julho, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/8/2635>. Acesso em 23.02.2023.

TAVARES, S. F. **Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energética de Edificações Residenciais Brasileiras**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TEODORO, Maria Inês Tavares de Matos. **Energia embutida na construção de edificações no Brasil**: contribuições para o desenvolvimento de políticas públicas a partir de um estudo de caso em Mato Grosso do Sul / Maria Inês Tavares de Matos Teodoro; orientador, José Goldemberg – São Paulo, 2017. Tese (Doutorado em Ciência) –

Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017

TELES, Mailson Borges. **Avaliação operacional das diferentes arquiteturas de interligação de geradores fotovoltaicos à rede elétrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). UFPA. Belém (2017), acesso em abril, 2025

TJGO, 2023 – **Decreto Judiciário nº 2.151/2023**, de 06/10/2023. Regulamenta o uso da energia elétrica no âmbito do Tribunal de Justiça do Estado de Goiás.

TOOSI, H. A.; LAVAGNA, M. LEONFORTE, F.; DEL PERO, C.; ASTE, N.; Life Cycle Sustainability Assessment in Building Energy Retrofitting; A Review, **Sustainable Cities and Society**, V.60, 2020, 102248, ISSN 2210-6707. Setembro, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720304698>. Acesso em 03.03.2025.

TORRES-RIVAS, A.; PALUMBO, M.; HADDAD, A.; CABEZA, L.F.; JIMÉNEZ, L.; BOER, D.; Multi-objective optimisation of bio-based thermal insulation materials in building envelopes considering condensation risk, **Applied Energy**, Volume 224, 2018, Pages 602-614, ISSN 0306-2619. Publicado em agosto, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918306378>. Acesso em 02.04.2024.

TOVAROVIĆ, J.C.; IVANOVIĆ-ŠEKULARAC, J., ŠEKULARAC, N.; Renovation of existing glass facade in order to implement energy efficiency and media facade, **Energy and Buildings**, Volume 152, 2017, Pages 653-666, ISSN 0378-7788. Publicado em outubro, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817305893>. Acesso em 04.04.2024.

UKGBC, 2021. UK Green Building Council - **Net zero whole life carbon roadmap for the built environment**, Policy Advocacy (no. November), Res. Innov. (2021), Publicado em novembro, 2021. Disponível em: <https://ukgbc.org/wp-content/uploads/2021/11/UKGBC-Whole-Life-Carbon-Roadmap-A-Pathway-to-Net-Zero.pdf>. Acesso em 21.02.2024.

UNEP, 2022. United Nations Environment Programme (2022). **2022 Global Status Report for Buildings and Construction**: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi. Disponível em: https://globalabc.org/sites/default/files/2022-11/ENGLISH_Executive%20Summary_Buildings-GSR.pdf. Acesso em 20.02.2024.

UNEP, 2025. United Nations Environmental Programme 2025. **Global Status Report for Buildings and Construction 2024/25**. Not just another brick in the wall. The solutions exist. Scaling them will build on progress and cut emissions fast. Paris, 2025. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction-20242025>, acesso em 04.04.2025.

UNION OF CONCERN SCIENTISTS (2022). **How Are Solar Panels Made?** October 19, 2022. Disponível em: <https://blog.ucs.org/charlie-hoffs/how-are-solar-panels-made/>. Acesso em 20.03.2025.

USDOE, 2015. **2015 Renewable Energy Data Book**: USDOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE). Disponível em: <https://research-hub.nrel.gov/en/publications/2015-renewable-energy-data-book-usdoe-office-of-energy-efficiency>. Acesso em 20.03.2024.

VELOSO, Ana Carolina de Oliveira. **Avaliação do consumo de energia elétrica de edificações de escritório e sua correlação com as decisões de projeto**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). PPG UFMG Belo Horizonte, 2017.

VERBEKE, S.; AUDENAERT, A. Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 82, Part 3, 2018, Pages 2300-2318, ISSN 1364-0321. Publicado em fevereiro, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117312236>. Acesso em 06.04.2024.

VILCHES, A.; GARCIA-MARTINEZ, A.; SANCHEZ MONTANÉZ, B.; Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review, **Energy and Buildings**, V. 135, 2017, p. 286-301, ISSN 0378-7788. Janeiro, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816315912>. Acesso em 03.03.2025.

WAIBEL, C.; EVINS, R.; CARMELIET, J.; Co-simulation and optimization of building geometry and multi-energy systems: Interdependencies in energy supply, energy demand and solar potentials, **Applied Energy**, Volume 242, 2019, Pages 1661-1682, ISSN 0306-2619. Publicado em maio, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919305938>. Acesso em 20.04.2024.

WBCSD 2021 - **Net-zero buildings**: Where do we stand ?, *Wbcsd*, p. 103, 2021, [Online]. Available: <<https://www.wbcsd.org/Programs/Cities-and-Mobility/Sustainable-Cities/Transforming-the-Built-Environment/Decarbonization/Resources/Net-zero-buildings-Where-do-we-stand>>

WBCSD, 2023. W. B. C. F. S. D. **Guidance on Avoided Emissions: Helping business drive innovations and scale solutions toward Net Zero** , 2023. Disponível em: https://www.wbcsd.org/wp-content/uploads/2023/09/Climate-Avoided-Emissions-guidance_WBCSD.pdf. Acesso em 12.04.2025.

WILLMOTT, C.J.; MATSUURA, K. (2005) Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) over the Root Mean Square Error (RMSE) in **Assessing Average Model Performance**. *Climate Research*, 30, 79-82. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscaador.html?task=detalhes&id=W2039240409>. Acesso em 20.02.2024.

YILDIZ, Y.; ARSAN, Z.D.; Identification of the building parameters that influence heating and cooling energy loads for apartment buildings in hot-humid climates, **Energy**, Volume 36, Issue 7, 2011, Pages 4287-4296, ISSN 0360-5442. Publicado em junho, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.013>. Acesso em 12.02.2024.

YOSHINO, H.; HONG, T.; NORD, N.; IEA EBC annex 53: Total energy use in buildings—Analysis and evaluation methods, **Energy and Buildings**, Volume 152, 2017, Pages 124-136, ISSN 0378-7788. Publicado em outubro, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817318716>. Acesso em 14.04.2024.

ZAVRL, E.; EL MANKIBI, M.; DOVJAK, M.; STRITIH, U.; Enhancing performance of building elements with phase change materials for cooling with air-based systems, **Journal of Energy Storage**, Volume 51, 2022, 104461, ISSN 2352-152X. Publicado em julho, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22004832>. Acesso em 20.02.2024.

ZEMERO, Bruno Ramos. **Metodologia para o projeto preliminar de edifícios utilizando otimização multiobjetivo baseada na simulação de desempenho**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). PPF UFPA Belém, 2019.

ZHENG, Z.; XIAO, J.; YANG, Y.; XU, F.; ZHOU, J.; LIU, H. Optimization of exterior wall insulation in office buildings based on wall orientation: Economic, energy and carbon saving potential in China, **Energy**, Volume 290, 2024, 130300, ISSN 0360-5442. Publicado em março, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544224000719>, acesso em 04.03.2025.

ZHOU, Y.; MA, M.; TAM, V.W.Y.; LE, K.N.; Design variables affecting the environmental impacts of buildings: A critical review, **Journal of Cleaner Production**, Volume 387, 2023, 135921, ISSN 0959-6526. Publicado em fevereiro, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623000793>