

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

ISABELLA CAMPAGNOL DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DO CONSUMO E DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM
EDIFICAÇÕES COM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO MEIO URBANO**

CAMPINAS

2026

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM SISTEMAS DE
INFRAESTRUTURA URBANA
ISABELLA CAMPAGNOL DE SOUZA

AVALIAÇÃO DO CONSUMO E DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM
EDIFICAÇÕES COM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO MEIO URBANO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Escola Politécnica, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como exigência para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientadora: Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota.

Coorientadora: Profa. Dra. Cláudia Cotrim Pezzuto.

CAMPINAS

2026

S719a

Campagnol de Souza, Isabella

AVALIAÇÃO DO CONSUMO E DA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA EM EDIFICAÇÕES COM SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS NO MEIO URBANO / Isabella Campagnol
de Souza. - Campinas: PUC-Campinas, 2026.

77 f.il.

Orientador: Lia Toledo Moreira Mota. Coorientador: Cláudia
Cotrim Pezzuto

Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura
Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de
Infraestrutura Urbana, Escola Politécnica, Pontifícia
Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2026.

Inclui bibliografia.

1. Consumo de Energia em Edificações. 2. Energia Solar
em Edificações. 3. Energyplus . I. Toledo Moreira Mota, Lia . II.
Cotrim Pezzuto, Cláudia III. Pontifícia Universidade Católica de
Campinas. Escola Politécnica. Programa de Pós-Graduação
em Sistemas de Infraestrutura Urbana. IV. Título.

ISABELLA CAMPAGNOL DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DO CONSUMO E DA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA EM EDIFICAÇÕES COM
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO MEIO URBANO**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana, da Escola Politécnica, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador (a): Profa. Dra. LIA TOLEDO MOREIRA MOTA

Coorientador(a): Profa. Dra. CLAUDIA COTRIM PEZZUTO

Dissertação defendida e aprovada em 18 de maio de 2026 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Profa. Dra. LIA TOLEDO MOREIRA MOTA
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dr. CARLOS ALBERTO DE CASTRO JUNIOR
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. ALBERTO LUIZ FRANCATO
UNICAMP

Dedico aos meus pais, Raquel e Leandro, pelo apoio que sempre me motivou a seguir em frente na busca por este título de mestre. E ao meu namorado, Guilherme, pela paciência, carinho e constante apoio ao longo dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota,

Minha orientadora, por sua dedicação constante, atenção cuidadosa e compromisso com a minha formação acadêmica e profissional dentro da linha de pesquisa.

À Profa. Dra. Cláudia Cotrim Pezzuto,

Por ter sido uma das principais incentivadoras do meu ingresso no programa e por todo o apoio oferecido ao longo da minha trajetória rumo ao título de mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Ao Prof. Dr. Everton Dias de Oliveira,

Pelo suporte técnico e valiosa contribuição nas análises realizadas com o *software EnergyPlus*.

À minha querida amiga Jaqueline Andrade Corrêa,

Por todo o apoio durante o mestrado, especialmente por compartilhar sua experiência na área de pesquisa, contribuindo de forma significativa para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste trabalho, deixo aqui minha sincera e eterna gratidão.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

“A perfeição não consiste na multiplicidade das coisas feitas,
mas no fato de serem bem feitas.”

São Vicente de Paulo

(1581-1660)

RESUMO

À medida que as mudanças climáticas se intensificam, a demanda por sistemas de climatização tem crescido acentuadamente, resultando em um aumento significativo no consumo de energia. Diante dessa realidade, torna-se fundamental a adoção de fontes renováveis para suprir essa demanda crescente, uma vez que estas permitem a expansão da capacidade energética sem a correspondente elevação na emissão de gases de efeito estufa. Ao substituir ou complementar fontes de geração fósseis, as fontes renováveis mitigam o impacto ambiental do setor de geração de energia. Entretanto, a efetividade dessas soluções está diretamente relacionada ao aprimoramento técnico de sua aplicação. Embora as estratégias de aproveitamento da energia solar em edificações sejam amplamente discutidas na literatura, ainda há espaço para investigações que analisem o desempenho dessas tecnologias quando operadas em conjunto com a infraestrutura de condicionamento de ar. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo investigar o impacto da instalação de placas fotovoltaicas no meio urbano tanto no consumo quanto na geração de energia elétrica em edificações no meio urbano. Essa avaliação foi realizada por meio de simulações computacionais, utilizando o *software Energy Plus*. Os resultados mostraram que os painéis fotovoltaicos afetam tanto a temperatura interna quanto o consumo de energia elétrica das edificações. Essa constatação possibilitou avaliar a viabilidade da microgeração, considerando as variações no consumo dos sistemas de climatização decorrentes da instalação dos painéis na cobertura e nas fachadas da edificação. Os resultados das simulações são apresentados e analisados criticamente, revelando que os sistemas BAPV (*Building Applied Photovoltaics*) apresentam o melhor desempenho global. Em contrapartida, os sistemas BIPV (*Building Integrated Photovoltaics*) sem ventilação mostraram-se desfavoráveis ao balanço energético.

Palavras-chave: consumo de energia em edificações, energia solar em edificações, *Energyplus* e geração fotovoltaica.

ABSTRACT

As climate change intensifies, the demand for HVAC systems has grown sharply, resulting in a significant increase in energy consumption. Given this reality, adopting renewable energy sources to meet this growing demand becomes essential, as they allow for the expansion of energy capacity without a corresponding rise in greenhouse gas emissions. By replacing or supplementing fossil fuel generation, renewable sources mitigate the environmental impact of the power sector. However, the effectiveness of these solutions is directly linked to the technical improvement of their application. Although solar energy utilization strategies in buildings are widely discussed in the literature, there is still room for investigations analyzing the performance of these technologies when operated in conjunction with air conditioning infrastructure. Therefore, this study aims to investigate the impact of installing photovoltaic panels in urban environments on both the electricity consumption and generation of urban buildings. This evaluation was carried out through computer simulations using the EnergyPlus software. The results showed that photovoltaic panels affect both the internal temperature and the electricity consumption of buildings. This finding made it possible to evaluate the feasibility of microgeneration, considering the variations in the consumption of HVAC systems resulting from the installation of panels on the building's roof and facades. The simulation results are presented and critically analyzed, revealing that BAPV (Building Applied Photovoltaics) systems achieve the best overall performance. Conversely, unventilated BIPV (Building Integrated Photovoltaics) systems proved unfavorable to the energy balance.

Keywords: building energy consumption, solar energy in buildings, Energyplus, photovoltaic generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aumento no número de publicações.	13
Figura 2. Médias Anuais da Temperatura Global do Ar na Superfície nos últimos anos.	14
Figura 3. Matriz energética brasileira.	15
Figura 4. Disponibilidade mundial de energia solar.	16
Figura 5. Aplicações de energia fotovoltaica BAPV e BIPV na cobertura.	19
Figura 6. Esquema de um sistema BIPVT.	20
Figura 7. Fachada Norte da edificação de estudo.	29
Figura 8. Modelo da edificação – Fachada Norte.	30
Figura 9. Modelo da edificação – Fachada Sul.	30
Figura 10. Modelo da edificação – Fachada Leste.	30
Figura 11. Modelo da edificação – Fachada Oeste.	31
Figura 12. Planta baixa com as Zonas Térmicas do Subsolo.	32
Figura 13. Planta baixa com as Zonas Térmicas do Pavimento Térreo.	32
Figura 14. Planta baixa com as Zonas Térmicas do 1º Pavimento.	32
Figura 15. Planta baixa com as Zonas Térmicas do 2º Pavimento.	33
Figura 16. Sala de aula 110 do prédio em estudo.	33
Figura 17. Modelo da Ficha Utilizada para Coleta de Dados.	34
Figura 18. Etapas metodológicas para o desenvolvimento do trabalho.	35
Figura 19. Composição da parede externa equivalente.	38
Figura 20. Composição da cobertura externa equivalente.	38
Figura 21. Composição das janelas.	39
Figura 22. Composição da cobertura externa equivalente com BAPV.	43
Figura 23. Composição da cobertura externa equivalente com BIPV.	44
Figura 24. Composição da parede de fachada equivalente com BAPV.	45
Figura 25. Composição da parede de fachada equivalente com BIPV.	46
Figura 26. Planta baixa da cobertura do edifício de estudo.	48
Figura 27. Cenários com Aplicação na Cobertura Simulados no Estudo.	49
Figura 28. Cenários com Aplicação na Fachada Simulados no Estudo.	50
Figura 29. Cenário Base de Simulação.	51
Figura 30. Cenário C-BAPV-E10-I.	52
Figura 31. Cenário C-BAPV-E10-P.	53
Figura 32. Ampliação do Cenário C-BAPV-E10-P.	53
Figura 33. Cenário C-BAPV-E0-I.	55
Figura 34. Cenário C-BAPV-E0-P.	55
Figura 35. Cenário C-BAPV-E0-23.	55
Figura 36. Cenário C-BIPV-I.	57
Figura 37. Cenário C-BIPV-P.	57
Figura 38. Cenário C-BIPV-23.	58
Figura 39. Modelo do Cenário F1-BAPV.	60
Figura 40. Implementação de Fachada Fotovoltaica no Modelo F2-BAPV.	60
Figura 41. Implementação de Fachada Fotovoltaica no Modelo F3-BAPV.	60
Figura 42. Implementação de Fachada Fotovoltaica no Modelo F4-BAPV.	61
Figura 43. Modelo do Cenário F1-BIPV.	61

Figura 44. Implementação de Fachada Fotovoltaica no Modelo F2-BIPV.....	62
Figura 45. Implementação de Fachada Fotovoltaica no Modelo F3-BIPV.....	62
Figura 46. Implementação de Fachada Fotovoltaica no Modelo F4-BIPV.....	62
Figura 47. Consumo Anual e Geração Fotovoltaica dos Cenários de Cobertura.....	63
Figura 48. Consumo Anual e Geração Fotovoltaica dos Cenários de Fachada.	63
Figura 49. Participação dos Sistemas de HVAC no Consumo Anual de Energia - Cenários de Cobertura.....	65
Figura 50. Participação dos Sistemas de HVAC no Consumo Anual de Energia - Cenários de Fachada.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Síntese do Estado da Arte.....	17
Tabela 2. Comparativo entre os softwares de Simulação Termo Energética para Sistemas HVAC.	27
Tabela 3. Características físicas da edificação.....	36
Tabela 4. Propriedades térmicas dos materiais utilizados.	37
Tabela 5. Média mensal da temperatura do solo na superfície do no local do edifício.	39
Tabela 6. Padrão de uso e ocupação dos ambientes.....	40
Tabela 7. Ocupação e potência total instalada nas zonas.....	41
Tabela 8. Parâmetros de uso dos equipamentos elétricos.	42
Tabela 9. Parâmetros do Sistema Fotovoltaico.	43
Tabela 10. Propriedades térmicas da Cobertura com Pannel BIPV.....	44
Tabela 11. Nomenclatura dos Cenários Baseada em Prefixos e Sufixos Indicativos da Tipologia de Instalação dos Módulos Fotovoltaicos.....	47
Tabela 12. Consumo e Geração Anual de Energia Elétrica da Edificação.	51
Tabela 13. Consumo e Geração Anual Cenário C-BAPV-E10-I.	54
Tabela 14. Consumo e Geração Anual Cenário C-BAPV-E10-P.....	54
Tabela 15. Consumo e Geração Anual Cenário C-BAPV-E0-I.....	56
Tabela 16. Consumo e Geração Anual Cenário C-BAPV-E0-P.....	56
Tabela 17. Consumo e Geração Anual Cenário C-BAPV-E0-23.....	56
Tabela 18. Consumo e Geração Anual Cenário C-BIPV-I.	58
Tabela 19. Consumo e Geração Anual Cenário C-BIPV-P.....	58
Tabela 20. Consumo e Geração Anual Cenário C-BIPV-23.....	59
Tabela 21. Consumo e Geração Anual - Cenários BAPV na Fachada.....	59
Tabela 22. Consumo e Geração Anual Cenários BIPV na Fachada.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BAPV	<i>Building-Applied Photovoltaics</i>
BEN	Balanço Energético Nacional
BIPV	<i>Building-Integrated Photovoltaics</i>
BIPV/T	<i>Building-Integrated Photovoltaic Thermal</i>
DDY	<i>Design Day Data</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPS	<i>Expanded Polystyrene</i>
EPW	<i>EnergyPlus Weather</i>
HQE	Haute Qualité Environnementale
IA	Inteligência Artificial
IEA	International Energy Agency
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MMGD	Micro e Minigeração Distribuída
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PV	<i>PhotoVoltaic</i>
3D	Tridimensional

LISTA DE UNIDADES DE MEDIDA

°C	Graus Celsius
Cm	Centímetro
KWh	Kilowatt Hora
V	Volts
W	Watt
W/m ²	Watt por metro ao quadrado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. Objetivo	9
1.1.1. Objetivo Geral	9
1.1.2. Objetivos Específicos	9
1.2. Justificativa	9
1.3. Estrutura da Dissertação	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. Análise da Produção Científica (2016–2026)	12
2.2. Diversificação da Matriz Energética	13
2.3. Energia Solar em Edificações Urbanas	16
2.3.1. Técnicas Passivas	18
2.3.2. Técnicas Ativas	18
2.4. Integração de Painéis Fotovoltaicos: Impactos no Consumo e na Geração de Energia	21
2.5. Selo e Certificação de Sustentabilidade em Edifícios: Procel Edifica, AQUA e LEED	22
2.6. Variáveis que Influenciam o Consumo de Energia Elétrica em Edificações	23
2.7. Potencialidades dos Softwares de Simulação Energética	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1. Introdução à Metodologia	28
3.2. Objeto de Estudo	29
3.3. Procedimentos Metodológicos	34
3.4. Parâmetros Considerados na Simulação	35
3.5. Caracterização dos Cenários de Estudo	47
4. RESULTADOS	51
4.1. Consumo de Energia	51
4.1.1. Cenário REF - Edificação sem Painel Fotovoltaico	51
4.1.2. Cenário C-BAPV-E10-I e C-BAPV-E10-P - Edificação com Painel do Tipo BAPV Inclinado (11°) e Plano (0°) – espaçamento: 10cm	52
4.1.3. Cenário C-BAPV-E0-I, C-BAPV-E0-P e C-BAPV-E0-23 - Edificação com Painel do Tipo BAPV Inclinado (11° e 23°) e Plano (0°) – sem espaçamento	54

4.1.4. Cenário C-BIPV-I, C-BIPV-P e C-BIPV-23 - Edificação com Pannel do Tipo BIPV Inclinado (11° e 23°) e Plano (0°)	56
4.1.5. Cenários F1-BAPV, F2-BAPV, F3-BAPV e F4-BAPV - Edificação com Pannel Apoiado sobre a Fachada	59
4.2. Análise Comparativa dos Cenários de Estudo	62
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
REFERÊNCIAS	69

1. INTRODUÇÃO

As fontes renováveis de energia vêm assumindo um papel cada vez mais estratégico na matriz energética mundial. De acordo com a *International Energy Agency* (IEA, 2024), as fontes renováveis devem suprir quase metade da demanda global de eletricidade até 2030. O relatório destaca que a capacidade de energia solar fotovoltaica e eólica continua a bater recordes anuais, impulsionada por políticas de segurança energética e pela redução contínua de custos das tecnologias de baixo carbono.

Entre essas fontes, a energia solar, especialmente por meio da tecnologia fotovoltaica, tem ganhado destaque no meio urbano (Agathokleous; Kalogirou, 2020), associado ao barateamento da tecnologia e ao grande potencial de geração de energia de forma autônoma das edificações, impulsionando a instalação de painéis fotovoltaicos no meio urbano.

Bosu *et al.* (2023) mostram que existe, nos dias de hoje muitas pesquisas que avaliam as diferentes técnicas, ativas e passivas, de utilização de energia solar. As técnicas ativas envolvem a coleta, armazenamento e distribuição de energia por meio de componentes elétricos ou mecânicos. Por outro lado, as técnicas passivas não requerem esses elementos para operar, como por exemplo, a orientação dos edifícios.

No entanto, na maioria dos casos, a adoção de medidas passivas em edifícios não é adequada para suprir totalmente as necessidades energéticas dos espaços modernos (Bosu *et al.*, 2023). Isso tem gerado um aumento considerável no interesse por pesquisas sobre sistemas de energia solar que adotam abordagens ativas, impulsionado pela crescente demanda por conforto térmico e soluções mais eficientes para atender às demandas energéticas (Campos *et al.*, 2016; Aguilar *et al.*, 2007).

Apesar de possibilitar a geração de energia pela edificação, a utilização dos painéis fotovoltaicos integrados à edificação (BIPV) tende a causar um aumento da temperatura ambiente no interior das edificações, levando a um aumento do consumo de energia relacionado à utilização do sistema de ar-condicionado (Bender *et al.*, 2020, p. 491, *apud* Lai e Hokoi, 2015). No entanto, há poucos estudos que exploram estratégias para aprimorar esses sistemas.

Nesse contexto, a justificativa deste estudo reside na necessidade de compreender o balanço líquido entre a geração de energia elétrica e o consumo devido a carga térmica adicional imposta pela integração fotovoltaica. Investigar essa relação é fundamental para garantir que os benefícios da microgeração distribuída não sejam mitigados pelo aumento do consumo de energia pelos sistemas de climatização.

1.1. Objetivo

1.1.1. Objetivo Geral

Este trabalho de pesquisa tem como objetivo analisar o impacto da utilização de painéis fotovoltaicos instalados em fachadas e coberturas sobre o consumo e a geração de energia elétrica em edificações situadas no meio urbano.

1.1.2. Objetivos Específicos

- a) Elaborar a modelagem tridimensional (3D) de uma edificação representativa do perfil predial;
- b) Comparar o desempenho da edificação de estudo a partir da análise de cenários simulados com e sem sistemas de microgeração fotovoltaica nas configurações BAPV (*Building-Applied Photovoltaics*) e BIPV (*Building-Integrated Photovoltaics*);
- c) Avaliar a viabilidade da instalação de sistemas de ar-condicionado em conjunto com painéis fotovoltaicos, por meio de uma análise comparativa entre o consumo e a geração de energia elétrica em edificações localizadas no meio urbano.

1.2. Justificativa

A crescente adoção de sistemas fotovoltaicos em áreas urbanas tem impulsionado o debate sobre seus impactos além da geração de energia, especialmente no que diz respeito ao microclima das edificações (Mohsenzadeh, 2021). Essa alteração no comportamento térmico decorre da modificação das propriedades ópticas e térmicas da envoltória, o que pode resultar em um aumento indesejado da carga térmica de

resfriamento. Em regiões de clima predominantemente quente ou durante períodos de pico solar, esse fenômeno possui implicações diretas na eficiência dos sistemas de climatização, podendo elevar o consumo energético a níveis que mitigam os benefícios ambientais da própria geração fotovoltaica (Domingos; Guarda, 2022).

Nesse sentido, torna-se fundamental compreender a interdependência entre a implementação de sistemas fotovoltaicos e o comportamento energético da edificação. Esta compreensão é crucial para mensurar os reflexos nos sistemas de condicionamento de ar, assegurando que a expansão da microgeração distribuída ocorra em harmonia com as estratégias de eficiência energética dos edifícios urbanos. Tal abordagem evita o "paradoxo energético", onde a busca por energia limpa acaba por sobrecarregar a infraestrutura predial devido ao ganho de calor excessivo.

Além disso, a relevância deste estudo é reforçada pelo seu alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU). Ao investigar soluções que otimizem a interface entre geração e consumo, a pesquisa contribui diretamente para o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ao promover o uso eficiente de fontes de energia renováveis, e para o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ao fomentar edificações urbanas mais resilientes e energeticamente autossuficientes. Assim, a justificativa do trabalho reside na necessidade de fornecer subsídios técnicos para que a integração fotovoltaica urbana seja, de fato, uma solução de sustentabilidade integral e não apenas uma adição tecnológica isolada.

1.3. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, além desta introdução.

- O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica e bibliométrica, abordando os principais conceitos relacionados ao uso da energia solar em edificações, bem como uma contextualização da matriz energética brasileira, dos softwares de simulação energética e das variáveis que influenciam o consumo de energia;
- O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada, incluindo a caracterização do edifício utilizado como estudo de caso, os parâmetros de simulação e os procedimentos utilizados no *software EnergyPlus*;

- O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos, comparando o consumo e geração de energia entre diferentes configurações de sistemas fotovoltaicos (BAPV e BIPV).
- O Capítulo 5 reúne as conclusões e sugestões para trabalhos futuros, destacando as principais contribuições da pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

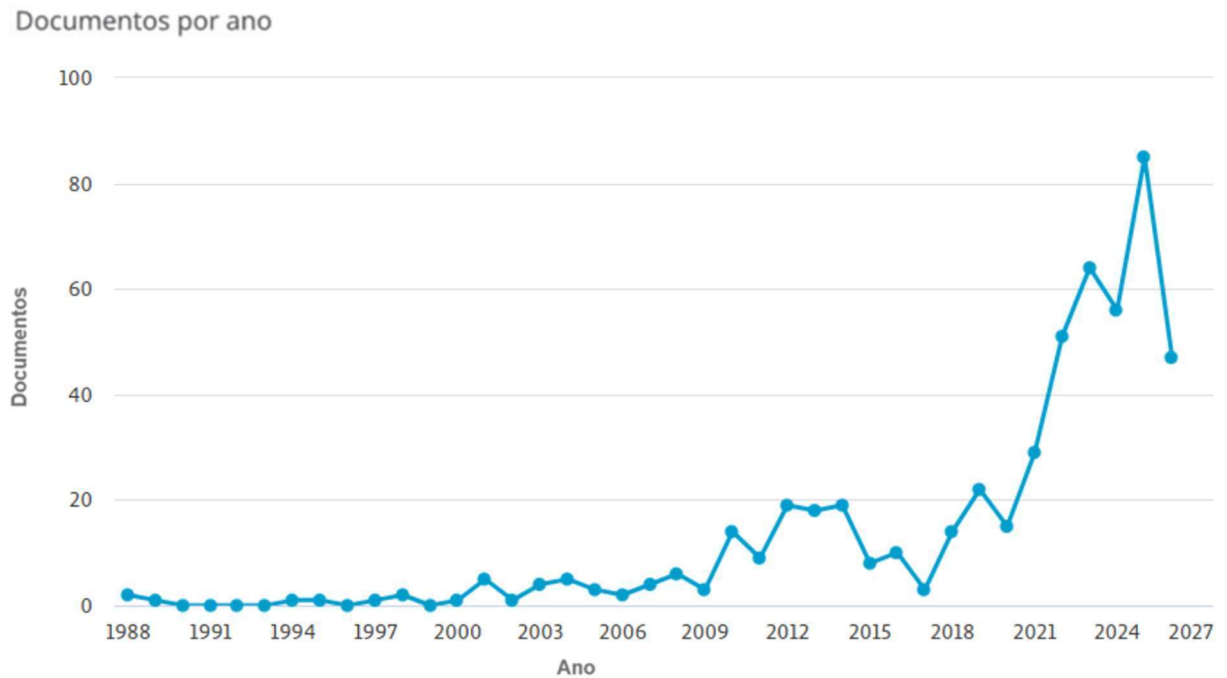
2.1. Análise da Produção Científica (2016–2026)

Para fundamentar este estudo, foi realizada uma análise bibliométrica destinada a mapear a evolução das pesquisas que utilizam simulações computacionais para investigar o uso de energia fotovoltaica em edificações na última década. A quantificação da produção científica e do crescente interesse pelo tema ao longo dos últimos dez anos evidenciam tendências que justificam o desenvolvimento desta pesquisa.

Foi utilizada uma base de dados consolidada: a Scopus, da Elsevier. Buscou-se exclusivamente artigos científicos originais, publicados no intervalo compreendido entre o ano de 1988 e 13 de abril de 2026.

Na busca de dados na Scopus, foram definidos critérios de inclusão e exclusão, garantindo que apenas estudos relevantes fossem incluídos na análise. Os critérios considerados foram: o período de publicação, a área de conhecimento foi limitada à “engenharia” e o tipo de publicação foi limitado a apenas artigos. A obtenção de informações foi realizada por meio de uma pesquisa por assunto, utilizando operadores booleanos para delimitar o escopo da pesquisa. A busca foi restrita aos campos de título, resumo e palavras-chave (*Article title, Abstract, Keywords*), combinando os termos principais do estudo e excluindo escopos não relacionados. A string de busca final configurou-se da seguinte forma: *Article title, Abstract, Keywords (photovoltaics AND computer simulation AND buildings) AND NOT Article title, Abstract, Keywords (agri* OR vehicles)*.

Dentre os 525 artigos identificados no período, observa-se que o interesse científico pelas técnicas de energia solar não foi linear, apresentando uma aceleração notável a partir de 2021. O ápice das publicações ocorreu em 2025, evidenciando que o tema atingiu um patamar de prioridade global nas agendas de pesquisa em engenharia. O comportamento dos dados sugere que o ano de 2026, embora ainda em seu primeiro trimestre, possui potencial para superar os recordes anteriores, conforme representado na Figura 1.

Figura 1. Aumento no número de publicações.

Ao aprofundar a análise do conteúdo desses artigos, percebe-se que a especificidade dos estudos evoluiu consideravelmente. Enquanto os trabalhos mais próximos de 2016 focavam na eficiência da conversão de energia em sistemas fotovoltaicos (Zaheeruddin, 2016), a produção recente destaca-se pela aplicação de simulações computacionais para a investigação de problemas, como o quanto a mobilidade dos painéis aumenta a captação de irradiância solar em comparação ao sistema estático (Zaghba, 2026).

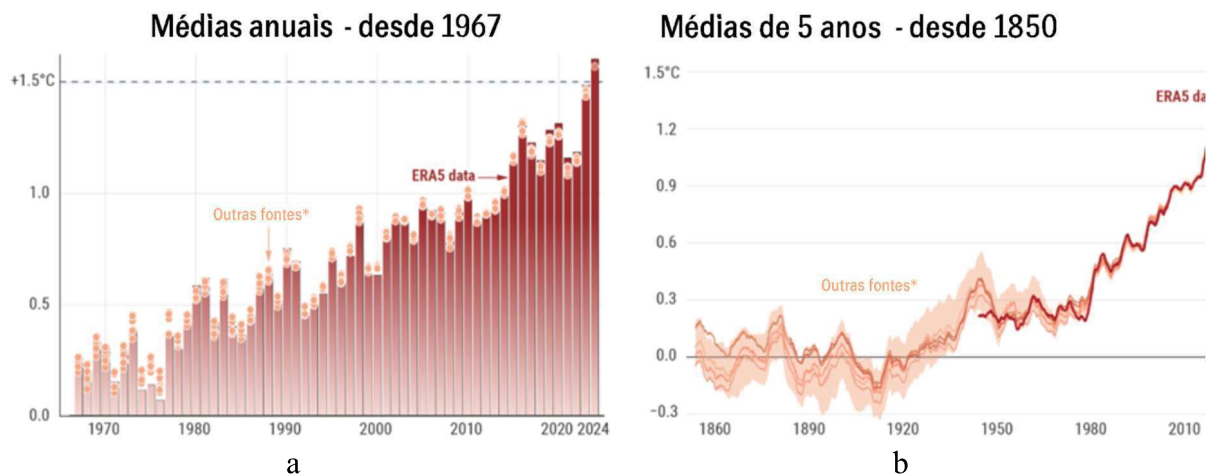
Nesse contexto, observa-se que a expansão das investigações científicas a partir de 2016 consolidou a simulação computacional como um recurso importante para a validação técnica e econômica das estratégias de transição energética. Conclui-se, portanto, que o avanço do setor é impulsionado por uma busca generalizada pelo aumento da eficiência tecnológica em seus vários aspectos.

2.2. Diversificação da Matriz Energética

À medida que as mudanças climáticas globais se intensificam, é notável um expressivo aumento no consumo de energia, especialmente devido à crescente necessidade de sistemas de climatização para enfrentar condições climáticas extremas (Herédia, 2025). O ano de 2024 foi o mais quente registrado desde 1850, de acordo com Copernicus (2024). As médias anuais de temperatura global do ar registrada na superfície, ou seja, na camada de ar que está imediatamente acima do

solo ou da água, foi de 1,50°C acima da estimativa de temperatura entre os anos de 1850-1900, considerada a época pré-industrial (Figura 2). A Figura 2a mostra as médias anuais detalhadas de 1967 a 2024 em formato de barras, evidenciando as oscilações de ano a ano e destacando o fato de que o ano de 2024. Já a Figura 2b adota uma perspectiva histórica muito mais ampla, desde 1850, suavizando as variações anuais.

Figura 2. Médias Anuais da Temperatura Global do Ar na Superfície nos últimos anos.



Fonte: Adaptado de Copernicus, 2024.

A IEA (2025c) constatou que a demanda global por energia aumentou 2,2% no ano de 2024 abaixo do crescimento do PIB de 3,2%, mas consideravelmente mais rápido do que o aumento médio anual da demanda de 1,3% entre 2013 e 2023.

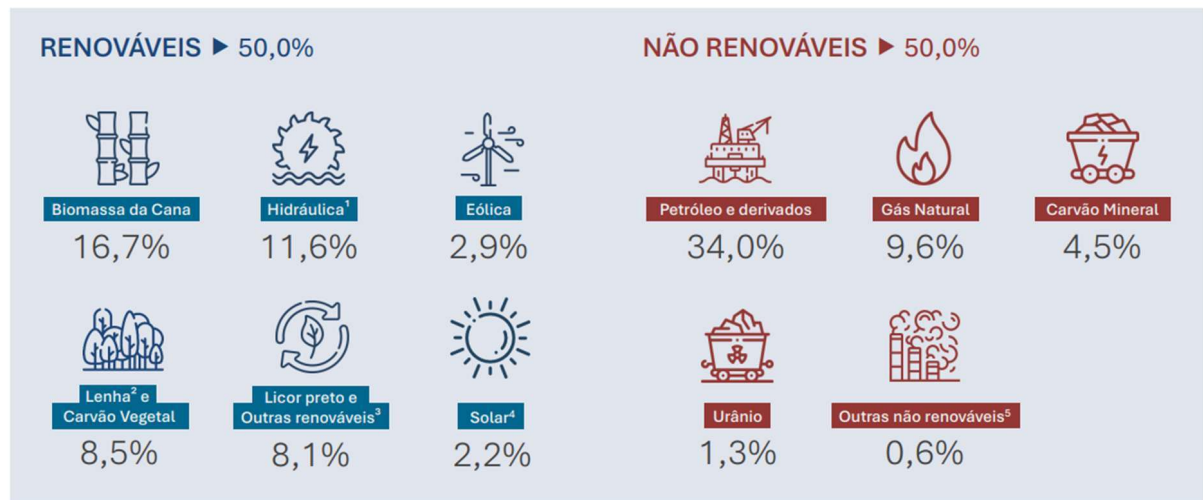
Com o aumento do consumo de energia, a dependência dos combustíveis fósseis para a geração de eletricidade impõe desafios relevantes, tanto por sua natureza finita quanto pelos impactos ambientais que acarretam. A IEA projeta que a demanda global por carvão, petróleo e gás natural atingirá seu pico coletivo antes de 2030. Essa mudança terá impactos profundos, especialmente para os países que dependem desses recursos, os quais enfrentarão desafios significativos com a redução de sua oferta (Francisco de Carvalho, 2008).

O Brasil possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, com cerca de 90% da eletricidade proveniente de fontes de baixa emissão, segundo a *International Energy Agency* – IEA (2025a). Conforme os dados mais recentes, a participação de fontes renováveis na Matriz Energética Brasileira subiu para 50,0%, consolidando o Brasil em um patamar muito superior à média global, conforme dados

do Balanço Energético Nacional (BEN, 2025). Enquanto isso, o cenário mundial permanece fortemente dependente de combustíveis fósseis, com cerca de 81,1% da matriz energética ainda depende de fontes não renováveis, como combustíveis fósseis (Jornal da USP, 2022). Apesar desse destaque positivo da matriz energética do Brasil, a participação da energia solar ainda é pouco expressiva, representando apenas 2,2% do total.

Figura 3. Matriz energética brasileira.

Repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) 2024



Fonte: Agência Gov, 2024.

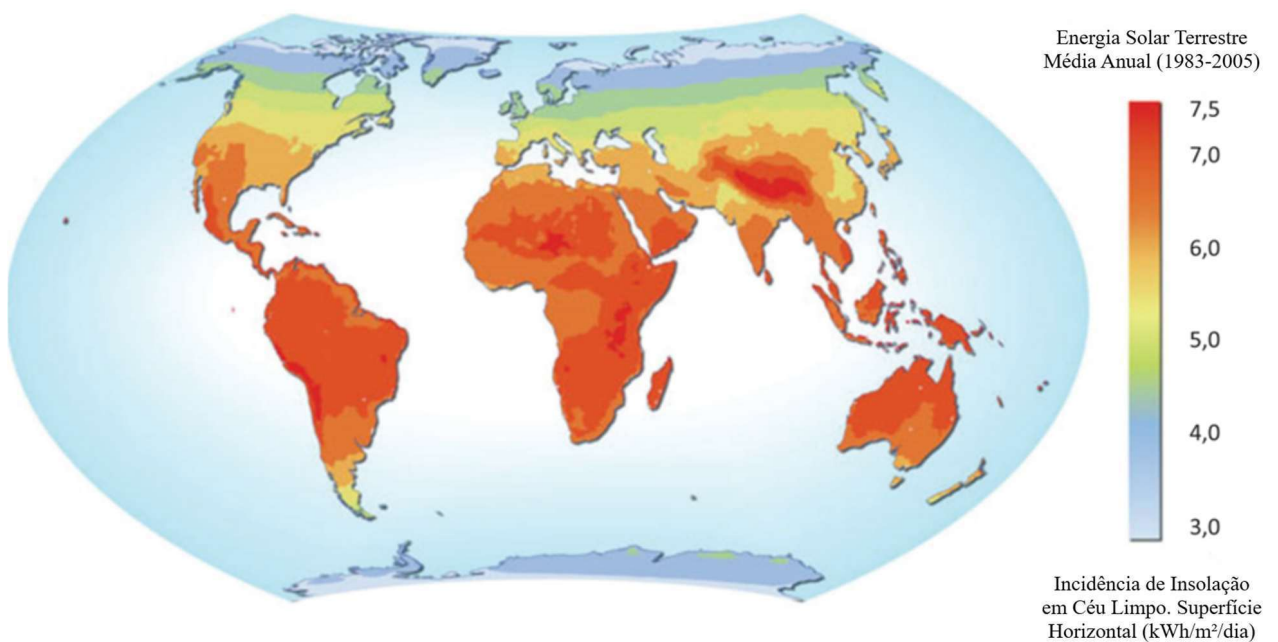
Segundo Godinho (2023), a produção de energia a partir do uso de combustíveis fósseis contribui para uma poluição significativa no ar, na água e no solo, impactando negativamente a saúde dos seres humanos e a qualidade de vida. Segundo a IEA (2025b), as emissões globais de CO₂ relacionadas à energia atingiram o recorde de 37,8 gigatoneladas em 2024.

Diversos fatores influenciam o desenvolvimento de políticas públicas energéticas sustentáveis, um avanço crucial no setor energético. Esses fatores podem ser classificados em três objetivos principais: a garantia no abastecimento, visando minimizar a dependência de recursos externos, formação de um setor energético competitivo e a conservação ambiental (Patlitzianas *et al.*, 2008).

Embora a irradiância solar que atinge a superfície terrestre (Figura 4) supere a demanda global por eletricidade, segundo ETENE, 2021, p. 3, apud EIA, 2018, a conversão desse recurso em uma solução definitiva para o consumo mundial enfrenta

desafios significativos. A viabilidade da energia fotovoltaica como fonte primária depende da superação de limitações tecnológicas ligadas à intermitência da fonte. Observa-se que regiões próximas ao Equador e desertos, como o Saara, o Oriente Médio e partes da Austrália e América do Sul, apresentam os maiores valores de irradiação (6 a 7,5 kWh/m²/dia), indicados em tons mais quentes na escala. Isso indica que essas áreas têm alto potencial solar e podem gerar energia efetiva com o uso de PV.

Figura 4. Disponibilidade mundial de energia solar.



Fonte: Traduzido de ETENE, 2021, p. 3, apud EIA, 2018.

Segundo Hosenuzzaman *et al.* (2015), entre os sistemas de energia solar para residências, a energia fotovoltaica se destaca como a opção com maior capacidade de aproveitamento, sendo que, a indústria fotovoltaica é a indústria que mais cresce para novos investimentos.

De acordo com Rosa; Oliveira; Schröder (2023), o investimento em sistemas de geração de energia solar por meio de painéis fotovoltaicos pode trazer vantagens econômicas significativas a longo prazo, uma vez que atualmente o custo investido na implementação é amortizado após alguns anos.

2.3. Energia Solar em Edificações Urbanas

Diante do aumento global do consumo de energia e da escassez de fontes não renováveis, a geração de energia solar surge como uma solução promissora e

crescente. Há uma extensa gama de estudos e publicações abordando as técnicas de energia solar no âmbito da construção civil (Agathokleous; Kalogirou, 2020; Bender *et al.*, 2020; Biyik *et al.*, 2017).

As técnicas de energia solar podem ser divididas em duas categorias principais: passivas e ativas. As técnicas passivas utilizam a energia solar sem a necessidade de componentes elétricos ou mecânicos, baseando-se em estratégias arquitetônicas e materiais adequados. Já as técnicas ativas recorrem a dispositivos e sistemas específicos, como ventiladores ou coletores solares, para proporcionar conforto térmico e maximizar o uso da energia solar (Bosu *et al.*, 2023).

De acordo com Shukla, Sudhakar e Bapat (2016), a aplicação de sistemas fotovoltaicos em edificações urbanas tem convergido para soluções de BAPV, dada a sua versatilidade e superioridade térmica em climas tropicais. Diferente dos sistemas integrados (BIPV), o BAPV aproveita a infraestrutura existente, focando na otimização da geração por meio do resfriamento natural dos módulos.

Com o intuito de sintetizar as principais abordagens da literatura recente, a Tabela 1 apresenta estudos que correlacionam o consumo energético das edificações à eficiência dos sistemas fotovoltaicos, destacando variáveis críticas de desempenho.

Tabela 1. Síntese do Estado da Arte.

Referência	Foco de Estudo	Metodologia de Avaliação	Principal Descoberta
EPE (2025)	Panorama Nacional	Dados estatísticos	A Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD) solar já representa 58% da geração solar total no Brasil, impulsionada pelo consumo residencial.
Lucas <i>et al.</i> (2024)	Morfologia Urbana	Análise de BIPV em cidades densas	O sombreamento mútuo em centros urbanos brasileiros exige o uso de superfícies verticais (fachadas) para atingir a autossuficiência em geração de energia.
Alazazmeh <i>et al.</i> (2022)	Energia Solar Fotovoltaica	Análise de BAPV aplicado em um edifício	A taxa de desempenho varia de 74,03% em agosto a 84,62% em janeiro, com um valor anual de 78,09%.
Mamodiya <i>et al.</i> (2025)	Otimização	Sistemas híbridos de energia solar baseados em IA	O uso de IA para gerir o balanço carga-geração gerou um aumento de 41,4% na produção anual de energia.

2.3.1. Técnicas Passivas

A utilização de técnicas passivas de energia solar para aquecimento ou resfriamento das edificações são alternativas importantes, pois não dependem de sistemas elétricos ou mecânicos para operar, sendo uma escolha inicialmente considerada para reduzir o consumo energético nas edificações (Balali; Hakimelahi; Valipour, 2020).

Dentre as técnicas passivas de aproveitamento da energia solar para o aquecimento e o resfriamento de edificações, destacam-se o dimensionamento estratégico de janelas, paredes e telhados, além da seleção de materiais construtivos com capacidade de absorção, armazenamento e distribuição eficiente do calor (123ECOS, 2024).

2.3.2. Técnicas Ativas

A maior proximidade entre edifícios, os altos níveis de ocupação e a demanda por maior conforto térmico contribuíram para que a maioria dos edifícios dependesse de estratégias ativas de aquecimento, resfriamento, ventilação e iluminação. Assim, a adoção de medidas passivas em edifícios não atende suficientemente necessidades energéticas dos edifícios modernos (Bosu *et al.*, 2023).

Os painéis fotovoltaicos (PV) se destacam entre as técnicas ativas de aproveitamento da energia solar, por realizarem a conversão direta da luz solar em eletricidade, utilizando células fotovoltaicas. Esses sistemas podem ser classificados em duas categorias principais: *Building-Applied Photovoltaics* (BAPV) e *Building-Integrated Photovoltaics* (BIPV), conforme ilustrado na Figura 5a e 5b, respectivamente.

Figura 5. Aplicações de energia fotovoltaica BAPV e BIPV na cobertura.



a

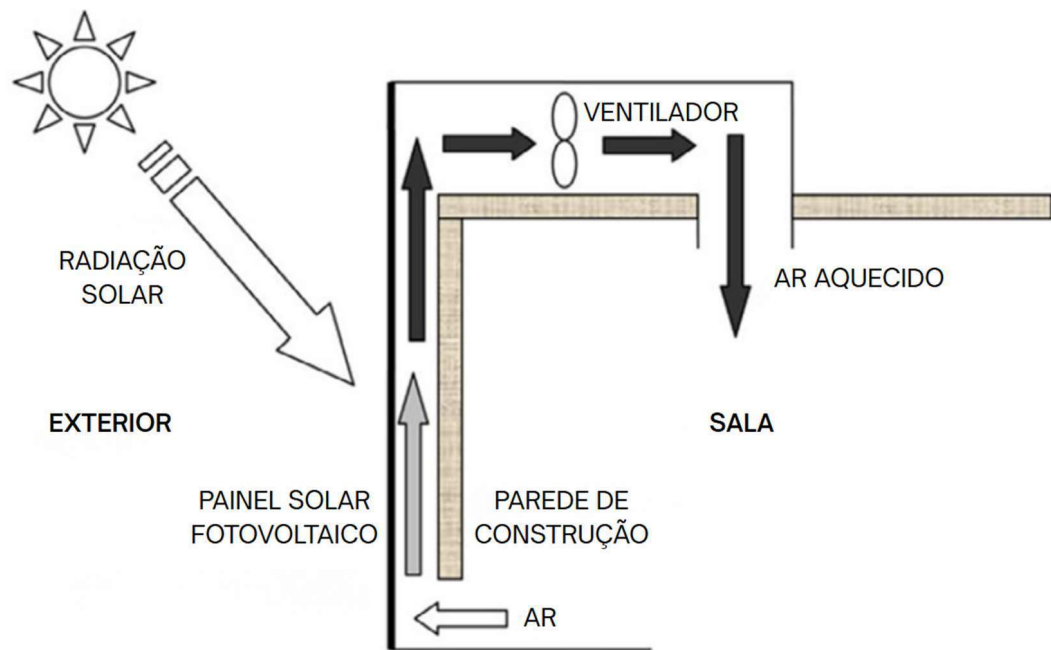
b

Fonte: SGBSOLAR, 2024.

A tecnologia fotovoltaica do tipo BAPV refere-se à instalação de painéis solares sobrepostos à estrutura existente dos edifícios. Já no método BIPV, os módulos fotovoltaicos são incorporados diretamente às estruturas do edifício, como telhados e fachadas, substituindo materiais de construção convencionais (como exemplo, telhas ou vidros) por elementos que desempenham simultaneamente funções construtivas e de geração de energia (Kumar; Sudhakar; Samykano, 2019).

Em algumas aplicações de BIPV, um ventilador e um duto de ar podem ser empregados no sistema para puxar o ar aquecido para o ambiente e reduzir a carga de aquecimento no inverno, conforme Figura 6. Esses sistemas são chamados de sistemas *Building-Integrated Photovoltaic/Thermal* (BIPV/T).

Figura 6. Esquema de um sistema BIPVT.



Fonte: Traduzido de Biyik *et al.*, 2017, apud Quesada *et al.*, 2012.

A construção de sistemas fotovoltaicos integrados (BIPV) e *Building Integrated Photovoltaic Thermal* (BIPVT) tem atraído um interesse crescente na última década. A configuração da célula/módulo é sem dúvida um dos pontos mais importantes para alcançar alta eficiência e potência nesse sistema, de acordo com (Biyik *et al.*, 2017).

Sailor, Anand e King (2021) revisaram estudos sobre a interação entre a geração de energia fotovoltaica e o ambiente urbano, identificando que a presença de sistemas fotovoltaicos pode influenciar significativamente diversos aspectos desse ambiente, especialmente a temperatura do ar, o consumo de energia das edificações e a disponibilidade de sombra.

Frequentemente, sistemas de HVAC (do inglês: *Heating, Ventilating and Air Conditioning*) são utilizados em conjunto com painéis fotovoltaicos. E de acordo com a International Energy Agency (2018), este sistema é responsável por uma parte significativa do consumo total de energia dos edifícios contemporâneos.

Em geral, as técnicas passivas de energia solar são alternativas preferíveis para aquecimento e resfriamento de edificações, por não utilizarem energia elétrica. No entanto, é comum a adoção híbrida de técnicas passivas e ativas, ambas sendo

aplicadas na mesma edificação para atender a demanda por conforto térmico nas edificações urbanas. (Frota; Schiffer, 2017)

2.4. Integração de Painéis Fotovoltaicos: Impactos no Consumo e na Geração de Energia

Segundo Viana, Miceli Junior e Pellanda (2025), a integração de painéis fotovoltaicos como elementos construtivos permite que a edificação se torne uma unidade geradora de energia. Essa abordagem, frequentemente denominada BIPV, vai além da simples instalação de módulos sobrepostos, promovendo a incorporação dos painéis como elementos construtivos da envoltória da edificação.

Estudos recentes indicam que a geração local pode compensar parcela significativa do consumo anual, dependendo de fatores como orientação e eficiência dos módulos (Wang; Zhang; Li, 2024). Em coberturas, onde a incidência solar tende a ser mais favorável, os sistemas apresentam, em geral, maior potencial de geração quando comparados às fachadas.

No entanto, superfícies verticais também desempenham papel importante, sobretudo em edificações de múltiplos pavimentos, nas quais a área de cobertura é limitada em relação à área de fachada disponível (Santos; Souza, 2024).

Além da geração de energia, a integração dos painéis fotovoltaicos pode influenciar diretamente o consumo energético da edificação, especialmente no que se refere às cargas de climatização. Quando aplicados na envoltória, os módulos atuam como uma camada adicional, alterando as trocas térmicas entre o ambiente interno e externo. Em fachadas, por exemplo, os sistemas fotovoltaicos podem reduzir a incidência direta de radiação solar sobre os elementos construtivos, contribuindo para a diminuição dos ganhos térmicos (Rodrigues; Mendes; Santos, 2024).

A redução da ventilação natural da superfície da envoltória e o acúmulo de calor na camada entre o painel e o elemento construtivo podem elevar a temperatura dos materiais (Costa; Lima, 2024).

Segundo Martins e Ferreira (2025), no que se refere à geração de energia, o desempenho dos sistemas fotovoltaicos em fachadas apresenta maior variabilidade ao longo do dia e do ano, em função da orientação e da menor incidência direta de

radiação solar em comparação com superfícies inclinadas ou horizontais. Entretanto, fachadas voltadas para o oeste e o norte (no hemisfério sul) podem apresentar contribuições significativas, o que pode favorecer a redução de picos de consumo (Almeida; Souza, 2024; Chen; Liu; Wang, 2024).

Dessa forma, a análise integrada dos impactos dos sistemas fotovoltaicos no consumo e na geração de energia elétrica é fundamental para a compreensão do desempenho energético das edificações no contexto urbano.

2.5. Selo e Certificação de Sustentabilidade em Edifícios: Procel Edifica, AQUA e LEED

A busca por edificações mais eficientes e ambientalmente responsáveis é impulsionada pelo sistema de selos e certificações de sustentabilidade. Segundo Cots (2024), as certificações ambientais no Brasil surgem como instrumentos fundamentais para avaliar, reconhecer e incentivar práticas construtivas que promovam eficiência energética, qualidade ambiental e uso racional dos recursos naturais. Entre os principais sistemas aplicados no Brasil destacam-se o Selo Procel Edifica, a certificação AQUA-HQE e a certificação internacional *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED).

O Selo Procel Edifica foi instituído pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e pela Eletrobras. Seu objetivo é classificar e identificar edificações que apresentam elevado desempenho energético, estimulando o mercado a adotar soluções construtivas mais eficientes. A avaliação considera aspectos como a envoltória da edificação (fachadas, coberturas e aberturas), sistemas de iluminação, sistemas de climatização, e equipamentos e instalações elétricas. Este selo tem sido aplicado em diferentes tipologias de edificações, como demonstrado por Crisóstomo et al. (2021) em estudo de caso realizado em uma instituição de ensino superior.

Edifícios que incorporam sistemas fotovoltaicos podem obter melhor classificação, uma vez que reduzem a demanda de energia da rede e contribuem para a autossuficiência energética. Assim, o selo funciona como um instrumento de valorização imobiliária e de incentivo à adoção de tecnologias renováveis.

A certificação AQUA-HQE é a adaptação brasileira da certificação francesa HQE (Haute Qualité Environnementale), aplicada no país pela Fundação Vanzolini. Trata-se de um sistema de gestão e avaliação da qualidade ambiental de edificações, abrangendo tanto projetos novos quanto empreendimento existentes.

Esta certificação é discutida como instrumento de sustentabilidade (Cots, 2024) e está estruturada justamente em torno desses compromissos: desempenho econômico, qualidade de vida, respeito ao meio ambiente e gestão responsável, como pilares fundamentais para avaliar e orientar edificações sustentáveis.

LEED é a certificação de edifícios sustentáveis mais difundida no mundo (Ribeiro; Scolaro; Ghisi, 2017), criado pelo U.S. Green Building Council (USGBC), e adotada em diversos países, inclusive no Brasil. Ele avalia critérios como eficiência energética, uso da água, materiais sustentáveis, qualidade ambiental interna e inovação construtiva. Selos de sustentabilidade têm papel estratégico na promoção de edificações eficientes, e a integração de sistemas fotovoltaicos fortalece esses resultados ao reduzir o consumo de energia da rede, valorizar os empreendimentos e atender às metas globais de sustentabilidade, tornando-se um diferencial competitivo no mercado imobiliário.

2.6. Variáveis que Influenciam o Consumo de Energia Elétrica em Edificações

São diversas as variáveis que influenciam o consumo de energia elétrica dentro das edificações. Analisar essas variáveis é importante para que seja possível estudar alternativas de otimização nos sistemas de consumo e geração de energia elétrica nos edifícios.

As características arquitetônicas e construtivas da edificação são frequentemente destacadas como um dos principais determinantes do consumo energético. A forma, a orientação solar, o percentual de aberturas e os elementos de sombreamento influenciam diretamente o ganho térmico e a necessidade de climatização artificial. Carvalho, la Rovere e Gonçalves (2010) indicam que decisões tomadas na fase de projeto podem impactar significativamente o consumo energético ao longo de toda a vida útil do edifício.

Além disso, análises paramétricas indicam que variáveis como cor da fachada, tipo de vidro e dispositivos de sombreamento podem alterar significativamente o consumo energético total (Ali-Tagba; Baneto; Lucache, 2024).

Maidel e Tavares (2020) compararam materiais como alvenaria convencional e madeira engenheirada, e mostraram variações no consumo energético operacional, evidenciando que a escolha dos materiais influencia diretamente o desempenho energético da edificação.

Segundo a literatura, as condições climáticas externas, combinadas com as características da edificação, determinam a demanda por aquecimento, resfriamento e ventilação, sendo essenciais em simulações energéticas (Yan; Zhao, 2025).

O comportamento dos ocupantes é considerado uma das variáveis mais complexas e influentes no consumo energético. Entre os principais aspectos destacam-se: horários de ocupação, uso de equipamentos, configuração de sistemas e hábitos de ventilação natural. Ali-Tagba, Baneto e Lucache (2024) mostram que a ocupação pode explicar grande parte da variação do consumo energético, chegando a valores superiores a 70% em alguns casos.

Os sistemas instalados na edificação representam uma parcela significativa do consumo energético, com destaque para os sistemas de climatização (HVAC). Buccieri (2014) empregou critérios, como a revisão de métodos de avaliação energética, critérios de desempenho econômico, localização e contexto, e otimização para identificar e selecionar indicadores de desempenho que medem a eficiência energética em edificações industriais. Dentre os indicadores observados, pode-se destacar: carga de refrigeração por hora, carga de aquecimento por hora, conservação de água, controle de vazão de ar do sistema de condicionamento, correção do fator de potência, custo e economia, fontes de energia renovável e de baixo carbono, instalações de ventilação (natural e artificial), localização do edifício, melhoria da eficiência de ventilação, otimização do uso de energia, planejamento de projetos, entre outros.

Em uma escala mais ampla, fatores urbanos também impactam o consumo energético das edificações, tais como: densidade urbana, ilhas de calor, taxa de áreas verdes e sombreamento entre edificações. A morfologia urbana influencia o

microclima local, afetando as condições térmicas externas e, consequentemente, o desempenho energético das edificações (Yan; Zhao, 2025).

Com base nos estudos analisados, verifica-se que o consumo energético em edificações é influenciado por um conjunto complexo de variáveis interdependentes. Entre elas, destacam-se: projeto arquitetônico e envoltória, materiais construtivos, condições climáticas, sistemas prediais, comportamento dos usuários e o contexto urbano.

2.7. Potencialidades dos Softwares de Simulação Energética

O uso de *softwares* para simulação e análise energética de edificações possibilita a criação de projetos mais eficientes e sustentáveis, permitindo a avaliação do consumo de energia já na fase de projeto.

Para aumentar a eficiência energética das edificações sem comprometer o conforto térmico e os aspectos visuais do ambiente, engenheiros e arquitetos utilizam a simulação computacional como um importante aliado na tomada de decisões sobre as medidas a serem implementadas no projeto de uma edificação.

Ribeiro *et al.* (2017) observa que essas ferramentas são pouco utilizadas devido à sua complexidade e dificuldade de aprendizado, uma vez que exigem uma grande quantidade de dados de entrada nas simulações e conhecimentos multidisciplinares dos usuários. Porém, dentre os principais *softwares* de simulação utilizados para analisar o consumo de energia em edificações, destacam-se o EnergyPlus, DesignBuilder, TRNSYS, DOE-2, ESP-r, EQuest, TRACE 700 e Bsim.

O EnergyPlus foi desenvolvido no início dos anos 2000 pelo *U.S. Department of Energy*, como uma evolução dos programas DOE-2 e BLAST, incorporando melhorias significativas na modelagem de sistemas prediais e na integração entre cargas térmicas e sistemas de climatização (CRAWLEY *et al.*, 2001). Já o DesignBuilder surgiu no Reino Unido, em 2005, como uma interface gráfica para o EnergyPlus, com o objetivo de facilitar o uso da ferramenta e ampliar seu acesso a profissionais da área (DESIGNBUILDER SOFTWARE LTD., 2020).

Dentre os *softwares* disponíveis para otimização do desempenho dos edifícios, o *Software Energy Plus, ([s. d.]*) é o mais utilizado, por ter como diferencial o formato de

entradas e saídas baseado em texto e por suas ferramentas completas para análise de simulação térmica e energética (Nguyen; Reiter; Rigo, 2014). Porém, o *software* não possui uma interface gráfica intuitiva.

O TRNSYS, por sua vez, foi desenvolvido na década de 1970 pela University of Wisconsin-Madison, sendo inicialmente voltado para simulações de sistemas térmicos transientes, com forte aplicação em estudos de energia solar e sistemas integrados (KLEIN *et al.*, 2017). No mesmo período, o DOE-2 foi criado pelo Lawrence Berkeley National Laboratory, sob financiamento do Departamento de Energia dos Estados Unidos, tornando-se uma das primeiras ferramentas amplamente utilizadas para simulação energética de edificações, segundo Hirsch (2017).

O ESP-r teve origem na década de 1970 na University of Strathclyde, sendo desenvolvido com foco acadêmico e voltado à modelagem integrada de desempenho térmico, energético e ambiental de edificações (Strachan; Kokogiannakis; Macdonald, 2008). Derivado do DOE-2, o eQUEST foi lançado nos anos 2000 como uma ferramenta mais acessível, com interface amigável e assistentes de modelagem, mantendo a robustez do motor de cálculo original.

O TRACE 700 foi desenvolvido pela Trane, sendo amplamente utilizado para análise e dimensionamento de sistemas de climatização, com foco na avaliação de cargas térmicas e consumo energético (TRANE, 2023). Por fim, o BSim foi desenvolvido na Technical University of Denmark, com enfoque em simulações detalhadas do desempenho térmico e energético de edificações, sendo bastante utilizado em pesquisas na Europa (Kalyanova; Heiselberg, 2008).

O *DesignBuilder*, assim como o *OpenStudio*, complementa o uso do *EnergyPlus*. O *OpenStudio* é um *software* utilizado para análise avançada de luz natural, enquanto o *DesignBuilder* permite uma introdução rápida e fácil de geometrias e oferece um conjunto de ferramentas que facilitam a modelagem de edifícios.

TRACE 700 é um *software* utilizado para o cálculo de cargas térmicas, e tem como objetivo principal projetar sistemas de HVAC. Já o Bsim é uma ferramenta voltada para a análise de edifícios e instalações, permitindo simulações e cálculos de consumo de energia, condições de iluminação natural, transporte de umidade, ventilação natural e produção elétrica de sistemas fotovoltaicos integrados. Dentre estes, o TRNSYS é o *software* de simulação de energia que, com sua abordagem

modular, se destaca como uma das ferramentas mais flexíveis disponíveis (Ribeiro *et al.*, 2017).

Os *softwares* mais destacados para análise energética de edificações, incluindo *EnergyPlus*, *DesignBuilder*, TRNSYS, DOE-2, ESP-r, *EQuest*, TRACE 700 e *Bsim*, são comparados na Tabela 2.

Tabela 2. Comparativo entre os *softwares* de Simulação Termo Energética para Sistemas HVAC.

Software	Etapa de projeto		Objetivos de análise			Disponível gratuitamente
	Preliminar	Detalhado	Energia	Térmico	Sistema HVAC	
EnergyPlus		X	X	X	X	Sim
OpenStudio	X	X	X	X	X	Sim
DesignBuilder	X	X	X	X	X	Não
TRNSYS		X	X	X		Não
DOE2		X	X			Sim
ESP-r		X	X	X	X	Sim
eQuest	X	X	X			Sim
TRACE700		X	X	X	X	Não
Bsim	X	X	X	X	X	Não
IDA-ICE	X	X	X	X	X	Não
IESVE	X	X	X	X	X	Não
HEED	X	X	X	X	X	Sim

Fonte: Adaptado de Ribeiro *et al.*, 2017.

A Tabela 2 organiza os softwares por meio de três dimensões principais: etapa de projeto, que define se a ferramenta é adequada para a fase preliminar (estudos iniciais e orientação) ou apenas para o nível detalhado (dimensionamento final e certificações); objetivos de análise, que identifica as capacidades técnicas em três frentes: energia (consumo), térmico (conforto e cargas) e sistema HVAC (detalhamento de ar-condicionado e ventilação); e acessibilidade, que indica se o software é gratuito ou pago.

O EnergyPlus, o ESP-r e o HEED são os grandes destaques aqui, uma vez que cobrem todas as frentes de análise (Energia, Térmico e HVAC) e são softwares disponíveis gratuitamente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Introdução à Metodologia

Este trabalho tem como objetivo analisar o impacto da utilização de painéis fotovoltaicos instalados em fachadas e coberturas sobre o consumo e a geração de energia elétrica em edificações situadas no meio urbano, por meio da elaboração de um modelo representativo do perfil predial, da comparação do desempenho da edificação a partir de cenários simulados com e sem sistemas de microgeração fotovoltaica nas configurações BAPV e BIPV, e da avaliação da viabilidade da associação entre sistemas de ar-condicionado e painéis fotovoltaicos, considerando a relação entre consumo e geração de energia elétrica.

A pesquisa pode ser caracterizada como quantitativa, pois se fundamenta na coleta e análise de dados numéricos, permitindo comparar cenários e avaliar variações de forma objetiva. Esse tipo de abordagem é amplamente descrito na literatura científica como adequado para estudos que envolvem variáveis físicas e mensuráveis, utilizando métodos estatísticos e computacionais (Lakatos & Marconi, 2017).

Quanto ao objetivo, a pesquisa se enquadra principalmente como exploratória, com apoio explicativo. A pesquisa exploratória busca proporcionar maior familiaridade com problemas pouco estudados, identificando padrões e relações sem pretensão de generalização (Shaughnessy, Zechmeister & Zechmeister, 2012). Há também um viés explicativo, pois será relacionada a instalação dos painéis às mudanças no ganho térmico e, conseqüentemente, ao impacto na temperatura interna e no consumo energético.

O recorte da pesquisa delimita-se a análise do aumento no consumo de energia pelo sistema de HVAC decorrente da instalação de sistemas fotovoltaicos em uma edificação urbana representativa do contexto climático estudado.

3.2. Objeto de Estudo

A modelagem de estudo foi realizada com base na edificação do prédio H15 localizado na Pontifícia Universidade Católica de Campinas (Figura 7), sendo que, Campinas se encontra a 22°54'21" de latitude sul.

Figura 7. Fachada Norte da edificação de estudo.



O modelo da edificação inclui banheiros, salas de aula, como aquela representada na Figura 16, laboratórios e administração, todos com pé esquerdo de 3,50m. As Figuras 09 a 12 apresentam as fachadas do modelo feito para simulação e análise energética desses ambientes.

Cada ambiente, como salas de aula, laboratórios e banheiros, foi considerado como uma zona térmica distinta. As dimensões dos ambientes foram definidas pelas distâncias entre os eixos das paredes. As Figuras 12 a 15 representam as plantas baixas do edifício com as várias zonas térmicas. Conforme a documentação do *software EnergyPlus* (s.d.), uma zona térmica é definida como um volume de ar interno (ou externo) que apresenta um perfil de temperatura uniforme, sendo a unidade espacial para a qual a ferramenta realiza um único balanço de calor.

Figura 8. Modelo da edificação – Fachada Norte.

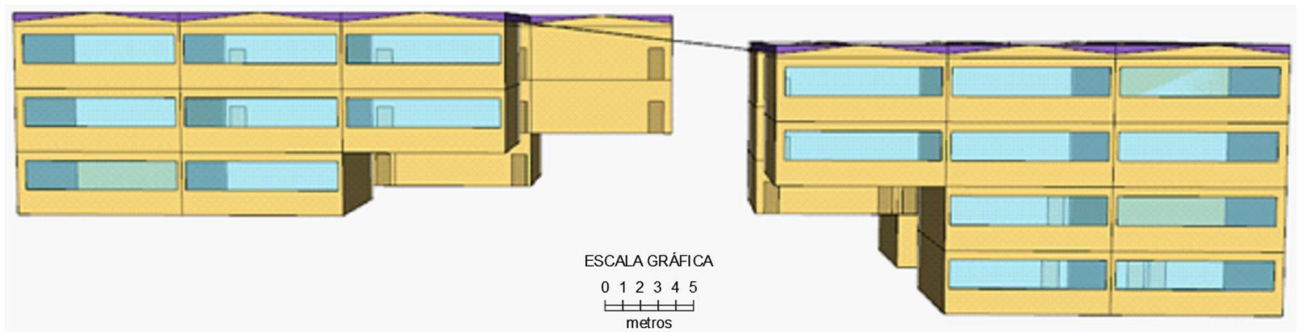


Figura 9. Modelo da edificação – Fachada Sul.

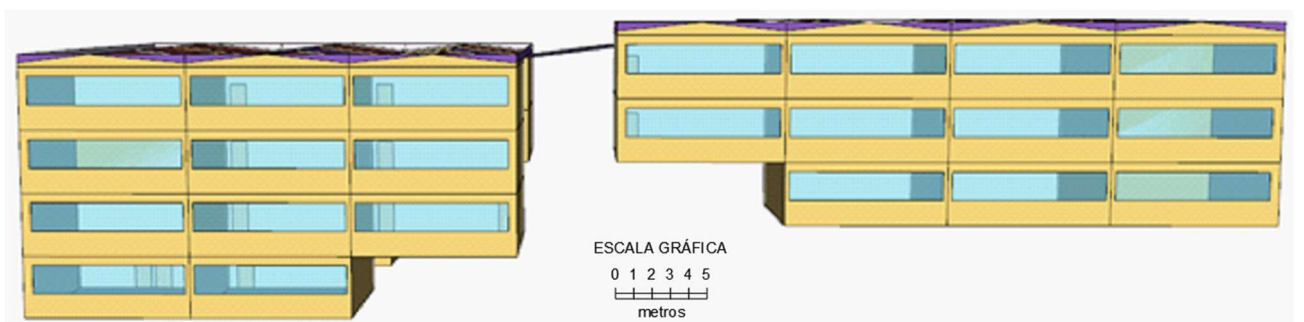


Figura 10. Modelo da edificação – Fachada Leste.

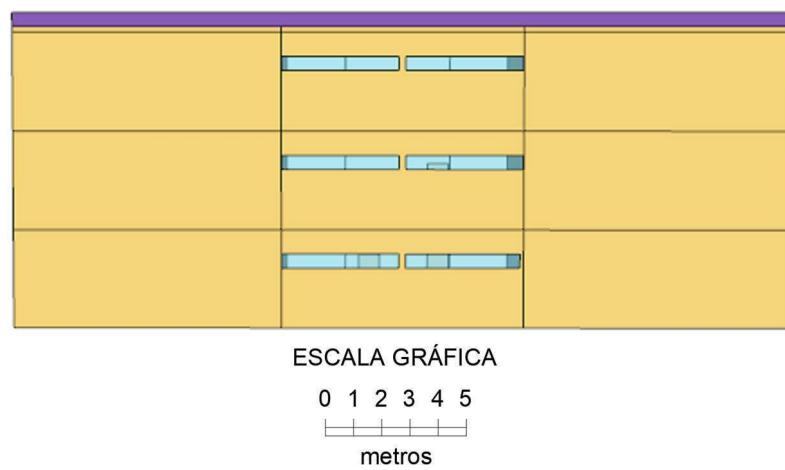


Figura 11. Modelo da edificação – Fachada Oeste.

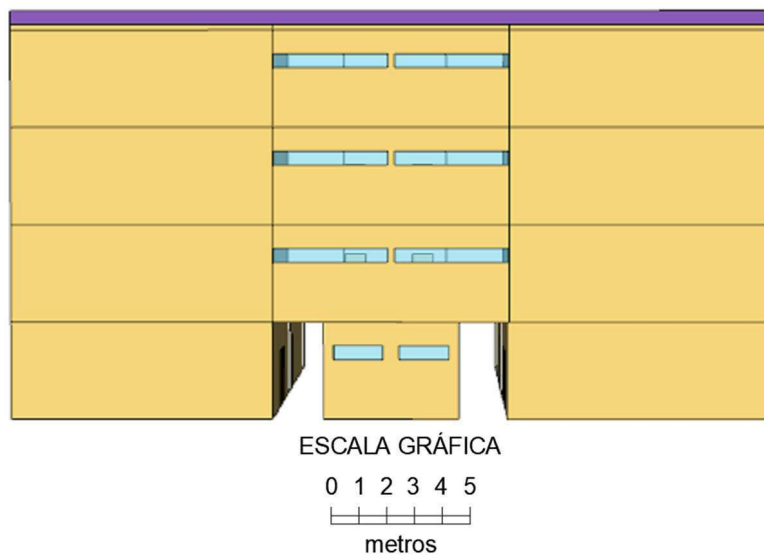


Figura 12. Planta baixa com as Zonas Térmicas do Subsolo.

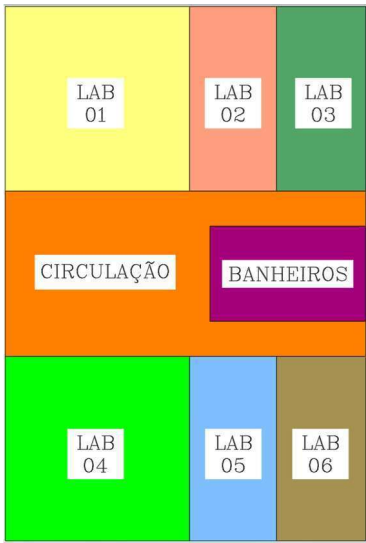


Figura 13. Planta baixa com as Zonas Térmicas do Pavimento Térreo.

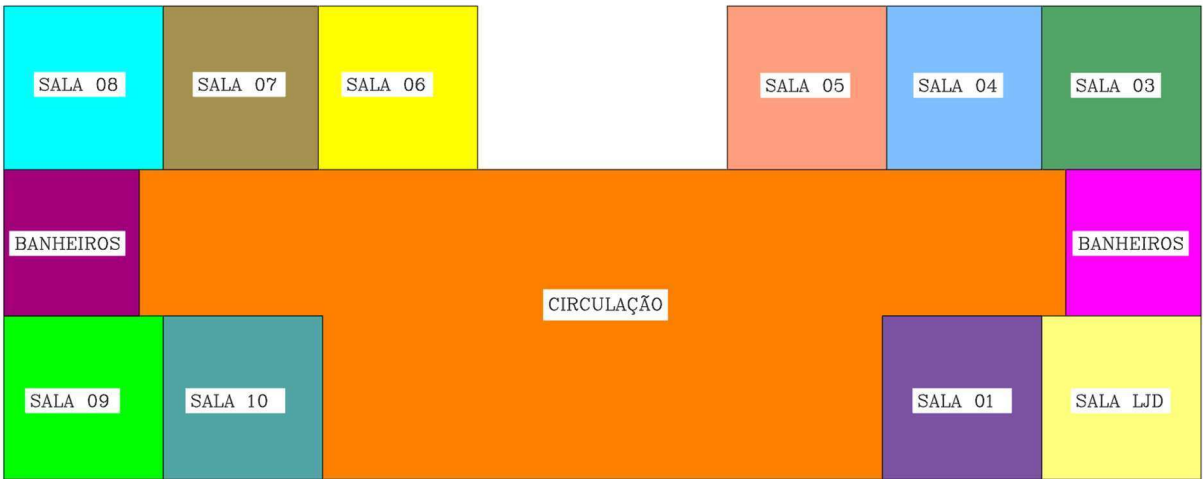


Figura 14. Planta baixa com as Zonas Térmicas do 1º Pavimento.

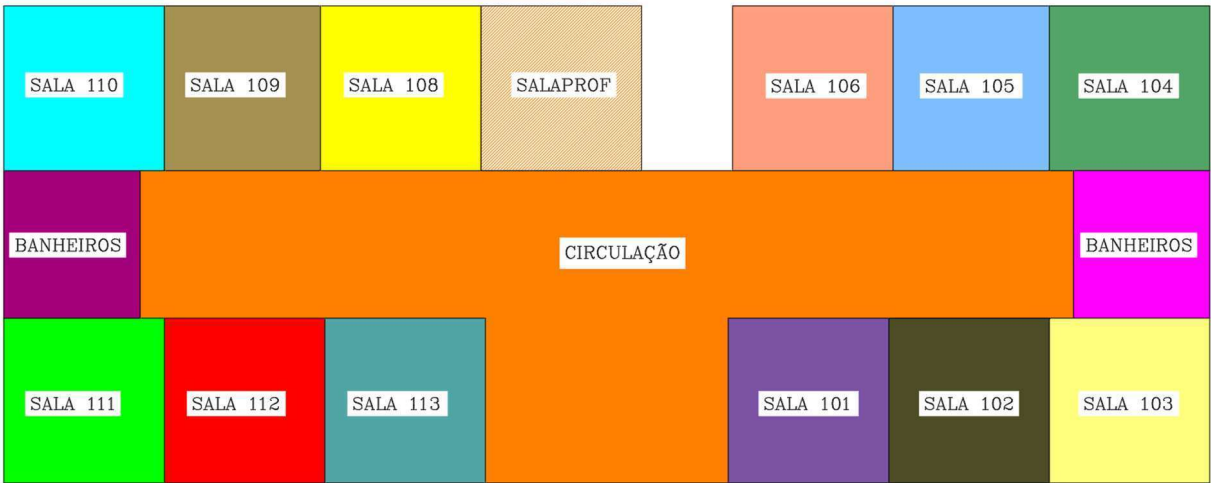


Figura 15. Planta baixa com as Zonas Térmicas do 2º Pavimento.

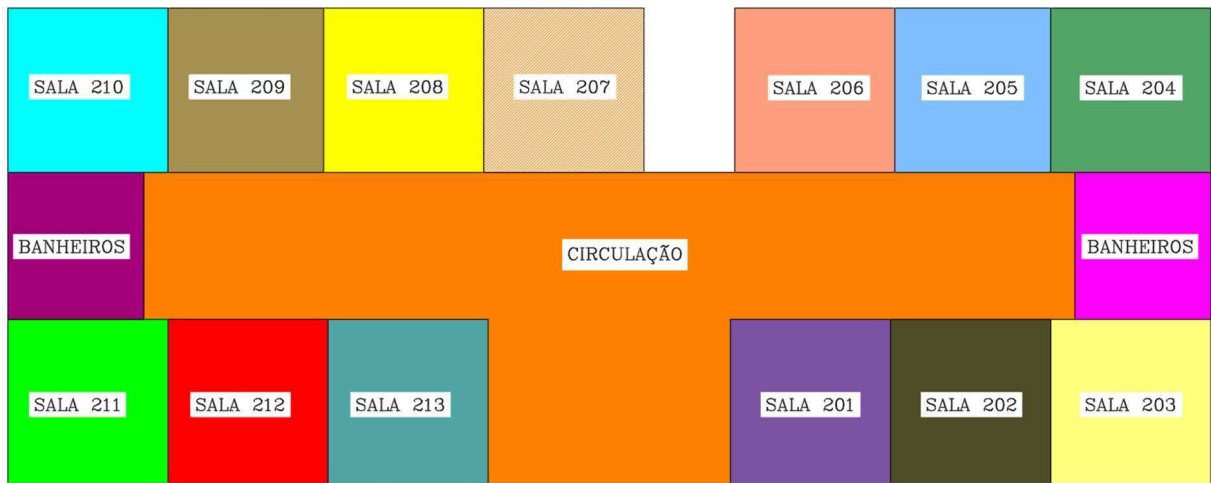
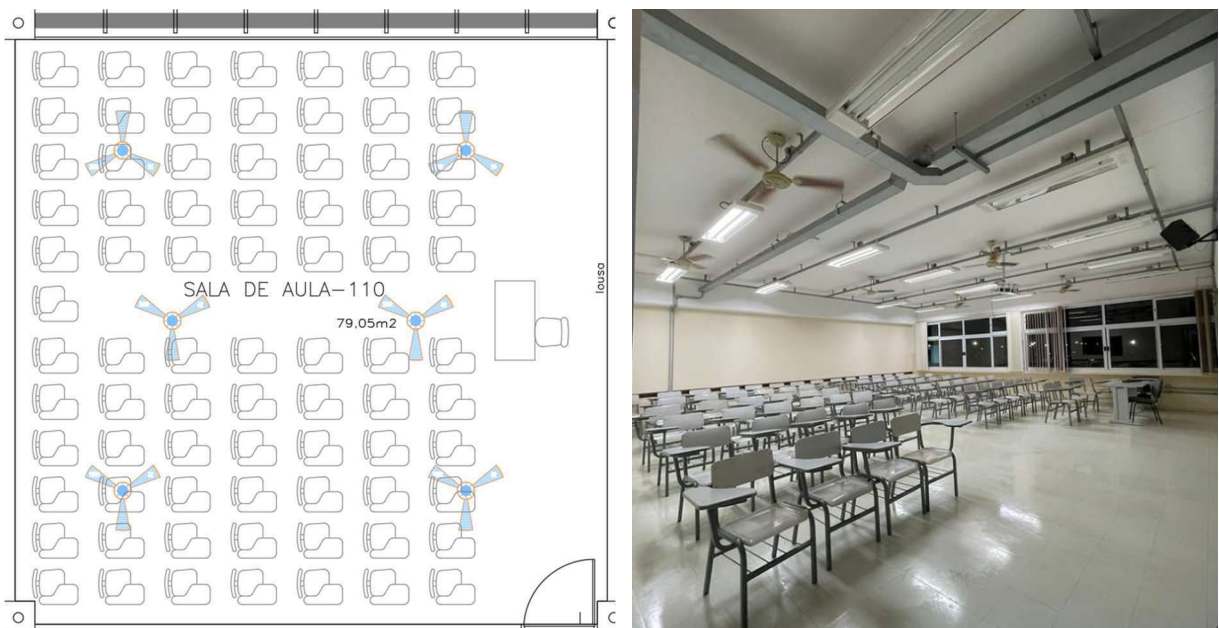


Figura 16. Sala de aula 110 do prédio em estudo.



O cenário base foi desenvolvido dentro do *software Sketchup 2017*, com o auxílio das ferramentas do plugin *OpenStudio*, versão 2.1.0. As maiores fachadas estão orientadas no sentido norte-sul.

Para avaliar a viabilidade da instalação de sistemas de ar-condicionado nas zonas de permanência prolongada, como salas de aula e laboratórios, essas áreas foram consideradas climatizadas no modelo simulado, enquanto as zonas de circulação e os banheiros foram mantidos sem condicionamento térmico.

3.3. Procedimentos Metodológicos

Os procedimentos metodológicos para a simulação dos cenários foram estruturados em quatro etapas principais. Na primeira etapa da pesquisa, realizou-se a coleta de dados, utilizando a ficha apresentada na Figura 17, referentes aos horários de uso, o padrão de iluminação das salas e a rotina de ocupação média dos ambientes analisados, com o objetivo de caracterizar a edificação objeto de estudo desta pesquisa.

Figura 17. Modelo da Ficha Utilizada para Coleta de Dados.

Prédio do H15
informações do local

LOCAL:

Horários de funcionamento e ocupação média:

Iluminação e equipamentos eletrônicos:

Sistema de HVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado):

LOCAL:

Horários de funcionamento e ocupação média:

Iluminação e equipamentos eletrônicos:

Sistema de HVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado):

LOCAL:

Horários de funcionamento e ocupação média:

Iluminação e equipamentos eletrônicos:

Sistema de HVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado):

LOCAL:

Horários de funcionamento e ocupação média:

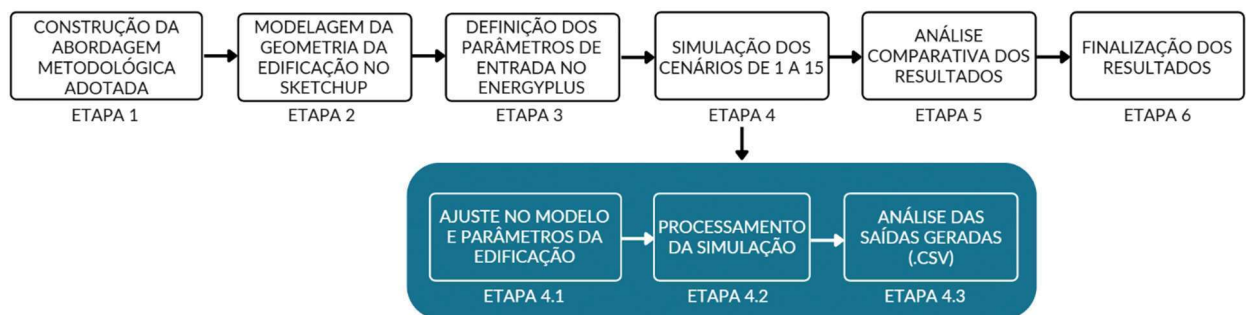
Iluminação e equipamentos eletrônicos:

Sistema de HVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado):

Então, utilizou-se o *Software SketchUp* ([s. d.]), junto do plugin *OpenStudio* para modelar a geometria da edificação, indicando as características físicas do edifício e delimitando as zonas térmicas, que representam áreas de temperatura uniforme.

Após essa etapa, foi feita a importação do modelo para o *software EnergyPlus*, que permite a configuração de materiais, propriedades térmicas e cargas internas, necessárias à simulação dos cenários propostos. O fluxograma apresentado na Figura 18 contém as etapas desenvolvidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Os procedimentos metodológicos para a simulação dos cenários foram estruturados também em quatro etapas principais, conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18. Etapas metodológicas para o desenvolvimento do trabalho.



O *EnergyPlus* permite análises detalhadas do comportamento térmico e elétrico da edificação, contribuindo para construções mais eficientes energeticamente. Para o desenvolvimento do modelo de análise, foi criado um arquivo com a extensão .idf que é a extensão utilizada para o *software Energy Plus*.

3.4. Parâmetros Considerados na Simulação

As simulações têm como objetivo avaliar o impacto da instalação de painéis fotovoltaicos em fachadas e coberturas no consumo e na geração de energia elétrica da edificação estudada, por meio de um modelo representativo do perfil predial.

Para isso, foram consideradas as características físicas do modelo, conforme Tabela 3. As propriedades térmicas dos materiais construtivos que compõem as paredes, o piso e o teto utilizados no modelo base estão detalhadas na Tabela 4.

Tabela 3. Características físicas da edificação.

Ambiente	Área [m2]	Volume [m3]	Área de vidro da janela [m2]
SALA09	87,64	306,75	13,6
SALA10	85,27	298,46	13,6
B06E07	62,92	220,21	4,08
SALA08	87,64	306,75	13,6
SALA07	85,28	298,46	13,6
SALA06	85,28	298,46	13,6
SALA05	87,64	306,75	13,6
SALA04	85,28	298,46	13,6
SALA03	87,64	306,75	13,6
B04E05	62,92	220,21	4,13
SALALJD	87,64	306,75	13,6
SALA01	85,27	298,46	13,6
LAB05E06	87,64	306,75	13,6
LAB04	85,27	298,46	13,6
SALACON	39,2	137,2	1,8
LAB02E03	88,24	308,86	13,6
LAB01	85,86	300,51	13,6
SALA111	87,64	306,75	13,6
SALA112	85,27	298,46	13,6
SALA113	85,27	298,46	13,6
B12E13	62,92	220,21	4,13
SALA110	87,64	306,75	13,6
SALA109	85,28	298,46	13,6
SALA108	85,28	298,46	13,6
SALAPROF	87,64	306,75	13,6
SALA103	87,64	306,75	13,6
B10E11	62,92	220,21	4,13
SALA102	85,27	298,46	13,6
SALA101	87,64	306,75	13,6
SALA104	87,64	306,75	13,6
SALA105	85,28	298,46	13,6
SALA106	87,64	306,75	13,6
SALA211	87,64	306,75	13,6
SALA212	85,27	298,46	13,6
SALA213	85,27	298,46	13,6
B18E19	62,92	220,21	4,13
SALA210	87,64	306,75	13,6
SALA209	85,28	298,46	13,6
SALA208	85,28	298,46	13,6
SALA207	87,64	306,75	13,6
SALA204	87,64	306,75	13,6
SALA205	85,28	298,46	13,6
SALA206	87,64	306,75	13,6
B16E17	62,92	220,21	4,13
SALA203	87,64	306,75	13,6
SALA202	85,27	298,46	13,6
SALA201	87,64	306,75	13,6

Tabela 4. Propriedades térmicas dos materiais utilizados.

Superfície	Material	Espessura [m]	Condutividade Térmica [W/m.K] (*)	Densidade [kg/m³] (*)	Calor Específico [J/kg.K] (*)	Absorção Solar (**)	Resistência térmica [m².K/W]
Paredes	Argamassa Interna	0,025	1,00	1800	1000	0,791	-
	Bloco de concreto	0,14	1,15	1800	1000	0,791	-
	Argamassa externa + pintura cor branco	0,025	1,00	1800	1000	0,282	-
Cobertura externa	Chapa metálica	0,0006	50	7800	450	0,489	-
	EPS	0,03	0,05	70	2300	0,282	-
	Chapa metálica	0,0006	50	7800	450	0,489	-
	Camada de ar	-	-	-	-	-	0,21
	Laje maciça de Concreto	0,10	1,15	1800	1000	0,791	-
Cobertura interna	Laje maciça de Concreto	0,10	1,15	1800	1000	0,791	-
Janela	Vidro float	0,003	1,00	-	-	-	-

(*) Dados conforme ABNT NBR ISO 10456:2022;

(**) Absortância Solar De Superfícies Opacas (2008).

O *EnergyPlus* monta a parede equivalente, considerando as propriedades térmicas das camadas definidas, conforme ilustrado na Figura 19. As paredes utilizadas na simulação são compostas por argamassa externa, bloco de concreto e argamassa interna, sendo também consideradas as propriedades de absorção solar da superfície externa, associadas à sua coloração.

A cobertura, nomeada como cobertura externa, composta pela laje maciça de concreto, uma camada de ar e a telha metálica tipo sanduíche, de chapa metálica e Poliestireno Expandido (*Expanded Polystyrene*, EPS) (Figura 20). Uma camada de ar não se comporta como um material sólido, pois a transferência de calor ocorre por condução, convecção e radiação. Devido à complexidade desses fenômenos, o *EnergyPlus* a representa por meio de uma resistência térmica equivalente já consolidada. E a janela composta por uma camada de vidro *float* (Figura 21).

Figura 19. Composição da parede externa equivalente.

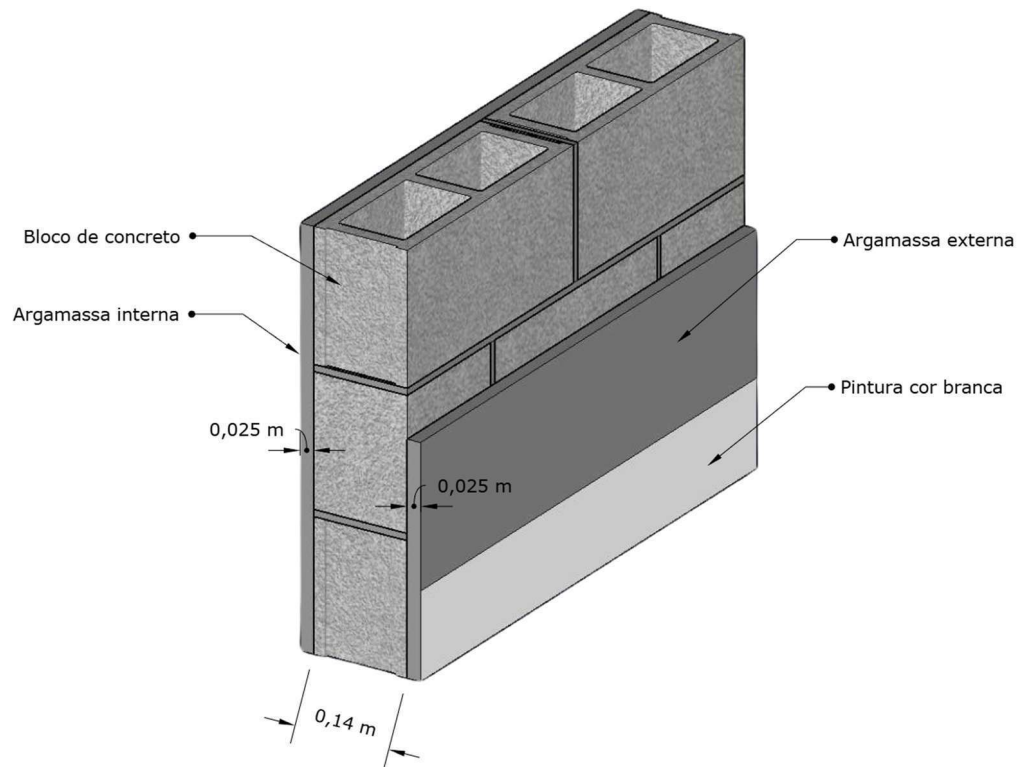


Figura 20. Composição da cobertura externa equivalente.

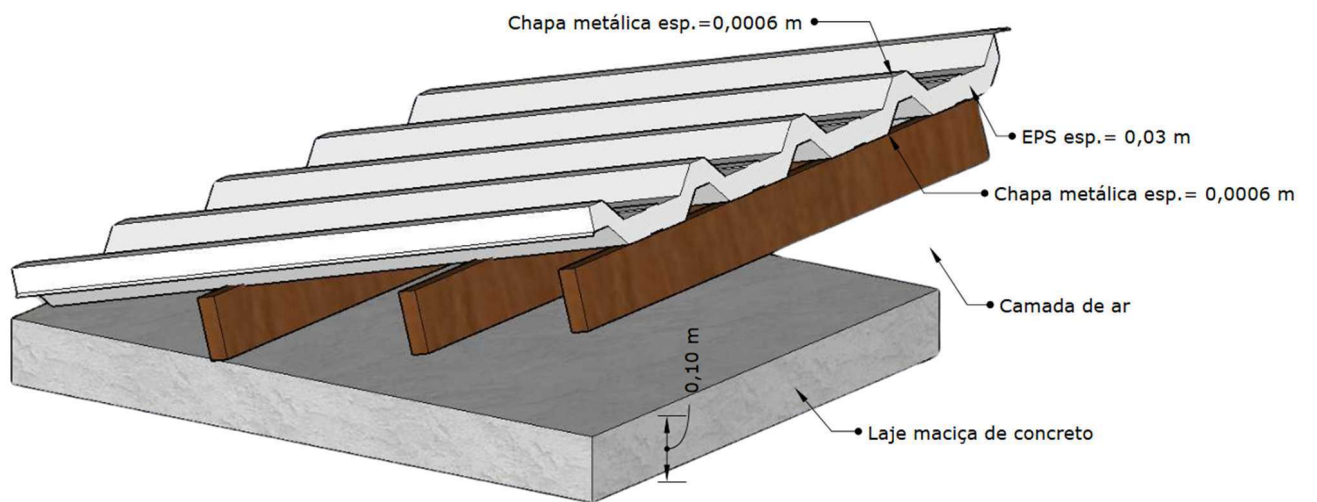
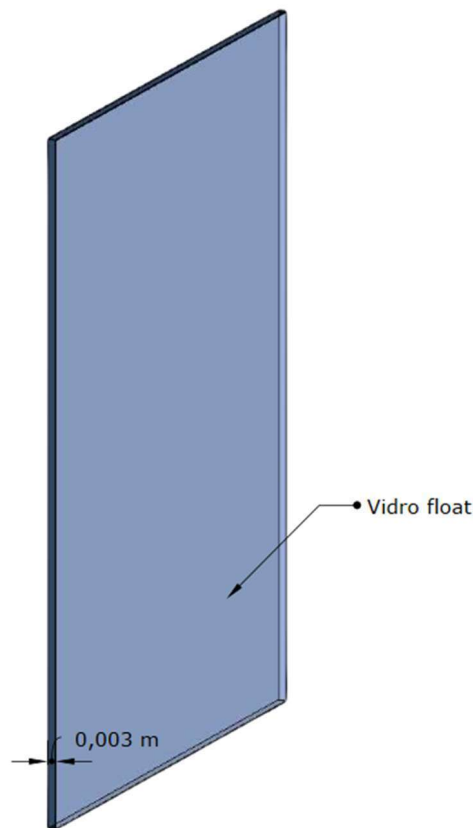


Figura 21. Composição das janelas.

A simulação foi definida para o período de um ano, de 01 de janeiro a 31 de dezembro. Os arquivos climáticos utilizados são da base de dados do INMET, e possuem as extensões .epw (*EnergyPlus Weather*) e .ddy (*Design Day Data*). Eles fornecem informações meteorológicas da cidade de Campinas, essenciais para a análise térmica da edificação. Ressalta-se que esses arquivos não correspondem a um ano específico, mas sim a um ano climático típico representativo das condições locais.

As demais variáveis de entrada consideradas na simulação estão sintetizadas na tabela a seguir.

Tabela 5. Média mensal da temperatura do solo na superfície do no local do edifício.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
27,0°C	26,0°C	27,0°C	28,0°C	26,0°C	25,0°C	24,0°C	26,0°C	26,0°C	28,0°C	27,0°C	28,0°C

As cargas internas constituíram outro parâmetro importante, possibilitando o ajuste da quantidade de calor dissipada pelos elementos internos da edificação, e seu impacto na carga térmica.

Foram definidas agendas, ou *schedules*, conforme Tabela 6, que caracterizam a forma de utilização e ocupação dos espaços de permanência prolongada, como salas de aula e laboratórios, especificando os limites de tempo de uso e ocupação dos ambientes no período de um ano. Foi considerada apenas a utilização e ocupação nos dias úteis, de segunda a sexta-feira. Foram desconsiderados os feriados, sábados, domingos e o período de férias.

Tabela 6. Padrão de uso e ocupação dos ambientes.

Período	Datas	Dias da Semana	Horário	Status/Ocupação
1º Semestre Letivo	01/01 a 30/06	Dias úteis	00:00 - 08:00	0 (Fechado)
			08:00 - 11:30	1 (Aula Manhã)
			11:30 - 19:30	0 (Intervalo/Tarde)
			19:30 - 22:30	1 (Aula Noite)
			22:30 - 24:00	0 (Fechado)
Férias de Julho	01/07 a 31/07	Todos os dias	00:00 - 24:00	0 (Sem ocupação)
2º Semestre Letivo	01/08 a 15/12	Dias úteis	00:00 - 08:00	0 (Fechado)
			22:30 - 24:00	0 (Fechado)
Férias de Dezembro	16/12 a 31/12	Todos os dias	00:00 - 24:00	0 (Sem ocupação)

O número de ocupantes considerados na simulação foi de 85 pessoas, considerando uma lotação máxima, de acordo com o projeto executivo, para as salas de aula e laboratórios. Aos sábados, domingos, feriados e durante o período de férias, os sistemas foram considerados desligados, com exceção do sistema fotovoltaico, que permanece operando continuamente, gerando energia durante todos os dias da semana, feriados e ao longo do ano todo.

O cálculo da Potência Total Instalada no sistema de Iluminação (W) foi dado pelo somatório da potência de todas as lâmpadas do ambiente, conforme dados indicados na Tabela 7, considerando que nos ambientes de permanência prolongada são utilizadas lâmpadas leds tubulares de 5W, conforme dados fornecidos pela equipe de obras da universidade (2025). Este parâmetro influencia diretamente o consumo de energia elétrica da edificação e a distribuição térmica do calor gerado pela iluminação. A consistência do dado foi verificada por meio de um cálculo manual,

somando o número de lâmpadas e multiplicando pela potência de 5W de cada uma para obter a potência total instalada. Em função do uso intermitente e da baixa carga térmica instalada, os sanitários não foram incluídos.

Tabela 7. Ocupação e potência total instalada nas zonas.

Ambiente	Ocupantes da Zona	Potência Total Instalada [W]
SALA10	85	90
SALA07	85	120
SALA05	85	120
SALA03	85	140
SALALJD	85	150
LAB02E03	85	160
LAB05E06	85	160
SALA101	85	140
SALA103	85	140
SALA105	85	140
SALA108	85	140
SALA110	85	140
SALA112	85	140
SALAPROF	85	140
SALA202	85	140
SALA204	85	140
SALA206	85	140
SALA208	85	140
SALA210	85	140
SALA212	85	140

Os equipamentos elétricos, como computadores e impressoras, são classificados de acordo com a potência total da zona onde estão instalados, utilizando o método de cálculo WATTS/área, que utiliza uma taxa média de potência por metro quadrado. A fórmula básica é:

$$\frac{\sum \text{Potência Nominal dos Equipamentos (W)}}{\text{Área útil da zona (m}^2\text{)}}$$

Os parâmetros referentes à carga térmica dos equipamentos elétricos encontram-se detalhados na Tabela 8, baseados nos valores adotados por Oliveira *et al.* (2022). O Índice de Fração Radiante especifica a parcela do calor dissipado que é transmitida ao ambiente via radiação infravermelha de onda longa. Complementarmente, o Índice de Fração Visível indica a fração da energia consumida convertida em radiação dentro do espectro visível.

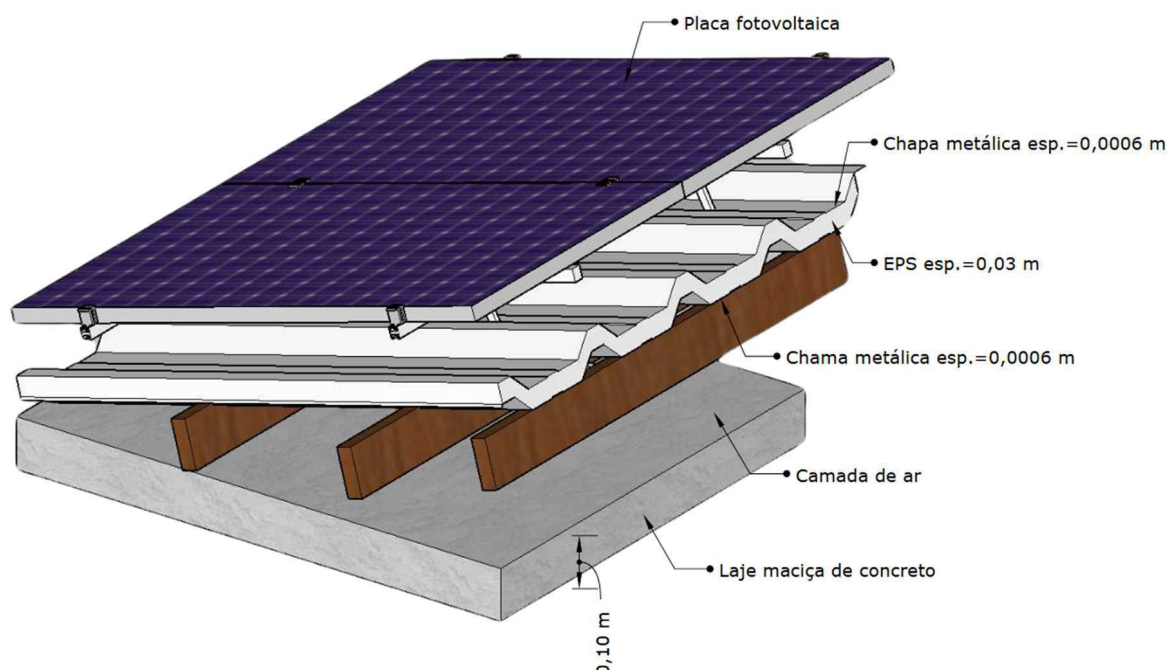
Tabela 8. Parâmetros de uso dos equipamentos elétricos.

WATTS por Área (W/m²)	Índice de Fração Radiante	Índice de Fração Visível
15	0,5	0

Foram definidos padrões de operação para o sistema de ar-condicionado, que permanece em funcionamento durante os períodos de ocupação das salas e laboratórios. O sistema de climatização opera por termostato, acionando o aquecimento sempre que a temperatura for menor que 21°C e o resfriamento quando a temperatura ultrapassar 24°C, valores que se encontram dentro da faixa de conforto térmico recomendada pela ABNT NBR 16401-2 (ABNT, 2008).

Utilizou-se o sistema de ar-condicionado do tipo *IdealLoadsAirSystem* no *EnergyPlus*, o qual permite a análise das cargas térmicas de aquecimento e resfriamento necessárias para a edificação, com base nos dados de *setpoint* definidos previamente no termostato.

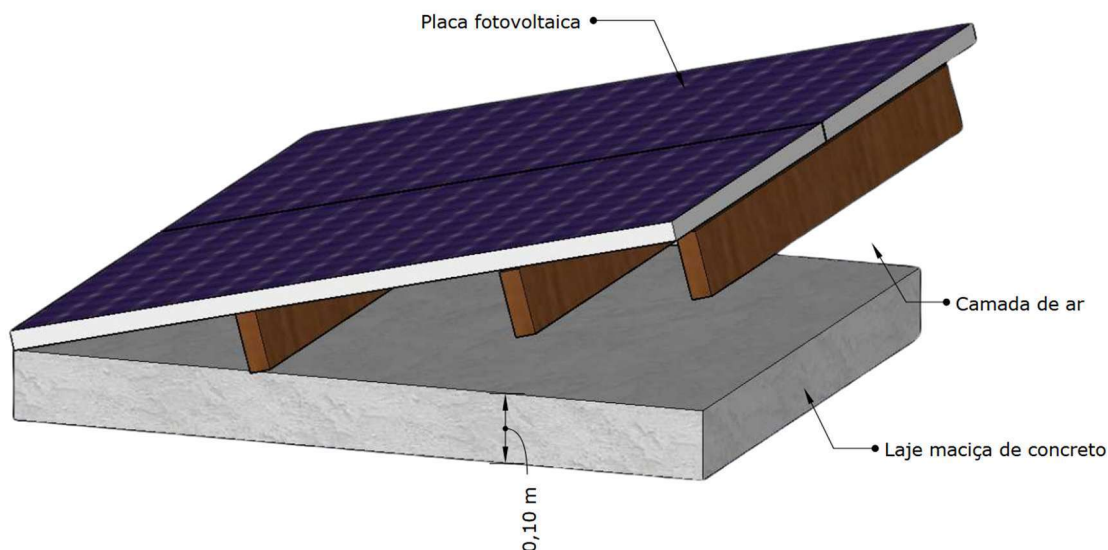
A partir do cenário base (sem a utilização de painéis fotovoltaicos), foram modeladas as placas do tipo BAPV sobre a cobertura existente, conforme Figura 22, utilizando elementos de sombreamento. A essas placas foram associados os módulos fotovoltaicos por meio do objeto *PhotovoltaicPerformance:Simple*. O módulo utilizado foi o Cs3w-33, com 144 Células em material policristalino com 350Wp (Watt-pico), fabricado pela Canadian Solar (2025), com dimensões de aproximadamente 99,2cm de largura por 2m de comprimento. Esse objeto do *EnergyPlus* permite a definição da eficiência dos painéis fotovoltaicos que convertem radiação solar incidente em eletricidade (Tabela 9).

Figura 22. Composição da cobertura externa equivalente com BAPV.**Tabela 9.** Parâmetros do Sistema Fotovoltaico.

Descrição	Valor
Nome do Gerador	Módulo Fotovoltaico
Tipo de Esquema de Operação do Gerador	Carga de Base
Potência Elétrica Nominal de Saída (por Placa)	350W
Nome do Medidor do Esquema do Medidor de Rastreamento do Gerador	Fotovoltaica: Eletricidade Produzida
Tipo de Barramento Elétrico	Corrente Alternada
Fração Radiativa	1
Eficiência do Inversor	0,2

Essa abordagem permite simular tanto o efeito da geração de energia quanto o impacto do sombreamento das placas sobre a edificação, contribuindo para uma análise mais realista do comportamento térmico e energético do edifício.

No método BIPV (Figura 23), em que os módulos fotovoltaicos substituem um elemento construtivo da edificação (telha ou fachada), as camadas que compõem esses módulos foram inseridas no *EnergyPlus* de forma semelhante às superfícies convencionais da construção, conforme especificado na Tabela 10.

Figura 23. Composição da cobertura externa equivalente com BIPV.**Tabela 10.** Propriedades térmicas da Cobertura com Painel BIPV.

Superfície	Material	Espessura [m]	Condutividade Térmica [W/m.K] (*)	Densidade [kg/m³] (*)	Calor Específico [J/kg.K] (*)	Absorção Solar (**)	Resistência térmica [m².K/W]
Cobertura externa com Módulo Fotovoltaico	Vidro	0,004	1,13	1800	1000	0,791	-
	EVA superior	0,001	0,15	1800	1000	0,791	-
	Silício	0,00037	148,00	1800	1000	0,282	-
	EVA inferior	0,001	0,15	1800	1000	0,282	-
	Tedlar	0,0002	0,24	1800	1000	0,282	-
	Alumínio	0,03	237,00	1800	1000	0,282	-
	Camada de ar	-	-	-	-	-	0,21
	Laje maciça de Concreto	0,10	1,15	1800	1000	0	-

(*) Dados conforme ABNT NBR ISO 10456:2022;

(**) Absortância Solar De Superfícies Opacas (2008).

Em seguida, foram realizadas simulações de cenários com a aplicação de placas fotovoltaicas nas fachadas. Com o objetivo de mensurar a influência da instalação dos painéis, optou-se por modelar as placas fotovoltaicas na fachada originalmente orientada para o norte, ocupando toda a área disponível, de forma a potencializar os resultados. A partir desse cenário base, foram simuladas quatro configurações, obtidas pela implementação de duas, três e quatro fachadas, respectivamente, utilizando BAPV (Figura 24) e BIPV (Figura 25).

Figura 24. Composição da parede de fachada equivalente com BAPV.

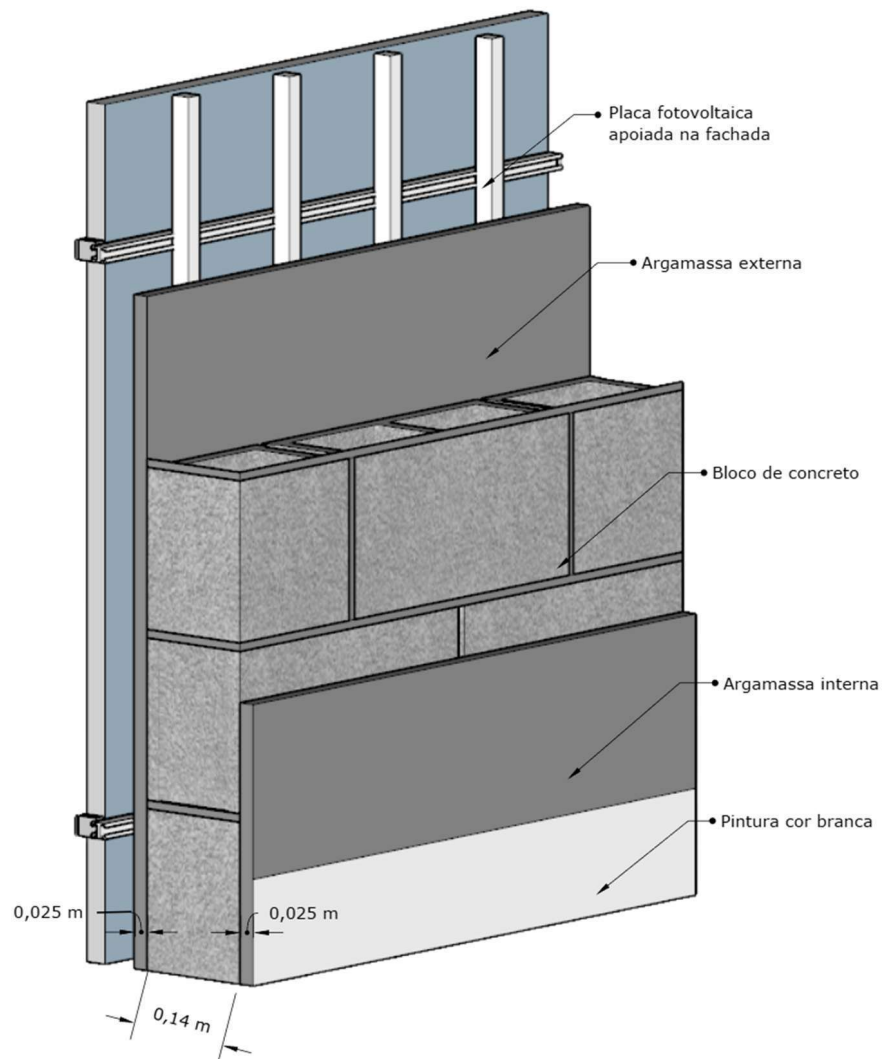
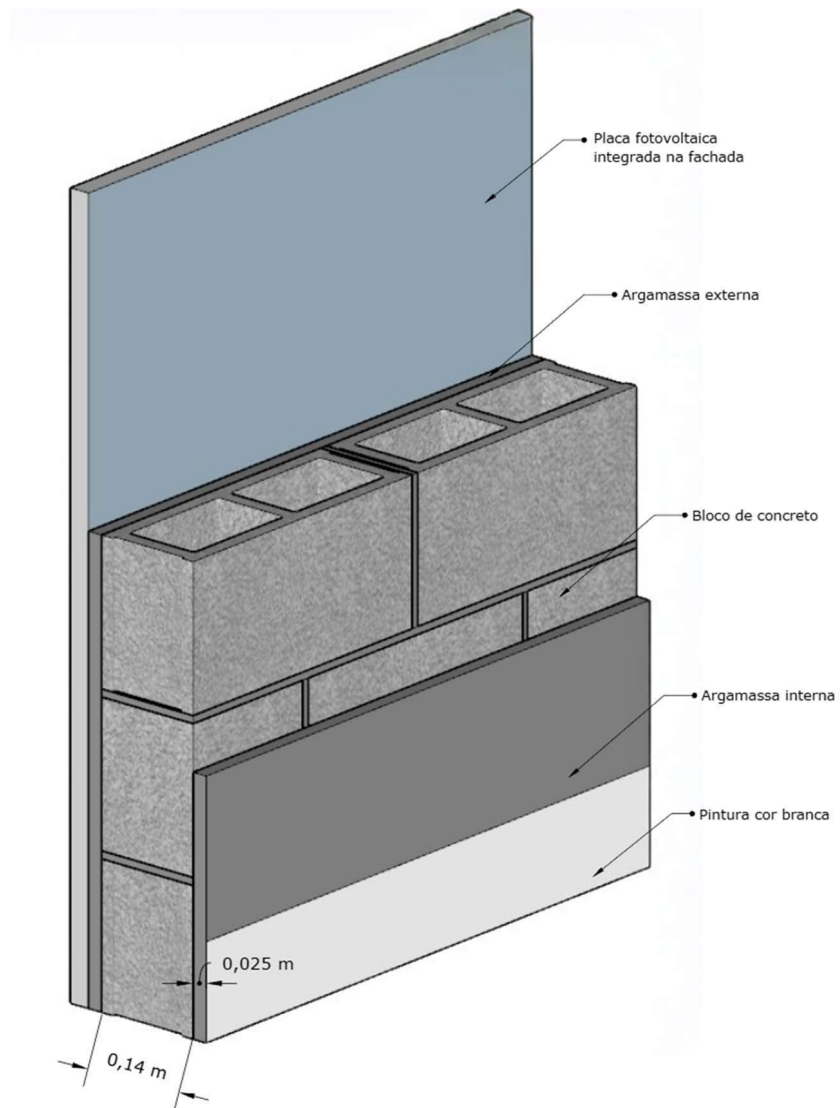


Figura 25. Composição da parede de fachada equivalente com BIPV.



3.5. Caracterização dos Cenários de Estudo

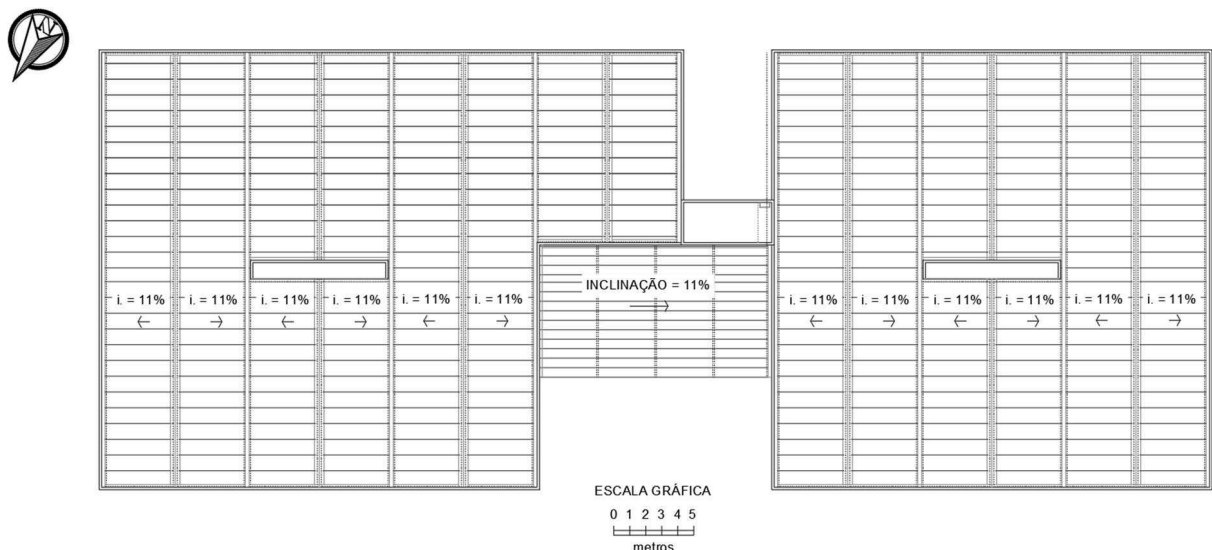
A análise fundamentou-se em uma matriz de 17 cenários de simulação, variando a forma de integração dos sistemas fotovoltaicos, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11. Nomenclatura dos Cenários Baseada em Prefixos e Sufixos Indicativos da Tipologia de Instalação dos Módulos Fotovoltaicos.

	Modelo	Sigla	Descrição
Grupo de Coberturas (Telhados)	Cenário 1	REF	Edificação de referência (sem fotovoltaico).
	Cenário 2	C-BAPV-E10-I	Cobertura com espaçamento de 10cm, inclinada.
	Cenário 3	C-BAPV-E10-P	Cobertura com espaçamento de 10cm, plana.
	Cenário 4	C-BAPV-E0-I	Cobertura com espaçamento zero (sobreposta), inclinada.
	Cenário 5	C-BAPV-E0-P	Cobertura com espaçamento zero (sobreposta), plana.
	Cenário 6	C-BAPV-E0-23	Cobertura com espaçamento zero (sobreposta), inclinada a 23°.
	Cenário 7	C-BIPV-I	Cobertura com painel integrado (substituindo a telha), inclinada.
	Cenário 8	C-BIPV-P	Cobertura com painel integrado (substituindo a telha), plana.
	Cenário 9	C-BIPV-23	Cobertura com painel integrado (substituindo a telha), inclinada a 23°.
Grupo de Fachadas	Cenário 10	F1-BAPV	Fachada Norte, sistema apoiado sobre a fachada.
	Cenário 11	F2-BAPV	Fachada Norte + Sul, sistema apoiado sobre a fachada.
	Cenário 12	F3-BAPV	Fachada Norte + Sul + Leste, sistema apoiado sobre a fachada.
	Cenário 13	F4-BAPV	Fachada Norte + Sul + Leste+ Oeste, sistema apoiado sobre a fachada.
	Cenário 14	F1-BIPV	Fachada Norte, sistema integrado sobre a fachada.
	Cenário 15	F2-BIPV	Fachada Norte + Sul, sistema integrado sobre a fachada.
	Cenário 16	F3-BIPV	Fachada Norte + Sul + Leste, sistema integrado sobre a fachada.
	Cenário 17	F4-BIPV	Fachada Norte + Sul + Leste+ Oeste, sistema integrado sobre a fachada.

Para a cobertura, consideraram-se aplicações da placa fotovoltaica em inclinações de 11° (paralela ao telhado, representado na Figura 26), 0° (paralela à laje) e a 23° (inclinação igual à latitude local), abrangendo sistemas BAPV e BIPV, além do cenário base (sem módulos fotovoltaicos). Complementarmente, foram simuladas as integrações em fachadas obtidas pela implementação de uma, duas, três e quatro fachadas, distinguindo-se entre sistemas BAPV (ventilados) e BIPV (aderidos). Nos cenários com BAPV, adotou-se uma câmara de ar de 10cm, conforme recomendações técnicas da fabricante (Canadian Solar, 2025), garantindo o fluxo de ar necessário para o resfriamento convectivo da face posterior do módulo.

Figura 26. Planta baixa da cobertura do edifício de estudo.



Após essa definição, foram realizadas as sete simulações de cobertura fotovoltaica apresentadas na Figura 27, variando-se as configurações entre elas. Em seguida, foram feitas simulações com a aplicação das placas fotovoltaicas na fachada, conforme ilustrado na Figura 28, utilizando os parâmetros descritos anteriormente.

Figura 27. Cenários com Aplicação na Cobertura Simulados no Estudo.

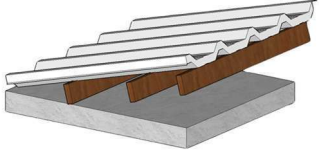
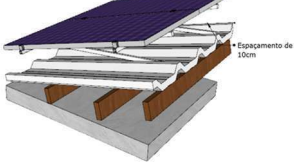
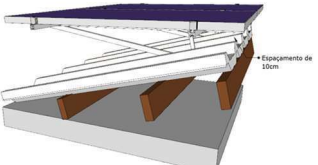
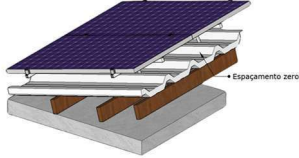
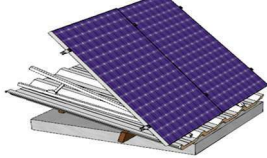
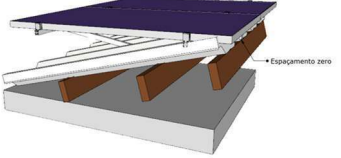
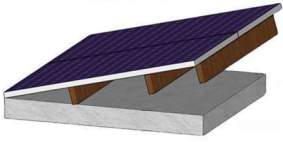
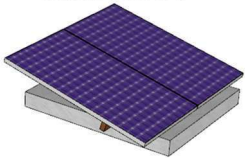
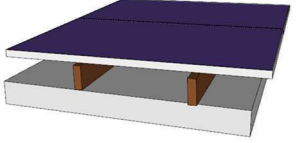
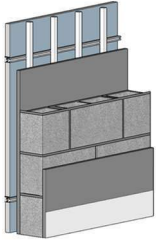
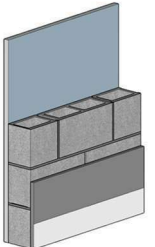
	Cobertura $i=11^\circ$	Cobertura $i=23^\circ$	Cobertura Plana
Modelo base (sem fotovoltaico)	Cenário REF  Representa a cobertura original da edificação, sem a instalação de painéis solares.		
Sistema BAPV, com painel fotovoltaico elevado - espaçamento de 10cm	Cenário C-BAPV-E10-I  Painéis fotovoltaicos instalados sobre a cobertura com um afastamento de 10cm (estrutura paralela ao telhado).		Cenário C-BAPV-E10-P  Painéis fotovoltaicos instalados sobre a cobertura com um afastamento de 10cm (estrutura inclinada).
Sistema BAPV, simulando uma condição de contato quase direto, com espaçamento zero	Cenário C-BAPV-E0-I  Módulos instalados diretamente sobre a cobertura (paralelo ao telhado), sem afastamento.	Cenário C-BAPV-E0-23  Módulos instalados diretamente sobre a cobertura (paralelo ao telhado), sem afastamento.	Cenário C-BAPV-E0-P  Painéis inclinados, porém sem espaçamento em relação à cumeeira da cobertura.
Sistema BIPV	Cenário C-BIPV-I  Os painéis substituem a cobertura convencional, funcionando como elemento construtivo (com a inclinação do telhado original).	Cenário C-BIPV-23  Os painéis substituem a cobertura convencional, funcionando como elemento construtivo (com a inclinação de 23°).	Cenário C-BIPV-P  Os painéis substituem a cobertura convencional, funcionando como elemento construtivo (paralelo a laje).

Figura 28. Cenários com Aplicação na Fachada Simulados no Estudo.

	 Cenários com BAPV	 Cenários com BIPV
1 Fachada (N)	Cenário F1-BAPV Representa a instalação de painéis solares do tipo BAPV em uma fachada (norte).	Cenário F1-BIPV Representa a instalação de painéis solares do tipo BIPV em uma fachada (norte).
2 Fachadas (N e S)	Cenário F2-BAPV Representa a instalação de painéis solares do tipo BAPV em duas fachadas (norte e sul).	Cenário F2-BIPV Representa a instalação de painéis solares do tipo BIPV em duas fachadas (norte e sul).
3 Fachadas (N, S e L)	Cenário F3-BAPV Representa a instalação de painéis solares do tipo BAPV em três fachadas (norte, sul e leste).	Cenário F3-BIPV Representa a instalação de painéis solares do tipo BIPV em três fachadas (norte, sul e leste).
4 Fachadas, envoltória completa (N, S, L, O)	Cenário F4-BAPV Representa a instalação de painéis solares do tipo BAPV em quatro fachadas (norte, sul, leste e oeste).	Cenário F4-BIPV Representa a instalação de painéis solares do tipo BIPV em quatro fachadas (norte, sul, leste e oeste).

A opção de aplicação das placas fotovoltaicas sobre a argamassa externa ao invés dos blocos estruturais justifica-se pela necessidade de preservação da integridade estrutural da edificação e pela otimização do desempenho térmico. Conforme aponta Jelle e Breivik (2012), os módulos BIPV devem atuar como a envolvente externa, garantindo a estanqueidade e proteção contra intempéries.

Para compreender o efeito das diferentes orientações na geração de energia elétrica, conduziu-se uma análise utilizando os dados gerados pelo *EnergyPlus*. Assim, foi possível identificar o cenário com maior potencial de absorção de radiação solar (maior geração fotovoltaica) e menor consumo de energia da edificação.

4. RESULTADOS

4.1. Consumo de Energia

A próxima etapa deste estudo consistiu na interpretação dos dados obtidos a partir dos diferentes cenários simulados, com a quantificação do consumo e da geração de energia elétrica da edificação nos cenários analisados.

4.1.1. Cenário REF - Edificação sem Painel Fotovoltaico

O consumo anual de energia elétrica da edificação cenário base (Figura 29) foi determinado pelo consumo dos sistemas de equipamentos elétricos, iluminação e ar-condicionado, conforme apresentado na Tabela 12, sendo este último, em sua maioria, utilizado para o resfriamento dos ambientes devido às condições térmicas predominantes na região.

Figura 29. Cenário Base de Simulação.

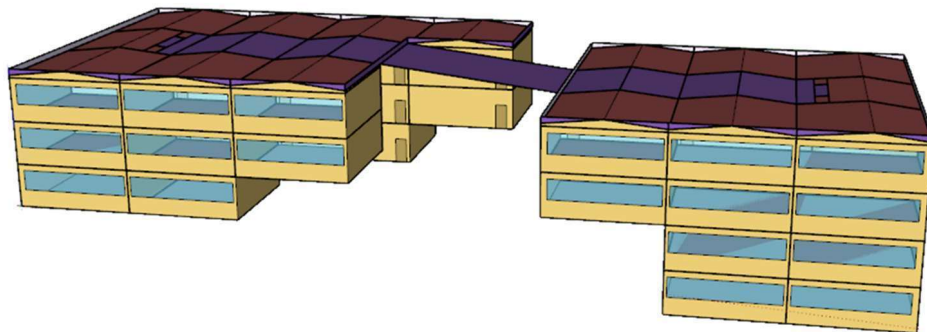


Tabela 12. Consumo e Geração Anual de Energia Elétrica da Edificação.

Sistema	Energia Elétrica [kWh]
Aquecimento	3.699,38
Resfriamento	734.740,62
Iluminação	7.848,36
Equipamentos elétricos	73.733,80
Geração de Energia Elétrica	0,00

4.1.2. Cenário C-BAPV-E10-I e C-BAPV-E10-P - Edificação com Painel do Tipo BAPV Inclinado (11°) e Plano (0°) – espaçamento: 10cm

O próximo passo deste estudo consistiu na implementação dos painéis fotovoltaicos apoiados na superfície da cobertura, com afastamento de 10cm, recomendado por Vinturini, (2022). Adotaram-se duas configurações de inclinação para os painéis solares: com inclinação de 11° (Figura 30), e uma horizontal (0°), conforme Figura 31.

Para maximizar a geração de energia, os painéis foram instalados em toda a área disponível da cobertura. Neste primeiro momento, foram instalados painéis fotovoltaicos do tipo BAPV, que são integrados ao edifício de forma posterior à sua construção, apoiando-se sobre o telhado existente, a uma distância de 10cm do telhado, conforme Figura 32.

Figura 30. Cenário C-BAPV-E10-I.

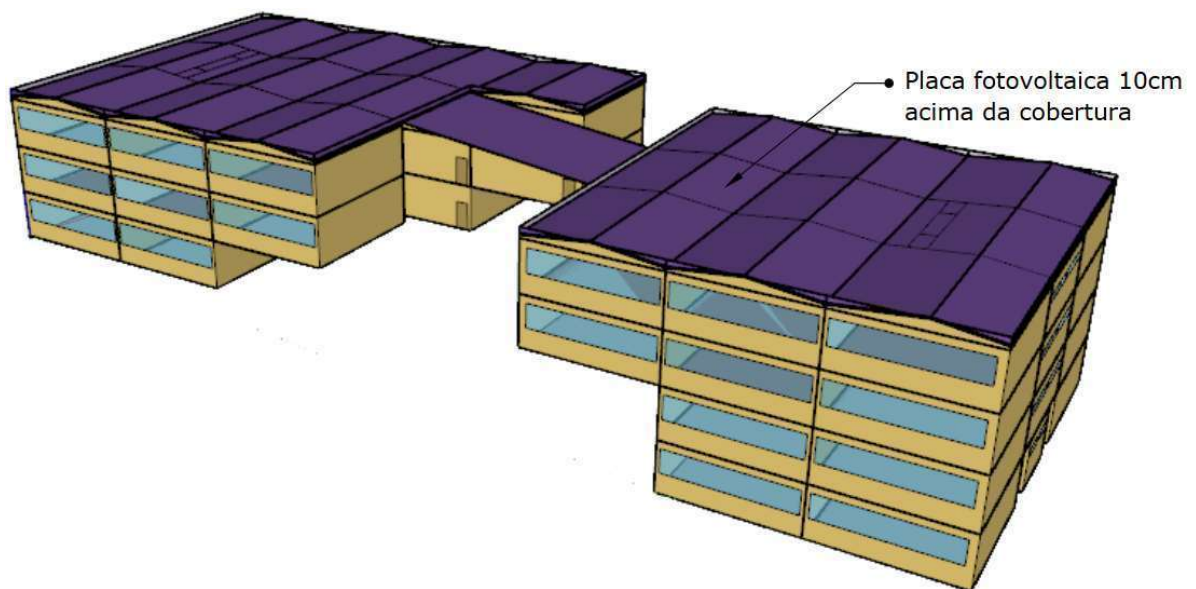


Figura 31. Cenário C-BAPV-E10-P.

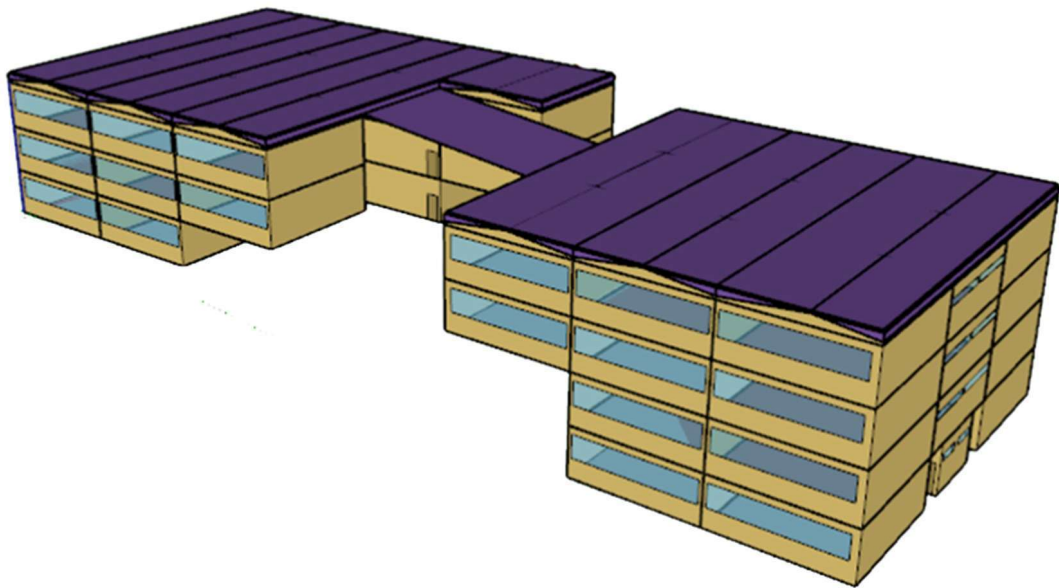
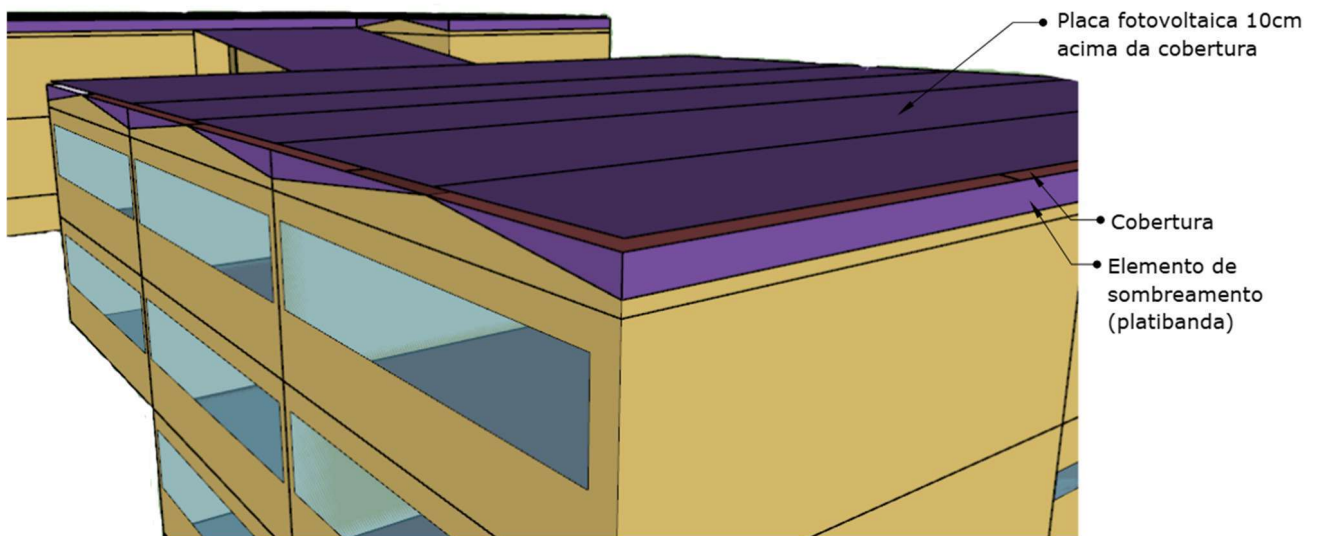


Figura 32. Ampliação do Cenário C-BAPV-E10-P.



A adoção do cenário BAPV com placas inclinadas e planas resultou nos valores de consumo anual de energia elétrica apresentados na Tabela 13 e na Tabela 14, correspondentes aos cenários C-BAPV-E10-I e C-BAPV-E10-P, respectivamente.

Tabela 13. Consumo e Geração Anual Cenário C-BAPV-E10-I.

Sistema	Energia Elétrica [kWh]
Aquecimento	3.977,22
Resfriamento	715.137,10
Iluminação	7.848,36
Equipamentos elétricos	73.733,80
Geração de Energia Elétrica	356.594,04

Tabela 14. Consumo e Geração Anual Cenário C-BAPV-E10-P.

Sistema	Energia Elétrica [kWh]
Aquecimento	3.970,42
Resfriamento	715.540,00
Iluminação	7.848,36
Equipamentos elétricos	73.733,80
Geração de Energia Elétrica	355.494,60

4.1.3. Cenário C-BAPV-E0-I, C-BAPV-E0-P e C-BAPV-E0-23 - Edificação com Pannel do Tipo BAPV Inclinado (11° e 23°) e Plano (0°) – sem espaçamento

Foi feita, então, a implementação dos painéis fotovoltaicos ainda do tipo BAPV, com a posição inclinada (11°), plana (0°) e a 23°, sobre a telha sanduíche, conforme Figura 33, Figura 34 e 35, respectivamente, porém, sem espaçamento entre as placas fotovoltaicas e a telha. As Tabela 15 a Tabela 16 apresentam os consumos anuais de energia elétrica dos cenários C-BAPV-E0-I, C-BAPV-E0-P e C-BAPV-E0-23, considerando as configurações descritas anteriormente.

Figura 33. Cenário C-BAPV-E0-I.

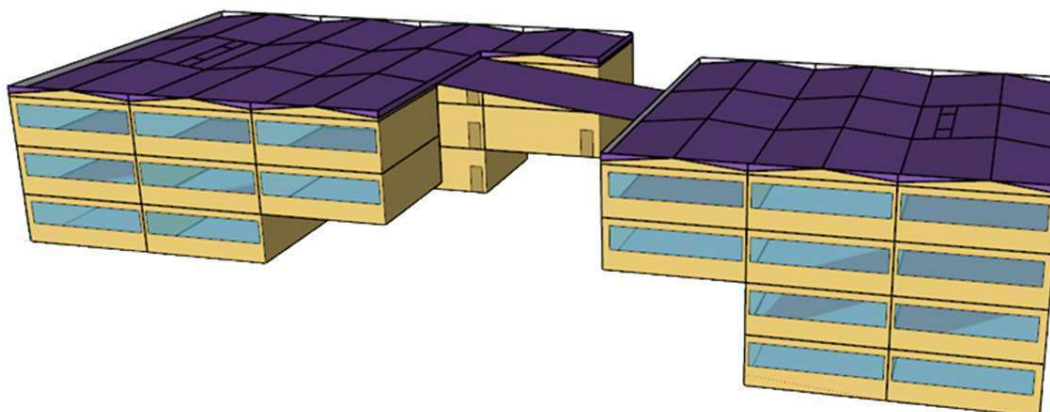


Figura 34. Cenário C-BAPV-E0-P.

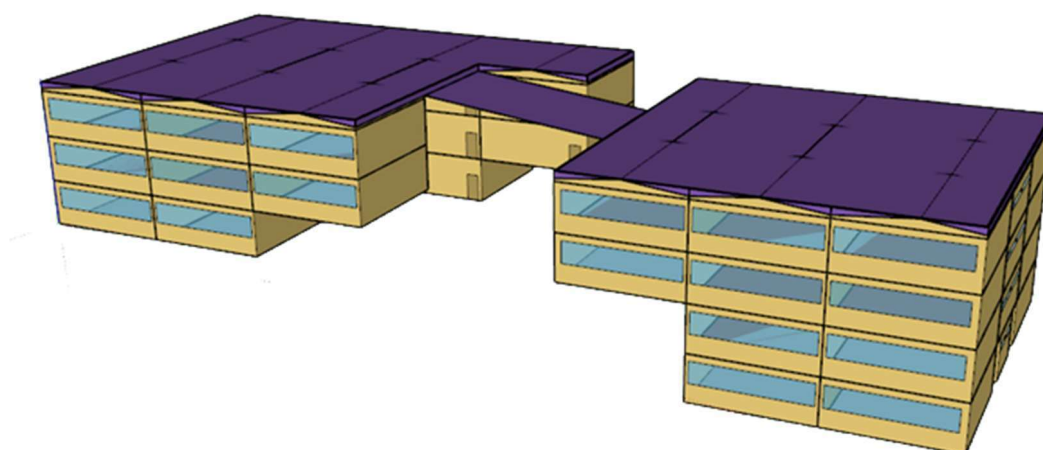


Figura 35. Cenário C-BAPV-E0-23.

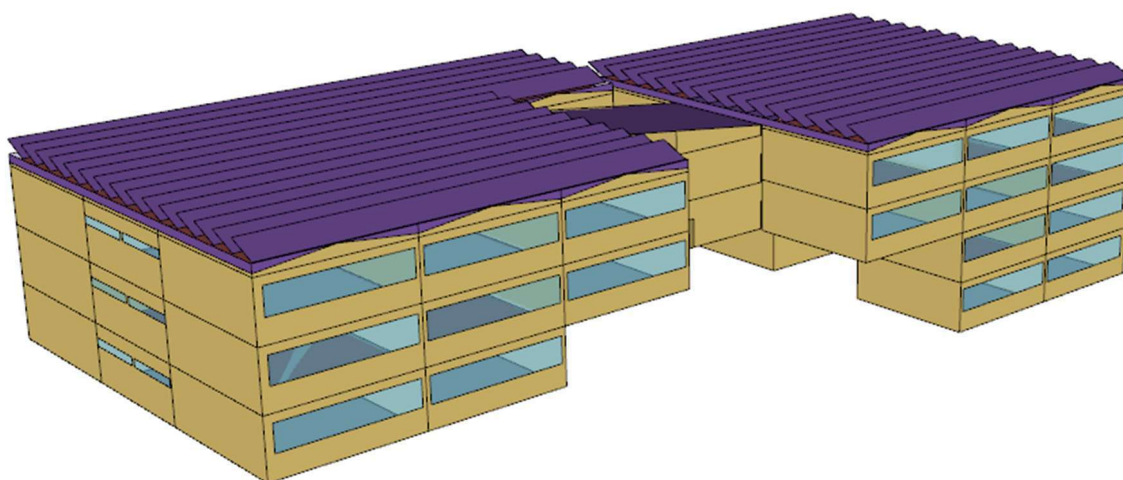


Tabela 15. Consumo e Geração Anual Cenário C-BAPV-E0-I.

Sistema	Energia Elétrica [kWh]
Aquecimento	3.977,44
Resfriamento	715.130,03
Iluminação	7.848,36
Equipamentos elétricos	73.733,80
Geração de Energia Elétrica	355.015,31

Tabela 16. Consumo e Geração Anual Cenário C-BAPV-E0-P.

Sistema	Energia Elétrica [kWh]
Aquecimento	3.938,98
Resfriamento	718.373,34
Iluminação	7.848,36
Equipamentos elétricos	73.733,80
Geração de Energia Elétrica	355.573,34

Tabela 17. Consumo e Geração Anual Cenário C-BAPV-E0-23.

Sistema	Energia Elétrica [kWh]
Aquecimento	4.373,00
Resfriamento	730.289,00
Iluminação	7.848,36
Equipamentos elétricos	73.733,80
Geração de Energia Elétrica	357.051,00

4.1.4. Cenário C-BIPV-I, C-BIPV-P e C-BIPV-23 - Edificação com Pannel do Tipo BIPV Inclinado (11° e 23°) e Plano (0°)

Na sequência, foi feita a implementação dos painéis fotovoltaicos na superfície da cobertura, com a posição inclinada (11°) e plana (0°), como substituto da telha

sanduíche, adotando o método BIPV. Para isso, foram retirados os elementos de sombreamento e adicionados os materiais que compõem a placa solar na superfície da cobertura. A Tabela 18 apresenta o consumo anual de energia elétrica do cenário C-BIPV-I (Figura 36), assim, como a Tabela 19 apresenta o consumo anual do cenário C-BIPV-P (Figura 37) e a apresenta o consumo anual do cenário C-BIPV-23 (Figura 38), considerando as configurações descritas anteriormente. A superfície de aplicação das placas solares está destacada em azul.

Figura 36. Cenário C-BIPV-I.

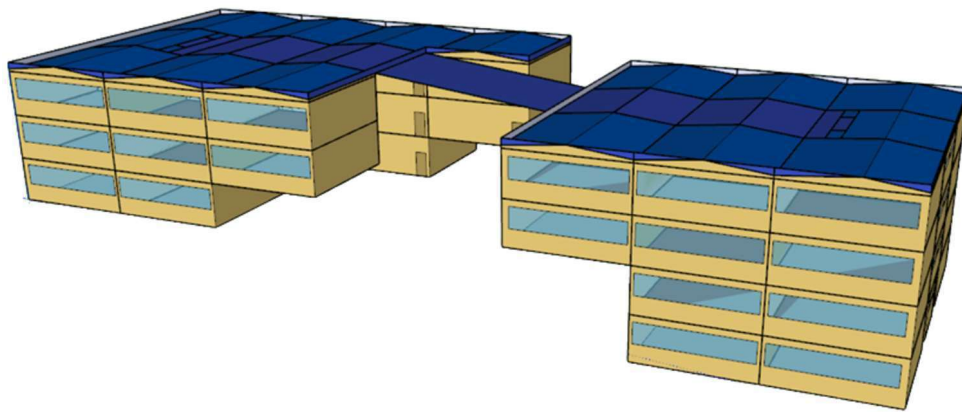


Figura 37. Cenário C-BIPV-P.

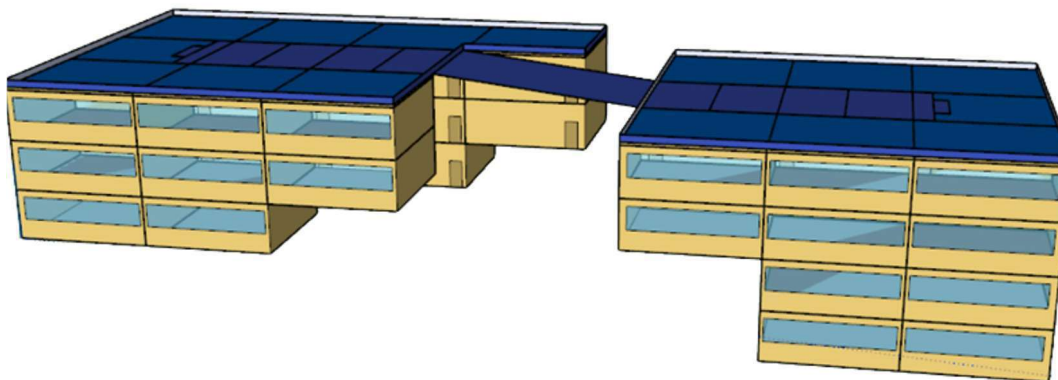
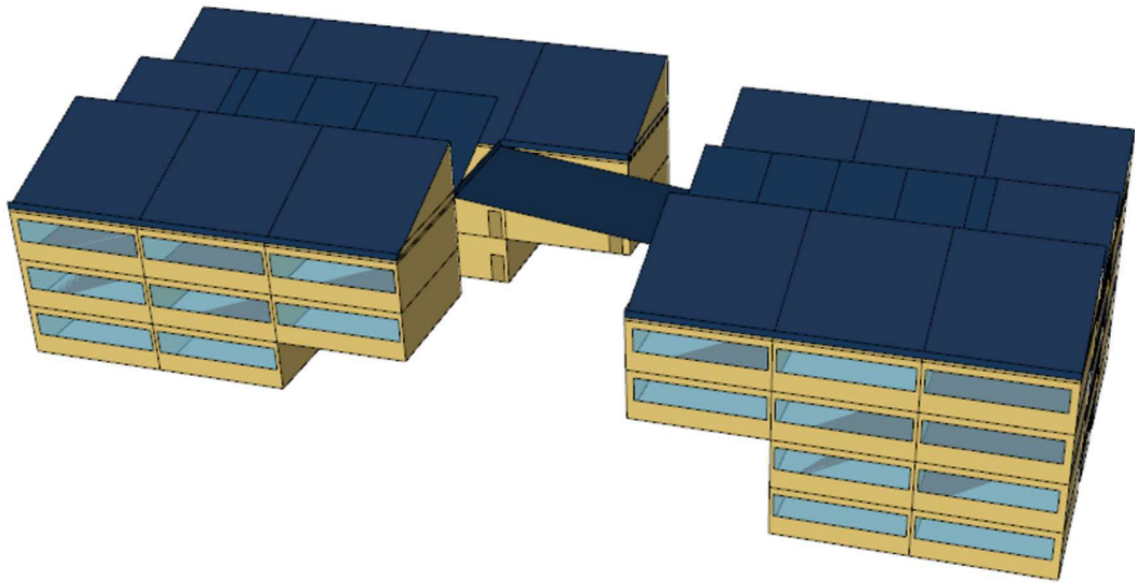


Figura 38. Cenário C-BIPV-23.**Tabela 18.** Consumo e Geração Anual Cenário C-BIPV-I.

Sistema	Energia Elétrica [kWh]
Aquecimento	4.274,27
Resfriamento	744.625,43
Iluminação	7.848,36
Equipamentos elétricos	73.733,80
Geração de Energia Elétrica	76.990,00

Tabela 19. Consumo e Geração Anual Cenário C-BIPV-P.

Sistema	Energia Elétrica [kWh]
Aquecimento	4.238,33
Resfriamento	745.536,57
Iluminação	7.848,36
Equipamentos elétricos	73.733,80
Geração de Energia Elétrica	165.066,68

Tabela 20. Consumo e Geração Anual Cenário C-BIPV-23.

Sistema	Energia Elétrica [kWh]
Aquecimento	4.351,55
Resfriamento	736.358,56
Iluminação	7.848,36
Equipamentos elétricos	73.733,80
Geração de Energia Elétrica	225.827,05

4.1.5. Cenários F1-BAPV, F2-BAPV, F3-BAPV e F4-BAPV - Edificação com Painel Apoiado sobre a Fachada

Na etapa seguinte, os painéis fotovoltaicos foram implementados na superfície da fachada, posicionados verticalmente e apoiados na parede externa, utilizando o método BAPV. Para a modelagem, foram incorporados os elementos de sombreamento e especificados os materiais que compõem os módulos fotovoltaicos aplicados à fachada. A Tabela 21 apresenta o consumo anual de energia elétrica dos cenários com BAPV (Figura 39 a Figura 42).

Tabela 21. Consumo e Geração Anual - Cenários BAPV na Fachada.

Cenário F1-BAPV		Cenário F2-BAPV		Cenário F3-BAPV		Cenário F4-BAPV	
Sistema	Energia Elétrica [kWh]	Sistema	Energia Elétrica [kWh]	Sistema	Energia Elétrica [kWh]	Sistema	Energia Elétrica [kWh]
Aquecimento	3.826,54	Aquecimento	3.859,80	Aquecimento	3.898,34	Aquecimento	3.945,73
Resfriamento	729.269,47	Resfriamento	726.433,16	Resfriamento	723.728,20	Resfriamento	720.214,23
Iluminação	7.848,36	Iluminação	7.848,36	Iluminação	7.848,36	Iluminação	7.848,36
Equipamentos elétricos	73.733,80	Equipamentos elétricos	73.733,80	Equipamentos elétricos	73.733,80	Equipamentos elétricos	73.733,80
Geração de Energia Elétrica	28.212,47	Geração de Energia Elétrica	51.069,35	Geração de Energia Elétrica	70.827,07	Geração de Energia Elétrica	92.923,22

Figura 39. Modelo do Cenário F1-BAPV.

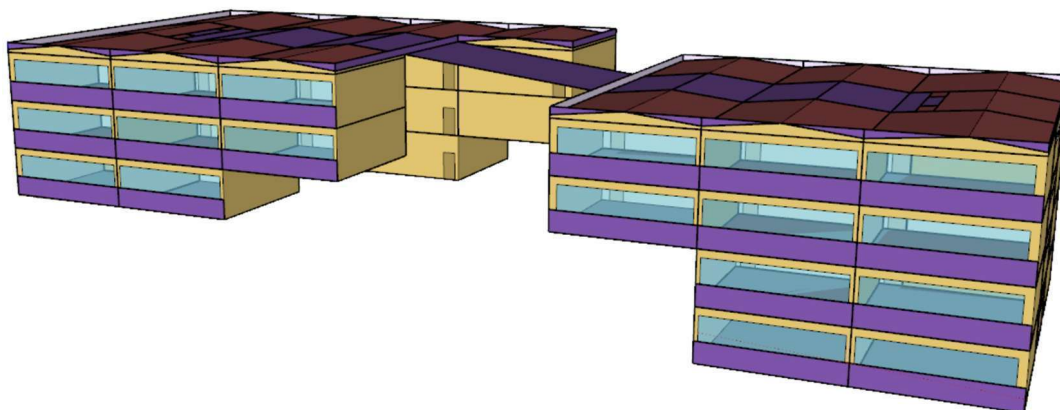


Figura 40. Implementação de Fachada Fotovoltaica no Modelo F2-BAPV.

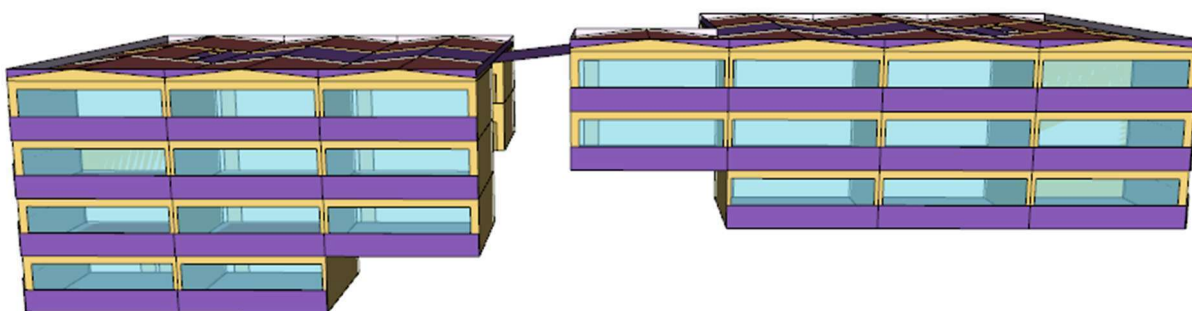


Figura 41. Implementação de Fachada Fotovoltaica no Modelo F3-BAPV.



Figura 42. Implementação de Fachada Fotovoltaica no Modelo F4-BAPV.

Na sequência, foi feita a implementação dos painéis fotovoltaicos na superfície da fachada, integrado na argamassa externa, adotando o método BIPV. Para a modelagem, os materiais que compõem os módulos fotovoltaicos à composição da fachada. A Tabela 22 apresenta o consumo anual de energia elétrica dos cenários BIPV (Figura 43 a 46). A superfície de aplicação das placas solares está destacada em azul.

Tabela 22. Consumo e Geração Anual Cenários BIPV na Fachada.

Cenário F1-BIPV		Cenário F2-BIPV		Cenário F3-BIPV		Cenário F4-BIPV	
Sistema	Energia Elétrica [kWh]	Sistema	Energia Elétrica [kWh]	Sistema	Energia Elétrica [kWh]	Sistema	Energia Elétrica [kWh]
Aquecimento	3.712,45	Aquecimento	3.701,97	Aquecimento	3.698,59	Aquecimento	3.714,16
Resfriamento	740.381,98	Resfriamento	745.536,20	Resfriamento	748.894,99	Resfriamento	752.915,32
Iluminação	7.848,36	Iluminação	7.848,36	Iluminação	7.848,36	Iluminação	7.848,36
Equipamentos elétricos	73.733,80	Equipamentos elétricos	73.733,80	Equipamentos elétricos	73.733,80	Equipamentos elétricos	73.733,80
Geração de Energia Elétrica	28.210,33	Geração de Energia Elétrica	50.179,31	Geração de Energia Elétrica	70.255,18	Geração de Energia Elétrica	92.864,42

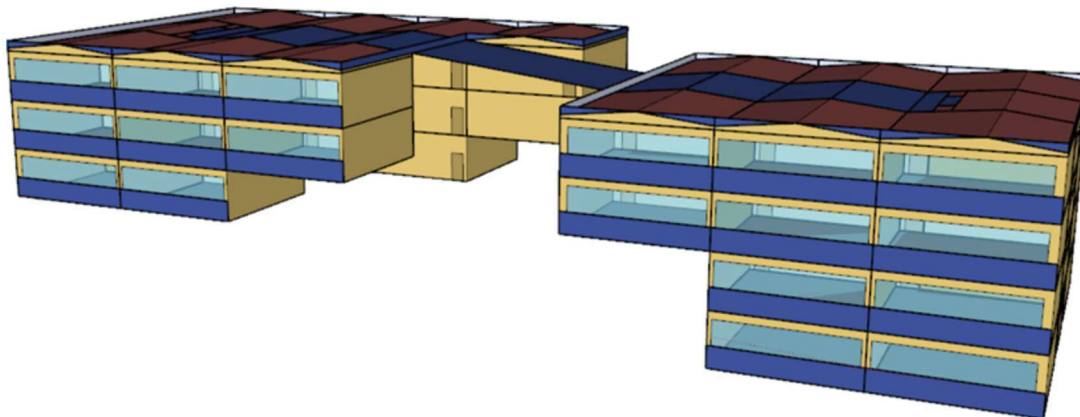
Figura 43. Modelo do Cenário F1-BIPV.

Figura 44. Implementação de Fachada Fotovoltaica no Modelo F2-BIPV.

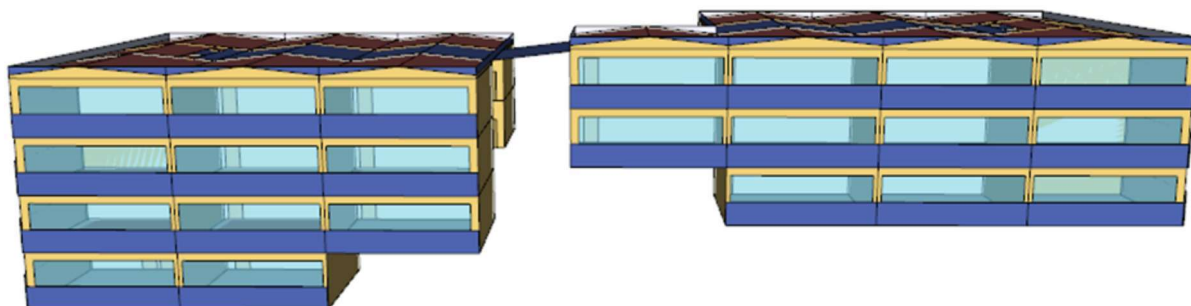
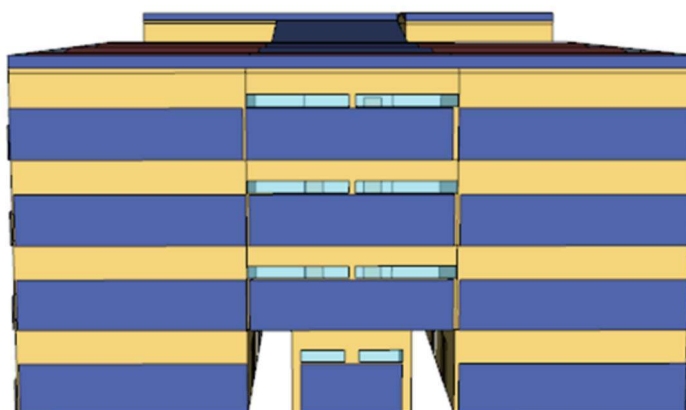


Figura 45. Implementação de Fachada Fotovoltaica no Modelo F3-BIPV.

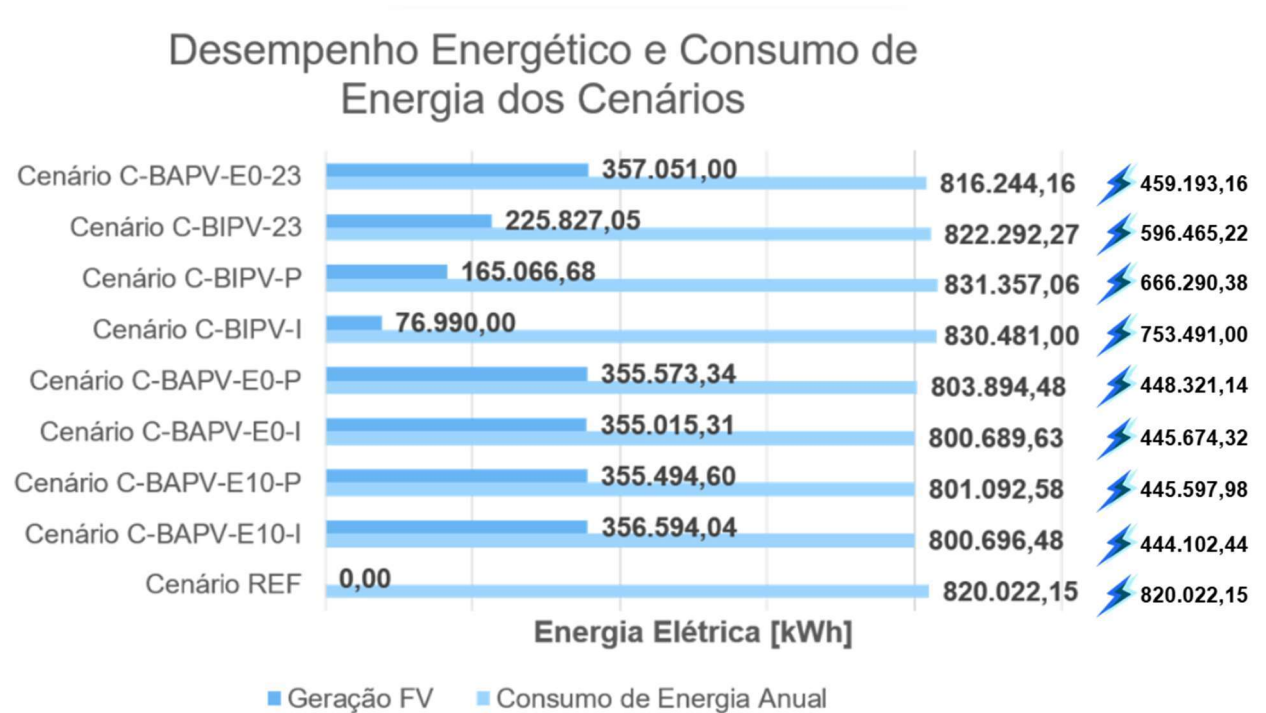
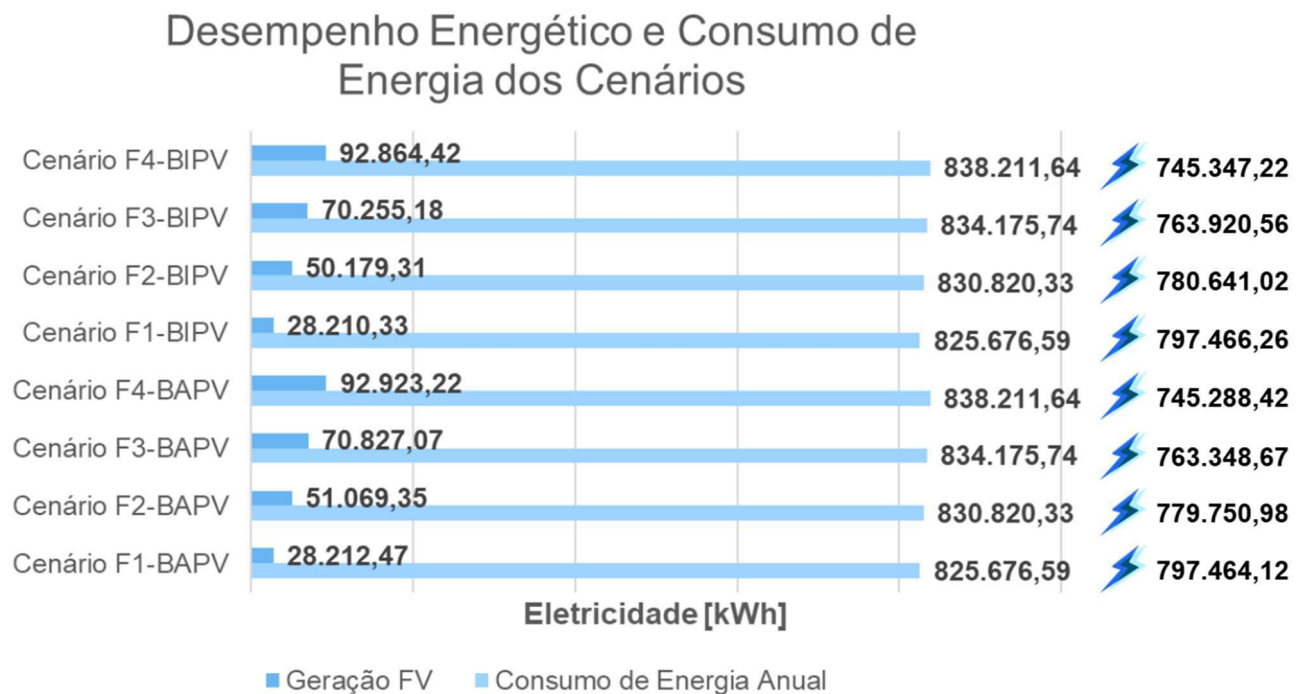


Figura 46. Implementação de Fachada Fotovoltaica no Modelo F4-BIPV.



4.2. Análise Comparativa dos Cenários de Estudo

A Figura 47 e a Figura 48 ilustram o impacto das formas de aplicação das placas fotovoltaicas no consumo e na geração de energia elétrica da edificação. A análise compara os 17 cenários propostos, considerando a aplicação de placas fotovoltaicas na cobertura e nas fachadas, respectivamente, e destaca a energia proveniente da rede da concessionária local, em cada caso, na direita do gráfico.

Figura 47. Consumo Anual e Geração Fotovoltaica dos Cenários de Cobertura.**Figura 48.** Consumo Anual e Geração Fotovoltaica dos Cenários de Fachada.

O contraste entre a estética do BIPV e sua entrega energética é notável. Ao substituir componentes da envoltória sem prever ventilação adequada, o sistema elimina a dissipação térmica por convecção. O aumento drástico na temperatura das

células reduz sua eficiência elétrica, justificando a queda na geração e o impacto negativo no consumo energético do edifício.

A Figura 49 e Figura 50 apresentam uma avaliação comparativa baseada em quatro variáveis principais: consumo total de energia (kWh), energia para aquecimento (kWh), energia para resfriamento (kWh) e energia do sistema de HVAC (aquecimento + resfriamento), comparando o cenário REF (cenário base) com os demais cenários. O objetivo é avaliar as diferenças resultantes das distintas formas de aplicação das placas fotovoltaicas na cobertura e fachada e seu impacto no consumo dos sistemas de climatização. Os símbolos de seta (↓ para redução e ↑ para aumento) indicam se os outros cenários melhoraram ou pioraram em relação ao cenário REF, e o lado direito do gráfico destaca a porcentagem de melhora ou piora no consumo geral de energia em cada caso.

Figura 49. Participação dos Sistemas de HVAC no Consumo Anual de Energia - Cenários de Cobertura.

Comparação do consumo de energia entre os sistemas				
Cenário REF Consumo: 820.022,16 kWh Aquecimento: 3.699,38 kWh Resfriamento: 734.740,62 kWh HVAC: 738.440,00 kWh				
	X			
Cenário C-BAPV-E10-I Consumo: 800.696,48 kWh Aquecimento: 3.977,22 kWh Resfriamento: 715.137,1 kWh HVAC: 719.114,32 kWh			↓ -2,36% ↓	
Cenário REF Consumo: 820.022,16 kWh Aquecimento: 3.699,38 kWh Resfriamento: 734.740,62 kWh HVAC: 738.440,00 kWh				
	X			
Cenário C-BAPV-E10-P Consumo: 801.092,58 kWh Aquecimento: 3.970,42 kWh Resfriamento: 715.540 kWh HVAC: 719.510,42 kWh			↓ -2,31% ↓	
Cenário REF Consumo: 820.022,16 kWh Aquecimento: 3.699,38 kWh Resfriamento: 734.740,62 kWh HVAC: 738.440,00 kWh				
	X			
Cenário C-BAPV-E0-I Consumo: 800.689,63 kWh Aquecimento: 3.977,44 kWh Resfriamento: 715.130,03 kWh HVAC: 719.107,47 kWh			↓ -2,36% ↓	
Cenário REF Consumo: 820.022,16 kWh Aquecimento: 3.699,38 kWh Resfriamento: 734.740,62 kWh HVAC: 738.440,00 kWh				
	X			
Cenário C-BAPV-E0-P Consumo: 803.894,48 kWh Aquecimento: 3.938,98 kWh Resfriamento: 718.373,34 kWh HVAC: 722.312,32 kWh			↓ -1,97% ↓	
Cenário REF Consumo: 820.022,16 kWh Aquecimento: 3.699,38 kWh Resfriamento: 734.740,62 kWh HVAC: 738.440,00 kWh				
	X			
Cenário C-BIPV-I Consumo: 830.481,86 kWh Aquecimento: 4.274,27 kWh Resfriamento: 744.625,43 kWh HVAC: 748.899,70 kWh			↑ +1,28% ↑	
Cenário REF Consumo: 820.022,16 kWh Aquecimento: 3.699,38 kWh Resfriamento: 734.740,62 kWh HVAC: 738.440,00 kWh				
	X			
Cenário C-BIPV-P Consumo: 831.357,06 kWh Aquecimento: 4.238,33 kWh Resfriamento: 745.536,57 kWh HVAC: 749.774,90 kWh			↑ +1,38% ↑	
Cenário REF Consumo: 820.022,16 kWh Aquecimento: 3.699,38 kWh Resfriamento: 734.740,62 kWh HVAC: 738.440,00 kWh				
	X			
Cenário C-BAPV-E0-23 Consumo: 816.244,16 kWh Aquecimento: 4.373,00 kWh Resfriamento: 730.289,00 kWh HVAC: 734.662,00 kWh			↓ -0,46% ↓	
Cenário REF Consumo: 820.022,16 kWh Aquecimento: 3.699,38 kWh Resfriamento: 734.740,62 kWh HVAC: 738.440,00 kWh				
	X			
Cenário C-BIPV-23 Consumo: 822.292,27 kWh Aquecimento: 4.351,55 kWh Resfriamento: 736.358,56 kWh HVAC: 740.710,11 kWh			↑ +0,28% ↑	

Figura 50. Participação dos Sistemas de HVAC no Consumo Anual de Energia - Cenários de Fachada.

Comparação do consumo de energia entre os sistemas				
Cenário REF Consumo: 820.022,16 kWh Aquecimento: 3.699,38 kWh Resfriamento: 734.740,62 kWh HVAC: 738.440,00 kWh		X	Cenário F1-BAPV Consumo: 814.678,17 kWh Aquecimento: 3.826,54 kWh Resfriamento: 729.269,47 kWh HVAC: 733.096,01 kWh	↓ ↑ -0,65% ↓ ↓ ↓
Cenário REF Consumo: 820.022,16 kWh Aquecimento: 3.699,38 kWh Resfriamento: 734.740,62 kWh HVAC: 738.440,00 kWh		X	Cenário F2-BAPV Consumo: 811.875,12 kWh Aquecimento: 3.859,8 kWh Resfriamento: 726.433,16 kWh HVAC: 730.292,96 kWh	↓ ↑ -0,99% ↓ ↓ ↓
Cenário REF Consumo: 820.022,16 kWh Aquecimento: 3.699,38 kWh Resfriamento: 734.740,62 kWh HVAC: 738.440,00 kWh		X	Cenário F3-BAPV Consumo: 809.208,70 kWh Aquecimento: 3.898,34 kWh Resfriamento: 723.728,20 kWh HVAC: 727.626,54 kWh	↓ ↑ -1,32% ↓ ↓ ↓
Cenário REF Consumo: 820.022,16 kWh Aquecimento: 3.699,38 kWh Resfriamento: 734.740,62 kWh HVAC: 738.440,00 kWh		X	Cenário F4-BAPV Consumo: 805.742,12 kWh Aquecimento: 3.945,73 kWh Resfriamento: 720.214,23 kWh HVAC: 724.159,96 kWh	↓ ↑ -1,74% ↓ ↓ ↓
Cenário REF Consumo: 820.022,16 kWh Aquecimento: 3.699,38 kWh Resfriamento: 734.740,62 kWh HVAC: 738.440,00 kWh		X	Cenário F1-BIPV Consumo: 825.676,59 kWh Aquecimento: 3.712,45 kWh Resfriamento: 740.381,98 kWh HVAC: 744.094,43 kWh	↑ ↑ +0,69% ↑ ↑ ↑
Cenário REF Consumo: 820.022,16 kWh Aquecimento: 3.699,38 kWh Resfriamento: 734.740,62 kWh HVAC: 738.440,00 kWh		X	Cenário F2-BIPV Consumo: 830.820,33 kWh Aquecimento: 3.701,97 kWh Resfriamento: 745.536,20 kWh HVAC: 749.238,17 kWh	↑ ↑ +1,32% ↑ ↑ ↑
Cenário REF Consumo: 820.022,16 kWh Aquecimento: 3.699,38 kWh Resfriamento: 734.740,62 kWh HVAC: 738.440,00 kWh		X	Cenário F3-BIPV Consumo: 834.175,74 kWh Aquecimento: 3.698,59 kWh Resfriamento: 748.894,99 kWh HVAC: 752.593,58 kWh	↑ ↓ +1,73% ↑ ↑ ↑
Cenário REF Consumo: 820.022,16 kWh Aquecimento: 3.699,38 kWh Resfriamento: 734.740,62 kWh HVAC: 738.440,00 kWh		X	Cenário F4-BIPV Consumo: 838.211,64 kWh Aquecimento: 3.714,16 kWh Resfriamento: 752.915,32 kWh HVAC: 756.629,48 kWh	↑ ↑ +2,22% ↑ ↑ ↑

Os resultados indicam que os cenários de integração (C-BIPV e F-BIPV) acarretaram um incremento no consumo de energia da edificação. Tal fenômeno é justificado pela substituição de componentes construtivos convencionais por elementos fotovoltaicos sem a presença de uma camada de ar ventilada. Nessas condições, a ausência de um entreferro resulta em um acoplamento direto, onde a radiação absorvida pelas células aquece a placa e transfere o fluxo de calor para o interior do edifício, sobrecarregando o sistema de HVAC em regime de resfriamento.

Em contrapartida, os sistemas apoiados (BAPV) na cobertura atuam como uma estratégia de sombreamento, reduzindo o consumo total em até 2,36%. Observou-se que o espaçamento de 10 cm (E10) favorece o resfriamento do painel, garantindo uma eficiência de geração ligeiramente superior em comparação ao modelo sem espaçamento (E0).

Quanto os cenários de fachada, os sistemas BAPV funcionam como dispositivos de proteção solar (brises), mitigando a incidência direta de radiação na envolvente e reduzindo o consumo em até 1,74% (Cenário F4-BAPV). Inversamente, a progressão da integração BIPV nas fachadas elevou o consumo de forma expressiva, atingindo um incremento de 2,22% no cenário F4-BIPV. Isso evidencia que a integração fotovoltaica em fachadas, quando desprovida de tratamento térmico ou ventilação, transforma os componentes de vedação em dissipadores de calor para o ambiente interno.

Por fim, a análise comparativa de geração revela que os modelos BIPV apresentam rendimento significativamente inferior aos BAPV. Essa disparidade sugere que, além do impacto térmico na edificação, a elevada temperatura de operação das células, causada pela deficiência na ventilação natural, compromete a geração de energia dos painéis.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa permitiu avaliar o impacto da integração de sistemas fotovoltaicos no desempenho energético de edificações urbanas, evidenciando que a escolha da estratégia de instalação, integrada (BIPV) ou apoiada (BAPV), é determinante para o balanço de energia do edifício (consumo - geração).

As simulações demonstraram que os sistemas BAPV (apoiados) apresentam o melhor desempenho global. Ao atuarem como um elemento de sombreamento ventilado, esses sistemas não apenas geram eletricidade com maior eficiência devido à ventilação natural que passa entre a placa e a edificação, como também reduzem o consumo de energia da edificação. Observou-se que essa configuração foi capaz de reduzir o consumo de energia anual em até 2,36% nas coberturas e 1,74% nas fachadas.

Em contrapartida, a integração total do tipo BIPV, sem a previsão de camadas de ar ventiladas ou tratamento térmico específico, revelou-se desfavorável ao balanço de energia do edifício (consumo - geração). O acoplamento direto entre as células fotovoltaicas e a envoltória da edificação resultou em um incremento no consumo de energia de até 1,38% nas coberturas e 2,22% nas fachadas. Além disso, a elevação da temperatura de operação das células nesses cenários comprometeu a geração de energia elétrica, resultando em rendimentos significativamente inferiores aos modelos ventilados.

Em suma, conclui-se que a adoção de tecnologias fotovoltaicas em ambientes urbanos deve transcender a análise isolada do potencial de geração. Para que a integração contribua efetivamente para edifícios de balanço energético positivo, é indispensável o manejo adequado das trocas térmicas entre o sistema e a envoltória.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação de sistemas BIPV híbridos que incorporem ventilação mecânica ou materiais para mitigar os ganhos térmicos indesejados e otimizar a eficiência das células fotovoltaicas.

REFERÊNCIAS

Aria, M.; Cuccurullo, C., 2017. **Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis**. Journal of Informetrics, v. 11, (4), 959-975.
<https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-2**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

AGATHOKLEOUS, Rafaela A.; KALOGIROU, Soteris A. Status, barriers and perspectives of building integrated photovoltaic systems. **Energy**, [s. l.], v. 191, 2020.

AGÊNCIA GOV. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/fontes-renovaveis-atingem-49-1-na-matriz-energetica-brasileira>. Acesso em: 5 maio 2025.

AGUILAR, Heliana Maria Ceballos *et al.* **Utilização de Sistemas de Energia Solar Ativa e Passiva na Edificação**. 2007. I CBENS - I Congresso Brasileiro de Energia Solar. [S. l.]: Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) da Universidade Federal do Pará (UFPA), 2007.

ALAZAZMEH, Ayman et al. Real-time data-based performance analysis of a large-scale building applied PV system. **Energy Reports**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01788-4>.

ALI-TAGBA, Abdoul-Razak; BANETO, Mazabalo; LUCACHE, Dumitru Dorin. Factors Influencing the Energy Consumption in a Building: Comparative Study between Two Different Climates. **Energies**, 2024. DOI: 10.3390/en17164041.

ALMEIDA, Rodrigo P.; SOUZA, Marina T. Análise do potencial de geração fotovoltaica em fachadas sob diferentes orientações solares em cidades brasileiras. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 15, n. 1, 2024.

BALALI, Amirhossein; HAKIMELAHI, Ali; VALIPOUR, Alireza. Identification and prioritization of passive energy consumption optimization measures in the building industry: Na Iranian case study. **Journal of Building Engineering**, v. 30, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101239>.

BENDER, Livia Vasques *et al.* Estudo da paridade econômica e do desempenho energético de fachadas solares fotovoltaicas no extremo sul do Brasil. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 489–508, 2020.

BIYIK, Emrah *et al.* A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems. [S. l.]: **Elsevier B.V.**, 2017.

BOSU, Issa *et al.* Applied single and hybrid solar energy techniques for building energy consumption and thermal comfort: A comprehensive review. [S. l.]: **Elsevier Ltd**, 2023.

CAMPOS, Gabriela Pessoa *et al.* Analysis of the generation of photovoltaic solar energy connected by electricity energy network using the software energypius. 2016. Renewable Energy and Power Quality Journal. [S. l.]: European Association for the Development of Renewable Energy, **Environment and Power Quality (EA4EPQ)**, 2016. p. 51–56. Acesso em: 9 abr. 2024.

CANADIAN SOLAR. **Manual de instalação de módulos fotovoltaicos**: apenas para uso profissional. Rev. Pt-BR-Rev IM/GN-EN/2.6. [S. l.]: CSI Solar Co., Ltd., jan. 2025.

Carvalho, M. M.Q.; la Rovere, E. L.; Gonçalves, A.C.M. Analysis of variables that influence electric energy consumption in commercial buildings in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2010. DOI: 10.1016/j.rser.2010.07.009.

CLICK PETRÓLEO E GÁS. Estimativas indicam prazo para o fim das reservas de petróleo no mundo e mostram avanço de alternativas energéticas. Disponível em: <<https://clickpetroleoegas.com.br/estimativas-indicam-prazo-para-o-fim-das-reservas-de-petroleo-no-mundo-e-mostram-avanco-de-alternativas-energeticas/>>. Acesso em: 20 jan. 2026.

COPERNICUS. [S. /], 2024. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2024-first-year-exceed-15degc-above-pre-industrial-level>. Acesso em: 4 maio 2025.

COSTA, André P.; LIMA, Beatriz S. Desempenho termofísico de fachadas ventiladas com integração fotovoltaica: riscos de sobreaquecimento em climas subtropicais. **Revista de Engenharia e Construção Civil**, v. 12, n. 2, 2024.

COTS, Pedro Rodrigues Riego. **Panorama brasileiro das certificações ambientais na construção civil: desafios e propostas para o avanço do desenvolvimento sustentável.** Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, 2024.

CRAWLEY, D. B. et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. **Energy and Buildings**, v. 33, 2001.

CRISÓSTOMO, Daniel C. C.; NETO, José A. M.; SILVA, Arison M.; MELO, Marcos C. V. **Aplicação do selo PROCEL EDIFICA: estudo de caso realizado em uma instituição de ensino superior em Mossoró/RN.** Revista Eletrônica de Engenharia

Elétrica e Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, v. 1, n. 2, p. 45-60, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21708/issn27635325>.

DESIGNBUILDER SOFTWARE LTD. *DesignBuilder Simulation Software – User Manual*. Stroud, Reino Unido, 2023. Disponível em: <https://designbuilder.co.uk>. Acesso em: 13 abr. 2026.

DOMINGOS, Renata Mansuelo Alves; GUARDA, Emeli Lalesca Ap. Influência do Uso de Paineis Fotovoltaicos do Desempenho Térmico de uma Edificação Comercial. **IX Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Florianópolis, 2022.

123ECOS. **Energia solar passiva**. 123ecos, [2024]. Disponível em: <https://123ecos.com.br/docs/energia-solar-passiva/>. Acesso em: 8 jun. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2025**: Relatório Síntese: Ano base 2024. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/balanco-energetico-nacional/ben-2025/relatorio-sintese/Sintese_BEN2025/view. Acesso em: 13 abr. 2026.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, U.S. **International Energy Outlook 2016**. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf). Acesso em: 4 maio 2024.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2025: ano base 2024*. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 11 março 2026.

ETENE - ESCRITÓRIO TÉCNICO DE ESTUDOS ECONÔMICOS DO NORDESTE.

Fortaleza: [s. n.], 2021. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/834/1/2021_CDS_174.pdf. Acesso em: 9 maio 2025.

FRANCISCO DE CARVALHO, Joaquim. Combustíveis Fósseis e Insustentabilidade. **Ciência e Cultura**, São Paulo, 2008.

FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Ramos. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Studio Nobel, 1987.

GODINHO, Cátia. **A Importância das Comunidades de Energia Renovável na Descarbonização**. ISCAP, Instituto Politécnico do Porto, [s. l.], 2023. Disponível em: <https://orcid.org/0009-0004-0308-4534>.

HERÉDIA, Thais. **Vendas de ar-condicionado batem recorde em 2024**. Blog Thais Herédia, CNN Brasil, 19 fev. 2025. Disponível em: <https://wmv.cnnbrasil.com.br/blogs/thais-heredia/economia/negocios/vendas-de-ar-> Acesso em: 9 maio 2025.

HIRSCH, J. J. & ASSOCIATES. *DOE-2 Building Energy Use and Cost Analysis Program*. 2017. Disponível em: <https://doe2.com>. Acesso em: 13 abr. 2026.

HOSENUZZAMAN, M. *et al.* Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 41, p. 284–297, 2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Brazil energy profile**. Paris: IEA, 2025a. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/brazil-energy-profile>>. Acesso em: 20 janeiro 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global energy review 2025**. Paris: IEA, 2025b. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>>. Acesso em: 20 jan. 2026.

International Energy Agency. **Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>. Acesso em: 04 abr. 2026.

JELLE, B. P.; BREIVIK, C. The State of the Art of Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Products and Challenges. **SciVerse ScienceDirect**, [s. l.], v. 20, p. 68-77, 2012.

JORNAL DA USP. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://jornal.usp.br/campus-ribeirao-preto/serie-energia-mais-de-80-da-matriz-energetica-vem-de-recursos-fosseis/>. Acesso em: 5 maio 2025.

KALYANOVA, O.; HEISELBERG, P. *BSim Modeler Report: Empirical validation of building simulation software*. Aalborg: Department of Civil Engineering, Aalborg University, 2008.

KLEIN, S. A. et al. TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program. **Solar Energy Laboratory**, University of Wisconsin-Madison, 2017. Disponível em: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>. Acesso em: 13 abr. 2026.

KUMAR, Nallapaneni Manoj; SUDHAKAR, K.; SAMYKANO, M. Performance comparison of BAPV and BIPV systems with c-Si, CIS and CdTe photovoltaic technologies under tropical weather conditions. **Case Studies in Thermal Engineering**, [s. l.], v. 13, 2019.

Lakatos, E. M.; Marconi, M. A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 8ª ed. Atlas, 2017.

LUCAS, Bianca Pereira et al. Influência da morfologia urbana na capacidade de geração de energia fotovoltaica por BIPVs. In: ENTAC 2024 - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Maceió, 2024.

MAIDEL, Bruna; TAVARES, Sérgio F. Consumo operacional para edificações em CLT: estudo comparativo com alvenarias convencionais por meio de BIM. **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 18., 2020, Porto Alegre. Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1-8. DOI: 10.46421/entac.v18i.795.

MAMODIYA, Udit et al. Artificial intelligence based hybrid solar energy systems with smart materials and adaptive photovoltaics for sustainable power generation. **Scientific Reports**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01788-4>.

MARTINS, G. H.; FERREIRA, L. C. Variabilidade sazonal da geração fotovoltaica em planos verticais: um estudo comparativo entre coberturas e fachadas. **CONGRESSO BRASILEIRO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA (CBGD)**, 2025. Curitiba: FRG, 2025.

MOHSENZADEH, Maryam et al. Building form and energy efficiency in tropical climates: A case study of Penang, Malaysia. **Bras. Gest. Urbana**, 2021.

NGUYEN, Anh Tuan; REITER, Sigrid; RIGO, Philippe. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, [s. l.], v. 113, p. 1043–1058, 2025.

OLIVEIRA, Everton Dias de *et al.* Analysis of the use BAPVs and BIPVs for Analysis of the use BAPVs and BIPVs for eletric energy generation in buildings in urban areas. *In:* , 2022, Rio de Janeiro. (**The Xiv Latin-American Congress On Electricity Generation And Transmission CLAGTEE 2022**, Org.) Anais [...]. Rio de Janeiro: [s. n.], 2022.

PATLITZIANAS, Konstantinos D. *et al.* Sustainable energy policy indicators: Review and recommendations. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 33, n. 5, p. 966–973, 2008.

RIBEIRO, Alessandra dos Santos *et al.* Estado da Arte dos Principais Softwares de Simulação Utilizados na Análise de Energia de Edifícios. *In:* , 2017, Covilhã. **ICEUBI2017 - International Congress on Engineering**. Covilhã: University of Beira Interior, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/324704176>.

RIBEIRO, Laura Michelle Leite; SCOLARO, Taylana Piccinini; GHISI, Enedir. **LEED Certification in Building Energy Efficiency: A Review of Its Performance Efficacy and Global Applicability**. *Sustainability*, v. 17, n. 5, p. 1876, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17051876>.

RODRIGUES, Ana Lúcia; MENDES, Nathan; SANTOS, Paulo. Impacto da integração fotovoltaica no desempenho térmico de edificações em climas tropicais. **Ambiente Construído**, v. 24, n. 2, p. 89-107, 2024.

ROSA, Leandro Ponciano da; OLIVEIRA, Renata Farias; SCHRÖDER, Nádia Teresinha. Energia Fotovoltaica: Geração de Energia Elétrica Sustentável. *In:* , 2023.

XIV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. [S. l.]: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais e de Saneamento, 2023.

SAILOR, D. J.; ANAND, J.; KING, R. R. Photovoltaics in the built environment: A critical review. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 253, 2021.

SANTOS, L. R.; SOUZA, R. V. G. Desempenho energético de sistemas fotovoltaicos integrados à envoltória em edifícios de múltiplos pavimentos no contexto brasileiro. **Revista de Arquitetura e Engenharia**, v. 32, n. 1, 2024.

SGBSOLAR. **What is the difference between BIPV and BAPV?**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.sgbsolar.com/news/what-is-the-difference-between-bipv-and-bapv>. Acesso em: 10 maio 2025.

Shaughnessy, J.; Zechmeister, E.; Zechmeister, J. **Research Methods in Psychology**. 9th ed. McGraw-Hill, 2012.

SHUKLA, Amit Kumar; SUDHAKAR, K.; BAPAT, Prashant. A comprehensive review on design of building integrated photovoltaic system. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 128, p. 99-110, 2016.

SOFTWARE ENERGY PLUS. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: 1 jun. 2025.

SOFTWARE SKETCHUP. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.sketchup.com/pt-BR>. Acesso em: 1 jun. 2025.

STRACHAN, P.; KOKOGIANNAKIS, G.; MACDONALD, I. *History and development of validation with the ESP-r simulation program*. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 601–609, 2008.

TRANE. *TRACE™ 700: Professional HVAC design and energy analysis software*. 2023. Disponível em: <https://www.trane.com>. Acesso em: 13 abr. 2026.

VIANA, Thomas Farias; MICELI JUNIOR, Giuseppe; PELLANDA, Paulo Cesar. BIM aplicado ao sistema fotovoltaico integrado à construção (BIPV) como alternativa à edificação zero energia: Uma revisão sistemática da literatura. **ENCONTRO LATINO-AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS (EUROELECS)**, 2025. Porto Alegre: ANTAC, 2025.

VINTURINI, Mateus. **A relação entre o distanciamento do módulo do telhado, segurança e desempenho**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/a-relacao-entre-o-distanciamento-do-modulo-do-telhado-seguranca-e-desempenho/>. Acesso em: 24 maio 2025.

WANG, Y.; ZHANG, X.; LI, J. Optimization of BIPV systems for high-rise buildings: Balancing facade and rooftop generation. **Solar Energy**, v. 268, 2024.

YAN, Zichun; ZHAO, Haikuan. A review of the influencing factors of building energy consumption and the prediction and optimization of energy consumption. **AIMS Energy**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 43-74, 2025. DOI: 10.3934/energy.2025003.

Zaghba, Layachi *et al.* **Comprehensive simulation and experimental validation of energy and economic performance in fixed and dual-axis tracking photovoltaic systems using photovoltaic modeling tools**. *Renewable Energy*, 2026. DOI: 10.1016/j.renene.2026.125481.

ZAHEERUDDIN; ZAHEER, S. F. **Performance evaluation of modified perturb & observe maximum power point tracker for solar PV system.** International Journal of System Assurance Engineering and Management, v. 7, n. 1, 2016. DOI: 10.1007/s13198-015-0369-z.