



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



RENAN DOUGLAS LOPES DA SILVA CAVALCANTE

**ANÁLISE DO GANHO DE CALOR EM UM EDIFÍCIO COM FACHADA
FOTOVOLTAICA DE CÉLULAS MONOCRISTALINAS: UM ESTUDO NA CIDADE
DE JOÃO PESSOA**

JOÃO PESSOA – PB
2025

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / N°

RENAN DOUGLAS LOPES DA SILVA CAVALCANTE

**ANÁLISE DO GANHO DE CALOR EM UM EDIFÍCIO COM FACHADA
FOTOVOLTAICA DE CÉLULAS MONOCRISTALINAS: UM ESTUDO NA CIDADE
DE JOÃO PESSOA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em Energias Renováveis, para a obtenção do grau de Mestre.

Orientador(a): Dr^a. Taynara Geysa Silva do Lago

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

C376a Cavalcante, Renan Douglas Lopes da Silva.

Análise do ganho de calor em um edifício com fachada fotovoltaica de células monocristalinas : um estudo na cidade de João Pessoa / Renan Douglas Lopes da Silva Cavalcante. - João Pessoa, 2025.

71 f. : il.

Orientação: Taynara Geysa Silva do Lago.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Energia solar. 2. Célula fotovoltaica. 3. Eficiência energética. 4. BIPV. 5. SHGC. I. Lago, Taynara Geysa Silva do. II. Título.

UFPB/BC

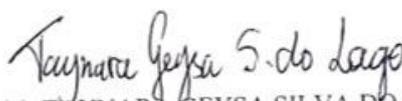
CDU 551.521.37(043)

**GANHO DE CALOR EM UM EDIFÍCIO COM FACHADA
FOTOVOLTAICA DE CÉLULAS MONOCRISTALINAS: UM ESTUDO NA CIDADE
DE JOÃO PESSOA**

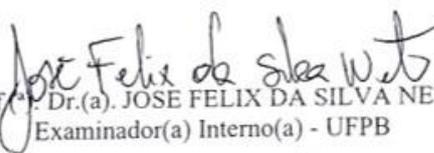
por

RENAN DOUGLAS LOPES DA SILVA CAVALCANTE

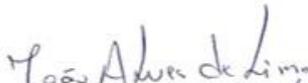
Dissertação aprovada em 27 de fevereiro de 2025



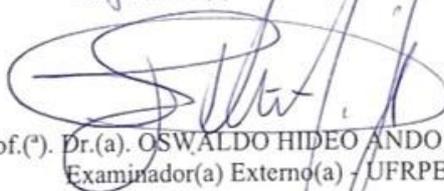
Prof.(^a). Dr.(a). TAYNARA GEYSA SILVA DO LAGO
Orientador(a) - UFPB



Prof.(^a). Dr.(a). JOSÉ FELIX DA SILVA NETO
Examinador(a) Interno(a) - UFPB



Prof.(^a). Dr.(a). JOAO ALVES DE LIMA
Examinador(a) Externo(a) - UFPB



Prof.(^a). Dr.(a). OSWALDO HIDEO ANDO JUNIOR
Examinador(a) Externo(a) - UFRPE

**JOÃO PESSOA – PB
2025**

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de força e sabedoria, por guiar cada passo desta jornada, iluminar meus caminhos nos momentos de incerteza e me conceder a resiliência necessária para concluir esta etapa tão desafiadora. Sem Sua graça e presença, nada disso seria possível.

À minha orientadora, Taynara Lago, pela paciência, dedicação e incentivo ao longo deste trabalho. Sua orientação precisa e seu compromisso com a excelência acadêmica foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa. Obrigado por acreditar no meu potencial e por me desafiar a sempre buscar mais.

Aos meus pais, Gledson Silva e Soraya Lopes, por serem minha base inabalável, pelo amor, apoio e ensinamentos que carrego comigo em cada conquista. Ao meu irmão, Gledson Vinicius, pelo companheirismo e incentivo, mostrando que o sucesso se torna ainda maior quando compartilhado com aqueles que amamos.

À Michelli Gomes, pela parceria incansável dentro do projeto e pela amizade construída ao longo dessa jornada. Seu comprometimento e troca de conhecimento tornaram este percurso mais enriquecedor e inspirador.

Aos amigos que, de diferentes formas, contribuíram com palavras de incentivo, apoio emocional e momentos de descontração. A amizade de vocês foi um alívio nos dias difíceis e um combustível para seguir em frente.

À minha namorada, Priscila Campos, por ser meu refúgio e minha maior motivação. Seu amor, paciência e apoio incondicional foram essenciais para que eu pudesse chegar até aqui. Obrigado por estar ao meu lado em cada desafio e celebrar comigo cada vitória.

Agradeço também ao do CEAR pelo suporte e pela estrutura oferecida durante minha trajetória acadêmica. Meu reconhecimento se estende aos profissionais da recepção e da copa, que, com sua dedicação e gentileza, tornaram o ambiente mais acolhedor no dia a dia. Cada gesto de atenção e cordialidade fez a diferença nessa jornada.

Por fim, agradeço ao apoio da Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba – FAPESQ, Brasil (Termo nº 066/2023, Edital nº 19/2022), fundamental para a realização deste trabalho, desenvolvido no âmbito de um projeto voltado ao estudo experimental de sistemas BIPV (Building-Integrated Photovoltaics), com foco na integração de tecnologias fotovoltaicas em edificações.

A todos vocês, minha eterna gratidão!

RESUMO

Os sistemas BIPV (*Building Integrated Photovoltaic/Thermal Systems*) representam uma tecnologia inovadora que integra painéis fotovoltaicos e térmicos aos edifícios, promovendo a eficiência energética e a sustentabilidade. Para avaliar essa solução, foi instalado um protótipo em um edifício em João Pessoa, Paraíba, com a adição de um módulo fotovoltaico de silício monocristalino com vidro duplo, posicionado a 90° na fachada norte. Foram realizados testes experimentais em abril, junho e julho de 2024, com o objetivo de avaliar o ganho de calor no ambiente e a geração de energia, levando em consideração o clima da região. A análise térmica foi conduzida através do cálculo do coeficiente de ganho de calor (SHGC), utilizando o balanço energético sobre as faces do BIPV. Os instrumentos empregados para a coleta de dados incluíram anemômetro (para medir a velocidade do vento), radiômetro (para os índices de radiação) e termopares (para registrar as temperaturas). Os resultados térmicos indicaram que a inclinação do módulo causou impactos significativos no ganho de calor dentro do ambiente. O SHGC variou entre 0,18 e 0,49. Ao analisar a relação entre irradiância e o coeficiente de ganho de calor solar (SHGC), observou-se que, nos horários de maior incidência solar, o calor absorvido pelo edifício foi mais intenso. A irradiância variou entre 450 W/m² e 730 W/m², mostrando como a radiação solar influencia diretamente na retenção de calor na construção. Os mapas de calor da superfície do módulo fotovoltaico revelaram padrões interessantes ao longo dos meses analisados. Em abril, as temperaturas oscilaram entre 31,2°C e 51,4°C, enquanto em junho ficaram entre 29,1°C e 52,0°C, e em julho, entre 28,3°C e 50,4°C. Notou-se que, em abril, as temperaturas apresentaram uma variação mais ampla ao longo do dia, provavelmente devido ao posicionamento do sol. Já em junho e julho, os valores mais altos se concentraram no período da tarde. Esses dados reforçam o impacto da radiação solar na distribuição de calor no painel, o que pode servir como base para o planejamento de estratégias mais eficientes de controle térmico. Além disso, o módulo fotovoltaico registrou temperaturas entre 40°C e 52°C, acompanhando a variação da irradiância ao longo do dia. A potência gerada pelo sistema variou de 12,55 W a 94,64 W, e a eficiência do módulo apresentou uma tendência inversa à temperatura, registrando 24% de eficiência para temperaturas abaixo de 45°C e 22% para temperaturas superiores. A energia média gerada para simulação e o experimental variou de 0,24 a 0,25 kWh/dia em abril, de 0,28 a 0,24 kWh/dia em junho e de 0,28 a 0,24 kWh/dia em julho. A relação entre a temperatura do módulo e a eficiência elétrica confirma a importância do controle térmico para maximizar a produção de energia. O estudo demonstrou que a eficiência do módulo fotovoltaico integrado é diretamente influenciada pela temperatura e irradiância, com perdas térmicas reduzindo seu desempenho em climas quentes. A análise do SHGC, mapas de calor e geração de energia reforça a necessidade de estratégias de resfriamento para otimizar sistemas BIPV em regiões tropicais.

Palavras-chave: BIPV, célula fotovoltaica, eficiência energética, energia solar, SHGC.

ABSTRACT

BIPV (Building Integrated Photovoltaic/Thermal Systems) systems represent an innovative technology that integrates photovoltaic and thermal panels to buildings, promoting energy efficiency and sustainability. To evaluate this solution, a prototype was installed in a building in João Pessoa, Paraíba, with the addition of a single-crystal silicon photovoltaic module with double glazing, positioned at 90° on the north facade. Experimental tests were carried out in April, June and July 2024, with the objective of evaluating the heat gain in the environment and the generation of energy, taking into account the climate of the region. The thermal analysis was conducted by calculating the heat gain coefficient (SHGC), using the energy balance on the faces of the BIPV. The instruments used for data collection included anemometer (to measure wind speed), radiometer (for radiation indices) and thermocouples (to record temperatures). The thermal results indicated that the inclination of the module caused significant impacts on heat gain within the environment. The SHGC varied between 0,18 and 0,49. When analyzing the relationship between irradiance and solar heat gain coefficient (SHGC), it was observed that at times of higher solar incidence, the heat absorbed by the building was more intense. The irradiance varied between 450 W/m² and 730 W/m², showing how solar radiation directly influences heat retention in the construction. The heat maps of the photovoltaic module surface revealed interesting patterns over the months analyzed. In April, temperatures ranged from 31,2°C to 51,4°C, while in June they were between 29,1°C and 52,0°C, and in July, between 28,3°C and 50,4°C. It was noted that in April, temperatures showed a wider variation throughout the day, probably due to the positioning of the sun. Already in June and July, the highest values were concentrated in the afternoon. These data reinforce the impact of solar radiation on the heat distribution in the panel, which can serve as a basis for planning more efficient thermal control strategies. In addition, the photovoltaic module recorded temperatures between 40°C and 52°C, tracking the variation of irradiance throughout the day. The power generated by the system ranged from 12,55 W to 94,64 W, and the efficiency of the module showed an inverse temperature trend, recording 24% efficiency for temperatures below 45°C and 22% for higher temperatures. The average energy generated for simulation and experimental ranged from 0,24 to 0,25 kWh/day in April, from 0,28 to 0,24 kWh/day in June and from 0,28 to 0,24 kWh/day in July. The relationship between module temperature and electrical efficiency confirms the importance of thermal control to maximize energy production. The study demonstrated that the efficiency of the integrated photovoltaic module is directly influenced by temperature and irradiance, with thermal losses reducing its performance in hot climates. The analysis of SHGC, heat maps and power generation reinforce the need for cooling strategies to optimize BIPV systems in tropical regions.

Key words: BIPV, photovoltaic cell, energy efficiency, solar energy, SHGC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Zonas Bioclimáticas brasileiras.....	16
Figura 2 – Irradiância Global Horizontal do estado da Paraíba.....	17
Figura 3 – Sistemas (a) BIPV; (b)BAPV.....	23
Figura 4 – Etapas da Metodologia.....	27
Figura 5 – Área do local do experimento.....	28
Figura 6 – Área do Container.....	29
Figura 7 – Objeto de estudo.....	30
Figura 8 – Microinversor modelo GMI 150L, Sunpvsolar.....	31
Figura 9 – Tomada inteligente para registrar a energia injetada na rede.....	32
Figura 10 – Termopar tipo K.....	33
Figura 11 – Calibração dos termopares tipo K.....	33
Figura 12 – LogBox Wi-fi.....	34
Figura 13 – Nxprience Software usado para configuração do sistema de LogBox Wi-fi.....	34
Figura 14 – Anemômetro digital MDA-20.....	35
Figura 15 – Radiômetro digital.....	35
Figura 16 – Configuração para redução da transmissão de calor para a sala.....	36
Figura 17 – Esquema do sistema.....	37
Figura 18 – Posicionamento do (a) anemômetro e (b) radiômetro na face da janela.....	38
Figura 19 – Posicionamento dos termopares nas superfícies estudadas.....	39
Figura 20 – Esquema da análise do sistema BIPV.....	40
Figura 21 – Software PVsyst.....	45
Figura 22 – Curvas dos dados de entrada para o mês de abril.....	46
Figura 23 – Curvas dos dados de entrada para o mês de junho.....	47
Figura 24 – Curvas dos dados de entrada para o mês de julho.....	47
Figura 25 – Relação da temperatura do painel x Irradiância, mês de abril.....	48
Figura 26 – Relação da temperatura do painel x Irradiância, mês de junho.....	49
Figura 27 – Relação da temperatura do painel x Irradiância, mês de julho.....	49
Figura 28 – Relação Irradiância x SHGC, mês de abril.....	50
Figura 29 – Relação Irradiância x SHGC, mês de junho.....	51
Figura 30 – Relação Irradiância x SHGC, mês de julho.....	52
Figura 31 – Mapa de calor para o mês de abril.....	52
Figura 32 – Mapa de calor para o mês de junho.....	53

Figura 33 – Mapa de calor para o mês de julho.	54
Figura 34 – Relação Temperatura PV x Eficiência, mês de abril.....	54
Figura 35 – Relação Temperatura PV x Eficiência, mês de junho.....	55
Figura 36 – Relação Temperatura PV x Eficiência, mês de julho.....	56
Figura 37 – Potência do mês de abril.	56
Figura 38 – Potência do mês de junho.....	57
Figura 39 – Potência do mês de julho.....	57
Figura 40 – Comparação da Energia injetada entre simulação e experimental.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Irradiação solar em João Pessoa	29
Tabela 2 – Especificação do Pannel Junction Box MC4 IP68 3-Split	31
Tabela 3 – Especificações do micro inversor	31
Tabela 4 – Dados técnicos dos instrumentos.....	35
Tabela 5 – Propriedades ópticas do sistema BIPV	43

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Abreviaturas

BAPV	(Building-Applied Photovoltaics) – Painéis solar fixados a edificações
BIPV	(Building-Integrated Photovoltaics) – Painéis solares integrados a edificações
BIPV/T	(Building-Integrated Photovoltaic/Thermal) – Fotovoltaico térmico integrado a edificação
SHCG	(Solar Heat Gain Coefficient) – Coeficiente de ganho de calor solar
STC	(Standard Test Conditions) – Condições padrão de teste

Nomenclaturas

A	Área [m ²]
E	Energia gerada
GHI	Irradiação global total
H	Altura [m]
Pr	Número de Prandtl
h_{conv}	Coeficiente de troca de calor convectiva [W/m ² .K]
$h_{c,ar}$	Coeficiente de troca de calor convectiva na cavidade de ar [W/m ² .K]
$h_{c,e}$	Coeficiente de troca de calor convectiva externa [W/m ² .K]
$h_{c,i}$	Coeficiente de troca de calor convectiva interna [W/m ² .K]
h_{rad}	Coeficiente de troca de calor radiativa [W/m ² .K]
$h_{r,ar}$	Coeficiente de troca de calor radiativa na cavidade de ar [W/m ² .K]
$h_{r,e}$	Coeficiente de troca de calor radiativa externa [W/m ² .K]
$h_{r,i}$	Coeficiente de troca de calor radiativa interna [W/m ² .K]
k_{ar}	Condutividade térmica do ar [W/m ² .K]
Nu_l	Número de Nusselt
$q_{convecção}$	Troca de calor convectiva [W]
$q_{conv,e}$	Troca de calor convectiva externa [W]
$q_{conv,i}$	Troca de calor convectiva interna [W]
$q_{conv,ar}$	Troca de calor convectiva no ar da cavidade [W]

$q_{radiacção}$	Troca de calor radiativa [W]
$q_{rad,ar}$	Troca de calor radiativa no ar da cavidade [W]
$q_{rad,i}$	Troca de calor radiativa interna [W]
Ra_L	Número de Rayleigh
T_S	Temperatura da superfície [°C]
T_{amb}	Temperatura ambiente [°C]
$T_{céu}$	Temperatura do céu [°C]
T_{cell}	Temperatura da célula [°C]
T_{ref}	Temperatura de referência em STC [°C]
α	Absortividade
β	Inclinação do módulo [°]
ε	Emissividade
ε_{PV}	Emissividade do módulo fotovoltaico
ε_V	Emissividade do vidro
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
η_{PV}	Eficiência do módulo fotovoltaico [%]
η_0	Eficiência do módulo em STC [%]
v_v	Velocidade do vento [m/s]
ν	Viscosidade cinemática [m ² /s]

Constantes

σ Constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8}$ W/m².K

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	JUSTIFICATIVA.....	12
1.2	OBJETIVOS.....	13
1.2.1	OBJETIVO GERAL.....	13
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	ENERGIA SOLAR.....	15
2.2	ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	15
2.3	ZONAS TÉRMICAS BRASILEIRAS.....	15
2.4	COEFICIENTE DE GANHO DE CALOR (SHGC).....	17
2.5	MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	18
2.5.1	CONDUÇÃO.....	18
2.5.2	CONVECÇÃO.....	19
2.5.3	RADIAÇÃO.....	20
2.6	PERDAS DO SISTEMA.....	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	27
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL.....	27
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO.....	29
4.3	INSTRUMENTAÇÃO.....	32
4.5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	36
4.6	ANÁLISE DESEMPENHO TÉRMICO.....	39
4.7	ANÁLISE DE DESEMPENHO ELÉTRICO.....	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
5.1	ANÁLISE DO DESEMPENHO DIÁRIO.....	46
5.1.1	SHGC E MAPA DE CALOR.....	50
5.1.2	EFICIÊNCIA DO BIPV/T.....	54
6	CONCLUSÃO.....	60
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
	REFERÊNCIAS.....	62

APÊNDICE A– CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES.....	67
--	----

1 INTRODUÇÃO

A arquitetura solar ou bioclimática desempenha um papel crucial como uma alternativa para mitigar a redução do consumo de energia em edifícios. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), para o ano de 2022, os edifícios foram responsáveis por aproximadamente 30% do consumo total de energia e 26% das emissões globais. No entanto, o avanço em práticas de *design* eficientes, incluindo a otimização da iluminação e o aproveitamento da ventilação natural, tem se mostrado uma abordagem promissora para reduzir os impactos ambientais associados à operação de edifícios (Quesada *et al.*, 2012). Segundo o estudo de Kalogirou (2016) e Kelly, Sen e Tatari (2020) uma das abordagens envolve a implementação de construções alternativas com adaptações em suas fachadas, coberturas e telhados.

A implementação de alternativas de energias renováveis ainda enfrenta desafios, tanto em termos de processos quanto de tecnologias envolvidas, devido à necessidade de considerar a adaptabilidade a diferentes cenários, incluindo variáveis como áreas geográficas e clima regional específico.

A abordagem de construções sustentáveis, conforme apresentada pela Universidade Nacional Autónoma de México – UNAM, ano de 2022, fundamenta-se na consideração da temperatura ambiente para alcançar um equilíbrio entre o conforto térmico e a saúde dos ocupantes, sem comprometer o bem-estar das pessoas no local. De acordo com Serra-Florensa e Coch Roura (1991), existem estratégias arquitetônicas que visam garantir um ambiente confortável nesse tipo de construção, incluindo a orientação do edifício para um controle eficaz da radiação solar e da ventilação natural.

Sabendo disso, as trocas de calor que ocorrem nos edifícios ocorrem principalmente pelas janelas, servindo para as trocas de ar e luminosidade do ambiente. Por sua vez, as janelas possuem características energéticas, e o fluxo de calor que atravessa ocorre através da condução nos materiais, pelo movimento do ar na convecção, ou mesmo via radiação térmica.

Os edifícios podem se tornar construções mais sustentáveis e eficientes energeticamente, uma das soluções seria a integração de sistemas fotovoltaicos nas fachadas desses ambientes os chamados BIPV – *Building Integrated Photovoltaic*, os painéis se adaptam à arquitetura existente, ocupam espaços externos sem interferir na estrutura e geram energia limpa no local. Ao unir tecnologias renováveis as estruturas existentes, reduzindo o abuso pelo consumo elétrico (Li, Yang e Lam, 2013; Schuetze, Willkomm e Ross, 2015)

Conforme destacado por Tripathy, Sadhu e Panda (2014), os módulos fotovoltaicos não se limitam apenas a gerar energia, mas também desempenham um papel crucial na estética arquitetônica, tornando-se elementos construtivos integrados à fachada, ao telhado e às janelas por meio de tecnologias semitransparentes e translúcidas. Essa integração permite a entrada de luz solar, promovendo a iluminação natural do ambiente. Além disso, esses módulos contribuem para um impacto econômico sustentável ao reduzir os custos dos materiais utilizados na construção, em linha com a busca pela neutralidade de carbono e zero energia.

Li, Yang e Lam (2013) ressaltam a relevância da avaliação ambiental, a qual está intrinsecamente relacionada ao ciclo de vida produtos BIPV, desde o consumo energético até os impactos ambientais, por menores que sejam. Essa análise ambiental, contudo, deve ser complementada por um estudo de viabilidade econômica, já que a implementação desse sistema requer um investimento significativo, o que muitas vezes gera um impasse entre os interessados em adotar essa tecnologia e os usuários finais (Calise *et al.*, 2021).

1.1 Justificativa

Uma das ferramentas mais promissoras para a geração de eletricidade é o sistema fotovoltaico (PV). As usinas de energia fotovoltaica têm o potencial de substituir as usinas de energia elétrica baseadas em combustíveis fósseis, que são grandes emissoras de gases de efeito estufa. Contudo, as usinas fotovoltaicas demandam uma área maior para gerar a mesma quantidade de energia, devido à sua eficiência ser inferior à de uma usina convencional (Abojela, Desa e Sabry, 2023). A ideia de produzir energia com menor impacto ambiental torna-se cada vez mais atrativa, à medida que crescem as preocupações com questões ambientais e a busca por soluções sustentáveis. Diferente das técnicas tradicionais de geração de energia, a energia fotovoltaica usa combustível renovável.

Além disso, como uma aplicação fotovoltaica conectada à rede, os sistemas de energia solar fotovoltaica promovem facilidade de instalação nos telhados de edifícios residenciais e nas fachadas de estruturas comerciais, gerando energia com menor taxa de poluição. A energia solar fotovoltaica oferece uma solução para abastecer vilarejos isolados e estabelecimentos que não possuem acesso à rede elétrica convencional, além de ser uma alternativa eficiente em sistemas fotovoltaicos conectados à rede (Zahedi, 2006)

A energia solar fotovoltaica tem se tornado continuamente mais popular ao longo dos anos em todo o mundo, impulsionando uma redução contínua em seus custos desde a década

de 1970 (Peters *et al.*,2019). Esse avanço ocorreu principalmente devido à adoção de sistemas fotovoltaicos em pequenas escalas, como aplicações residenciais e prediais (Klenk, 2018).

Uma estratégia para maximizar o aproveitamento de espaço nesses ambientes com a geração de energia fotovoltaica é o uso dos sistemas conhecidos como BIPVs (*Building Integrated Photovoltaics*). Esses sistemas podem ser facilmente integrados às estruturas dos edifícios, sendo aplicados em elementos como janelas, telhados ou fachadas. Os módulos fotovoltaicos funcionam como envelope no edifício, reduzindo a necessidade de recursos de construção, possibilitando a produção de energia renovável localmente e substituindo componentes tradicionais de alvenaria (Reddy, 2020).

Essa configuração viabiliza a geração simultânea de energia elétrica e térmica facilitando a otimização dos recursos e na diminuição do desperdício de energia, promovendo uma redução nos custos operacionais de um edifício. Na linha de pesquisa BIPV, inúmeros avanços tecnológicos têm sido observados, abrangendo os materiais fotovoltaicos, combinações de sistemas e sistemas de armazenamentos de energia. Dessa forma, uma pesquisa nessa área, permite explorar novas possibilidades e contribuir no desenvolvimento de um conhecimento científico mais sólido consolidado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este estudo avalia experimentalmente o efeito do ganho de calor em um sistema BIPV, com células de silício monocristalino instaladas em uma fachada vertical, além de analisar o desempenho elétrico do sistema.

1.2.2 Objetivos Específicos

Com a finalidade de alcançar o objetivo geral proposto, este trabalho foi norteado pelos seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver uma bancada experimental do sistema BIPV;
- Modelar matematicamente as equações de transferência de calor para o sistema BIPV;

- Analisar o ganho de calor (SHGC) no sistema BIPV em função das condições climáticas de João Pessoa, considerando os mecanismos de transferência de calor envolvidos;
- Avaliar a geração de energia elétrica, a potência produzida e a eficiência do sistema BIPV instalado na fachada norte com inclinação vertical de 90° para a cidade de João Pessoa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Energia Solar

O Sol emite uma grande quantidade de energia na forma de radiação eletromagnética, que pode ser aproveitada por meio de tecnologias como sistemas fotovoltaicos e térmicos. A eficiência da conversão de energia solar depende de fatores como a localização geográfica, as condições climáticas e a inclinação dos painéis solares (Duffie; Beckman, 2013). No contexto da cidade de João Pessoa-PB, a alta incidência solar ao longo do ano torna a região propícia para a implementação de sistemas de energia solar.

2.2 Energia Fotovoltaica

A energia fotovoltaica é obtida por meio da conversão direta da luz solar em eletricidade, utilizando células fotovoltaicas feitas de materiais semicondutores, como o silício monocristalino (SI-mono). Essas células são capazes de gerar energia elétrica quando expostas à radiação solar, devido ao efeito fotovoltaico. A eficiência dos sistemas fotovoltaicos depende de fatores como a temperatura de operação, a intensidade da radiação solar e as perdas por reflexão ou sombreamento (Markvart, 2000). No caso da janela fotovoltaica com inclinação de 90°, é essencial avaliar como a orientação e a inclinação impactam a captação de radiação e a geração de energia.

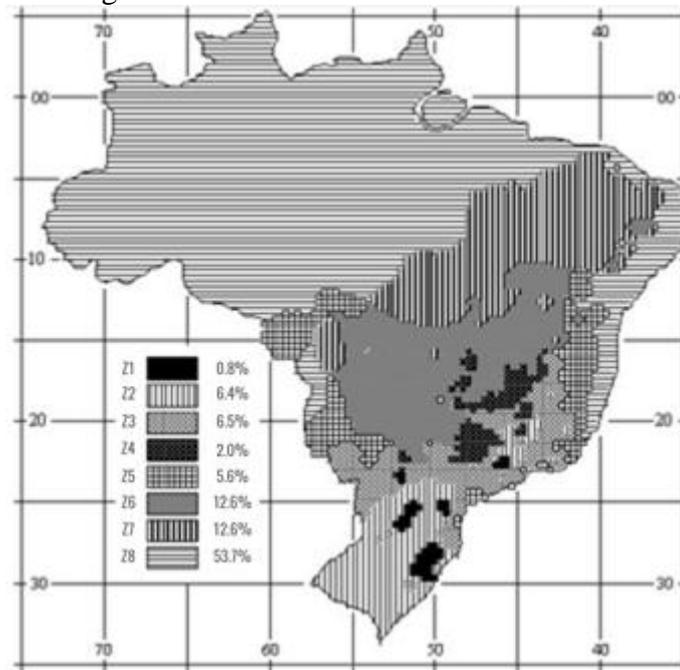
2.3 Zonas Térmicas brasileiras

O estado da Paraíba está situado na região Nordeste do Brasil, região composta por 9 estados brasileiros, e faz fronteira com apenas três que são Rio Grande do Norte, Ceará e Pernambuco. A cidade de João Pessoa, capital da Paraíba, apresenta clima tropical úmido. A Paraíba está inserida na zona bioclimática 8, segundo acordo estabelecido pela NBR 15220-3 para nosso território. As zonas climáticas vão de 1 a 8, e foram classificadas baseadas em parâmetros característicos como temperatura máxima e mínima obtidas e da umidade relativa.

Esta pesquisa está situada na capital João Pessoa, Paraíba, Pertencente a zona climática 8, que se estende a 53,7% do território brasileiro, conforme apresenta a Figura 1 no mapa de classificação da NBR 15220-3. Essa zona compreende a grande parte do norte do país, incluindo a Amazônia, região que apresenta altas temperaturas ao longo do ano, alta umidade relativa por

conta da vegetação e rios, possuindo variações mínimas de temperatura durante o dia. Observa-se que a zona climática 8 está compreendida entre os trópicos de capricórnio e equador.

Figura 1 – Zonas Bioclimáticas brasileiras.



Fonte: Norma NBR 15220-3

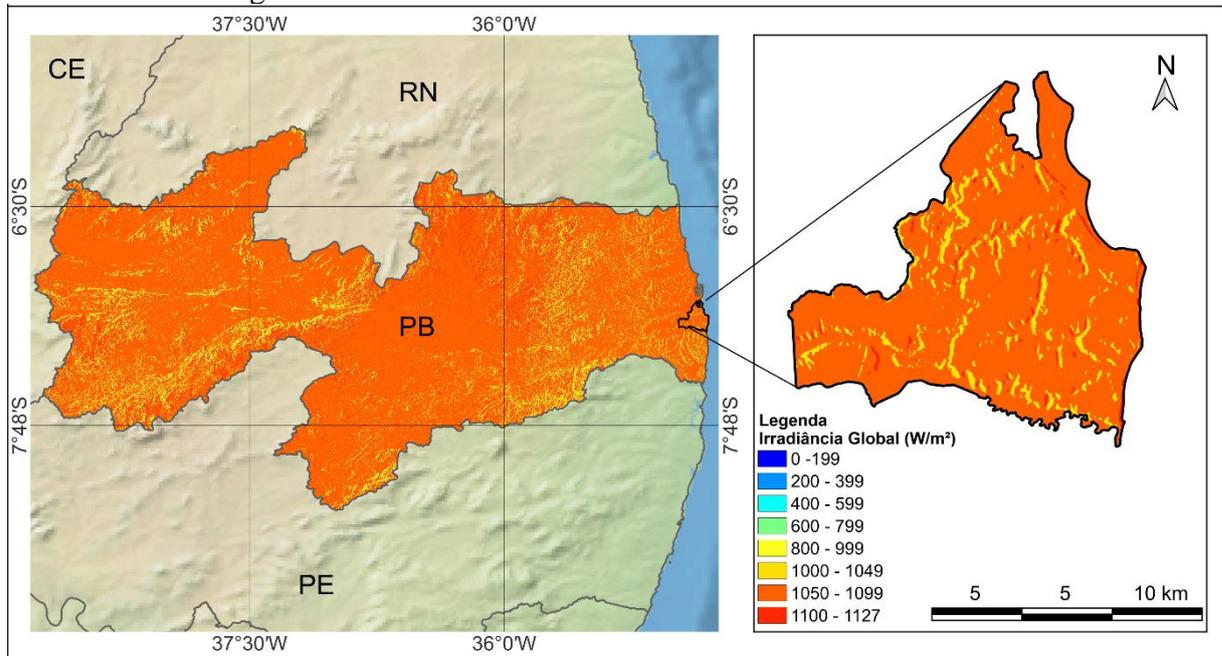
Segundo o estudo “Climatologia do Estado da Paraíba”, disponibilizado no repositório eduCAPES, o estado da Paraíba possui dois principais mecanismos causadores de chuvas, o primeiro a chamada ZCIT – Zona de Convergência Intertropical e as perturbações ondulatórias dos ventos alísios. O estado da Paraíba é regido por dois grandes momentos chuvosos, de fevereiro a maio, nas regiões do Alto Sertão e o Cariri; outro de abril a julho, para o Agreste, Brejo e Litoral.

Segundo dados da Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB) e o Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN). A cidade de João Pessoa, possui uma radiação média de 5,53 kWh/m².dia, com incidência solar o ano inteiro. Essas características fazem da capital paraibana um local privilegiado para pesquisas sobre integração de sistemas fotovoltaicos em edificações. Essa vantagem natural contribui tanto para o desenvolvimento da matriz energética renovável quanto para a construção de cidades mais sustentáveis.

No *software* QGIS versão 3.34.12, ferramenta para uso de informações geográficas que permite a visualização de dados georreferenciados para compor mapas de alta precisão, o *software* permitiu analisar padrões espaciais e integrar camadas de informações sobre o território paraibano. Através da base de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

(INPE) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), os dados de relevo, altitude e declividade foram usados para compor índice de Irradiância Global Horizontal (GHI) sobre todo o estado, ilustrada pela Figura 2.

Figura 2 – Irradiância Global Horizontal do estado da Paraíba



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

2.4 Coeficiente de Ganho de Calor (SHGC)

O ganho de calor que ocorre por meio das janelas, o Coeficiente do Ganho de Calor (SHGC), é utilizado para avaliar o desempenho térmico para componentes ou um arranjo em relação a incidência solar. Segundo Çengel (2012), o intervalo de valores para SHGC varia de 0 a 1, o SHGC representa a fração total de radiação solar que transferida para o interior do ambiente, considerando não apenas a parcela que atravessa o vidro, mas também o calor absorvido pela janela irradiado para dentro. Por fim, valores próximos a 1 indica que quase todo calor solar é transferido para o interior da sala, enquanto valores próximos a 0 indica que a janela bloqueia a entrada de calor.

A Equação 1 expressa o cálculo do SHGC:

$$SHGC = \frac{\text{Ganho de calor solar através da janela}}{\text{Incidência de radiação na janela}} \quad (1)$$

$$\text{Ganho de calor solar através da janela} = (q_{\text{convecção}} + q_{\text{radiação}}) + G_T \quad (2)$$

G_T : radiação solar transmitida para dentro do ambiente interno, produto da irradiância e transmitância da janela [W/m²];

$q_{\text{convecção}}$: Troca térmica por convecção [W/m²];

$q_{\text{radiação}}$: Troca térmica por radiação [W/m²];

Para compreender o comportamento do SHGC sobre a superfície estudada é necessário antes entender os mecanismos de transferência de calor por convecção e radiação no interior das edificações.

2.5 Mecanismos de Transferência de Calor

A transferência de calor é um fenômeno fundamental para o funcionamento de sistemas BIPV, pois envolve a dissipação ou retenção de calor gerado pelos módulos fotovoltaicos. Os três principais mecanismos de transferência de calor são: condução, convecção e radiação.

2.5.1 Condução

A condução é a transferência de calor através de um material sólido ou líquido, sem o movimento do próprio material. Nos sistemas BIPV, a condução ocorre principalmente no interior dos painéis fotovoltaicos e nas estruturas de suporte, influenciando a distribuição térmica e a eficiência do sistema (Incropera; Dewitt, 2011).

A taxa de transferência de calor por condução pode ser expressa pela Equação 3:

$$q_{\text{cond}} = \frac{kA(T_1 - T_2)}{d} \quad (3)$$

T_1 e T_2 : Temperatura paralela das superfícies [°C];

T_∞ : Temperatura da vizinhança [°C];

d : Espessura do material [m];

A : Área da superfície [m²];

k : Condutividade térmica do material

2.5.2 Convecção

A convecção é a transferência de calor através do movimento de fluidos, como o ar ou a água. Nos sistemas BIPV, os processos de dissipação do calor gerado pelos módulos podem ser naturais ou mecanicamente forçados, aperfeiçoando o desempenho térmico e elétrico do sistema (Bergman *et al.*, 2011). A transferência de calor por convecção pode ser calculada segundo a Equação 4:

$$q_{convecção} = h_{conv}A(T_s - T_{\infty}) \quad (4)$$

T_s : Temperatura da superfície [°C];

T_{∞} : Temperatura da vizinhança [°C];

A : Área da superfície [m²];

h_{conv} : Coeficiente convectivo.

A transferência de calor por radiação e convecção que ocorre dentro da cavidade de ar entre o vidro interno do painel e o vidro externo da janela, pode ser determinada pelo número de Nusselt (Nu), que trata a razão entre a transferência de calor por convecção e condução de um fluido. O número de Nusselt, indica que quanto maior for o número Nu maior será a troca de calor por convecção. Nu pode ser expresso pela Equação 5:

$$Nu = \frac{hL}{k_{ar}} \quad (5)$$

h : Coeficiente convectivo [W/m².K];

k_{ar} : Condutividade térmica do ar [W/m.K]

L : Comprimento da superfície [m].

Nas equações que envolvem o número de Nusselt, é fundamental determinar o valor para o número de Prandtl (P_r), calculado pela Equação 6. Essa relação revela a difusidade de movimento e a difusidade térmica. Os valores do número de Prandtl variam de acordo com o fluido estudado. Em líquidos, valores menores, valores elevados para meio oleosos. Para os gases valores próximos entre si.

$$P_r = \frac{g\beta(T_s - T_{\infty})L^3}{\vartheta\alpha} \quad (6)$$

Além disso, o número de Nusselt, também depende do número de Rayleigh, apresentado pela Equação 7, os efeitos de flutuação em um fluido devido as diferenças de temperatura, que indica a proporção entre a transferência de calor por convecção e por condução (Çengel, 2012).

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (7)$$

g : Aceleração da gravidade [m/s²];
 T_s : Temperatura da superfície [°C];
 T_∞ : Temperatura da vizinhança [°C];
 α : Difusividade térmica [m²/s];
 β : Coeficiente de expansão volumétrica [K⁻¹];
 ν : Viscosidade cinemática [m²/s];
 L : comprimento da superfície [m];
 ε : emissividade da superfície;

2.5.3 Radiação

O calor por radiação pode se propagar através de ondas eletromagnéticas, mesmo no vácuo, diferente de como ocorre na condução e convecção, que precisam de um meio material para ocorrer. Cada material tem suas propriedades que vão interagir com essa radiação parte é absorvida parte refletida e parte é transmitida. No sistema fotovoltaico não é diferente, uma vez que a quantidade de radiação que chega afeta o aquecimento e a eficiência energética. No entanto, painéis integrados em construções BIPV ou BIPV/T necessitam controlar o aquecimento excessivo, para que haja uma dissipação de calor eficiente (Modest, 2013).

As taxas de transferência de calor por radiação podem ser calculadas, para o meio externo pode ser expressa pela equação 8:

$$q_{radiação} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{céu}^4) \quad (8)$$

Para o meio interno, Equação 9:

$$q_{radiação} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_\infty^4) \quad (9)$$

$T_{céu}$: Temperatura do céu [°C];
 T_s : Temperatura da superfície [°C];
 T_∞ : Temperatura da vizinhança [°C];
 A : Área da superfície [m²];

ε : emissividade da superfície;

σ : constante de Stefan Boltzmann [$5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$].

Segundo Duffie e Beckmann (2013), a temperatura do céu pode ser determinada pela Equação 10:

$$T_{céu} = 0,0552T_{amb}^{1,5} \quad (10)$$

A transferência de calor por radiação dentro da cavidade de ar, pode ser obtida pela Equação 11.

$$h_{cavidade} = \frac{\sigma A(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (11)$$

T_1 e T_2 : Temperaturas paralelas das superfícies [$^{\circ}C$];

A : Área da superfície [m^2];

ε_1 e ε_2 : emissividade paralelas das superfícies;

σ : constante de Stefan Boltzmann [$5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$].

2.6 Perdas do sistema

A perda em sistemas fotovoltaicos funciona como um avaliador de desempenho térmico e elétrico da conversão de energia solar. Sofre influência de vários elementos desde a radiação solar incidente até o processo final de entregar a energia gerada. Os fatores podem ser o sombreamento, altas temperaturas dos painéis, resistência elétrica, processos de degradação ao longo do tempo, essas variáveis afetam diretamente a quantidade de energia útil gerada pelo sistema.

Estudos como o de Jamil *et al.* (1995), analisam as perdas térmicas como avaliador do comportamento das temperaturas do ambiente externo e módulo fotovoltaico. As perdas Ôhmicas, por sua vez, tratam a dissipação de calor ocasionado pela resistência elétrica dos componentes do circuito elétrico, essa fluidez da corrente elétrica até a resistência, faz com que o sistema sofra queda de tensão elevando a temperatura, chamada então de efeito Joule.

Outras perdas relacionadas ao sistema, remetem ao ângulo de incidência solar, uma vez que, a eficiência do painel está diretamente ao ângulo que os raios solares fazem sobre a superfície do painel, impactando na geração de energia. Conforme Pfrommer *et al.* (1995), a

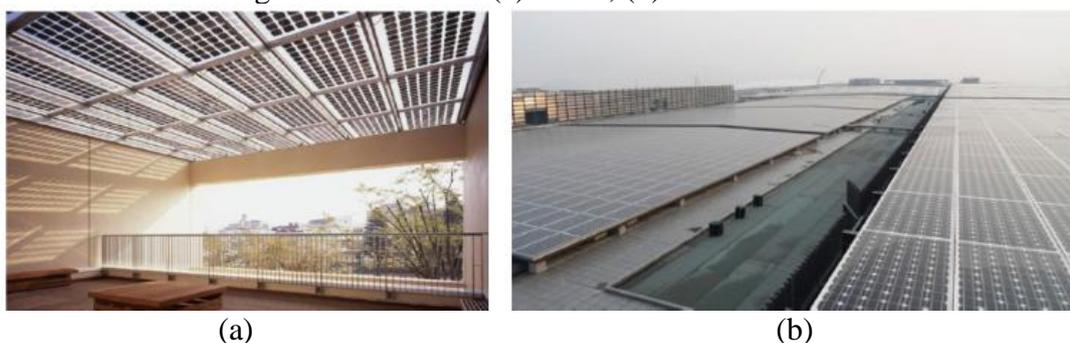
máxima absorção das células fotovoltaicas ocorre quando a incidência solar faz um ângulo perpendicular sobre a superfície do módulo, essa inclinação vai depender do local onde encontra-se o painel.

Por fim, perdas relacionadas ao módulo como a sua estrutura podem ser observadas, sendo elas sujidades sobre a superfície do painel por este estar em contato direto com o ambiente externo, ocasionado pelo acúmulo de poeira endurecida devido exposição de sol e chuva, dejetos de aves, ou qualquer outra eventual partícula que funcione como obstáculo para a captação solar. O acúmulo de sujeira nos módulos fotovoltaicos reduz a produção energética, e comprometer a eficiência. Por isso, é necessário manutenções periódicas para limpeza da superfície.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ghosh (2020) por meio de uma revisão sobre potencial das tecnologias fotovoltaicas integradas (BIPV) e aplicadas (BAPV) em sistemas adaptativos e de baixo consumo de energia. Destacou que a utilização dessas tecnologias, além de melhorar a eficiência das fachadas e coberturas dos edifícios, reduz a dependência das fontes de combustíveis fósseis. Contudo, a pesquisa apontou os desafios operacionais ligados à implementação do BIPV/BAPV, incluindo questões como custo, desempenho térmico e integração arquitetônica. A pesquisa mostra que, com avanços tecnológicos e políticas de incentivo adequadas, a aplicação dessas soluções pode se tornar cada vez mais viável para edifícios sustentáveis. A Figura 3, ilustra os dois tipos de sistemas.

Figura 3 – Sistemas (a) BIPV; (b)BAPV.



Fonte: Peng *et al.* (2011)

Shakouri, Ghadamian e Noorpoor (2020) desenvolveram uma análise dinâmica do desempenho energético de fachadas de vidro duplo integradas a sistemas fotovoltaicos térmicos (BIPV/T) em climas do Oriente Médio. O estudo quantificou os efeitos da integração arquitetônica no balanço de energético, o efeito da influência de variáveis como a ventilação, a radiação solar e a temperatura ambiente, impacta nas eficiências térmicas e elétricas. A utilização de fachadas duplas em sistemas BIPV/T resultou em melhorias significativas no desempenho energético dos edifícios, minimizando a carga térmica e otimizando a geração de energia. O estudo comprovou a viabilidade dessa tecnologia para regiões de clima quente e seco, além de contribuir para projetos arquitetônicos mais eficientes que tendem a ser mais sustentáveis.

Kaltmaier, Junior e Santos (2020) conduziram um estudo detalhado sobre a construção e os ensaios de um protótipo BIPV/T na cidade de Curitiba, conforme apresentado nos Anais do CBENS 2020. O projeto integrou painéis fotovoltaicos à envoltória do edifício, permitindo

a geração simultânea de energia elétrica e térmica. O sistema utilizou em um painel fotovoltaico com três módulos de telureto de cádmio e para otimizar o desempenho do sistema, foram utilizadas estratégias específicas de configuração e escolha de materiais, houve o monitoramento das temperaturas internas e externas, que atuaram no conforto térmico do ambiente, atribuindo isso as configurações para as trocas de calor do sistema. Os resultados indicaram que o protótipo apresentou desempenho satisfatório em termos de eficiência energética, demonstrando o potencial da tecnologia BIPV/T em climas subtropicais como o de Curitiba.

A integração de sistemas fotovoltaicos/térmicos as edificações (BIPV/T) explora inovações para a produção combinada de energia elétrica e térmica, colaborando para a eficiência energética prediais. No estudo apresentado por Maghrabie *et al.* (2021), a respeito das aplicações e desafios dos BIPV/T, destacou que esses sistemas promovem um melhor aproveitamento da radiação solar, tanto para a redução das perdas energéticas como melhoramento da performance térmica das edificações. A pesquisa reforça as principais aplicações para os sistemas BIPV/T, na área de climatização de ambientes, promoção do aquecimento da água e na cogeração de energia. O estudo também aponta melhorias para a dissipação térmica e como os designs arquitetônicos podem potencializar o benefício dessa tecnologia. Além disso, os sistemas BIPV/T evidenciam um ótimo caminho para a transição energética sustentável.

Luo *et al.* (2021) conduziram um estudo experimental e uma avaliação de desempenho de uma fachada de dupla camada de vidro integrada com persianas fotovoltaicas (*PV-blind*) durante a estação de inverno. O sistema contribui para a eficiência energética dos edifícios, atuando como um isolante térmico extra à medida que está produzindo eletricidade. Desse modo, a regulação dinâmica das persianas permite uma gestão mais eficiente da radiação solar e do ganho térmico interno. Embora apresente dificuldades de instalação, a tecnologia mostrou-se promissora para uso em climas frios, auxiliando na redução do consumo de energia e aumento do conforto térmico interno.

Hoseinzadeh *et al.* (2021) em uma análise de desempenho energético de edifícios de grande porte com sistema BIPV/T na cidade de Teerã, Irã. Trata-se de um estudo de caso que investigou a implementação de sistemas fotovoltaicos em edifícios altos pode auxiliar na geração de energia renovável e a redução do consumo energético, como forma de suprir sua própria demanda energética. Os resultados comprovaram a viabilidade técnica e econômica como solução para regiões de alta irradiação solar, beneficiando o meio ambiente. Vale destacar, o impacto da poluição do ar e a direção dos painéis foram levados em consideração

como fatores que influenciam a eficiência do sistema. Por fim, o estudo reforça a necessidade de adaptação de tecnologias fotovoltaicas para áreas urbanas em consideração ao clima local.

Lamnatou *et al.* (2021) investigaram sistemas fotovoltaicos/térmicos baseados em concentradores de calor e não concentradores, com diferentes fluidos de trabalho variando as faixas de temperatura (baixa, média e alta). Sua análise avaliou o impacto dessas tecnologias na eficiência energética, demonstrando que sistemas de concentração podem melhorar o aproveitamento térmico da energia solar, principalmente em aplicações de alta temperatura. O estudo enfatizou que a escolha do fluido de trabalho é um fator determinante para o melhoramento das transferências de calor e a eficiência geral do sistema.

Gassar e Cha (2021) utilizaram sistemas de informação geográfica (GIS) para a estimar o potencial fotovoltaico em telhados urbanos. Por meio de dados geoespaciais a fim de avaliar a viabilidade da instalação de sistemas solares em larga escala. A pesquisa destacou a importância de variáveis como orientação dos telhados, sombreamento e radiação solar impactam na capacidade de geração de energia. O estudo aponta que o uso de ferramentas GIS pode aperfeiçoar o planejamento e a implementação de energia fotovoltaica em áreas urbanas, colaborando para cidades mais sustentáveis e melhor eficiência energética.

Wang *et al.* (2021) comparou o desempenho energético de dois sistemas para fachadas fotovoltaicas: painel com duplo vidro (PV-DSF) e unidades de vidro isolante fotovoltaicas (PV-IGU). Assim, o estudo avaliou a eficiência térmica e elétrica desses sistemas. Por último, constatou que as PV-DSF apresentaram melhor controle térmico e melhor aproveitamento da radiação solar. Os resultados mostraram que a escolha do tipo de painel fotovoltaico a ser utilizado deve considerar fatores como clima, orientação da edificação e demandas energéticas específicas.

No estudo realizado por Alhammadi *et al.* (2022), em um experimento comparou a performance dos módulos fotovoltaicos de telureto de cobre, índio e gálio (CIGS) e silício cristalino (c-Si) em fachadas BIPV ventiladas naturalmente em regiões de clima quente. O trabalho demonstrou que o sistema de ventilação permite uma redução significativa da temperatura dos painéis, à medida que sua eficiência aumenta. Entre as descobertas os resultados revelaram que os módulos CIGS apresentam melhor desempenho térmico em regime de alta temperatura, entretanto os módulos c-Si possuem maior eficiência em condições de alta irradiação. Ao final, destaca a importância da boa escolha do módulo solar para a região que irá ser instalado a fim de maximizar a geração de energia, em regiões de clima quente.

Zhao *et al.* (2023) conduziram um estudo experimental sobre o desempenho de sistemas BIPV/T com cavidade de ar sob diferentes condições climáticas. O experimento avaliou a

eficiência térmica e elétrica, observando as variações da temperatura ambiente e na irradiação solar, afetavam diretamente na performance do painel fotovoltaico. Ao aumentar a taxa de fluxo de ventilação de 0,4 m/s para 2,2 m/s, o aproveitamento térmico subiu consideravelmente de 23,0% para 51,8% ao longo do dia, mas a eficiência elétrica só aumentou em aproximadamente 3,5%. No entanto, os dados revelam a necessidade de uma otimização do fluxo de ar e na estrutura do sistema que pode melhorar a eficiência como um todo. Por fim, o estudo destaca a importância de adaptar os sistemas BIPV/T para diferentes climas na China, a fim de obter o melhor aproveitamento energético e contribuindo para edificações sustentáveis.

Roberts *et al.* (2023) analisaram como uso de vidros fotovoltaicos (PV) semi-transparentes de silício amorfo (a-Si) em fachadas duplas afetaram o desempenho energético e a iluminação em um escritório em Londres. O estudo comparou dois modelos em uma simulação realizado no *software DAYSIM*, um o módulo de escritório com fachada dupla utilizando vidros duplos transparentes e o outro um módulo similar equipado com vidros PV semi-transparentes. Os números indicaram uma redução de 73% na iluminância máxima diurna para o sistema BIPV-DSF em relação à fachada dupla convencional. O gasto energético, o prédio com o BIPV-DSF foi um consumo de 8% a mais que o modelo da referência. Portanto, concluiu-se que, nas condições climáticas do Reino Unido, a aplicação comercial do BIPV-DSF não é viável.

No presente trabalho, foi desenvolvida uma bancada experimental em um *container* marítimo de 20 pés, integrada a um sistema BIPV (*Building Integrated Photovoltaic*), com janelas de vidro duplo voltadas para a fachada norte, em João Pessoa, Paraíba. O objetivo principal foi implementar um sistema BIPV com cavidade de ar para avaliar seu desempenho térmico e elétrico. Essa abordagem busca analisar o conforto térmico do ambiente e a capacidade de geração de energia elétrica do painel fotovoltaico.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção, são apresentados os materiais e métodos utilizados na pesquisa. O modelo metodológico adotado detalha os aspectos da construção do aparato experimental, as variáveis envolvidas e o método empregado na coleta dos dados relacionados ao modelo. A metodologia está estruturada em oito etapas, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Etapas da Metodologia.



Fonte: Elaboração própria (2024)

4.1 Caracterização do local

A caracterização da escolha do local para a realização dos experimentos, está definida como a capital da Paraíba, a cidade de João Pessoa, estado pertencente a região Nordeste do Brasil localizado na América do Sul. O estudo será realizado na face voltada para o norte, devido às condições favoráveis do clima e do posicionamento do sol devido ao solstício de inverno, iniciado em 21 de junho de 2023, esse fenômeno proporciona uma inclinação ao eixo da terra favorecendo uma maior irradiação solar na fachada norte do objeto de estudo.

A cidade de João Pessoa está localizada aproximadamente 7.12° latitude Sul, 34.82° longitude Oeste e altitude 33,5 m (INMET), possui uma localização vantajosa para a realização da pesquisa, por possuir um clima tropical úmido caracterizado por elevadas temperaturas ao longo do ano.

Conforme Figura 5, o local do experimento não possui obstrução de construções ou vegetações que dificultem a passagem de luz solar na fachada norte do *container*.

Figura 5 – Área do local do experimento.



Fonte: elaboração própria (2024)

Segundo dados obtidos pelo LABREN – Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos de Energias Renováveis e do INMET- Instituto Nacional de Meteorologia, a irradiação global tem uma média registrada em torno de 5530 Wh/m².dia, a Tabela 1 apresenta a irradiação global anual para João Pessoa.

Tabela 1 – Irradiação solar em João Pessoa

Mês	Irrad. Global (Wh/m ² .dia)
Janeiro	5862
Fevereiro	6002
Março	6009
Abril	5365
Mai	4823
Junho	4360
Julho	4475
Agosto	5261
Setembro	5758
Outubro	6054
Novembro	6240
Dezembro	6151
Média Anual	5530

Fonte: LABREN e INMET (2023).

4.2 Caracterização do objeto de estudo

O estudo foi realizado na Universidade Federal da Paraíba no Centro de Energias Alternativas e Renováveis. O Sistema BIPV foi configurado baseado nas pesquisas realizadas por Roberts *et al.* (2023) e Boafó *et al.* (2022). Ao redor onde será realizado o experimento foi verificado que não há obstrução (vegetação ou construções) à captação da luz solar aos painéis solares inseridos no *container*. A Figura 6 mostra o local do experimento e a área circunvizinha.

Figura 6 – Área do *Container*

Fonte: Adaptado Google Earth (2023).

Foi realizada a instalação do *container* no local, cujas dimensões são 6,10 x 2,45 x 2,60 metros, correspondendo respectivamente ao comprimento, largura e altura, conforme apresentado na Figura 7. Após o tratamento interno, que incluiu revestimento isolante, *drywall* e piso, obteve-se uma área interna útil de 13,05 m².

Por se tratar de um *container* do tipo marítimo modelo fabricado em aço com conexões por soldas, teve a necessidade de passar por um tratamento de descontaminação externo e interno, por meio abrasivo como também a necessidade de manutenção externa por meio de massa e pontos de solda a fim de preservar toda a estrutura. No teto e nas paredes, foi utilizada lã de rocha como revestimento térmico, juntamente com *drywall*, enquanto no piso foram aplicados impermeabilizantes e cerâmica de alta qualidade, tudo com o objetivo de garantir um bom conforto térmico.

Figura 7 – Objeto de estudo



Fonte: Elaboração própria (2023).

O *container* possui duas salas idênticas, cada uma com: porta lateral de 2,10 metros de altura, 0,80 metros de comprimento e com janelas de 1 metro por 1 metro, ambas as janelas voltadas para a fachada Norte. Nessa configuração, uma das janelas recebeu o módulo fotovoltaico monocristalino de alto rendimento *Junction Box MC4 IP68 3-Split*, encapsulado em vidro laminado (vidro+vidro), cujas especificações podem ser detalhadas na Tabela 2. A Figura 7 documenta a instalação da janela e sua especificação no.

Tabela 2 – Especificação do Pannel Junction Box MC4 IP68 3-Split

Si-mono	
Dimensões	0,99 x 0,99
Potência máxima em STC [Pmax]	132 Wp
Tensão no ponto de máxima potência [Vmp]	19,8 V
Corrente no ponto de máxima potência [Imp]	6,7 A
Tensão em circuito aberto [Voc]	23,2 V
Corrente de curto-circuito [Ioc]	7,1 A
Eficiência do módulo em STC	25% ± 5%

Fonte: Elaboração própria (2023).

O módulo foi conectado a um microinversor modelo GMI 150L, da fabricante *Sunpv solar*. A Figura 8 apresenta o equipamento e a Tabela 3 mostra as especificações.

Tabela 3 – Especificações do micro inversor

GMI 150 L	
Faixa de tensão MPPT	12,5V – 25V
Faixa de tensão de operação	10,8V-30V
Tensão de inicialização	10,8V
Corrente máxima de entrada	9,37 ^a
Tipo de rede monofásica	120 / 230
Potência nominal de saída	130W
Potência máxima de saída	140W
Corrente nominal de saída	120 : 1,08 ^a /230V : 0,56 A
Eficiência Pico	92.5%
Eficiência nominal do MPPT	99.9%

Fonte: Sunpv solar (2024).

Figura 8 – Microinversor modelo GMI 150L, Sunpv solar

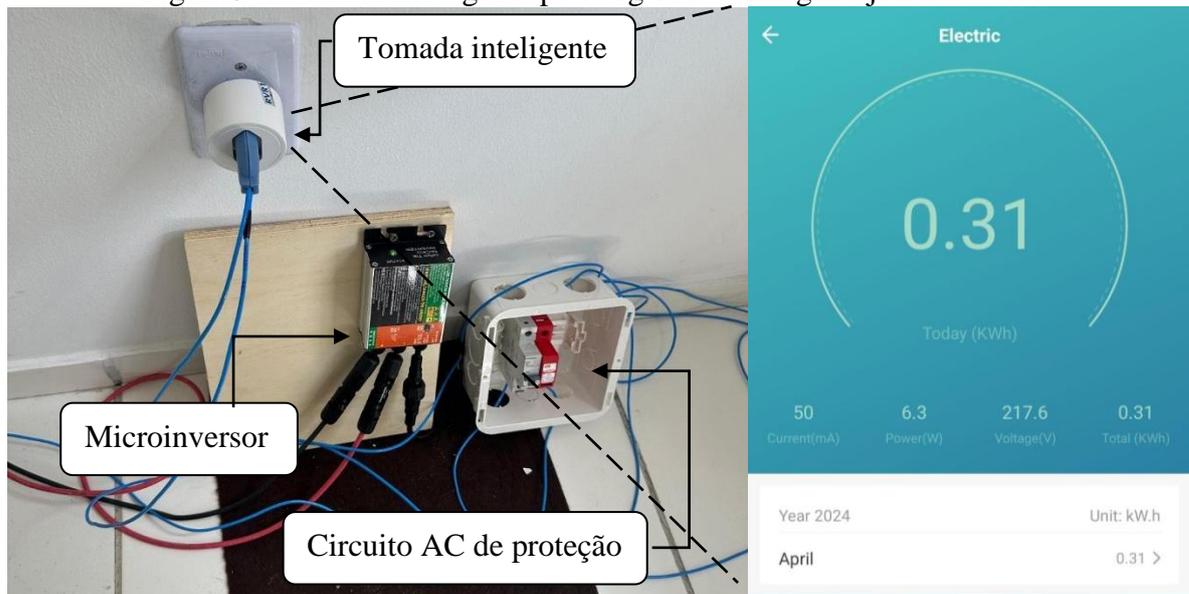


Fonte: Sunpv solar (2023)

O sistema em atividade, foi realizado com o pannel conectado ao microinversor por conectores MC4, conector macho ligado ao positivo e o conector fêmea ligado ao negativo.

Para preservação dos equipamentos e segurança, o mesmo foi inserido em um circuito de corrente alternada, através de uma *stringbox* CA com disjuntor de 2A e DPS de 275V antes da energia produzida pelo módulo fotovoltaico ser injetada na rede elétrica. Adicionalmente, uma conexão do microinversor a rede utilizou uma tomada inteligente para monitoramento em tempo real da energia produzida pelo módulo ser injetada na rede elétrica, o conjunto pode ser visualizado na Figura 9.

Figura 9 – Tomada inteligente para registrar a energia injetada na rede.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.3 Instrumentação

Nas etapas do procedimento experimental, foram utilizados equipamentos a fim de complementar os dados locais, com maior exatidão. Uso do anemômetro que é possível medir velocidade do vento, temperatura e radiômetro, este servindo para aferir a irradiação solar.

A coleta de dados das temperaturas da superfície interna e externa do módulo fotovoltaico e da janela de vidro, assim como do ambiente externo, da cavidade e do interior da sala, foi realizada por meio de 13 termopares do tipo K, o termopar utilizado, Figura 10.

Figura 10 – Termopar tipo K.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os termopares foram calibrados utilizando termômetro padrão de alta resolução, com precisão de $0,1^{\circ}\text{C}$ e um agitador magnético com aquecimento para controle da temperatura no recipiente, apresentado pela Figura 11. A calibração iniciou a uma temperatura de 25°C , os termopares foram submersos em um Becker com água para atingirem o equilíbrio térmico com o termômetro de precisão. Na etapa seguinte, foi realizado o aumento gradual da temperatura, com a base aquecida variando em torno de 100°C , com o objetivo de obter as curvas de calibração, as quais estão disponíveis no Apêndice A deste trabalho.

Figura 11 – Calibração dos termopares tipo K.



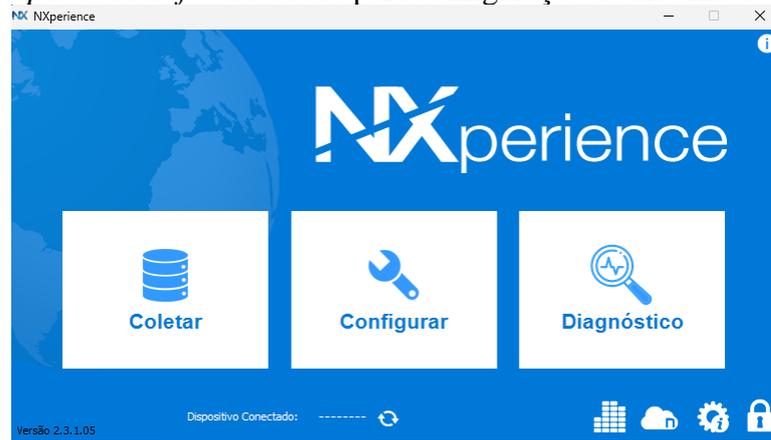
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A *LogBox Wi-fi*, Figura 12, foi usada para traduzir os dados de temperaturas gerados pelos termopares.

Figura 12 – *LogBox Wi-fi*.

Fonte: NOVUS (2024).

O *software* utilizado para coletar e configurar a *LogBox Wi-fi* foi o *NXperience* fornecido pela própria empresa NOVUS, apresentado na Figura 13.

Figura 13 – *Nxperience Software* usado para configuração do sistema de *LogBox Wi-fi*.

Fonte: NOVUS (2024)

As medições utilizando o anemômetro digital MDA-20, apresentado na Figura 14, para a velocidade do vento, ocorreram cerca de 1,50 m de altura do solo rente à superfície do painel. Isto permite um melhor entendimento do comportamento do vento sobre a face do painel.

Figura 14 – Anemômetro digital MDA-20



Fonte: site Minipa (2024)

Adicionalmente, as medições da radiação solar incidente sobre o painel foram registradas por meio de um radiômetro digital, conforme Figura 15, na posição vertical a face do painel fotovoltaico.

Figura 15 – Radiômetro digital.



Fonte: site Instrutherm (2024)

Dados técnicos dos equipamentos podem ser visualizados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados técnicos dos instrumentos.

Instrumentos	Dados técnicos	Precisão
Radiômetro	Faixa de medição: 2000 W/m ² Resposta espectral: 400 para 1000 nm	± 10 W/m ²
Termopar K	-50°C a 240°C	± 0,1 °C
Anemômetro	0,80 a 40 m/s	± 2%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.4 Configurações do Sistema BIPV

No *container*, na área de aberturas da fachada norte, há um espaço de 50 mm entre a janela de vidro e o módulo fotovoltaico, a Figura 16 mostra a cavidade de ar. Esta configuração permite investigar o comportamento térmico das células fotovoltaicas durante o processo de conversão energética. Dessa forma, a configuração adotada tem o objetivo reduzir a transmissão do calor produzido pelo módulo fotovoltaico para dentro do ambiente do *container*. Como não há aberturas para trocas de calor, o ar presente no espaço atua como meio de convecção térmica para o vidro. Além disso, o ambiente interno teve controle de temperatura com o ar-condicionado.

Figura 16 – Configuração para redução da transmissão de calor para a sala.

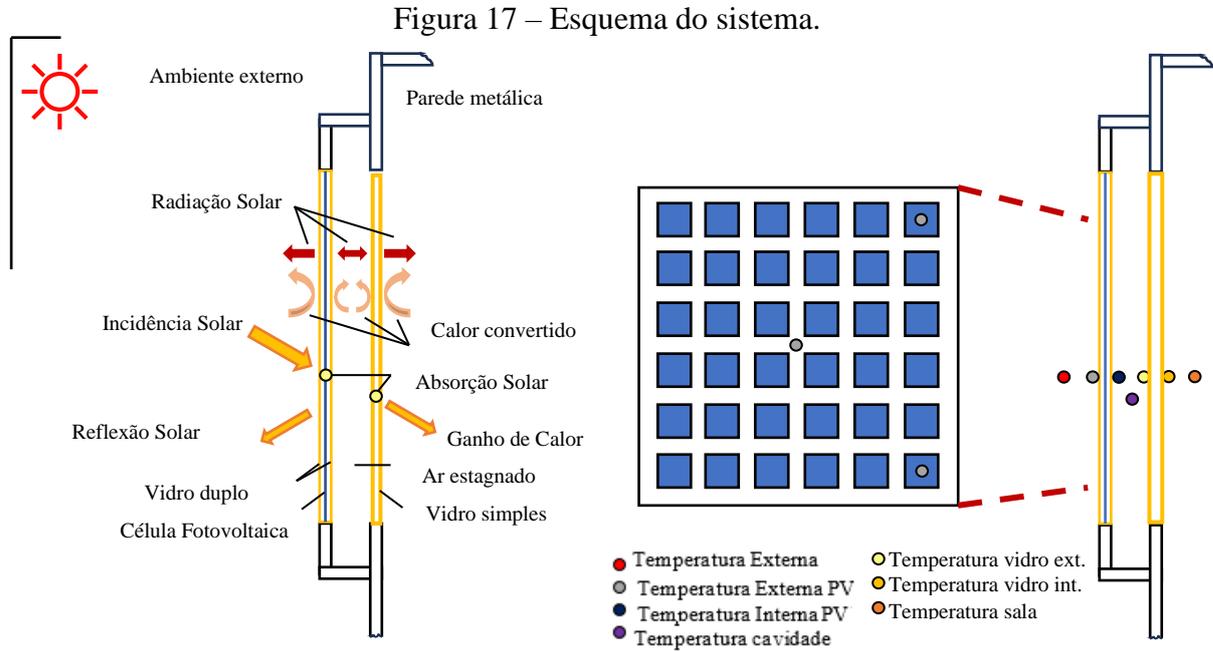


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.5 Procedimento Experimental

Realizadas as etapas de instalação do *container* no local de estudo, foi utilizado um sistema com uma janela de vidro duplo, na qual foi inserido um módulo fotovoltaico Si-mono semitransparente para a geração de energia. O módulo foi inserido em uma das janelas da fachada do *container*, para a direção Norte formando um sistema BIPV, com 11 mm de espessura, composto por um vidro interno simples de 5 mm e uma cavidade de ar de 50 mm que os separa.

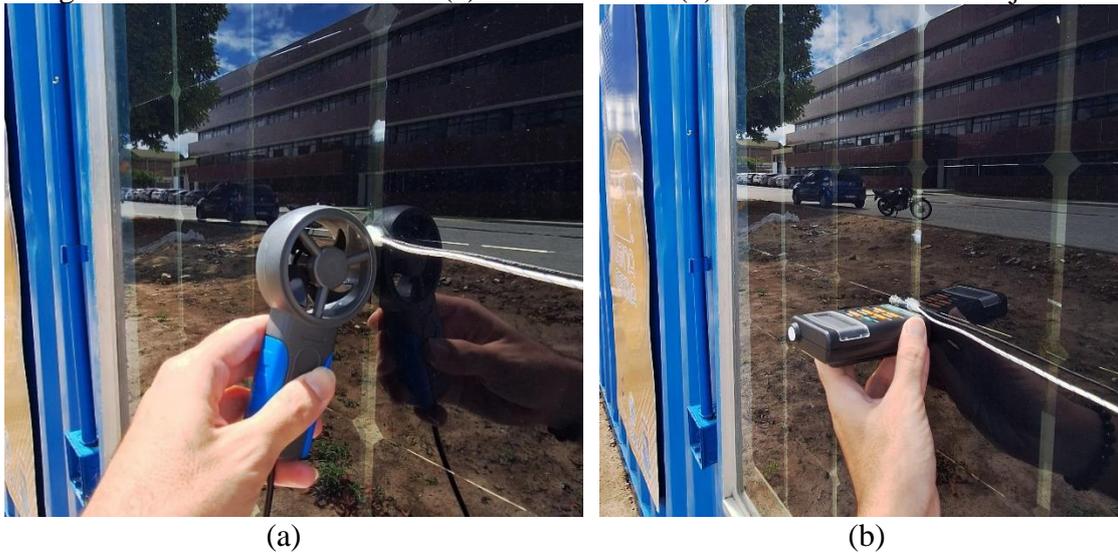
A ilustração do esquema das trocas de calor envolvidas pode ser visualizada, na Figura 17.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os experimentos ocorreram para os dias de 23, 24 e 25 abril, 21, 26 e 28 de junho e 17, 18 e 19 julho de 2024. O período de coleta ocorreu das 07:50h às 16:10h, com intervalos de vinte minutos, durante os quais foram registrados os parâmetros de temperatura, velocidade do vento e radiação solar, a Figura 18 apresenta o posicionamento dos equipamentos para coleta dos dados de radiação e velocidade do vento.

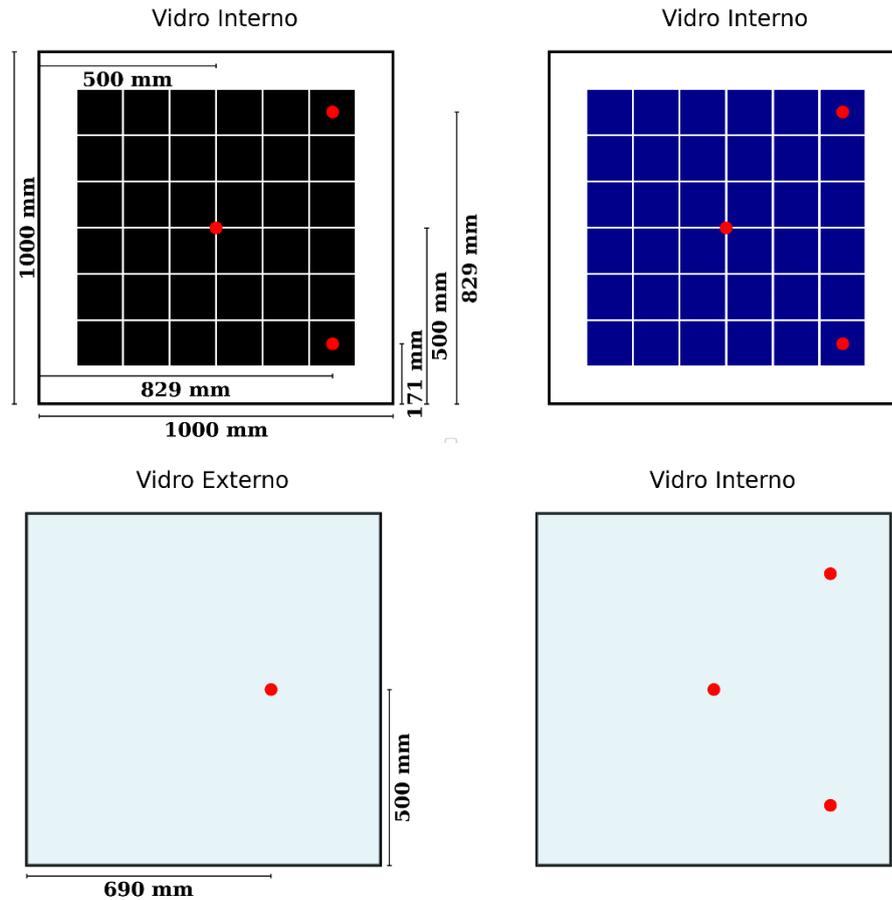
Figura 18 – Posicionamento do (a) anemômetro e (b) radiômetro na face da janela.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

No módulo fotovoltaico, na cavidade de ar e na sala, foram distribuídos 13 termopares do tipo K, posicionados sobre as superfícies a serem estudadas. Na área externa, três foram instalados na superfície externa do módulo fotovoltaico e um para medir a temperatura do ambiente externo. Dentro da cavidade de ar, três foram posicionados na superfície interna do painel, um foi adicionado sem contato com nenhuma superfície e outro no vidro da janela. Os termopares restantes foram colocados na sala interna, sendo três no vidro interno e um para medir a temperatura interna da sala. A Figura 19 mostra a disposição dos termopares sobre as superfícies.

Figura 19 – Posicionamento dos termopares nas superfícies estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

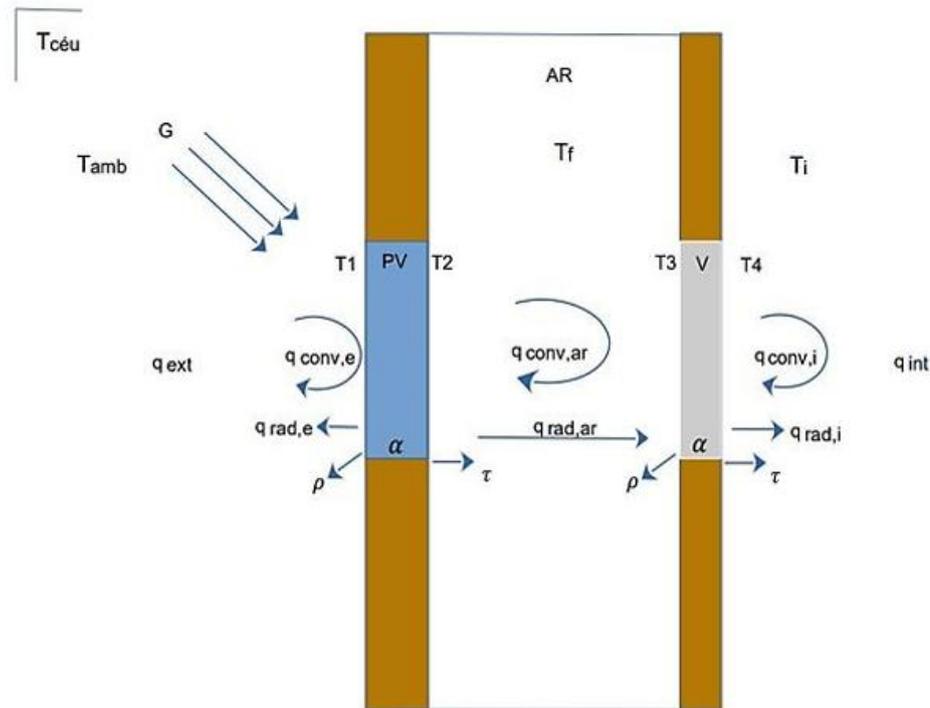
4.6 Análise Desempenho Térmico

A análise térmica do sistema, envolve os processos de fluxo de calor por convecção e radiação no ambiente interno e externo do *container*, a fim de avaliar o comportamento das temperaturas alcançadas.

O coeficiente de ganho de calor solar (SHGC), funciona como um avaliador de desempenho térmico, que retrata o ganho de calor por meio do painel fotovoltaico, para calcular o SHGC, Equação 1.

O valor do SHGC por meio da janela é determinado pela soma das trocas de calor por radiação e convecção no interior, além da quantidade de calor transmitido através da janela devido à radiação solar incidente. As variáveis podem ser visualizadas pelo esquema da Figura 20.

Figura 20 – Esquema da análise do sistema BIPV.



α : absortância

τ : transmitância

ρ : reflectância

G : radiação solar

q_e : transferência de calor externa

q_i : transferência de calor interna

$q_{conv,e}$: transferência de calor convectiva externa

$q_{conv,i}$: transferência de calor convectiva interna

$q_{conv,ar}$: transferência de calor convectiva na cavidade

$q_{rad,e}$: transferência de calor radiativa externa

$q_{rad,i}$: transferência de calor radiativa interna

$q_{rad,ar}$: transferência de calor radiativa na cavidade

T_1 : Temperatura externa do PV

T_2 : Temperatura interna do PV

T_3 : Temperatura interna do vidro

T_4 : Temperatura externa do vidro

T_f : Temperatura de filme

T_e : Temperatura externa da vizinhança

T_i : Temperatura externa do container

T_{amb} : Temperatura ambiente

$T_{céu}$: Temperatura do céu

PV: painel fotovoltaico

V: vidro

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na área externa da janela fotovoltaica ocorrem as trocas de calor através da convecção e radiação. No primeiro momento ocorre as trocas por convecção entre painel e ambiente externo, calculado pela equação 12:

$$q_{conv,e} = A \cdot h_{c,e} \cdot (T_1 - T_{amb}) \quad (12)$$

T_1 : Temperatura do módulo fotovoltaico[°C];

T_{amb} : Temperatura do ambiente externo [°C];

A : Área do painel [m²];

$h_{c,e}$: Coeficiente convectivo [W/m².K].

Estudos revelam que mesmo baixas condições de vento exercem influência significativa na transferência de calor por convecção em módulos fotovoltaicos. O trabalho do Sharples e Charlesworth (1987), demonstrou que, quando o vento que incide perpendicularmente à superfície do painel, o coeficiente convectivo pode ser calculado utilizando a Equação 13, vale destacar apenas para intervalos de velocidade do vento entre 0,8 e 6,2 m/s.

$$h_{conv,e} = 6,50 + 3,30 \cdot v_v \quad (13)$$

v_v : velocidade do vento [m/s].

Dentro da cavidade de ar as trocas de calor, ocorrem por convecção e radiação efeito gerado pelo módulo fotovoltaico interno e o vidro externo da janela. Calcula-se a troca de calor por convecção na cavidade de ar utilizando a Equação 14:

$$q_{conv,ar} = A \cdot h_{c,ar} \cdot (T_2 - T_3) \quad (14)$$

$$h_{c,ar} = \frac{Nu_l K_{ar}}{L} \quad (15)$$

Nu_l : Número de Nusselt;

K_{ar} : Condutividade térmica do ar [W/m.K];

L: Comprimento do painel fotovoltaico [m]

O número de Nusselt pode ser calculado através da Equação 16, a depender do número de Rayleigh e número de Prandtl.

$$Nu_L = 0,42 Ra_L^{1/4} Pr^{0,012} \left(\frac{H}{L} \right)^{-0,3} \quad (16)$$

Nu_l : Número de Nusselt;

Ra_L : Número de Rayleigh;

Pr : Número de Prandtl;

$\frac{H}{L}$: Razão entre altura e comprimento da superfície.

$$10 < \frac{H}{L} < 40$$

$$1 \approx Pr$$

$$10^4 < Ra_L < 10^9$$

Para obter a transferência de calor por radiação dentro da cavidade de ar, Equação 16:

$$q_{rad,ar} = A \cdot h_{r,ar} \cdot (T_2 - T_3) \quad (17)$$

T_2 : Temperatura superfície interna do módulo fotovoltaico[°C];

T_3 : Temperatura superfície interna do vidro [°C];

A: Área do painel/área do vidro [m²];

$h_{r,ar}$: Coeficiente de radiação cavidade de ar [W/m².K].

Sendo

$$h_{c,ar} = \frac{\sigma \varepsilon (T_2 - T_3)(T_2^2 - T_3^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{PV}} + \frac{1}{\varepsilon_V} - 1} \quad (18)$$

ε_{PV} : emissividade do módulo fotovoltaico;

ε_V : emissividade do vidro;

σ : constante de Stefan Boltzmann [$5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$].

Na área interna, para calcular a troca de calor do vidro interno para a sala do *container*, Equação 19:

$$q_{rad,i} = A \cdot h_{r,i} \cdot (T_4 - T_i) \quad (19)$$

$h_{r,i}$: coeficiente de radiação entre vidro interno e sala interna [W/m².K];

A: área do vidro;

T_4 : Temperatura superfície do vidro [°C];

T_i : Temperatura do ambiente interno [°C].

Desse modo,

$$h_{r,i} = \varepsilon_V \cdot \sigma \cdot (T_4^2 + T_i^2)(T_4 + T_i) \quad (20)$$

ε_V : emissividade do vidro.

A transferência de calor por convecção foi calculada através da Equação 21:

$$q_{conv,i} = A \cdot h_{c,i} \cdot (T_4 - T_i) \quad (21)$$

$h_{c,i}$: coeficiente de convecção entre painel e o vidro [W/m².K];

A: área do modulo fotovoltaico;

T_4 : Temperatura superfície do vidro [°C];

T_i : Temperatura do ambiente interno [°C].

A sala do *container*, por ser um ambiente fechado e controlado, tem características térmicas específicas. Liu et. al. (2016) propuseram que coeficiente convectivo pode ser calculado pela Equação 22, uma vez que para o estudo a velocidade do vento dentro da sala foi considerado 0 m/s.

$$h_{conv,e} = 5,34 + 3,25 \cdot v_v \quad (22)$$

v_v : velocidade do vento [m/s].

As propriedades ópticas do módulo fotovoltaico utilizado no sistema, Tabela 6, variáveis essenciais aos cálculos do modelo. Para estabelecer parâmetros confiáveis, foi adotado como referência a configuração testada por Peng *et.al* (2021), que utilizou células de silício entre lâminas de vidro de 5 mm em posição vertical de 90°.

Tabela 5 – Propriedades ópticas do sistema BIPV

Propriedades	Valores
Emissividade	0,84
Transmitância vidro 5mm	0,8
Reflectância módulo PV	0,524
Propriedades	Valores
Transmitância módulo PV	0,246
Absortância módulo PV	0,231

Fonte: Elaborado pelo autor (2024), adaptado Peng *et al.* (2021).

4.7 Análise de Desempenho Elétrico

Para analisar o desempenho elétrico do sistema BIPV, foi desenvolvido uma modelagem numérica, que considera a relação entre absorção de energia solar e a dissipação do calor, possuem relação direta no aquecimento módulo fotovoltaico. Na literatura especializada Zhao et. al. (2023) apresenta um método específico para calcular a eficiência de módulos instalados verticalmente a 90°.

A eficiência do módulo η_{PV} pode ser expressa pela Equação 23:

$$\eta_{PV} = \eta_0 [1 - \beta_{PV}(T_{cell} - T_{ref})] \quad (23)$$

O coeficiente de temperatura pode ser obtido através da Equação 24:

$$\beta_{PV} = 1 - \frac{1}{T_{méd,PV}} \quad (24)$$

η_0 : eficiência do painel em STC;

β_{PV} : coeficiente de temperatura;

$T_{méd,PV}$: temperatura média do painel;

T_{cell} : Temperatura atingida pela célula;

T_{ref} : Temperatura de referência em STC.

A potência em corrente contínua pode ser calculada pela Equação 25, expressa pela relação da área do módulo, irradiância solar no painel e eficiência obtida na Equação 23.

$$P = \eta_{PV} A G_{inc} \quad (25)$$

η_{PV} : Eficiência do módulo fotovoltaico;

A : área total das células [m²];

G_{inc} : Irradiância solar [W/m²].

Além disso, foi realizada uma simulação do mesmo sistema BIPV experimental no *software PVsyst* versão 7.4, Figura 21, com o objetivo de prever o desempenho do sistema sob diferentes condições. Para isso, foram consideradas as condições ambientais reais, como

temperatura ambiente, radiação solar global direta, radiação solar difusa, velocidade do vento, umidade relativa e ângulo de incidência.

O *PVsystem* permite considerar variáveis como localização geográfica, inclinação e orientação dos módulos, especificações técnicas do componente e as condições climáticas da região, para uma análise da energia produzida injetada na rede.

Figura 21 – Software *PVsystem*.

The screenshot displays the PVsystem software interface. The top section is the 'Projeto' (Project) tab, showing fields for 'Nome do projeto' (Projeto BIPVT), 'Nome do cliente' (Projeto BIPV/T), 'Ficheiro localização' (João Pessoa - PB_Custom_2023.SIT), and 'Ficheiro meteorológico' (João Pessoa - PB_Custom_Imported.MET). A status bar indicates 'Simulação terminada (versão 7.4.0, data 15/03/24)'. The middle section is the 'Variante' (Variant) tab, showing 'Nº de Variante' (VCO : Módulo Si-mono (direção Norte)) and various simulation parameters. The bottom right section displays a 'Sinopse dos resultados' (Summary of results) table.

Tipo de sistema	Sistema instalado num edifício
Produção do sistema	50 kWh/ano
Produção específica	378 kWh/KWp/ano
Índice de performance	0.432
Produção normalizada	1.04 kWh/KWp/dia
Perdas do grupo	0.83 kWh/KWp/dia
Perdas do sistema	0.54 kWh/KWp/dia

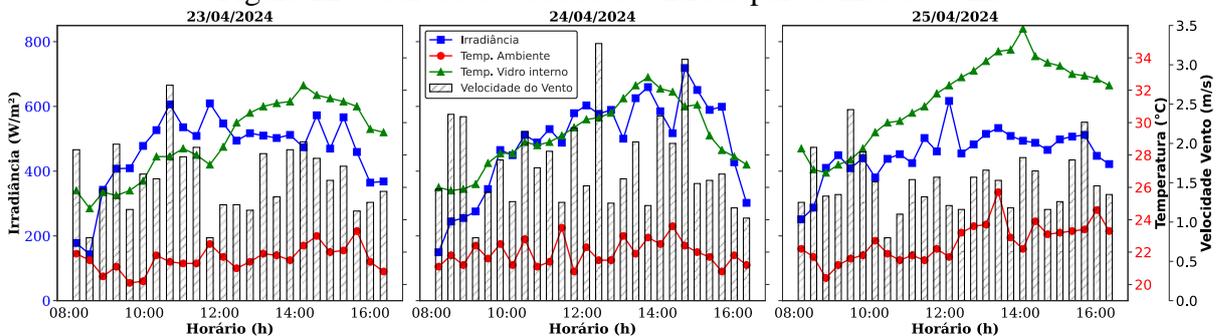
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise do Desempenho diário

Os dados experimentais apresentados, mostram o comportamento diário de quatro variáveis essenciais durante os meses de abril, junho e julho a irradiância solar, velocidade do vento, temperatura interna da sala (temperatura controlada) e temperatura interna do vidro. Esses parâmetros, quando integrados ao modelo matemático, permitem quantificar as trocas energéticas no sistema BIPV. A Figura 22 apresenta os dados para o mês de abril.

Figura 22 – Curvas dos dados de entrada para o mês de abril.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

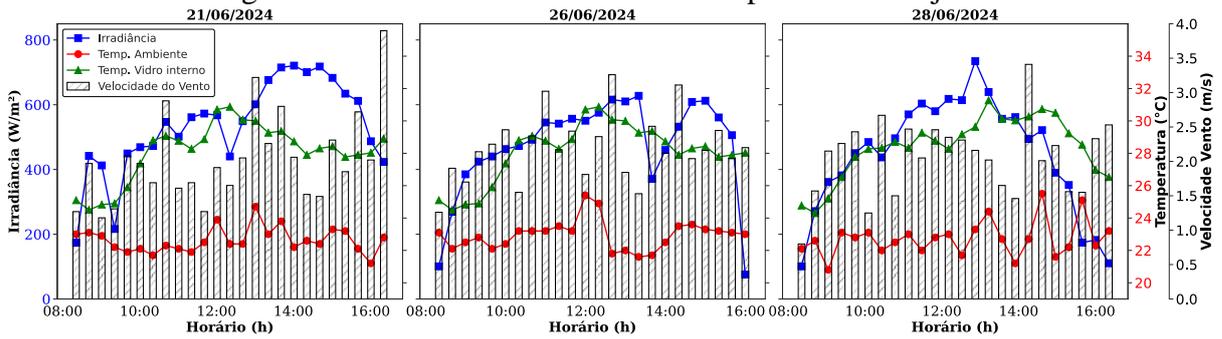
Conforme a Figura 22, para o dia 23 de abril a irradiância solar variou de 143,1 W/m² a 609,5 W/m², a velocidade do vento variou de 0,8 m/s a 2,74 m/s, a temperatura da sala variou de 20,1°C a 23,3°C e a temperatura interna do vidro variou de 24,7°C a 32,3°C.

No dia 24 de abril, a irradiância solar variou de 149,4 W/m² a 718,7 W/m², a velocidade do vento variou de 0,8 m/s a 3,27 m/s, a temperatura da sala variou de 20,8°C a 23,6°C e a temperatura interna do vidro variou de 25,8°C a 32,8°C.

No dia 25 de abril irradiância solar variou de 251,2 W/m² a 616,9 W/m², a velocidade do vento variou de 0,8 m/s a 2,43 m/s, a temperatura da sala variou de 20,4°C a 25,7°C e a temperatura interna do vidro variou de 26,9°C a 35,8°C.

A Figura 23 apresenta os dados experimentais das variáveis irradiância solar, velocidade do vento, temperatura interna do vidro e temperatura interna da sala, coletadas durante o experimento para o mês de junho.

Figura 23 – Curvas dos dados de entrada para o mês de junho



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

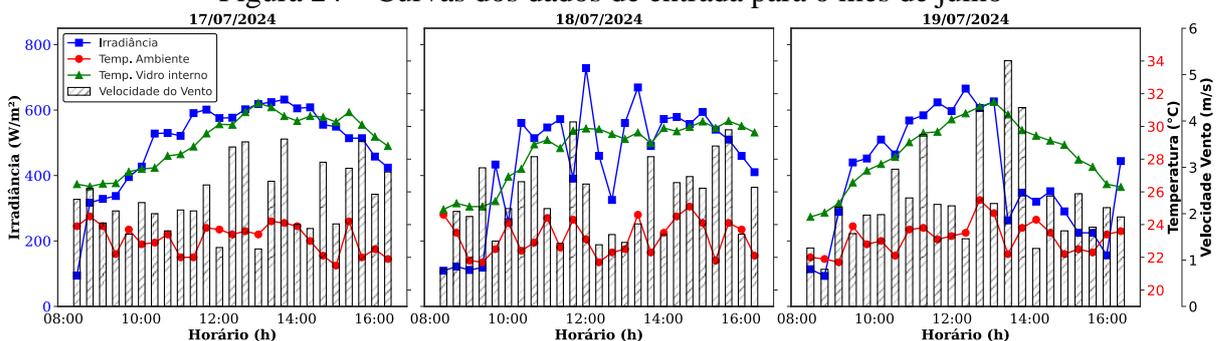
Segundo a Figura 23, para o dia 21 de junho a irradiância solar variou de 173,8 W/m² a 720,8 W/m², a velocidade do vento variou de 1,18 m/s a 3,90 m/s, a temperatura da sala variou de 21,2°C a 24,7°C e a temperatura interna do vidro variou de 24,5°C a 30,8°C.

No dia 26 de junho, a irradiância solar variou de 50,1 W/m² a 627,5 W/m², a velocidade do vento variou de 1,26 m/s a 3,26 m/s, a temperatura da sala variou de 21,6°C a 25,4°C e a temperatura interna do vidro variou de 24,5°C a 31,4°C.

No dia 28 de junho irradiância solar variou de 100,7 W/m² a 734,6 W/m², a velocidade do vento variou de 0,8 m/s a 3,41 m/s, a temperatura da sala variou de 20,8°C a 25,5°C e a temperatura interna do vidro variou de 24,3°C a 31,2°C.

Os dados experimentais apresentados pela Figura 24, representam as curvas de irradiância solar, velocidade do vento, temperatura interna do vidro e temperatura interna da sala, coletadas durante o experimento para o mês de julho.

Figura 24 – Curvas dos dados de entrada para o mês de julho



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

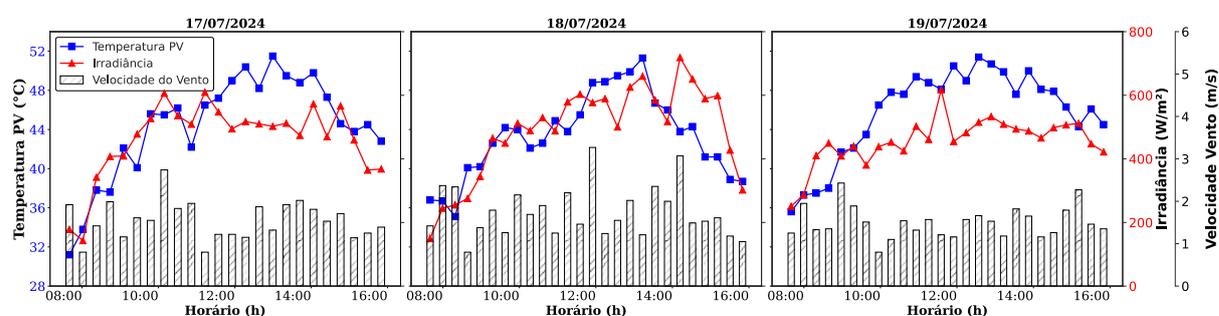
A Figura 24 apresenta para o dia 17 de julho a irradiância solar variou de 94,3 W/m² a 632,1 W/m², a velocidade do vento variou de 1,24 m/s a 3,61 m/s, a temperatura da sala variou de 21,5°C a 24,5°C e a temperatura interna do vidro variou de 26,3°C a 31,4°C.

No dia 18 de julho, a irradiância solar variou de 109,1 W/m² a 728,2 W/m², a velocidade do vento variou de 0,8 m/s a 3,98 m/s, a temperatura da sala variou de 21,7°C a 25,1°C e a temperatura interna do vidro variou de 24,9°C a 30,3°C.

No dia 19 de julho irradiância solar variou de 93,2 W/m² a 665,7 W/m², a velocidade do vento variou de 0,8 m/s a 5,30 m/s, a temperatura da sala variou de 21,7°C a 25,5°C e a temperatura interna do vidro variou de 24,5°C a 31,5°C.

Por meio da análise da Figura 25, referente ao mês de abril, é possível observar o comportamento térmico do módulo solar à medida que a irradiação solar incide em sua superfície.

Figura 25 – Relação da temperatura do painel x Irradiância, mês de abril.

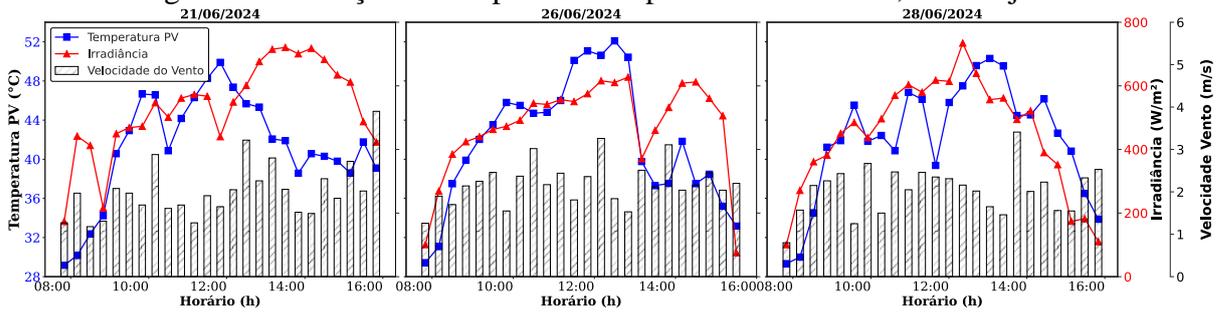


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 25 apresenta, para o início do experimento, nas primeiras horas da manhã, a baixa incidência solar sobre a face do módulo, cerca de 143 W/m², a temperatura permanece em equilíbrio com o ambiente, variando entre 32°C e 35°C nos dias do experimento. À medida que o dia avança, a temperatura tende a subir devido ao aumento da intensidade da radiação solar. As células fotovoltaicas absorvem mais calor, resultando em um aumento da temperatura do painel. Os picos de temperatura ocorrem após as 13:00h, quando a irradiância solar atinge seu valor máximo, entre 600 W/m² e 700 W/m², com temperaturas variando entre 50°C e 52°C. As barras no gráfico apresentam o comportamento da velocidade do vento para os três dias analisados, que variou de 0,8 m/s a 3,5 m/s, devido à baixa ventilação, o efeito do aquecimento fica mais evidente o que contribui para o aumento da temperatura no módulo.

A Figura 26 apresenta a temperatura do painel e as irradiâncias para o mês de junho.

Figura 26 – Relação da temperatura do painel x Irradiância, mês de junho

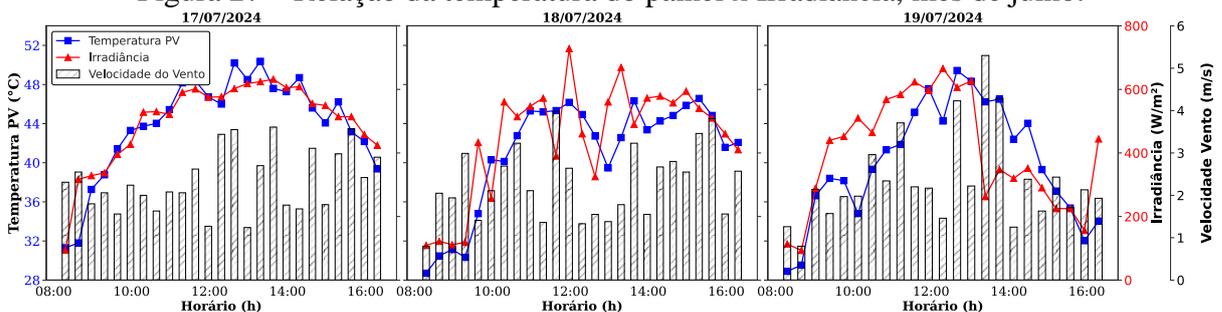


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 26 para o mês de junho, mostra que durante as primeiras horas de baixa incidência solar sobre a superfície do módulo, na faixa de 50 W/m^2 a 250 W/m^2 , a temperatura variou entre 29°C e 35°C para os dias do experimento. A temperatura aumenta gradativamente ao passar das horas, devido à intensidade da radiação solar aumentar. As máximas das temperaturas alcançadas pelo painel ocorrem após as 13:00h, momento no qual tem-se a irradiância solar atingindo sua máxima, na faixa de 500 W/m^2 a 800 W/m^2 , e temperaturas na faixa de 48°C a 52°C . Vale destacar que, no dia 21 de junho, após as 13:00, observou-se um afastamento das curvas de irradiância e temperatura do painel. Esse fenômeno ocorreu devido a ventos constantes e mais intensos, entre $2,5 \text{ m/s}$ e $3,2 \text{ m/s}$, que resfriaram as células fotovoltaicas, mesmo sob altos índices de radiação.

A Figura 27 mostra a temperatura do painel e da irradiância para o mês de julho.

Figura 27 – Relação da temperatura do painel x Irradiância, mês de julho.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

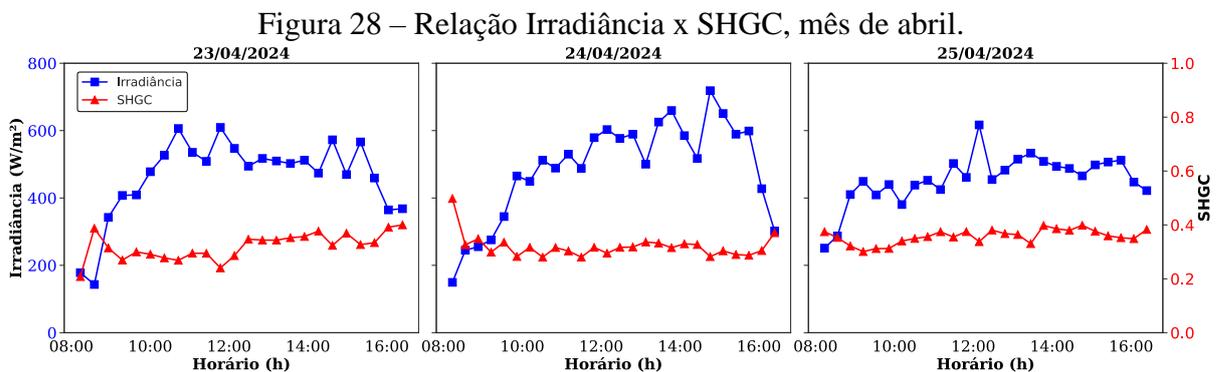
A Figura 27 revela nos primeiros momentos do dia, as curvas apresentam baixa incidência solar sobre a superfície do módulo, na faixa de 150 W/m^2 a 200 W/m^2 , a temperatura, variou entre 28°C e 32°C para os dias do experimento. A temperatura aumenta gradativamente ao passar das horas, devido intensidade da radiação solar aumentar as curvas ficam bem próximas. As máximas das temperaturas alcançadas pelo painel ocorrem após as 12:00h, momento no qual tem-se a irradiância solar atingindo sua máxima, na faixa de 600 W/m^2 a 750 W/m^2 , e temperaturas na faixa de 46°C a 51°C .

A partir do horário das 14:30h, a temperatura do módulo, mesmo em momentos de alta radiação solar. Essa dinâmica envolve as trocas térmicas por convecção do meio externo e a superfície do módulo. Esses momentos são intensificados pelo aumento da velocidade do vento, que variou de 0,8 m/s a 5,30 m/s durante os dias de experimento, aliado à queda da temperatura ambiente, potencializando ainda mais a redução da temperatura do painel. Vale salientar que para o processo de troca de calor ser bem sucedido entre painel e ambiente, está diretamente relacionado a velocidade do vento e da temperatura do meio, permitindo então uma dissipação de calor de forma eficiente.

No período de baixa irradiância, para o dia 18, no horário entre 12:00h e 13:00h, o painel mantém sua temperatura elevada devido à cavidade de ar que o separa do ambiente interno. Mesmo com a temperatura controlada entre 21°C e 24°C, há diferenças térmicas entre o painel e a janela de vidro, porém insuficientes para influenciar significativamente no seu resfriamento. Além disso, como as medições foram realizadas em curtos intervalos de tempo, a redução da radiação solar não causa um impacto real no resfriamento do módulo.

5.1.1 SHGC e Mapa de Calor

Para avaliar o ganho de calor através da janela no mês de abril, a Figura 28 mostra o coeficiente de ganho de calor (SHGC) durante os experimentos. De acordo com Çengel (2012), em uma janela de vidro simples com espessura de 5 mm, o SHGC é de 0,84, enquanto para janelas de vidro duplo esse valor diminui para 0,72.

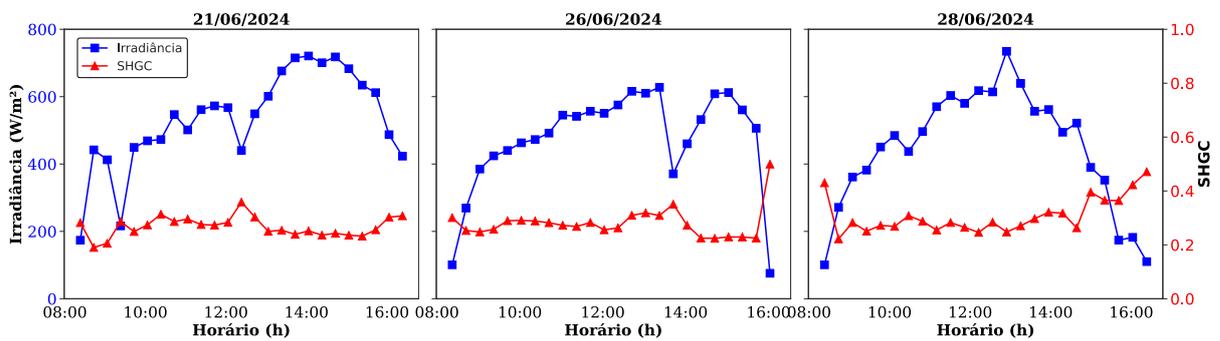


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 28 mostra como a intensidade da luz solar afeta o SHGC durante o mês de abril. Quando o sol está mais baixo no céu, muda o ângulo de inclinação que o sol incide sobre o painel nas propriedades de refletir, absorver e transmitir a luminosidade solar. Nas primeiras horas do experimento, inicia com baixa irradiância solar, abril ficou abaixo de 300W/m², os

painéis refletiam menos e deixava mais calor passar para dentro da sala em uma menor, para os dias analisados os valores de SHGC foram 0,39 e 0,49 valores obtidos no início da manhã e fim de tarde. Todavia, com o aumento da incidência solar sobre a face do painel, a intensidade variou de 400 W/m² a 720 W/m². Essa mudança fez com que menos calor fosse transmitindo para dentro da sala, gerando uma redução dos valores de SHGC, variou de 0,20 a 0,30 entre as 10:00 e 15:30.

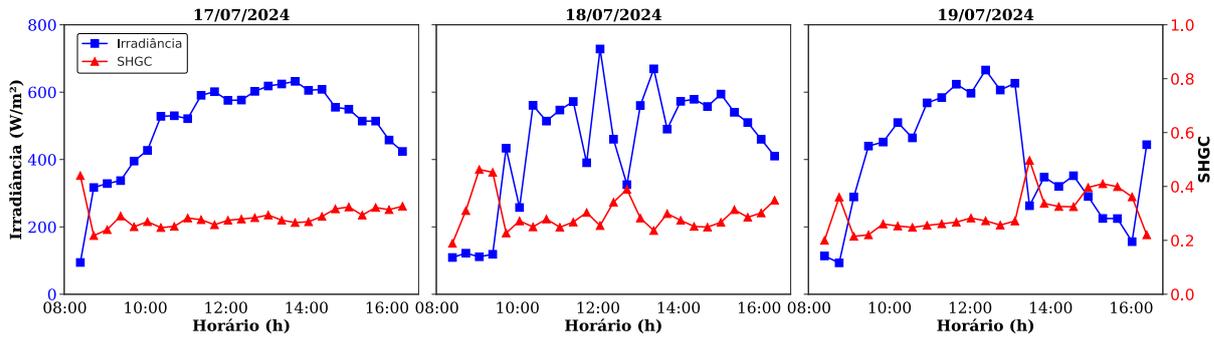
Figura 29 – Relação Irradiância x SHGC, mês de junho



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Figura 29, revela a mesma relação entre a irradiância e o SHGC agora para o mês de junho. Nos horários com baixa intensidade sola, a irradiância ficou abaixo de 300W/m², os painéis refletiam menos a luz e deixavam passar mais calor para o ambiente interno isso explica os valores mais alto do SHGC, entre 0,47 e 0,49 no horário antes das 10:00h e depois das 15:40h. Alguns momentos específicos mostraram quedas irradiância devido a presença de nebulosidade durante a coleta e os picos de irradiância ocorreram por volta das 13:00h. Todavia, com o aumento da incidência solar sobre a superfície do painel, variando 400 W/m² a 735 W/m², os painéis passaram a refletir e absorver mais energia. Como consequência desse efeito menor calor era transmitido para o interior da sala como mostra os valores menos de SHGC, variou de 0,20 a 0,36 valores mais constantes entre 10:00 as 15:00.

Figura 30 – Relação Irradiância x SHGC, mês de julho

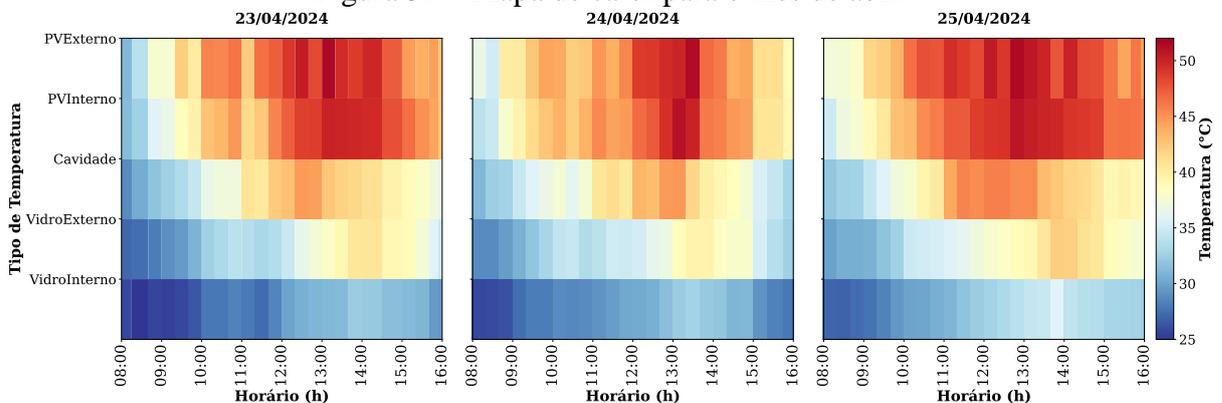


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 30 mostra como a intensidade do sol afetou o SHGC. Nas primeiras horas do experimento registou baixa irradiância, que foram de 90 W/m^2 a 350 W/m^2 . Nos dias analisados, os maiores valores de SHGC foram 0,47 e 0,49 para o horário antes das 10:00 e depois das 15:30h. Os dias 18 e 19 de julho, as curvas apresentaram comportamento irregulares devido à incidência solar instável, causada pela presença de nuvens e chuva. Durante a redução da irradiância, os valores de SHGC tendem a aumentar, atingindo 0,49 às 13:00h do dia 18 e 0,38 às 13:40h do dia 19. No entanto, com o aumento da incidência solar sobre a superfície do painel, na faixa de 400 W/m^2 a 730 W/m^2 , os valores de SHGC, variaram de 0,18 a 0,29, entre as 10:00h até as 15:00h.

Para uma análise mais detalhada do comportamento térmico, as temperaturas foram monitoradas nas superfícies onde os termopares foram instalados. Esses termopares foram posicionados na cavidade de ar, nas faces interna e externa do painel fotovoltaico, e nas superfícies interna e externa da janela de vidro. A partir desses dados, foi elaborado um mapa de calor dessas superfícies, conforme mostrado na Figura 31, para os dias do mês de abril.

Figura 31 – Mapa de calor para o mês de abril

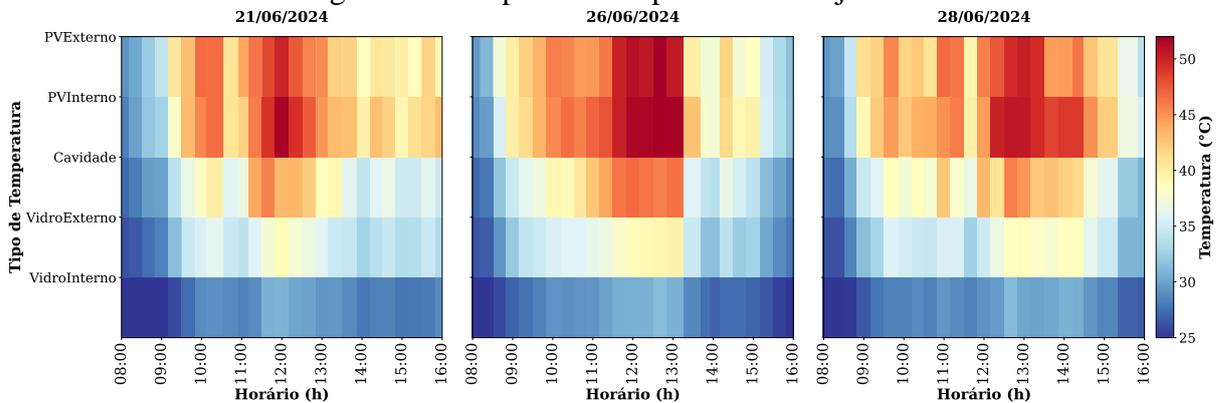


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 31 apresenta a distribuição de calor ao longo do dia para os dias de experimento no mês de abril para as diferentes camadas do sistema (PVExterno, PVInterno, Cavidade, VidroExterno, VidroInterno). Observa-se aumento das temperaturas entre as 10:00h e 14:00h, com valores máximos registrados por volta das 13:00h, 51,5°C. Para a superfície externa do módulo (PVExterno), as temperaturas ultrapassaram os 50°C no pico solar. A temperatura da superfície interna do módulo (PVInterno), acompanhou esse movimento, mas com valores ligeiramente inferiores, efeito gerado pela dissipação térmica da cavidade de ar. A cavidade de ar apresentou temperaturas intermediárias, 30°C a 44°C, sugerindo efeito de isolamento térmico. O vidro externo apresentou temperaturas mais altas em comparação ao vidro interno, indicando retenção do calor, ou seja, reduzindo a transmissão direta para a sala do *container*.

Pequenas variações ao longo do dia estão relacionadas a mudanças na velocidade do vento ou à presença de nuvens. As altas temperaturas afetam diretamente a eficiência de conversão do módulo fotovoltaico, que tende a diminuir à medida que a temperatura aumenta.

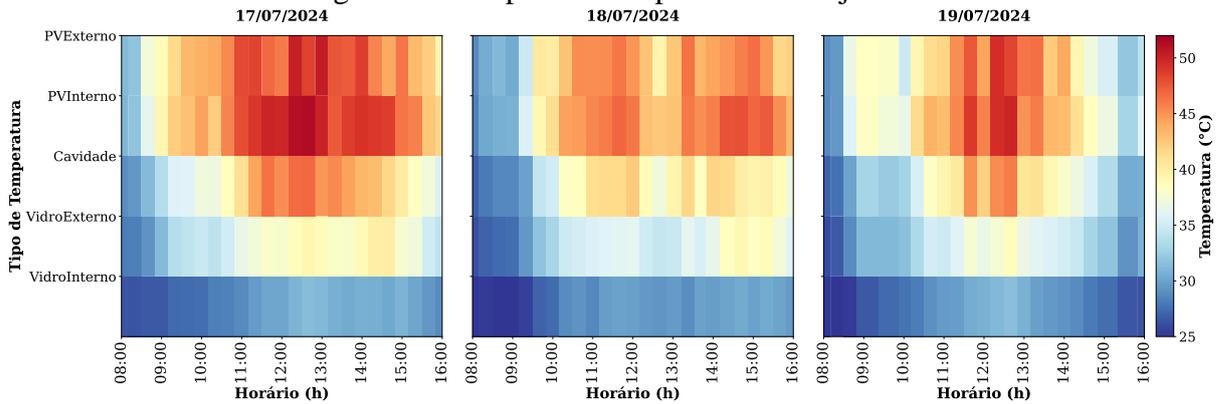
Figura 32 – Mapa de calor para o mês de junho.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para o mês de junho a Figura 32 mostra a temperatura que PVExterno atingiu valores acima dos 50°C entre 12:00h e 13:00h, com um rápido declínio após esse período. O PVInterno apresentou comportamento semelhante, mas com temperaturas ligeiramente menores, mas elevou a temperatura após as 14:00, indicando resfriamento na parte externa em virtude da presença de vento. A cavidade manteve valores médios, indicando isolamento térmico parcial. O VidroExterno aqueceu ao longo da manhã, mas registrou temperaturas inferiores às do PV, enquanto o VidroInterno permaneceu mais estável e abaixo dos 35°C, comprovando o efeito isolante da estrutura. O rápido resfriamento após 13:00h pode estar relacionado à redução da irradiância ou aumento da ventilação.

Figura 33 – Mapa de calor para o mês de julho.



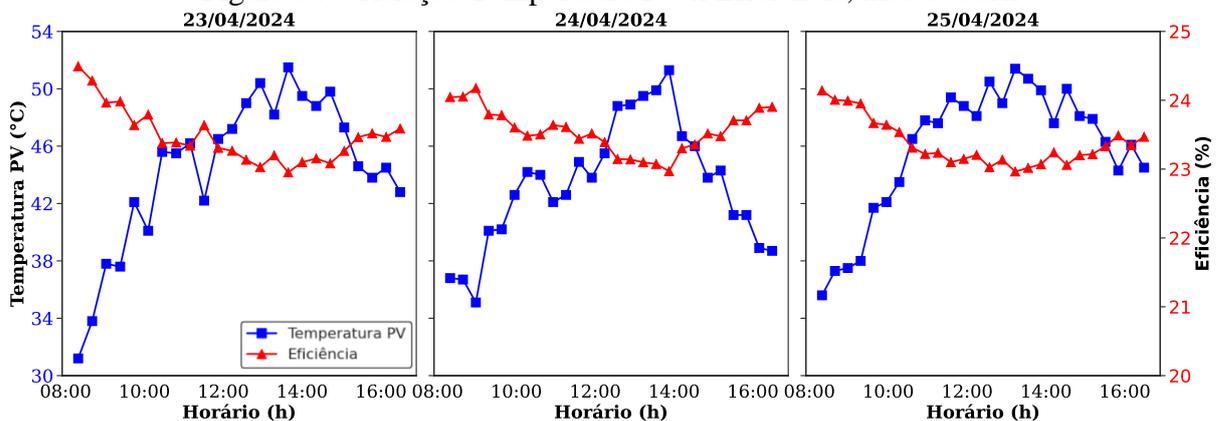
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 33 apresenta as temperaturas do PVExterno e PVInterno atingiram valores próximos a 45°C entre 12:00h e 15:00h, com variações menores ao longo do período da tarde. A cavidade apresentou temperaturas intermediárias, evidenciando a dissipação térmica parcial. O VidroExterno aqueceu gradualmente, mas manteve temperaturas inferiores às do PV, enquanto o VidroInterno permaneceu mais estável, abaixo de 35°C, destacando o efeito isolante da estrutura. Diferentemente de outros dias, o dia 19 de julho houve um resfriamento abrupto após o pico térmico, sugerindo influência de fatores externos como vento ou nuvem.

5.1.2 Eficiência do BIPV

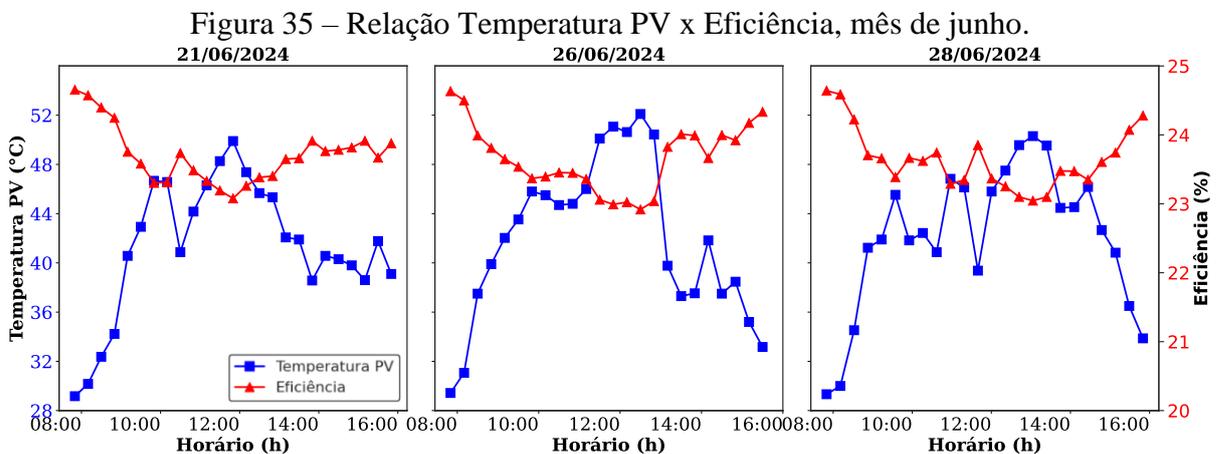
Juntamente com a análise da temperatura em relação à irradiância, é possível avaliar a eficiência do módulo à medida que sua temperatura aumenta. Como discutido na metodologia, a Equação 22 descreve essa relação proporcional, indicando que, para aumentos significativos na temperatura, haverá uma redução da eficiência do módulo. A Figura 34, por sua vez, traz as variações da eficiência em função da temperatura do módulo para os dias dos experimentos.

Figura 34 – Relação Temperatura PV x Eficiência, mês de abril



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 34 mostra a relação entre a temperatura do painel fotovoltaico (PV) e sua eficiência o mês de abril. Observa-se que a temperatura do PV aumenta no período das manhãs, atingindo máximas entre 12:00h e 14:00h, assumindo temperaturas na faixa de 45,5°C a 51,5°C, gerando uma eficiência em torno de 22,9%. Após o pico térmico, a temperatura começa a diminuir no período da tarde, favorecendo uma leve recuperação da eficiência. Para os momentos em que a temperatura permaneceu abaixo dos 45°C, a eficiência obteve máximas de 24%. Essa tendência confirma o impacto negativo do aumento da temperatura na conversão de energia do módulo fotovoltaico, evidenciando a necessidade de estratégias de resfriamento para mitigar perdas de desempenho.

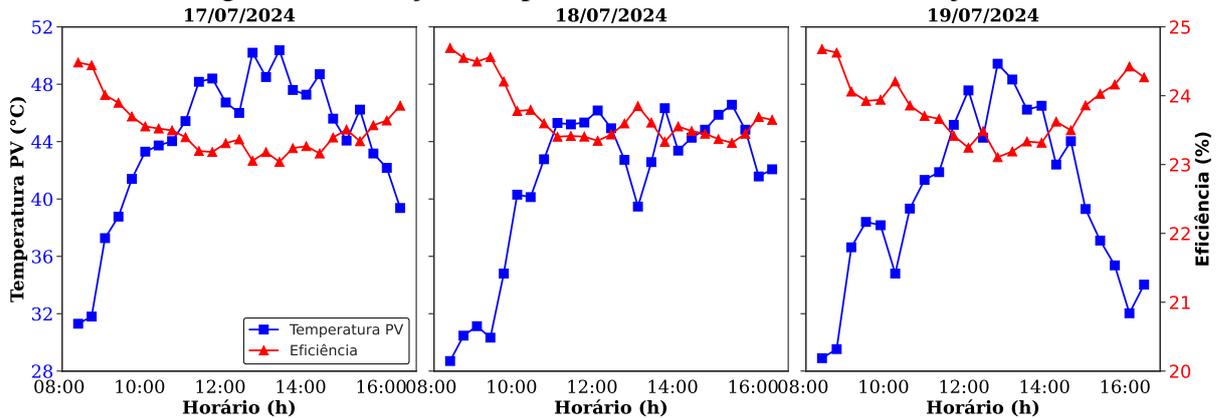


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 35 apresenta a relação entre temperatura do painel fotovoltaico (PV) e eficiência para o mês junho de 2024. Logo no começo do dia, quando os módulos ainda estão mais frios, possui um melhor desempenho. Porém, conforme o sol se intensifica, as temperaturas atingem valores mais altos entre 12:00h e 14:00h, com temperaturas entre 40,8°C à 52,1°C, e a eficiência diminui gradualmente. Após o término desse período, a temperatura começa a decair, permitindo uma leve recuperação da eficiência.

Em comparação com abril, as temperaturas do painel fotovoltaico em junho são mais elevadas, o que intensifica a perda de eficiência. Isso evidencia como o aumento da temperatura influencia negativamente a conversão de energia no módulo.

Figura 36 – Relação Temperatura PV x Eficiência, mês de julho.

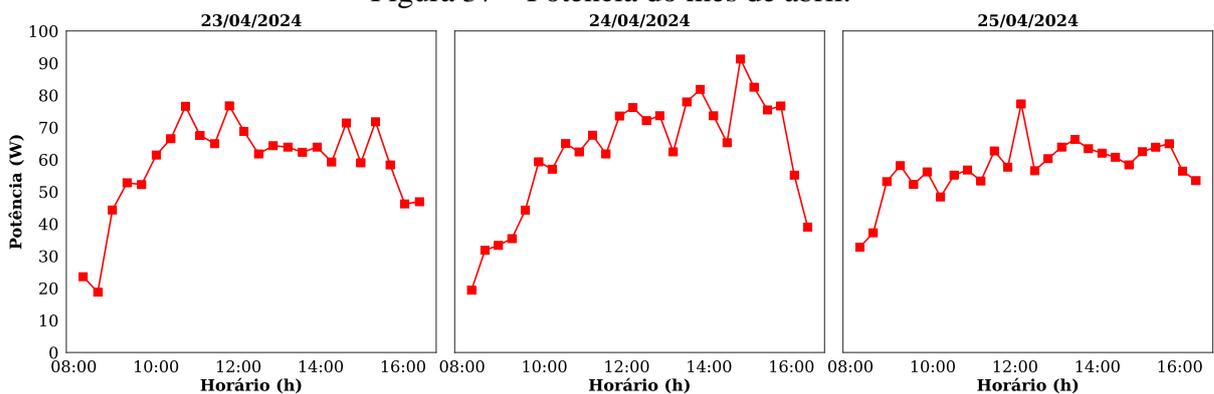


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Por fim, a Figura 36, para o mês de julho, exibe uma relação semelhante entre temperatura do painel fotovoltaico (PV) e eficiência, confirmando a tendência observada nos meses anteriores. A temperatura do PV aumenta durante a manhã, atingindo valores máximos entre 12:00h e 14:00h, temperaturas entre 39,3°C a 50,3°C, enquanto a eficiência apresenta uma leve queda nesse período. No entanto, comparando ao mês de junho, as temperaturas aparecem mais baixas, isso pode estar relacionado às variações climáticas. Novamente fica constatado a influência térmica na conversão energética.

A potência gerada pelo módulo fotovoltaico pode ser visualizada na Figura 37, para o mês de abril. Essa potência está diretamente associada à eficiência do módulo, a qual, por sua vez, é influenciada pela temperatura alcançada pelo sistema em funcionamento.

Figura 37 – Potência do mês de abril.

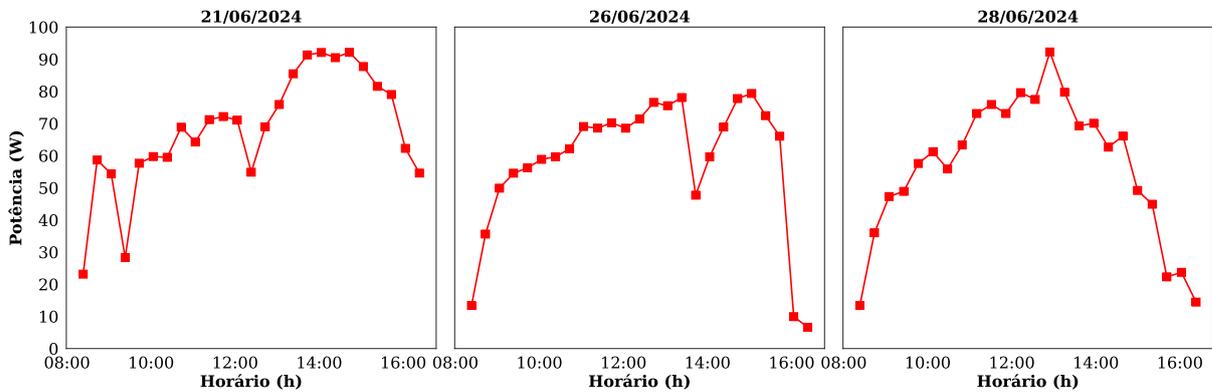


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 37 mostra a variação da potência gerada pelo módulo solar ao longo dos dias 23, 24 e 25 de abril de 2024, evidenciando um aumento progressivo durante a manhã, um pico entre 12:00h e 14:00h, alcançando valores de potência na faixa de 61 W a 82 W, e uma queda gradual à tarde. Além do mais, a distribuição dos valores sugere forte influência da radiação

solar. As flutuações observadas podem estar associadas a variações na radiação solar, possivelmente causadas por nebulosidade intermitente.

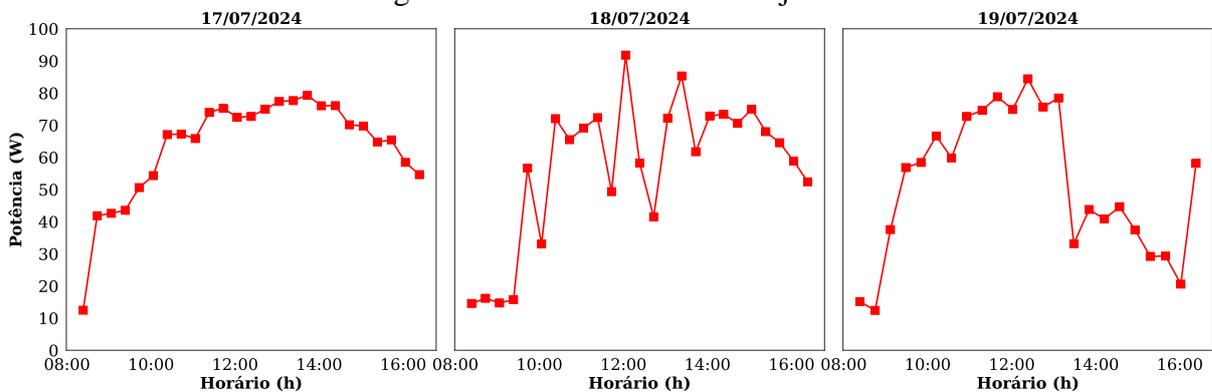
Figura 38 – Potência do mês de junho.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 38 para o mês de junho, revela um comportamento característicos de sistemas fotovoltaicos na geração de energia, estabelecendo um aumento gradual no período da manhã e início da tarde, e uma redução progressiva até o fim do experimento. Observa-se algumas mudanças da potência no decorrer dos dias possivelmente pela presença de nuvens. As máximas da potência entre as 12:30h e 14:00h, obteve valores próximos a 92 W. Os momentos de variações da potência, ocorre devido aos momentos de coleta serem próximos isso não remete a baixa irradiância para o período, ocasionados principalmente pela presença de nuvens. A estabilidade das curvas nos dias analisados propõe dias com menores interferências por condições climáticas, apesar de oscilações terem sido registradas.

Figura 39 – Potência do mês de julho.



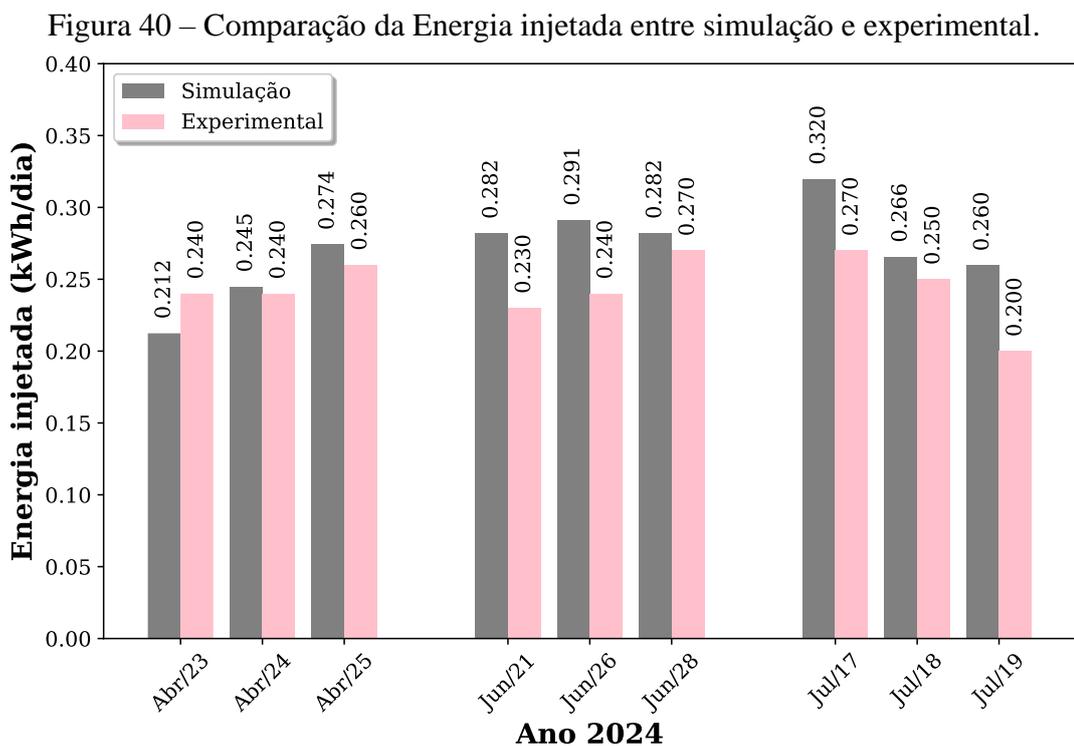
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 39 para o mês de julho, apresentou variações da potência para os dias analisados. O início dos experimentos mostrou aumento progressivo no período da manhã, com

picos em torno de 80 W a 90 W, para o horário das 12:00h às 14:00, seguido de uma redução gradual após esse período. Essas variações aconteceram principalmente por causa do tempo nublado nos dias em que foram realizadas as medições. De modo geral, a geração para o mês de julho foi semelhante a junho, mas apresentou maior instabilidade da potência em determinados dias, atribuídos ao clima.

O módulo fotovoltaico silício monocristalino foi instalado na fachada voltada para orientação norte, com inclinação de 90°, como o posicionamento do sol ao longo do ano varia para o hemisfério sul este incide diretamente sobre a janela alguns meses do ano, o que limitou a geração de energia do sistema BIPV em comparação a sistemas com inclinação otimizada para o local específico. Ao examinar os dias estudados o padrão de geração foi próximo, mas com diferenças ligeiramente nos picos de geração, evidenciando a influência do clima local, como variação na cobertura de nuvens e velocidade do vento. Apesar das limitações estabelecidas pela orientação e inclinação do painel, os dados indicam um nível significativo de geração ao longo do dia.

Os resultados experimentais validaram as simulações realizadas no *software PVsyst* versão 7.4, que consideraram as condições ambientais reais de temperatura, radiação solar e ângulos de incidência. A Figura 40 mostra que os valores simulados e medidos apresentaram tanto convergências quanto divergências no período realizado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Em abril, os valores simulados e experimentais apresentaram uma conformidade significativa. Os valores experimentais foram 0,24, 0,24 e 0,26 kWh/dia, com média de 0,25 kWh/dia, enquanto os valores simulados foram 0,29, 0,28 e 0,28 kWh/dia, e uma média de 0,24 kWh/dia. Essa diferença pode ser atribuída às condições climáticas típicas do mês, que, apesar do início do inverno, ainda apresentam boa disponibilidade de radiação solar direta e baixa variabilidade atmosférica, favorecendo a precisão das simulações.

Em junho, ocorreu uma discrepância significativa entre os métodos. Nos dias 21, 26 e 28 os valores simulados ficaram em 0,28, 0,29 e 0,28 kWh/dia, com média de 0,28 kWh/dia, enquanto os dados experimentais registraram 0,23, 0,24 e 0,27 kWh/dia, média de 0,24 kWh/dia. A variação reflete ao aumento da nebulosidade, típica do período, que reduziu a radiação direta e, conseqüentemente a produção de energia.

Em julho, as diferenças se acentuaram ainda mais. Os valores reais foram 0,27, 0,25 e 0,20 kWh/dia, com média de 0,24 kWh/dia, contra 0,31, 0,26 e 0,25 kWh/dia nas simulações, com média de 0,28 kWh/dia. Esse comportamento pode ser atribuído as condições climáticas de inverno em João Pessoa, aumento da cobertura de nuvens e déficit na incidência de radiação direta, fatores que impactam diretamente no rendimento dos módulos. Vale ressaltar que o modelo de simulação, embora confiável, pode não captar com precisão essas variações, pois se baseia em dados climáticos médios.

6 CONCLUSÃO

O estudo investigou experimentalmente o desempenho térmico e elétrico de um módulo fotovoltaico de silício monocristalino integrado a um *container* com fachada voltada para o Norte e inclinado a 90°. Considerou-se não apenas a potência gerada ao longo dos dias analisados, mas também a relação entre a temperatura do módulo fotovoltaico e sua eficiência, a relação entre a irradiância e o SHGC, os mapas de calor e a interação entre a temperatura do módulo e a irradiância. Isso reflete no quanto a radiação solar influencia diretamente na eficiência do sistema, sendo o clima do local um fator determinante para análise do desempenho fotovoltaico.

No desempenho elétrico, a análise da potência evidenciou padrões distintos entre os meses de abril, junho e julho. Em abril, a geração foi mais uniforme, com picos de potência para os horários de maior incidência solar, próximo às 12:00h, remetendo a dias ensolarados. Por sua vez, os meses de junho e julho performaram com oscilações significativas na potência ao longo do dia, indicando uma condição climática com maior variabilidade de presença de nuvens.

Além disso, a eficiência revelou o comportamento esperado, à medida que a temperatura da célula fotovoltaica tendia a aumentar, a eficiência tendia a diminuir. Nesse contexto, a relação de inversão ocorre devido ao aquecimento sobre os semicondutores reduzindo a tensão do circuito, atuando diretamente na eficiência do módulo. Assim, a necessidade de buscar soluções que possam atuar na dissipação do calor para mitigar as perdas térmicas.

Os resultados do SHGC mostraram que, durante períodos de intensa irradiância solar, os valores foram mais altos, indicam maior ganho térmico nas superfícies do módulo fotovoltaico e da janela de vidro. Esse efeito é fundamental nas aplicações de arquiteturas bioclimáticas e de conforto térmico, já que a escolha por matérias mais eficientes e sistemas de sombreamento pode ajudar a reter o calor nas edificações.

O mapa de calor permitiu visualizar a distribuição de calor sobre as superfícies analisadas ao longo do dia. Foi possível identificar os horários de máxima radiação e as temperaturas atingidas pelo módulo, evidenciando a relação direta entre a irradiância e o aquecimento do painel. Com isso, torna-se possível buscar soluções para o resfriamento do módulo, melhorando sua performance em climas mais quentes.

Por fim, a relação entre temperatura do painel solar e a irradiância destaca a importância do controle térmico. Apesar de a alta irradiância ser essencial na produção de energia, aquece as células, reduzindo sua eficiência.

Diante do resultado observado, conclui-se que fatores climáticos e térmicos exercem grandes influências para o sistema fotovoltaico, necessitando de acompanhamento contínuo para otimização da geração de energia. A potência, temperatura, irradiância e SHGC são variáveis fundamentais para entender o desempenho de um sistema BIPV, permitindo aplicar estratégias e configurações, que ajudem a minimizar as perdas térmicas.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Avaliar o comportamento térmico e elétrico do sistema BIPV com ventilação natural e forçada, determinando o espaçamento ideal da cavidade de ar para maximizar a eficiência.
- Investigar o desempenho térmico e elétrico do módulo fotovoltaico monocristalino com o *container* orientado para Leste, Oeste e Sul, comparando os resultados com os obtidos no presente estudo.
- Analisar o desempenho utilizando novos materiais integrados a edificações, considerando eficiência elétrica, impacto estético e durabilidade em diferentes condições climáticas.

REFERÊNCIAS

ABOJELA, Zuher R. Khalifa; DESA, Mohd Khairunaz Mat; SABRY, Ahmad H. Current prospects of building-integrated solar PV systems and the application of bifacial PVs. **Frontiers in Energy Research**, v. 11, p. 1164494, 2023. doi: 10.3389/fenrg.2023.1164494.

ALHAMMADI, Noura; RODRIGUEZ-UBINAS, Edwin; ALZAROUNI, Sarah; ALANTALI, Mohamed. Building-integrated photovoltaics in hot climates: Experimental study of CIGS and c-Si modules in BIPV ventilated facades. **Energy Conversion and Management**, v. 274, p. 116408, 2022. ISSN 0196-8904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116408>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15220-3: Desempenho Térmico em Edificações — Parte 3: Zonas Bioclimáticas Brasileiras e Diretrizes Construtivas para Habitações de Baixo Custo. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 7. ed. Hoboken: Wiley, 2011.

BOAFO, Fred Edmond; KIM, Jin-Hee; AHN, Jong-Gwon; KIM, Sang-Myung; KIM, Jun-Tae; ZHANG, Liangliang. Study on thermal characteristics and electrical performance of a hybrid building integrated photovoltaic (BIPV) system combined with vacuum insulation panel (VIP). **Energy and Buildings**, v. 277, p. 112574, 2022. ISSN 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112574>.

BRITO, Sérgio S. Potencial Solar—SunData v3.0. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB). Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 05 nov. 2024.

CALISE, F.; CAPPIELLO, F. L.; CIMMINO, L.; DENTICE D'ACCADIA, M.; VICIDOMINI, M. Dynamic Simulation and Thermo-economic Analysis of a Hybrid Renewable System Based on PV and Fuel Cell Coupled with Hydrogen Storage. **Energies**, v. 14, p. 7657, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14227657>.

ÇENGEL, Yunus A. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 4. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2012.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4. ed. Nova York: Wiley, 2013.

EIA. Serviços de Dados Online, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/buildings>. Acesso em: 16 fev. 2024.

GASSAR, Abdo Abdullah Ahmed; CHA, Seung Hyun. Review of geographic information systems-based rooftop solar photovoltaic potential estimation approaches at urban scales. **Applied Energy**, v. 291, p. 116817, 2021.

GHOSH, Aritra. Potential of building integrated and attached/applied photovoltaic (BIPV/BAPV) for adaptive less energy-hungry building's skin: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, p. 123343, 2020.

HOSEINZADEH, Pegah; KHALAJI ASSADI, Morteza; HEIDARI, Shahin; KHALATBARI, Mohammad; SAIDUR, R.; HAGHIGHAT NEJAD, Kiana; SANGIN, Hamed. Energy performance of building integrated photovoltaic high-rise building: Case study, Tehran, Iran. **Energy and Buildings**, v. 235, p. 110707, 2021. ISSN 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110707>.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normais climatológicas do Brasil, 2021. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 20 jan. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Organização do Território: Malhas Territoriais. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 07 nov. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Dados de Irradiação para o Estado da Paraíba. Disponível em: https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017_PB.html#. Acesso em: 07 nov. 2024.

INSTRUTHERM. Medidor de Energia Solar Digital Portátil – Mod. MES 100. Disponível em: <https://www.instrutherm.com.br/medidor-de-energia-solar-digital-portatil-mod-mes-100>. Acesso em: 26 fev. 2024.

International Energy Agency – IEA. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/>. Acesso em: 15 dez. 2023.

JAMIL, I.; LUCHENG, H.; HABIB, S.; AURANGZEB, M.; ALI, A.; AHMED, E. M. Performance Ratio Analysis Based on Energy Production for Large-Scale Solar Plant. **IEEE Access**, v. 10, p. 5715-5735, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3141755.

KALOGIROU, S. A. **Engenharia de energia solar: processos e sistemas**. Tradução: Luciana Arissawa. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016. ISBN 978-85-352-8004-3.

KALTAMAIER, G.; JUNIOR, J. U.; SANTOS, F. F. Construção e ensaios de um protótipo BIPV/T na cidade de Curitiba. Ceará: Anais CEBENS 2020. ISSN 978-65993338-0-4. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/938>. Acesso em: 02 abr. 2024.

KELLY, C.; SEN, B.; TATARI, O. A system dynamics analysis of the alternative roofing market and its potential impacts on urban environmental problems: a case study in Orlando, Florida. **Resources, Conservation and Recycling**, [s.l.], v. 153, p. 104556, fev. 2020.

KLENK, M. Bifacial PV systems and yield data (bifacial gain). In: **Bifacial photovoltaics: Technology, applications and economics**. 2018. doi:10.1049/PBPO107E_ch5.

LAMNATOU, Chr.; VAILLON, R.; PAROLA, S.; CHEMISANA, D. Photovoltaic/thermal systems based on concentrating and non-concentrating technologies: Working fluids at low,

medium and high temperatures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, p. 110625, 2021. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110625>.

LI, D. H. W.; YANG, L.; LAM, J. C. Zero energy buildings and sustainable development implications – A review. **Energy**, [s.l.], v. 54, p. 1-10, jun. 2013.

LI G, ZHANG G, HE W, JI J, Lv S, CHEN X, et al. Performance analysis on a solar concentrating thermoelectric generator using the micro-channel heat pipe array. **Energ Conver Manage** 2016;112:191–8.

LUO, YONGQIANG; ZHANG, LING; LIU, ZHONGBING; XIE, LEI; WANG, XILIANG; WU, JING. Experimental study and performance evaluation of a PV-blind embedded double skin façade in winter season. **Energy**, v. 165, Part B, p. 326-342, 2018. ISSN 0360-5442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.175>.

MAGHRABIE, HUSSEIN M.; ELSAID, KHALED; SAYED, ENAS TAHA; ABDELKAREEM, MOHAMMAD ALI; WILBERFORCE, TABBI; OLABI, A. G. Building-integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) systems: Applications and challenges. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 45, p. 101151, 2021. ISSN 2213-1388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101151>.

MARKVART, T. **Solar Electricity**. 2. ed. Chichester: Wiley, 2000.

MINIPA. Anemômetro Digital MDA-20. Disponível em: <https://www.minipa.com.br/temperatura-e-ambiente/anemometros/136-md-20>. Acesso em: 26 fev. 2025.

MODEST, M. F. **Radiative Heat Transfer**. 3. ed. Nova York: Academic Press, 2013.

NOVUS. Data Logger LogBox Wi-Fi. Disponível em: <https://www.novus.com.br/pt/produto/data-loggers/logbox-wi-fi>. Acesso em: 26 fev. 2024.

PARAÍBA. Governo do Estado. Climatologia do Estado da Paraíba. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/573985/2/Climatologia%20do%20Estado%20da%20Paraiba.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2025.

PENG, J.; CURCIJA, D. C.; THANACHAREONKIT, A.; LEE, E. S.; GOUDEY, H.; JONSSON, J.; SELKOWITZ, S. E. Comparative study on the overall energy performance between photovoltaic and Low-E insulated glass units. **Solar Energy**, v. 214, p. 443-456, 2021. ISSN 0038-092X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.006>.

PETERS, I. M.; RODRIGUEZ GALLEGOS, C. D.; SOFIA, S. E.; BUONASSISI, T. The value of efficiency in photovoltaics. **Joule**, v. 3, p. 2732–2747, 2019. DOI: [10.1016/j.joule.2019.07.028](https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.07.028).

PFROMMER, P.; LOMAS, K. J.; SEALE, C.; KUPKE, Chr. The radiation transfer through coated and tinted glazing. **Solar Energy**, v. 54, n. 5, p. 287-299, 1995. ISSN 0038-092X. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(94\)00132-W](https://doi.org/10.1016/0038-092X(94)00132-W).

PVSYST. Software PVsyst. Disponível em: <https://www.pvsyst.com/about-us/>. Acesso em: 10 jan. 2024.

QGIS. Visão Geral do Software. Disponível em: <https://qgis.org/project/overview/>. Acesso em: 01 nov. 2024.

QUESADA, Guillermo; ROUSSE, Daniel; DUTIL, Yvan; BADACHE, Messaoud; HALLÉ, Stéphane. A comprehensive review of solar facades. Transparent and translucent solar facades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 16, n. 5, p. 2643-2651, 2012.

REDDY, P. Status of BIPV and BAPV system for less energy-hungry building in India-a review. *Applied Sciences*, Suíça, v. 10, n. 7, 2020. doi:10.3390/app10072337.

ROBERTS, F.; YANG, S.; DU, H.; YANG, R. Effect of semi-transparent a-Si PV glazing within double-skin façades on visual and energy performances under the UK climate condition. *Renewable Energy*, v. 207, p. 601-610, 2023. ISSN 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.023>.

SCHUETZE, T.; WILLKOMM, W.; ROOS, M. Development of a Holistic Evaluation System for BIPV Façades. *Energies*, [s.l.], v. 8, n. 6, p. 6135-6152, 19 jun. 2015.

SERRA-FLORENSA, R.; COCH-ROURA, H. **Arquitectura y energía natural**. Espanha: Ediciones UPC, 1991.

SHAKOURI, Mahdi; GHADAMIAN, Hossein; NOORPOOR, Alireza. Quasi-dynamic energy performance analysis of building integrated photovoltaic thermal double skin façade for middle eastern climate case. *Applied Thermal Engineering*, v. 179, p. 115724, 2020.

SHARPLES, S., CHARLESWORTH, P. S. Full-scale measurements of wind-induced convective heat transfer from a roof-mounted flat plate solar collector. *Solar Energy*, volume 62, Issue 2, 1998, Pages 69-77, ISSN 0038-092X. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00119-9](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00119-9).

TRIPATHY, M.; SADHU, P. K.; PANDA, S. K. A critical review on building integrated photovoltaic systems. *Energies*, [s.l.], v. 8, n. 6, p. 6135-6152, 2015.

UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México). Primer Diplomado Internacional em Eficiência Energética y Confort Adaptativo. Ciudad de México: MX, 2022.

VENTURA, José Miguel Gião Beja. Estudo experimental de um sistema BIPV/T-PCM. 2014. Tese de Doutorado.

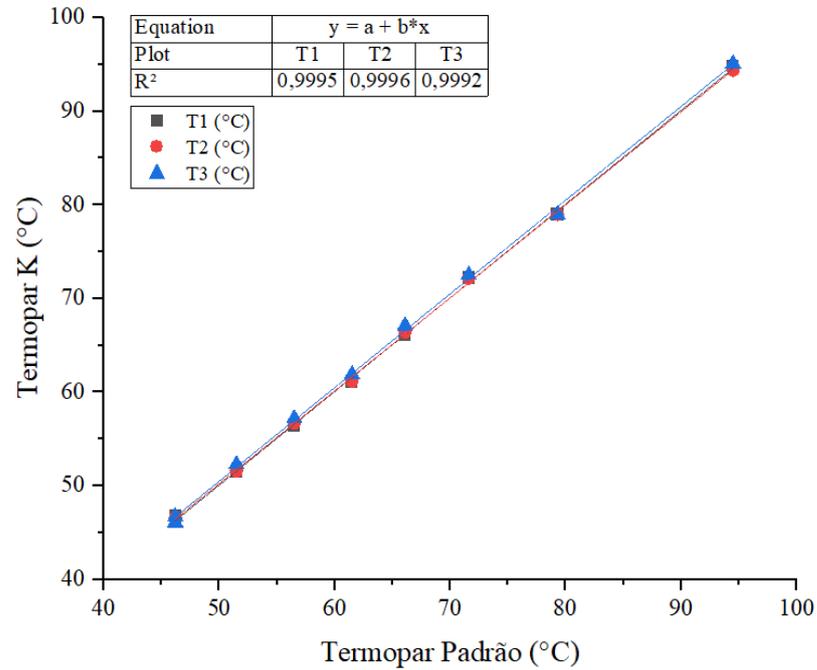
WANG, MENG; PENG, JINQING; LI, NIANPING; YANG, HONGXING; WANG, CHUNLEI; LI, XUE; LU, TAO. Comparison of energy performance between PV double skin facades and PV insulating glass units. *Applied Energy*, v. 194, p. 148-160, 2017. ISSN 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.019>.

ZAHEDI, A. Solar photovoltaic (PV) energy; latest developments in the building integrated and hybrid PV systems. *Renewable Energy*, v. 31, p. 711-718, 2006. doi: 10.1016/j.renene.2005.08.007.

ZHAO, YULONG; LI, WENJIE; ZHANG, GUOYIN; LI, YANZHE; GE, MINGHUI; WANG, SHIXUE. Experimental performance of air-type BIPV/T systems under different climate conditions. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 60, p. 103458, 2023. ISSN 2213-1388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103458>.

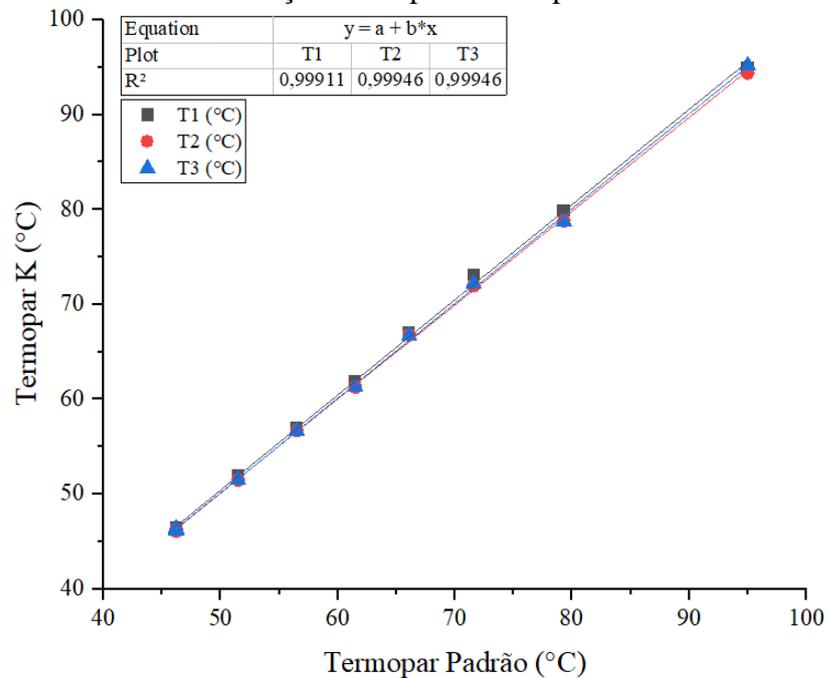
APÊNDICE A– CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES

Figura 1 - Curva de calibração termopares da superfície externa do módulo.



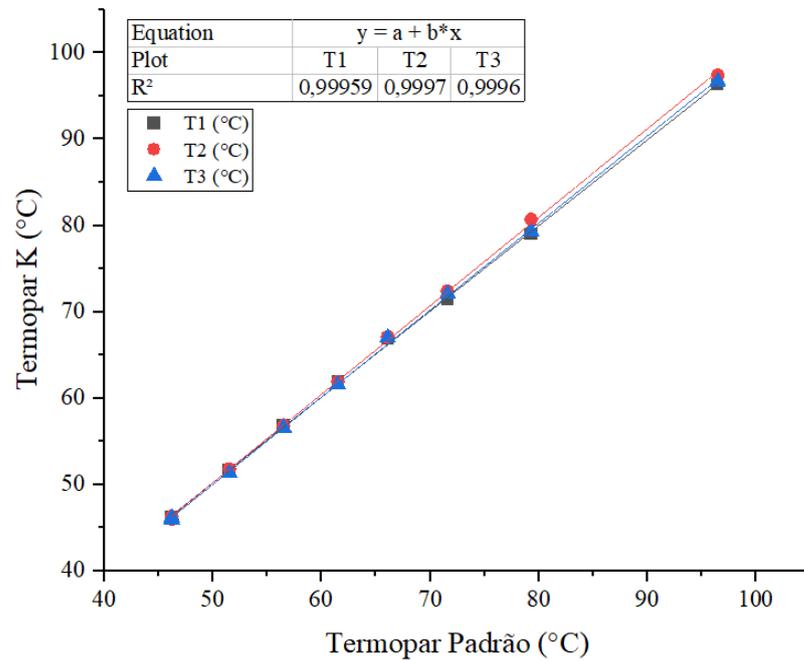
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 2 – Curva de calibração termopares da superfície interna do módulo.



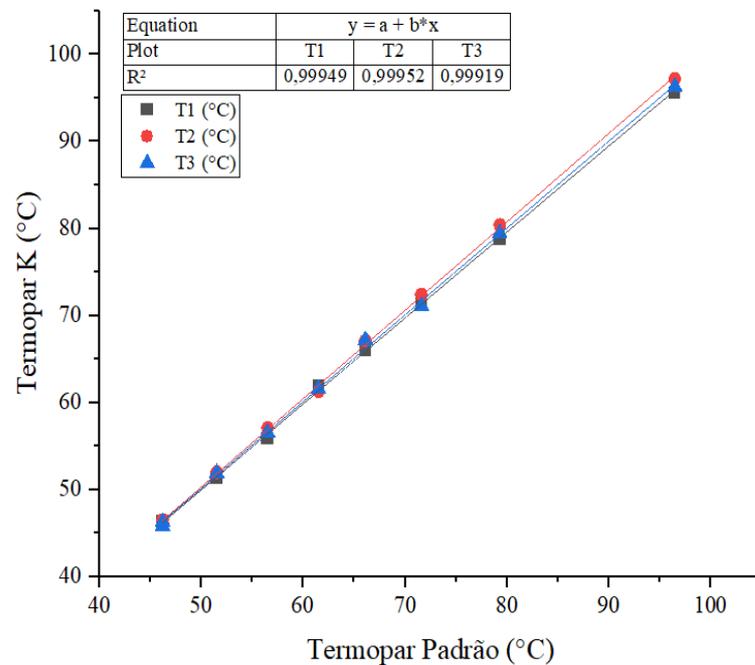
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 3 – Curva de calibração termopares da superfície externa do vidro da janela.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 4 – Curva de calibração termopares para temperatura do ar externo, ar da cavidade e ar interno do *container*



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 5 - Calibração termopares para temperatura da superfície interna do vidro da janela.

