

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM SISTEMAS DE
INFRAESTRUTURA URBANA**

WILLIAN ROGGER PAVAN

***ANÁLISE DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DE PAINÉIS EM FACHADAS E
COBERTURAS***

CAMPINAS

2022

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS CENTRO DE
CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE TECNOLOGIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM SISTEMAS DE
INFRAESTRUTURA URBANA**

WILLIAN ROGGER PAVAN

***ANÁLISE DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DE PAINÉIS EM
FACHADAS E COBERTURAS***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana

Orientadora: Profa.Dra. Lia Toledo Moreira Mota

Coorientadora: Profa.Dra. Cláudia Cotrim Pezzuto

PUC-CAMPINAS

2022

Ficha catalográfica elaborada por Fabiana Rizziolli Pires CRB 8/6920
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

621.31244 Pavan, Willian Rogger
P337a

Análise da geração fotovoltaica de painéis em fachadas e coberturas / Willian Rogger Pavan. - Campinas: PUC-Campinas, 2022.

97 f.: il.

Orientador: Lia Toledo Moreira Mota; Coorientador: Claudia Cotrim Pezzuto.

Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2022.

Inclui bibliografia.

1. Geração de energia fotovoltaica. 2. Energia solar. 3. Sistemas fotovoltaicos integrados em edifícios. I. Mota, Lia Toledo Moreira. II. Pezzuto, Claudia Cotrim III. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. IV. Título.

CDD - 22. ed. 621.31244

WILLIAN ROGGER PAVAN

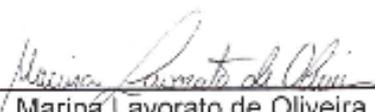
**ANÁLISE DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DE PAINÉIS
EM FACHADAS E COBERTURAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Lia Toledo Moreira Mota.
Co-orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Cláudia Cotrim Pezzuto.

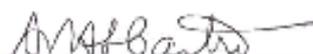
Dissertação defendida e aprovada em 29 de junho de 2022 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Marina Lavorato de Oliveira
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Adriana Petito de Almeida Silva Castro
Universidade Paulista - UNIP

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho foi possível graças ao auxílio e dedicação de várias pessoas que com suas respectivas ideias e conhecimentos colaboraram com a elaboração da proposta apresentada neste escopo.

À Pontifícia Universidade Católica de Campinas pela infraestrutura concedida como os laboratórios do CEATEC, bem como pelos equipamentos e recursos utilizados para realização dos ensaios efetuados.

À minha orientadora Professora Dra. Lia Toledo Moreira Mota pelos maravilhosos anos de trabalho, por toda sua incansável dedicação, por seu conhecimento compartilhado, e toda a perseverança no direcionamento da mais importante etapa de minha vida acadêmica.

Agradeço à minha coorientadora Professora Dra. Cláudia Cotrim Pezzuto pela dedicação em me auxiliar no delineamento deste trabalho através de seu conhecimento e ampla experiência.

À minha professora de graduação e coordenadora do Programa de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Dra. Lia Lorena Pimentel por todo seu apoio amigável e profissionalismo.

Aos professores que me possibilitaram ampla aprendizagem contribuindo na concretização deste trabalho e por todas as experiências vividas ao longo das aulas, mesmo que a distância mediante às dificuldades enfrentadas durante o período de pandemia.

Aos colaboradores do CEATEC da PUC-Campinas pelo auxílio na construção dos componentes utilizados transporte e manuseio durante os testes e práticas realizadas.

Em especial agradeço aos técnicos do Laboratório de Eletrônica, Daniel Braga Barros e José Ricardo Alves, pela ajuda com a elaboração, montagem e programação dos componentes eletrônicos utilizados, todo o suporte e acompanhamento prestados

durante as atividades e ensaios experimentais realizados.

Aos técnicos do Laboratório de Conforto Térmico, Fabiano Gonçalves e Jacqueline Neves pela prestatividade e dedicação durante os procedimentos realizados para a escolha do local de testes, montagem e manuseio dos equipamentos de medição .

Agradeço a todos os colegas de curso da turma 2020, de forma muito especial à Jhenifer Lopes, Fernando Cotulio, Henrique Carlsen, Thainá Beatto e Vinícius Criscuolo pela amizade, apoio, incentivo e por toda aquela motivação nas horas difíceis, pelas madrugadas em claro desenvolvendo apresentações e trabalhos.

Aos meus pais, Luiz Antonio e Amelia Pavan, por acreditarem em mim e estarem sempre presentes na minha vida mostrando que é possível alcançar qualquer objetivo, sendo minha maior referência e Inspiração.

Aos amigos professores, diretores, coordenadores e colaboradores com quem tenho a honra de trabalhar e compartilhar experiências ao longo de minha carreira.

Em especial agradeço aos amigos professores Mrs. Marco Antonio Eid e a Dra. Helena Cristina Padovani por todo o apoio e incentivo na carreira docente e nos estudos.

À professora e artista plástica Rose Conte por todo o conhecimento transmitido e direcionamento pessoal em minha carreira artística, acadêmica e profissional.

In Memoriam agradeço à Professora Francisca Maria Mendes Marques (Dona Chica), por abrir em minha vida a oportunidade de me tornar professor e me incentivar a buscar e transmitir o conhecimento adquirido, contribuindo com a aprendizagem e formação de todos aqueles que buscam.

RESUMO

PAVAN, Willian Rogger Pavan. *Análise da Geração Fotovoltaica de Painéis em Fachadas E Coberturas*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2022.

A crescente utilização de sistemas fotovoltaicos vem ganhando cada vez mais espaço nas edificações, deixando de ocupar predominantemente as áreas de coberturas e telhados, expandindo sua funcionalidade as fachadas envoltórias dos edifícios. Entretanto os módulos utilizados em coberturas e fachadas são influenciados pelo clima, condições ambientais e também pelo posicionamento e direção na qual estes são aplicados /integrados, buscando sua maior efetividade na geração de energia. Sendo assim este trabalho se objetivou a montagem de um sistema de monitoramento dos parâmetros de tensão e corrente elétrica de saída dos módulos fotovoltaicos, posicionados emulando sua utilização em telhados e fachadas, estando expostos a fatores ambientais. Os parâmetros climáticos de temperatura e umidade relativa do ar, foram coletados por sensor instalado em um abrigo meteorológico no local de testes, também foi realizado o acompanhamento fotográfico das condições de nebulosidade e acompanhamento da posição do sol por meio da altura e azimute na carta solar. Foram avaliados o comportamento dos módulos em ambas as posições de utilização e a influência ocasionada pelos fatores ambientais na geração de energia em cada posição simulada. Como resultados identificou-se, nas posições e direcionamentos testados a geração do painel fachada foi 9,6% menor que no painel telhado, e que os painéis obtiveram sua máxima geração de energia em horários diferentes e complementares entre si, sendo favorável a utilização em ambas as posições testadas. Outro parâmetro identificado foi de que o painel fachada recebe maior influência de posicionamento do azimute solar, em quanto o painel telhado é mais influenciado pela altura solar relacionada aos ângulos de radiação direta nos módulos para maior geração de energia.

Palavras-chave: energia solar em edificações, energia fotovoltaica, painéis em fachadas e coberturas.

ABSTRACT

PAVAN, Willian Rogger Pavan. *Analysis of photovoltaic generation of panels in facades and roofs*. Masters dissertation. Postgraduate Program in Urban Infrastructure Systems, Pontifical Catholic University of Campinas, Campinas, 2022.

The growing use of photovoltaic systems has been gaining more and more space in buildings, no longer occupying predominantly the areas of roofs and roofs, expanding its functionality to the surrounding facades of buildings. However, the modules used in roofs and facades are influenced by the climate, environmental conditions and also by the positioning and direction in which they are applied/integrated, seeking their greater effectiveness in energy generation. Therefore, this work aimed to set up a monitoring system for the parameters of voltage and electrical current output of photovoltaic modules, positioned to emulate their use on roofs and facades, being exposed to environmental factors. The climatic parameters of temperature and relative humidity were collected by a sensor installed in a meteorological shelter at the test site, photographic monitoring of cloud conditions and monitoring of the position of the sun through the height and azimuth in the solar chart was also carried out. The behavior of the modules in both positions of use and the influence caused by environmental factors on energy generation in each simulated position were evaluated. As a result, it was identified, in the positions and directions tested, the generation of the facade panel was 9.6% lower than that of the roof panel, and that the panels obtained their maximum energy generation at different and complementary times, being favorable to use in both positions tested. Another parameter identified was that the facade panel receives greater influence from the positioning of the solar azimuth, while the roof panel is more influenced by the solar height related to the angles of direct radiation in the modules for greater energy generation.

Key-words: solar energy in buildings, photovoltaic energy, panels on facades and roofs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Local para a realização dos testes e montagens experimentais.....	26
Figura 2 – Montagem experimental utilizada para o monitoramento dos painéis fotovoltaicos.....	27
Figura 3 –Código utilizado na configuração do Arduino de cada painel para a obtenção do resultado de potência de seu respectivo painel.....	30
Figura 4 – Esquemático da organização dos componentes na protoboard.....	31
Figura 5 – Componentes utilizados para desenvolvimento da placa de prototipagem.....	32
Figura 6 – Desmontagem do abrigo para a colocação do sensor e remontagem para utilização do equipamento.....	34
Figura 7 – Posicionamento de cada painel utilizado em sua respectiva estrutura...	35
Figura 8 – Ilustrativo em perspectiva das peças de montagem das estruturas para fixação dos painéis.....	36
Figura 9 – Estruturas montadas com os painéis e equipamentos de coleta.....	37
Figura 10 – Carta solar do dia 16/09/2021 para o local da coleta de dados.....	39
Figura 11 – Informações da referência utilizada para a análise de radiação solar....	40
Figura 12 –Imagem registrada do local do experimento para auxílio na análise e classificação dos tipos de nuvem observados ao longo do dia de coleta.....	42
Figura 13 – Ilustração dos 10 tipos de nuvens pela Organização Meteorológica Mundial	44
Figura 14 – Esquemático de classificação dos 10 principais tipos de nuvens.....	45
Figura 15 – Ligação dos painéis, sensor de temperatura e umidade e computador na placa de prototipagem.....	47
Figura 16 – Sequência de registros fotográficos realizados em 29/09/2021.....	49
Figura 17 – Registros da trajetória solar realizada através da utilização do aplicativo no local durante os experimentos.....	50
Figura 18 – Comportamento da tensão média horária dos painéis fachada e telhado no dia 08/09/2021.....	52
Figura 19 – Comportamento da tensão do painel fachada através da média horária de cada dia de coleta realizado.....	52
Figura 20 – Comportamento da tensão do painel telhado através da média horária de cada dia de coleta realizado.....	53

Figura 21 – Comportamento da corrente gerada pelos painéis fachada e telhado no Dia 08/09/2021.....	54
Figura 22 – Comportamento da corrente gerada pelo painel fachada para todos os dias de coleta.....	54
Figura 23 – Comportamento da corrente gerada pelo painel telhado para todos os dias de coleta.....	55
Figura 24 – Comportamento da média horária de potência gerada pelos painéis fachada e telhado no dia 08/09/2021.....	56
Figura 25 – Comportamento da média horária de potência gerada pelo painel fachada para todos os dias de coleta.....	57
Figura 26 – Comportamento da média horária de potência gerada pelo painel telhado para todos os dias de coleta.....	57
Figura 27 – Comportamento da média horária de tensão, corrente e potência dos painéis telhado e fachada para cada hora de coleta do dia 29/09/2021.....	58
Figura 28 – Comportamento da média horária de tensão, corrente e potência dos painéis telhado e fachada para cada hora de coleta do dia 22/09/2021.....	60
Figura 29 – Comportamento pontual da temperatura do ar para todos os dias de coleta.....	63
Figura 30 – Representação gráfica da faixa pontual horária de concentração das temperaturas pontuais mais elevadas registradas durante a coleta.....	64
Figura 31 – Representação gráfica do comportamento da temperatura comparada a potência gerada por cada painel no dia 24/09/2021.....	65
Figura 32 – Representação gráfica do comportamento da temperatura comparada a potência gerada por cada painel no dia 30/09/2021.....	66
Figura 33 – Representação gráfica do comportamento da média horária de temperatura, umidade e potência nos painéis fachada e telhado no dia 09/09/2021.....	67
Figura 34 – Representação gráfica do comportamento pontual horário da umidade relativa do ar em todos os dias de coleta.....	69
Figura 35 – Representação da média horária do comportamento da temperatura, umidade do ar e potência gerada pelos painéis no dia 13/09/2021.....	70
Figura 36 – Representação gráfica do comportamento pontual horário da temperatura umidade do ar, nebulosidade e potência gerada pelos painéis no dia 22/09/2021.....	71

Figura 37 – Representação gráfica da queda de potência no painel fachada e no painel telhado provocada pela obstrução na presença de nebulosidade.....	73
Figura 38 – Representação gráfica do comportamento pontual horário de temperatura, umidade do ar e potência dos painéis fachada e telhado no dia 24/09/2021.....	74
Figura 39 – Representação gráfica do comportamento pontual horário de temperatura, umidade do ar e potência dos painéis fachada e telhado no dia 29/09/2021.....	75
Figura 40 – Representação gráfica do comportamento pontual horário de temperatura umidade do ar e potência dos painéis fachada e telhado no dia 30/09/2021.....	76
Figura 41 – Representação gráfica do comportamento pontual horário da temperatura, umidade do ar e potência nos painéis fachada e telhado no dia 01/10/2021.....	77
Figura 42 – Comportamento da altura solar, temperatura do ar e potência gerada pelos painéis no dia 08/09/2021.....	79
Figura 43 – Comportamento da altura solar, temperatura do ar e potência gerada pelos painéis no dia 16/09/2021.....	80
Figura 44 – Comportamento da altura solar, temperatura do ar e potência gerada pelos painéis no dia 01/10/2021.....	80
Figura 45 – Comportamento horário do azimute solar e da potência gerada pelos painéis no dia 08/09/2021.....	81
Figura 46 – Comportamento horário do azimute solar e da potência gerada pelos painéis no dia 16/09/2021.....	82
Figura 47 – Comportamento horário do azimute solar e da potência gerada pelos painéis no dia 01/10/2021.....	82
Figura 48 – Potência máxima dos painéis, fachada e telhado, em cada dia de coleta.....	83
Figura 49 – Potência máxima dos painéis, fachada e telhado, contendo o dia de coleta.....	84
Figura 50 – Potência máxima do painel da fachada em função da altura solar.....	85
Figura 51 – Potência máxima do painel da fachada em função do azimute solar.....	86
Figura 52 – Potência máxima do painel do telhado em função da altura solar.....	87
Figura 53 – Potência máxima do painel do telhado em função do azimute solar.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –Especificações do módulo sensor de tensão e corrente.....	29
Tabela 2 – Especificações do módulo sensor de temperatura e umidade do ar.....	30
Tabela 3 – Características do comportamento médio horário das grandezas dos painéis fachada e telhado para o dia 08/09/2021.....	59
Tabela 4 – Resumo das médias dos valores obtidos em cada dia de coleta considerando ospainéis fachada e telhado.....	60
Tabela 5 – Médias diárias de potência gerada pelos dois painéis e o percentual gerado pelafachada comparada ao resultado gerado pelo painel telhado.....	61
Tabela 6 – Registro de temperatura no período do meio dia em 21/09/2021..	68
Tabela 7 – Médias diárias de temperatura, umidade e potência dos painéis fachada e telhado em cada dia de coleta.....	78
Tabela 8 – Potência máxima dos painéis, fachada e telhado, em cada dia de coleta.....	83

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

a-Si – Silício Amorfo

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BAPV – Building Applied Photovoltaic

BIPV – Building Integrated Photovoltaic

c-Si – Silício Cristalino

FV – Fotovoltaico (a)

GSOLAR – Irradiância Solar

IEC – International Electrotechnical Commission

I – Corrente Circulante no Módulo Fotovoltaico

ISAÍDA – Corrente Elétrica do Módulo Fotovoltaico

m-Si – Silício Monocristalino

mc-Si – Silício Multicristalino

NOCT – *Nominal Operating Cell Temperature*

NREL – *National Renewable Energy Laboratory*

OLED – *Organic Light-Emitting Diode*

pc-Si – Silício Policristalino

PSAÍDA – Potência de Saída

PVs – Sistemas Fotovoltaicos

RH – Umidade Relativa do Ar

SCL – *Serial Clock*

SDA – *Serial Data*

Si – Silício

Ta – Temperatura Ambiente

TOP – Temperatura de Operação da Célula Fotovoltaica

V – Tensão Elétrica

VMP – Tensão de Máxima Potência

VOC – Tensão de Circuito Aberto

VSAÍDA – Tensão de Saída do Módulo Fotovoltaico

LISTA DE UNIDADES DE MEDIDA

°C – graus Celsius

A – Ampere

cm – centímetro

GB – Giga Byte

GW – Giga Watt

kWh – kiloWatt hora

mA – mili Ampere

MW – Mega Watt

m/s – metros por segundo

V – Volts

W – Watt

W/m² – Watt por metro ao quadrado

SUMÁRIO

1. Introdução.....	17
1.1 Objetivo.....	18
1.2 Organização do trabalho.....	19
2. Revisão bibliográfica.....	20
2.1 Utilização de módulos fotovoltaicos em edificações.....	21
2.2 Utilização de painéis fotovoltaicos em fachadas e superfícies verticais.....	21
2.2.1 Influência do posicionamento vertical dos módulos na geração de energia....	24
3. Materiais e métodos.....	26
3.1 Local da realização dos testes e montagens experimentais.....	26
3.2 Montagem experimental para monitoramento dos painéis fotovoltaicos.....	27
3.2.1 Painéis fotovoltaicos.....	28
3.2.2 Sensores.....	28
3.2.2.1 Sensor de corrente.....	28
3.2.2.2 Sensor de tensão.....	29
3.2.2.3 Determinação de potência gerada pelo painel.....	29
3.2.2.4 Sensor de temperatura e umidade relativa do ar.....	30
3.2.3 Placa de prototipagem (protoboard).....	31
3.2.4 Computador base.....	33
3.2.5 Abrigo meteorológico.....	33
3.2.6 Estrutura para fixação dos painéis.....	34
3.3 Acompanhamento fotográfico de posicionamento solar e condições ambientais meteorológicas.....	37
3.4 Detalhamento da coleta de dados utilizando o sistema de monitoramento.....	46
4. Resultados.....	51
4.1 Análise comparativa do comportamento da tensão, corrente e potência para os painéis posicionados na cobertura e na fachada.....	51
4.2 Influência da temperatura do ar, umidade relativa do ar e da nebulosidade na geração dos painéis fotovoltaicos	61
4.3 Influência da orientação solar na geração dos painéis fotovoltaicos.....	79
5. Conclusões.....	88
Referências.....	91

1. Introdução

Com o desenvolvimento tecnológico, vêm se tornando cada vez mais acessíveis diferentes sistemas geradores de energia instalados ou integrados na própria edificação. Alguns recursos e incentivos favorecem a geração de energia elétrica mais próxima aos pontos de consumo, viabilizando o uso de sistemas fotovoltaicos junto às construções, favorecendo o consumidor final.

Os painéis fotovoltaicos são mais usualmente encontrados instalados em coberturas e telhados de edificações, podendo também ser aplicados sobre fachadas e integrados à edificação, substituindo os tradicionais materiais construtivos por módulos fotovoltaicos.

Com o aumento da demanda por geração de energia no meio urbano e por conta da redução das áreas de cobertura com a verticalização dos edifícios, os módulos fotovoltaicos vêm sendo cada vez mais utilizados em fachadas de edificações como material de fechamento ou por meio de películas fotovoltaicas aplicadas em superfícies envidraçadas.

Quando do início de sua utilização, os sistemas de geração de energia fotovoltaica eram simplesmente instalados como um equipamento ou componente voltado, exclusivamente, para a geração de energia elétrica, sem nenhuma preocupação com a estética, ou função arquitetônica de qualidade ambiental do edifício (FREITAS; CENTENO, 2019). Entretanto, novas tendências e tecnologias fazem com que os sistemas sejam, atualmente, parte fundamental da envoltória edificada, trazendo diversas contribuições estéticas, valorizando as fachadas e proporcionando maior conforto térmico (LAI; HOKOI, 2015).

Os tipos de sistemas fotovoltaicos em edificações são definidos por meio da sua relação com o edifício, podendo ser um sistema aplicado sobre a envoltória da construção utilizando estruturas complementares, constituindo os BAPVs (Building Applied Photovoltaics), ou um sistema diretamente integrado à edificação, substituindo parte do material construtivo tradicional da envoltória do edifício por módulos, painéis e películas fotovoltaicos, denominados BIPVs (Building Integrated Photovoltaics), sendo que ambos os sistemas (BAPVs e BIPVs) podem ser utilizados em fachadas e coberturas (RITZEN, 2017; GHOSH, 2020).

Além das especificações técnicas e materiais das células FVs, a direção e inclinação dos módulos é fundamental para a eficiência dos sistemas BIPV/BAPV,

Assim como outros aspectos tais como a temperatura do ar, os ventos, a umidade relativa do ar, a localização da edificação e o sombreamento do entorno da edificação (PORTOLAN DOS SANTOS; RÜTHER, 2014; CHEN et al., 2018).

A utilização de módulos fotovoltaicos instalados em telhados é normalmente realizada com os módulos inclinados em ângulos próximos ao da latitude local. Atualmente junto ao uso em telhados e coberturas, vem se tornando crescente o emprego de módulos fotovoltaicos verticais em fachadas. (SÁNCHEZ-PANTOJA; VIDAL; PASTOR, 2018; GONÇALVES; VAN HOOFF; SAELENS, 2021).

Recentemente, um número expressivo de estudos vem sendo realizados sobre a utilização de sistemas FVs verticais em fachadas, impulsionados pela crescente demanda de uso e aproveitamento do espaço no meio urbano. (YOUSIF et al., 2018; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; EDITORS: N. JAKICA, R.J. YNAG, 2019; GONÇALVES; VAN HOOFF; SAELENS, 2021). Nesse contexto, a utilização dos painéis FV BAPV e BIPV em fachadas de edificações, evidencia a importância de análises mais detalhadas sobre o desempenho dos painéis com relação à geração de energia elétrica. Nesse sentido, essas análises podem contribuir para a utilização destes recursos energéticos sustentáveis nas edificações de forma mais eficaz.

Junto ao crescimento e verticalização das cidades, cresce a demanda pela utilização de sistemas fotovoltaicos em fachadas de edifícios, seja de modo independente ou complementando a geração de energia elétrica realizada por painéis instalados nas áreas de cobertura e telhados.

Estudos sobre projetos, e desempenhos de sistemas fotovoltaicos, mostram que o conteúdo sobre utilização de painéis FV ainda carece de informações pertinentes a integração destes sistemas, especialmente quando utilizados na posição vertical, em fachadas de edificações (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019).

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo analisar a geração de energia elétrica de sistemas fotovoltaicos aplicados a fachadas e coberturas de edificações, considerando a influência de grandezas e aspectos como temperatura do ar, umidade relativa do ar, altura solar e azimute.

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho encontra-se organizado como se segue.

O Capítulo 2 trata da revisão bibliográfica realizada sobre a utilização de módulos fotovoltaicos em edificações, abordando mais especificamente a utilização de painéis fotovoltaicos em fachadas verticais e a influência do posicionamento vertical dos módulos na geração de energia.

O Capítulo 3 aborda os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento prático experimental do trabalho, a escolha do local, montagem e monitoramento do sistema de equipamentos e sensores. São especificados neste capítulo os componentes que integram o sistema projetado para coleta de dados, tais como: painéis fotovoltaicos, sensores de tensão, sensor de temperatura e umidade relativa do ar, abrigo meteorológico e estruturas de fixação dos painéis.

É apresentado o processo de montagem e os componentes eletrônicos utilizados na elaboração da placa de prototipagem desenvolvida para integrar os equipamentos e sensores ao computador base para coleta de dados gerados.

Neste capítulo, são descritos os detalhes da coleta de dados e monitoramento da geração de energia nos painéis e das condições ambientais, assim como o acompanhamento fotográfico e documental do posicionamento solar no local.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos ao longo do período de coleta através da análise comparativa do comportamento de tensão corrente e potência para os painéis posicionados emulando cobertura e fachada, mostrando consecutivamente a influência da temperatura e umidade relativa do ar em cada painel durante a geração de energia.

Neste capítulo, são apresentados também os resultados de influência da nebulosidade e posição relativa do Sol analisados por meio da carta solar através dos ângulos de azimute e altura ocorrida durante o período de coleta de dados.

O Capítulo 5 atribui a conclusão realizada por meio da avaliação dos resultados comparativas de comportamento e geração dos painéis posicionados.

2. Revisão bibliográfica

Os sistemas fotovoltaicos vêm despertando cada vez mais o interesse do setor da construção, especialmente com a utilização destes recursos para a certificação de edifícios energeticamente sustentáveis, de acordo com exigências e diretrizes ambientais voltadas ao setor da construção civil (AGATHOKLEOUS; KALOGIROU, 2020). A possibilidade de melhoria na eficiência energética das edificações transformou-se em um pilar para o desenvolvimento de novos conceitos de construção, objetivando a redução do consumo de energia através de requisitos de restrição e da necessidade de utilização de fontes de energia renováveis, assim como a aplicabilidade de novos materiais construtivos que atendam ao conceito de construção de edifícios de energia zero (BELUSSI et al., 2019).

Além disso, com o aumento do consumo de energia em todo o mundo e a escassez de fontes não-renováveis de energia, muitos têm sido os programas e incentivos públicos, facilitando a aquisição de sistemas fotovoltaicos, como meio de aumentar a diversificação da matriz energética de muitos países. Muitos destes incentivos são realizados em forma de benefícios fiscais voltados ao desenvolvimento e fabricação de novas tecnologias, proporcionando redução de custos em seu desenvolvimento e promovendo a popularização destes sistemas, ampliando a implantação de novos meios de geração de energia.

Mais ainda, o desenvolvimento de tecnologias relacionadas à energia fotovoltaica vem permitindo inúmeras possibilidades de utilização, aumentando sua escalabilidade de uso, proporcionando maior durabilidade e efetividade de geração por parte dos materiais utilizados na fabricação das células, que vem atendendo aos mais diversos fins de utilização e ganhando cada vez mais força com programas e medidas de ampliação sustentável de geração de energia (BAIG et al., 2020).

Com a implantação destes novos paradigmas, barreiras têm sido superadas para a introdução de novas soluções, principalmente voltadas a aplicabilidade de sistemas construtivos, que se estendem além das coberturas e se expandem pelas fachadas e aberturas, renovando a envoltória das edificações, promovendo uma maior capacidade de geração e inovação de recursos sustentáveis incorporados às edificações (BELUSSI et al., 2019).

2.1 Utilização de módulos fotovoltaicos em edificações

Os primeiros sistemas fotovoltaicos utilizados em edificações tinham apenas a função de gerar energia elétrica para o consumidor, não havendo uma preocupação estética (TOLEDO et al., 2016). Com o aumento de sua utilização, os painéis começaram a ganhar cada vez mais espaço nas coberturas de edifícios residenciais e, com o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica, rapidamente surgiram novas aplicações, vindo a contribuir com a arquitetura das edificações.

Partindo do avanço tecnológico, os painéis ganharam novas funções como o aquecimento de água ou da própria edificação, contribuindo com o conforto térmico interno dos ambientes. Com isso, os painéis que eram apenas instalados de forma independente na cobertura utilizados diretamente sobre a tipologia construtiva (BAPVs) começaram a dividir espaço com novos sistemas integrados à envoltória da edificação. Estes novos sistemas (BIPVs) são utilizados como materiais construtivos substituindo parte dos tradicionais materiais construtivos por placas, painéis e telhas compostos por módulos fotovoltaicos. Além da utilização em coberturas e telhados, os painéis vêm sendo cada vez mais utilizados como fechamento nas fachadas dos edifícios (ZHOU et al., 2017).

Estudos sobre o aproveitamento do potencial solar na geração de energia através da utilização de recursos fotovoltaicos em edificações, usualmente tratam da estimativa de geração por meio de módulos fotovoltaicos instalados em coberturas e telhados.

Entretanto, novas pesquisas e metodologias visam, atualmente, estimar o potencial de geração de sistemas fotovoltaicos em fachadas verticais, impulsionadas pelo aumento da demanda de implantação dessa tecnologia e pela falta de espaço necessário para a instalação na cobertura dos edifícios.

2.2 Utilização de painéis fotovoltaicos em fachadas e superfícies verticais

A implantação de sistemas fotovoltaicos na atual paisagem urbana é uma crescente tendência, assim como o desenvolvimento de ferramentas e métodos para a análise do potencial solar no local em que se almeje utilizar o sistema.

As edificações oferecem diversas possibilidades de áreas de suas envoltórias para a

implantação dos sistemas fotovoltaicos, mais usualmente instalados na cobertura, em lajes e telhados. Porém, estes espaços têm se tornado cada vez menores nas novas edificações, principalmente, nos edifícios altos e compactos comprouquíssima área de cobertura, que muitas vezes é utilizada para maquinário de elevadores, caixas d'água, equipamentos de comunicação e proteção do edifício, como é o caso de antenas e para-raios instalados na superfície da cobertura.

Nessas edificações, muitas vezes, a área do telhado não é suficiente para a instalação efetiva da quantidade de módulos necessários para atender ao consumo de energia elétrica da unidade consumidora (GAVIRIA; PEREIRA; MIZGIER, 2013).

Para melhor atender a necessidade de ampliação do sistema de geração e suprir a falta de área ou possibilidade de instalação na cobertura, está se tornando necessária e, cada vez mais comum, a instalação dos sistemas fotovoltaicos em fachadas e superfícies verticais de fechamento das edificações, aumentando a capacidade de produção de energia.

A integração das fachadas e seus benefícios na geração fotovoltaica são apontados em diversos artigos e referências, por autores como (SÁNCHEZ; IZARD, 2015; FREITAS; CENTENO, 2019; GHOSH, 2020; ASSOA et al., 2021)

Dentre as vantagens da instalação em fachadas está a diversidade de funções a serem agregadas, pois além de gerar energia, os painéis podem ser aplicados como brises solares para contenção de incidência solar excessiva no interior da edificação, podem ser utilizados, também, no direcionamento dos ventos incidentes na fachada e atuar como elementos de proteção em janelas e vidraças contra possíveis chuvas e intempéries que possam ocasionar danos à envoltória.

O posicionamento vertical dos painéis fotovoltaicos nas fachadas recebe uma menor incidência direta de radiação solar em comparação à instalação em coberturas, devido ao ângulo de incidência da radiação solar e a superfície vertical (LAI; HOKOI, 2015; HAFEZ et al., 2017). Os elementos fotovoltaicos instalados na vertical oferecem a vantagem de menor manutenção referente à limpeza dos painéis, pois a própria chuva acaba limpando a superfície, fazendo com que, limpos, os módulos obtenham melhor aproveitamento da incidência solar. Os painéis verticais em fachadas operam em temperatura mais baixa, o que favorece seu funcionamento, evitando parte de perda de energia em forma de calor para o ambiente ou transmitindo calor excessivo para a edificação. O efeito de aquecimento dos módulos ocorre, muitas vezes com placas

solares utilizadas nos telhados, as quais recebem maior incidência direta e elevada temperatura, dissipando parte da energia que seria utilizada em forma de calor (LAI; HOKOI, 2015).

Como um recurso estético, os módulos fotovoltaicos proporcionam às fachadas uma aparência limpa e sofisticada com um visual moderno e inovador, valorizando ainda mais o imóvel e também protegendo sua superfície de intempéries, exposição direta ao clima e a sujeira, aumentando a durabilidade da envoltória da edificação além da função principal, a geração de energia(FREITAS; CENTENO, 2019).

Um aspecto fundamental para a otimização do funcionamento dos sistemas fotovoltaicos independente da tecnologia utilizada, é seu correto posicionamento e a escolha do local mais adequado para a utilização dos módulos na fachada estando favorável à incidência dos raios solares, sempre que possível sem a interferência do sombreamento de edificações próximas, árvores, equipamentos urbanos ou pela cobertura da própria edificação.

Estudos recentes realizados apontam que as áreas disponíveis nas paredes verticais em uma cidade moderna ultrapassam largamente a área disponível nos telhados, compensando, assim, a diferença de irradiação relativamente menor direcionada na inclinação das faces verticais do edifício, o que tem levado recentemente ao desenvolvimento de metodologias para a análise da geração solar em fachadas(REDWEEK; CATITA; BRITO, 2013; ESCLAPÉS et al., 2014).

Como revestimento ou material construtivo de fechamento, os painéis ou vidros peliculados, integrados ou aplicados às fachadas conseguem não apenas transmitir uma imagem mais limpa e moderna aos edifícios, mas também contribuir ao atuar como meio otimizador de geração de energia, possibilitando também uma maior iluminação natural, quando utilizados painéis fotovoltaicos semitransparentes nas janelas e aberturas(FREITAS; CENTENO, 2019)

Tendo como significativa a área disponível em fachadas nas paisagens edificadas contemporâneas, e a importância de sua utilização no aproveitamento da edificação para a expansão da capacidade de geração fotovoltaica de energia, a análise do potencial solar em escala local ou municipal, deve ser desenvolvida levando em consideração a irradiação incidente em paredes verticais, assim como suas propriedades características de geração diária e sazonais fotovoltaicas em na maioria das vezes em orientações não ótimas analisadas(SÁNCHEZ; IZARD, 2015).

Os edifícios possuem fachadas com diferentes orientações que gerarão energia máxima em diferentes horas do dia. Por isso, as instalações fotovoltaicas integradas à fachada, exigem um maior planejamento para obter o melhor desempenho em comparação com os sistemas fotovoltaicos utilizados em telhados, devido ao risco de sombreamento ser maior, e ao fato do ângulo de incidência solar ser menos favorável (VULKAN et al., 2018).

Além disso, por serem mais visíveis na paisagem urbana, as fachadas têm maior necessidade de serem atrativas e atender a requisitos voltados a aprovação do público, arquitetos e designers em relação à sua estética e desempenho, mais do que as instalações em telhados os quais são menos visíveis (WU et al., 2022).

2.2.1 Influência do posicionamento vertical dos módulos na geração de energia.

O posicionamento correto dos painéis de um sistema fotovoltaico é o ponto de partida e condicionante mais importante para a obtenção de resultados satisfatórios na geração de energia, pois é a partir do direcionamento e posicionamento adequados que os painéis receberão a incidência solar necessária para a geração, evitando sombreamentos em alguns períodos do dia (STANCIU; STANCIU, 2014).

Os impactos causados pela densidade urbana na geração de energia fotovoltaica vêm sendo cada vez mais estudados junto à importância dos demais impactos térmicos e ambientais. Nesse contexto, diversos autores analisam a morfologia urbana, sua expansão e adensamento, sua verticalização e obstrução do fator de visão do céu, como parâmetros fundamentais para avaliar as condições lumínicas e térmicas nos grandes centros urbanos e em suas edificações (CATITA et al., 2014; VULKAN et al., 2018; CHU et al., 2021; POLO et al., 2021) .

Estes fatores estão diretamente relacionados à incidência solar e, portanto, à capacidade de geração de energia elétrica pelos sistemas fotovoltaicos. Dessa maneira é de fundamental importância o reconhecimento do entorno onde os sistemas serão instalados e a avaliação de alternativas de implantação e posicionamento, considerando a verticalidade das cidades, as limitações de espaço e obstruções existentes (GAVIRIA; PEREIRA; MIZGIER, 2013)

Na referência (GONÇALVES et al., 2021), os autores avaliam diferentes tipologias urbanas e seu respectivo acesso à irradiação solar nas fachadas e seu potencial na

geração de energia fotovoltaica. A influência no posicionamento deve ser analisada desde a fase de concepção do projeto da edificação, onde serão definidas as melhores faces disponíveis para a implantação e a área necessária a ser ocupada pelos painéis.

Uma vez que a geração dos painéis é diretamente proporcional à incidência lumínica em sua face, os painéis, necessariamente precisam estar posicionados e orientados de forma a obter o máximo de radiação solar nas fachadas (FREITAS; CENTENO, 2019).

Outro fator importante a ser considerado, relacionado ao posicionamento correto dos painéis, é que esse posicionamento deverá proporcionar a maior faixa de tempo de exposição efetiva possível aos raios solares ao longo do dia, pois não é interessante que os módulos recebam uma grande quantidade de incidência solar durante um curto período de tempo por dia.

Mesmo que em um curto período do dia os painéis recebam grande incidência direta de irradiação solar intensa, as células não conseguirão na maioria das vezes, aproveitar toda essa luminosidade, atingindo seu limite de geração. Nessa situação, parte da energia obtida se perde em forma de calor para o ambiente ou é transmitida para a edificação, podendo inclusive alterar as condições de conforto térmico no interior do edifício, o que não é desejável (NG; ADAM; AB KADIR, 2019)

Para que se obtenha um posicionamento favorável próximo do ideal, se faz necessário analisar a orientação solar e estabelecer sua trajetória através do azimute solar, que é definido pelos ângulos entre leste e oeste, do nascer ao pôr do sol, para calcular a incidência solar que atingira os módulos durante os diferentes períodos do dia. Também deverá ser considerada a altura solar e seu ângulo de incidência, pois com os módulos posicionados na vertical é necessário avaliar a inclinação com que recebem a radiação solar influenciando diretamente no resultado esperado e na capacidade de geração (STANCIU; STANCIU, 2014).

É justamente nesse contexto que este trabalho se insere, uma vez que visa analisar a geração de energia elétrica de sistemas fotovoltaicos aplicados a fachadas e coberturas de edificações, considerando a influência de grandezas e aspectos como temperatura do ar, umidade relativa do ar, altura solar e azimute. Nesse sentido, vale destacar a definição de azimute solar como sendo o ângulo que a projeção do Sol faz com a direção Norte, entre o Sol e o plano horizontal, no sentido horário, a partir do Norte, variando de 0 a 360°. Já a altura solar pode ser definida como o ângulo formado

entre o Sol e o plano vertical, variando de 0 a 90°.

3. Materiais e Métodos

Este capítulo apresenta a Metodologia adotada neste trabalho.

3.1 Local da realização dos testes e montagens experimentais

Para a realização da montagem experimental e dos testes, foi escolhida uma área externa da PUC-Campinas, mais especificamente, o campo de futebol da Faculdade de Educação Física, conforme ilustra a Figura 1. O ponto escolhido fica na Latitude – 22°831883 Longitude -47°045023, na cidade de Campinas (SP) a 634 metros de elevação acima do nível do mar, com um amplo espaço plano, proporcionando condições adequadas (sem obstrução e sem sombreamento) ideais para a realização dos testes.

Figura 1–Local para a realização dos testes e montagens experimentais

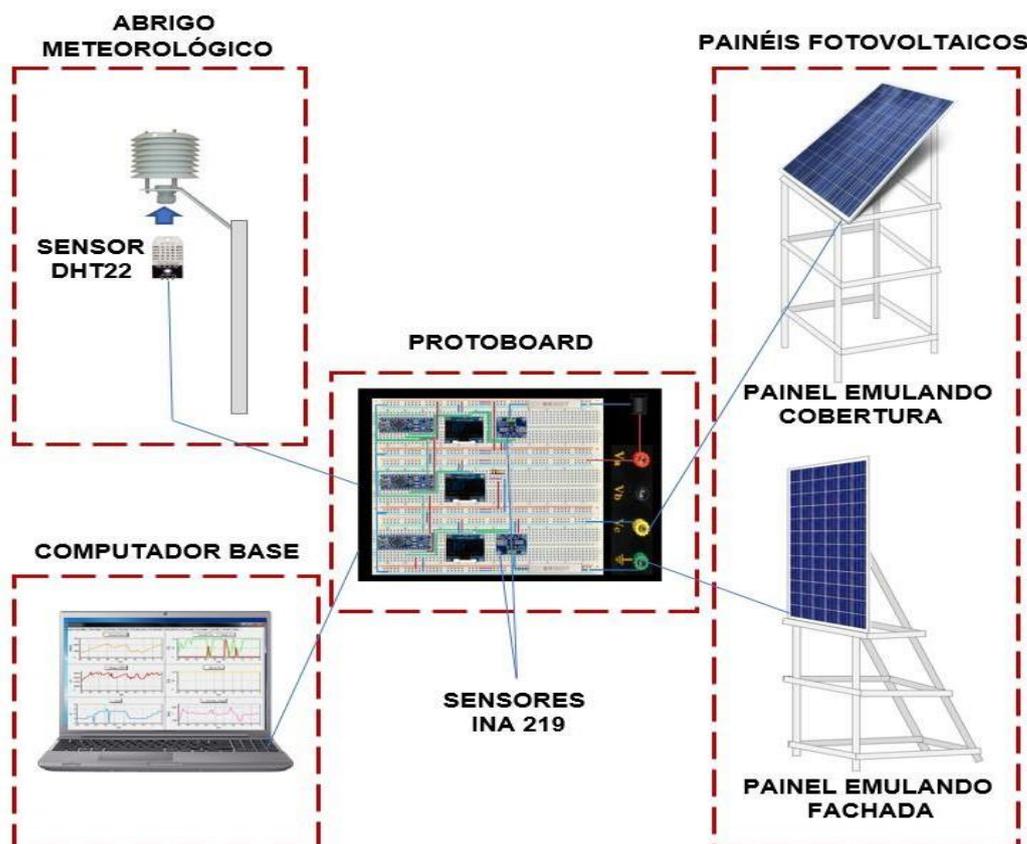


Fonte: Autor

3.2. Montagem experimental para monitoramento dos painéis fotovoltaicos

A montagem experimental utilizada, ilustrada na Figura 2, possibilita o monitoramento da geração de energia elétrica (em termos da tensão, corrente e potência) de dois painéis fotovoltaicos (um emulando uma aplicação na cobertura e outro na fachada de uma edificação) simultaneamente. Além disso, essa montagem permite o monitoramento da temperatura do ar e da umidade relativa do ar com a utilização de um sensor no interior do abrigo meteorológico empregado no experimento.

Figura 2–Montagem experimental utilizada para o monitoramento dos painéis fotovoltaicos.



Fonte: Autor

Nessa figura, observa-se que a montagem experimental é composta por dois painéis fotovoltaicos (um emulando sua aplicação na cobertura e outro emulando sua aplicação na fachada de uma edificação) uma placa de prototipagem (protoboard), onde estão conectados os sensores e demais dispositivos eletrônicos responsáveis

pelo monitoramento dos painéis; um computador base e um abrigo meteorológico. Todos esses componentes da montagem experimental estão descritos a seguir.

3.2.1 Painéis fotovoltaicos

Os dois painéis FVs utilizados são de Silício Policristalino S55P, produzidos pela empresa Solaris Tecnologia para uso profissional e residencial. Cada painel é constituído por 36 células de 156x65mm cada, com eficiência de 12,5%. Possui dimensões de 510x870x53 mm e peso de 5,7kg, sua capacidade de geração é de uma potência nominal máxima de 55W, tensão máxima de 18.20 V e corrente máxima de 3,04 A.

Um dos painéis é posicionado a 90° na vertical, e o outro na posição horizontal inclinado 23° com relação ao eixo horizontal, ambos orientados com a face voltada para o norte verdadeiro, conforme referenciado na literatura científica (PORTOLAN DOS SANTOS; RÜTHER, 2014; HAFEZ et al., 2017; CHEN et al., 2020).

3.2.2 Sensores

A seguir, são apresentados os sensores utilizados na montagem experimental para obtenção de dados de corrente, tensão e potência gerados pelos painéis fotovoltaicos simultaneamente e o sensor introduzido no abrigo meteorológico para monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar.

3.2.2.1 Sensor de corrente

Para a coleta de informações de geração de energia dos dois painéis FVs foram utilizados dois módulos sensores de tensão e corrente INA219 (um para cada painel fotovoltaico) ligados a um display (um display para cada painel) para visualização das informações.

Ligados ao sensor de tensão e corrente INA 219 de cada painel foi instalada uma carga resistiva utilizando uma resistência cerâmica de 100Ω, permitindo ao sensor identificar a corrente gerada pelos painéis. A Tabela 1 mostra as especificações do módulo sensor INA 219.

Tabela 1- Especificações do módulo sensor de tensão e corrente

Sensor de tensão
Modelo: INA219
Tensão de modo comum Máx (V): 26
Tensão de modo comum Min: (V): 0
Deslocamento de entrada (+/-) Máx uV: 50,100
Largura de banda (kHz): 5.5 Iq Máx (mA): 1
Tensão de alimentação Máx (V): 5,5
Tensão de alimentação Min (V): 3
Faixa de temperatura operacional (°C) -40 a 125
Interface digital: I2C, SMBus
Resolução bits: 12
Dimensões: 3,91mm x 4,90mm

Fonte: Adaptado de (TEXAS INSTRUMENTS 2022)

3.2.2.2 Sensor de tensão

O monitoramento da tensão foi realizado através dos dados coletados dos dois sensores INA219 que recebem a tensão separadamente de cada um dos dois painéis fotovoltaicos utilizados no experimento.

3.2.2.3 Determinação da potência gerada pelo painel

A determinação da potência foi realizada através dos dados de tensão e corrente fornecidos pelo sensor INA219 ligados a cada um dos painéis fornecendo estas informações ao seu respectivo microcontrolador Arduino, responsável por calcular a potência por meio da multiplicação da tensão pela corrente. A Figura 3 mostra o código executado no Arduino de cada painel para a determinação da potência.

Figura 3 –Código utilizado na configuração do Arduino de cada painel para a obtenção do resultado de potência de seu respectivo painel.

```

void loop ()
{
if (millis ()           //Executa o código dentro do if
{
millis_ = millis ();   // Guarda o valor atual de millis
v = S.getBusVoltage_V(); // Faz a leitura do valor de tensão
i = S.getCurrent mA();  // Faz a leitura do valor da corrente
p = v * i;             // Calcula potência
exibe_dsp ();         // Executa a função de exibição no display.
envia_dados();        // Envia os dados via Serial para o Software ou Terminal do Arduino
}
}

```

Fonte: Autor

3.2.2.4 Sensor de temperatura e umidade relativa do ar

Para o monitoramento da temperatura do ar e da umidade relativa do ar foi utilizado o sensor DHT22 instalado em um abrigo meteorológico no local do experimento. A Tabela 2 mostra as especificações do módulo sensor de temperatura e umidade AM2302 DHT22 sua faixa de medição, precisão e capacidade de exposição às condições de temperatura local.

Tabela 2- Especificações do módulo sensor de temperatura e umidade do ar

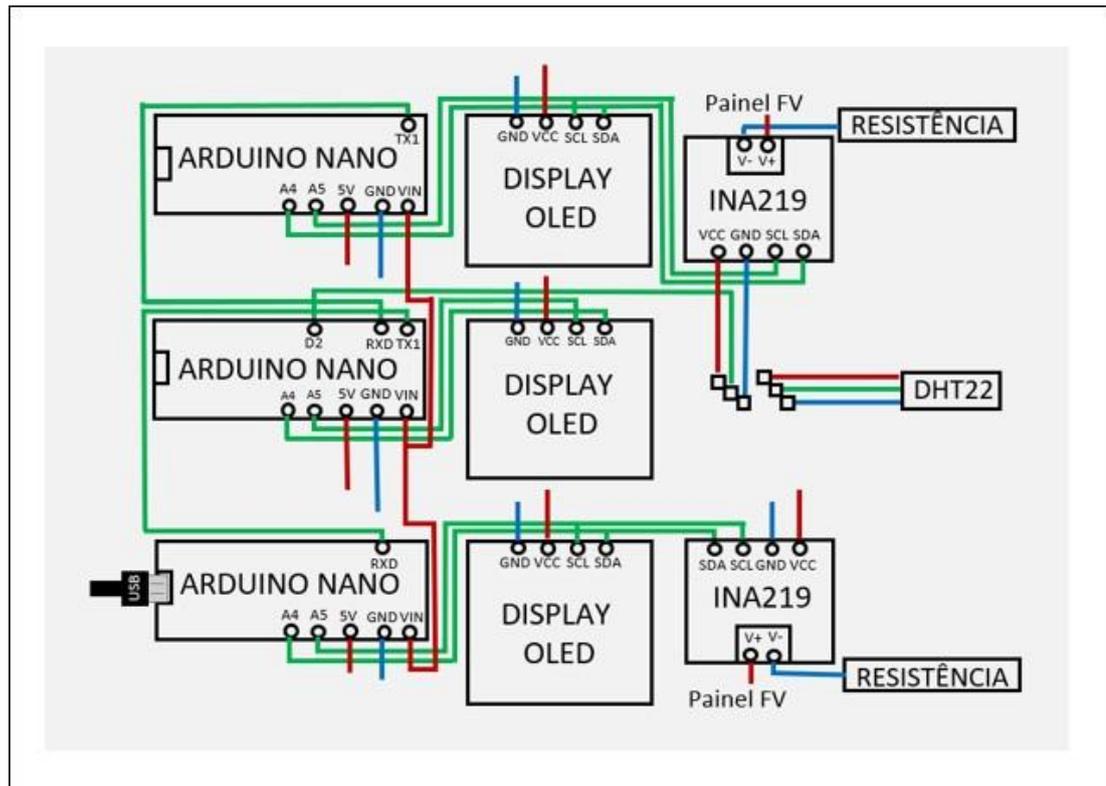
Sensor de temperatura e umidade relativa do ar
Modelo: AM2302 DHT22
Tensão de operação: 3-5 VDC (5,5VDC Máximo)
Faixa de medição de umidade: 0 a 100% UR
Faixa de medição de temperatura: -40° a +80°C
Corrente: 2,5 mA Max durante uso, em stand by de 100uA a 150uA
Precisão de umidade de medição: 2,0% UR
Precisão de medição de temperatura: 0,5°C
Resolução: 0,1
Tempo de resposta: 2s
Dimensões: 25 x 15,7 mm (sem terminais)

Fonte: Adaptado de (AOSONG ELETRONICS, 2022)

3.2.3 Placa de prototipagem (*protoboard*)

A Figura 4 ilustra a organização dos componentes na protoboard e suas conexões de forma esquemática.

Figura 4 – Esquemático da organização dos componentes na protoboard.



Fonte: Autor

Observa-se que os painéis FVs estão conectados aos sensores de corrente (INA219). Nota-se, ainda, a presença da conexão do sensor de temperatura do ar e umidade relativa do ar (DHT22). Os sensores INA219 e DHT22 estão conectados a 3 microcontroladores ATmega328 Arduino Nano que têm como função o processamento e a transmissão de informações provenientes dos sensores INA219 e DHT22 para os displays Oled e para o computador base via cabo mini USB. O Arduino Nano é uma placa eletrônica muito compacta e versátil, de fácil manipulação, possuindo 14 entradas/saídas digitais (D1 a D13), 8 entradas analógicas, (A0 a A7) 1 UARTs (porta serial de hardware), um oscilador de cristal de frequência 16 MHz, uma conexão mini-USB, entradas de alimentação, conexão ICSP e um botão para reset.

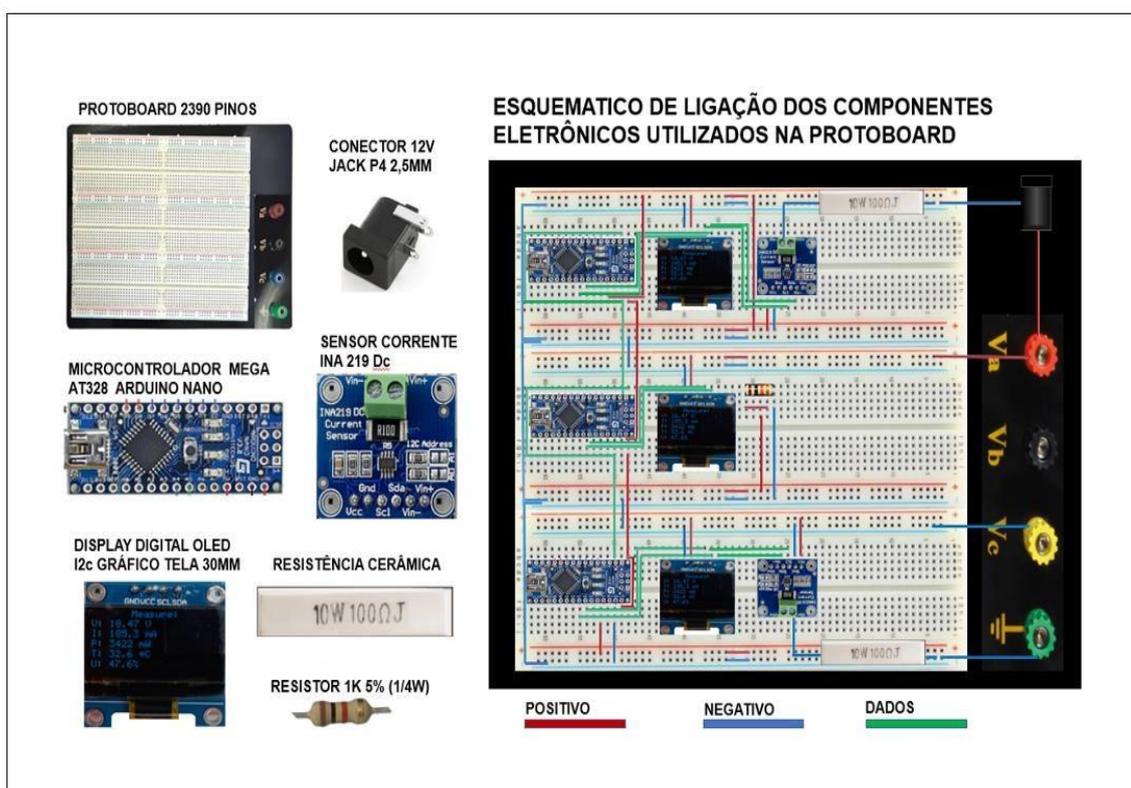
A utilização dos microcontroladores no experimento realizado, se deu de forma que cada Arduino fosse transferindo informações integradas aos demais Arduinos, através das portas TX (Transmitir) ligada a porta RX(Receber) do Arduino seguinte, estando conectados entre si, pela chamada interface UART.

É importante ressaltar que a Figura 2 mostra a conexão da protoboard ao DHT22, enfatizando que esse sensor fica instalado dentro do abrigo meteorológico, conforme descrito no item 3.2.

Os dados coletados pelos microcontroladores são transmitidos, via porta mini_USB ao computador base, onde podem ser analisados. Mais ainda, nota-se a presença de 3 displays OLED que permitem a visualização dos dados coletados. Observa-se, finalmente, a presença de duas resistências de 100Ω que atuam como carga dos painéis FVs.

A Figura 5 apresenta as imagens dos componentes utilizados para o desenvolvimento da placa de prototipagem.

Figura 5 –Componentes utilizados para o desenvolvimento da placa de prototipagem.



Fonte: Autor

3.2.4 Computador base

Foi utilizado, como computador base, um *notebook* da marca Acer, com processador Intel®Core™ i5-430M, modelo Aspire E5-572-6586, com sistema operacional Windows 7 profissional de 64 bits e memória de 4 GB DDR3 (RAM).

O computador base recebe, processa e organiza os dados coletados para armazenamento e posterior análise de todas as informações. Foi utilizado, rodando nesse computador, um sistema supervisor, desenvolvido em linguagem Python (versão 2.6.2), que permite o monitoramento das grandezas medidas de temperatura, umidade relativa do ar, tensão, corrente e potência.

Para a realização da coleta, foi estabelecido um espaço de tempo de cinco minutos entre um armazenamento e outro de informações, visto que a geração de energia e as condições climáticas de temperatura e umidade relativa do ar constatadas não sofrem variações bruscas em intervalos menores de tempo.

3.2.5 Abrigo meteorológico

Se exposto diretamente ao Sol, o sensor de temperatura absorve parte da radiação solar e aquece acima da temperatura ambiente. Este aquecimento excessivo causa uma significativa diferença durante as medições, entre a temperatura captada pelo sensor e a temperatura real do ar no ambiente. Por isso, se fez necessário o uso de um abrigo que protegesse o sensor de temperatura e umidade relativa do ar da radiação solar (VALIN et al., 2016).

O abrigo meteorológico foi fundamentalmente empregado para receber em seu interior o sensor de temperatura e umidade DHT22. A instalação do abrigo meteorológico foi realizada em uma haste de madeira fixada verticalmente no campo de futebol, sendo que a montagem do abrigo na haste foi realizada a 1,5m do solo, seguindo as exigências da Organização Meteorológica Mundial (WMO), que estabelece as normas e padrões para instalação dos instrumentos meteorológicos, determinando que o abrigo/sensor de temperatura e umidade relativa do ar deve ser instalado a uma altura entre 1,25 a 2,00m, acima do terreno sendo aconselhado a 1,5m pois a diferença de temperatura para sensores localizados entre 1,5 e 2m é inferior a 0,2 °C.

O modelo de abrigo utilizado é composto de 8 camadas de pratos quadrados de cantos arredondados, produzidos em polímero rígido branco, com um átrio central para a colocação do sensor. Os pratos são montados intercalados em 3 eixos metálicos com rosca na extremidade, parafusados na parte superior no suporte metálico de fixação da haste.

A Figura 6 exemplifica em uma sequência de imagens, como é o procedimento de desmontagem do abrigo meteorológico para a colocação do sensor em seu interior, e sua remontagem e fixação na haste para utilização.

Figura 6 –Desmontagem do abrigo para colocação do sensor e remontagem para utilização do equipamento.



Fonte: Autor

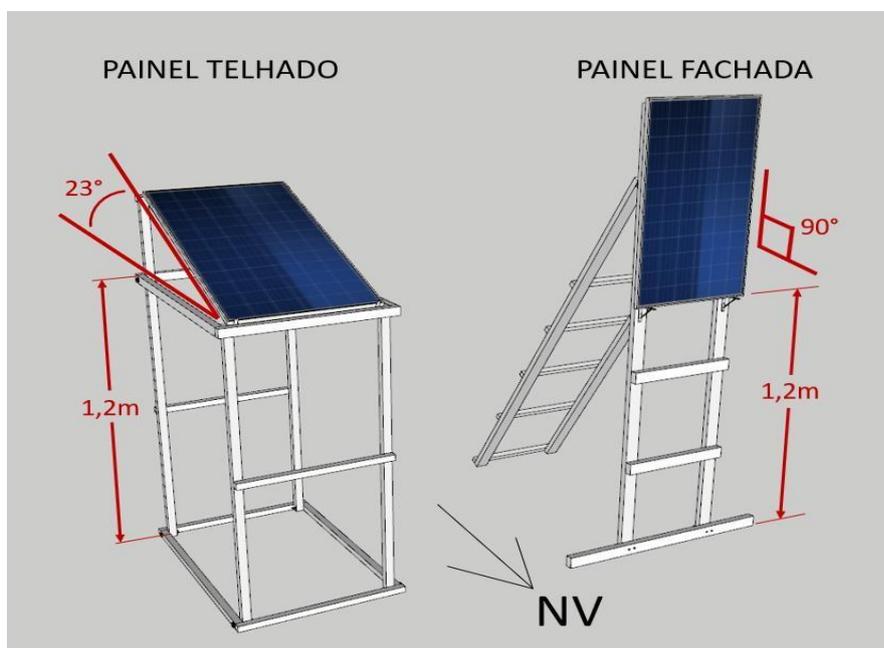
3.2.6 Estruturas para a fixação dos painéis

Foram realizados o projeto e a execução de estruturas para fixação dos painéis FVs. Todo o projeto foi pensado de modo que as estruturas fossem independentes,

para cada painel, de modo que pudessem ficar separadas, evitando que um painel viesse a sombrear o outro. Foi realizado o desenvolvimento para que o painel emulando a instalação em uma fachada ficasse instalado com ângulo exato de 90 graus, a 1,20m do solo, evitando a influência do aquecimento dessa superfície (solo) na eficiência do painel. A estrutura de fixação de painel emulando a instalação em telhado foi realizada de modo que o painel se apoie em um ângulo de 23° de inclinação partindo do plano horizontal, ângulo este correspondente ao ângulo aproximado de latitude do local onde o painel foi instalado.

A Figura 7 ilustra o posicionamento de cada painel utilizado em sua respectiva estrutura projetada, sendo um painel emulando a posição de instalação em fachada e o outro emulando a posição de instalação em um telhado, ambos direcionados para o Norte verdadeiro. Deve-se salientar que foi realizada a correção do Norte verdadeiro, utilizando-se o aplicativo online disponível SunPositions para esse fim (STONEKICK, 2021).

Figura 7 –Posicionamento de cada painel utilizado em sua respectiva estrutura



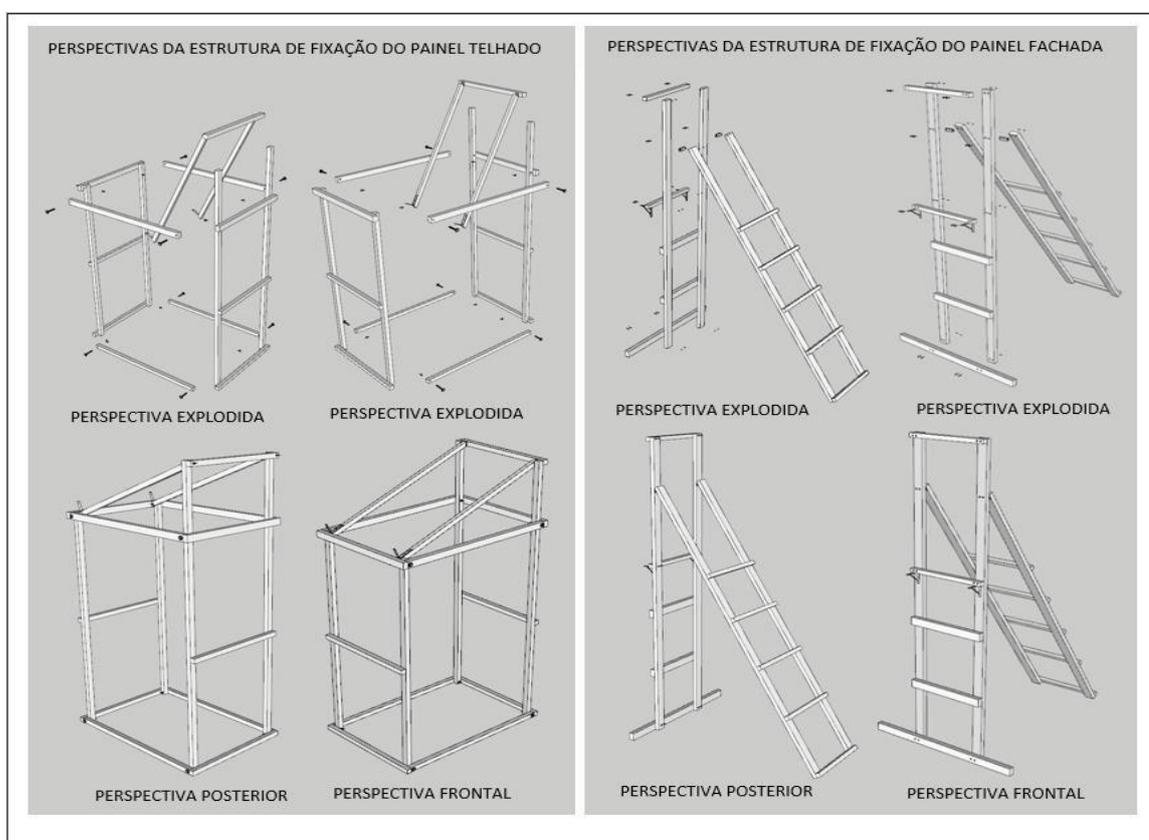
Fonte: Autor

A idealização das estruturas e também alguns parâmetros de montagem se basearam em referências na literatura, como os experimentos realizados por (SÁNCHEZ; IZARD, 2015) que utiliza um protótipo arquitetônico estrutural com painéis em todo o seu entorno para avaliação do desempenho fotovoltaico em diferentes

orientações representando fachadas.

As estruturas foram confeccionadas em madeira com várias partes desmontáveis para facilitar o transporte e seu armazenamento. Cada estrutura foi projetada em partes conectáveis por parafusos, arruelas de pressão e porcas formato borboleta, não necessitando de chaves ou ferramentas específicas em campo para sua montagem. A Figura 8 ilustra em detalhes o projeto de cada estrutura desenvolvida para posicionamento dos painéis emulando fachada e telhado.

Figura 8 – Ilustrativo em perspectivas das peças de montagem das estruturas para fixação dos painéis.



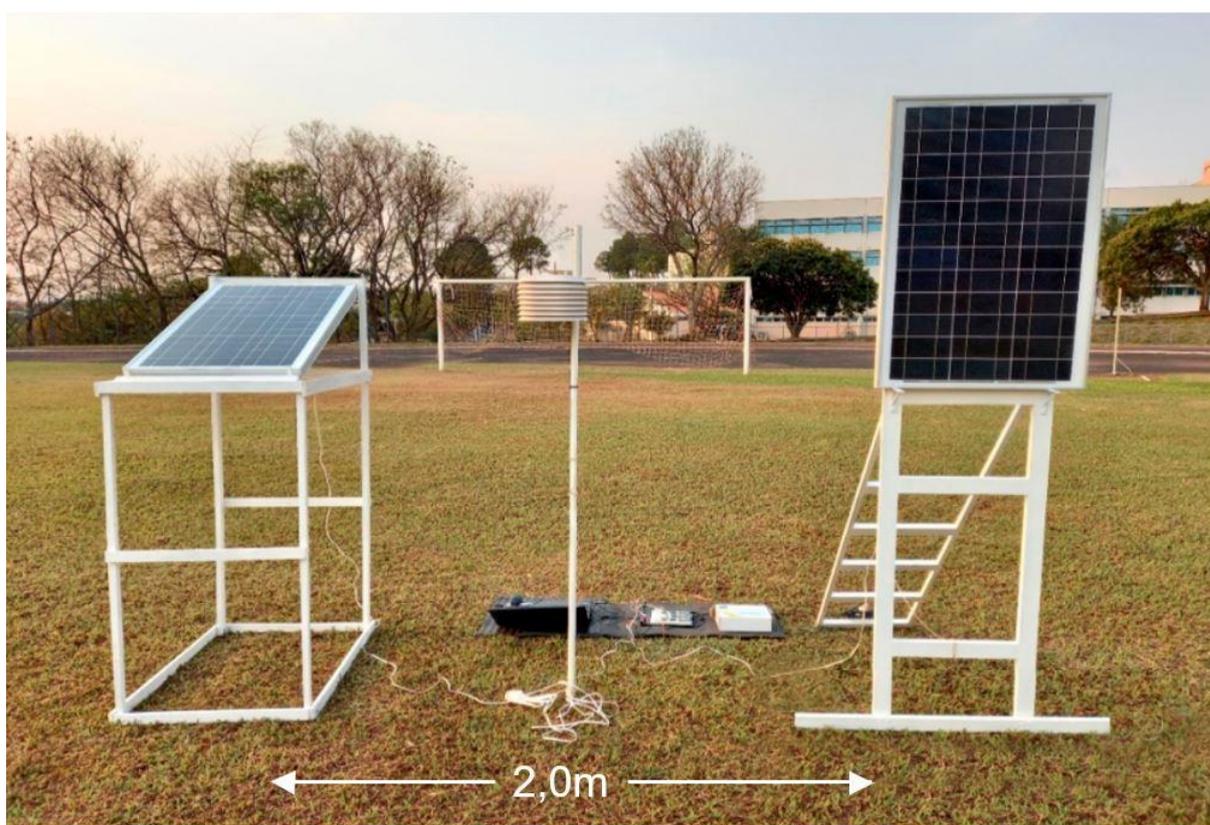
Fonte: Autor

Os encaixes e travamentos estruturais foram pensados para garantir a firmeza necessária para suportar o painel e a ação de ventos incidentes em sua superfície, proporcionando estabilidade às estruturas.

Antes da montagem, as peças de madeira, parafusos e dobradiças foram pintados de branco conforme padrão, para minimizar a absorção da radiação solar, mesmo estando estes instalados sobre vegetação rasteira e longe de fontes transmissoras de calor, diminuindo o ganho e transmissão térmica das estruturas.

A Figura 9 mostra a imagem das duas estruturas montadas com seus respectivos painéis fotovoltaicos posicionados no local escolhido para as coletas de dados (campo de futebol da Universidade), onde é possível visualizar, entre as duas estruturas, o abrigo meteorológico e as ligações provenientes do equipamento utilizado para a coleta de dados.

Figura 9 –Estruturas montadas com os painéis e equipamentos de coleta.



Fonte: Autor

3.3 Acompanhamento fotográfico de posicionamento solar e condições ambientais meteorológicas

A realização do acompanhamento da posição do sol ao longo do período de coleta foi vinculada aos demais dados monitorados no experimento. Para isso, foram utilizados diversos recursos para o acompanhamento, tendo em mãos, como ferramenta principal para essa atividade, a carta solar, que fornece informações da localização geométrica do sol em determinado dia e horário através da altura solar e do azimute.

Para a obtenção da representação da carta solar atualizada e dos dados da geometria solar do local exato do experimento, foram utilizados recursos disponíveis gratuitamente. As cartas solares, tabelas e gráficos de altura e azimute solar foram obtidas através dos sites: (SUN EARTH TOOLS, 2021) e (GLOBAL SOLAR ATLAS,

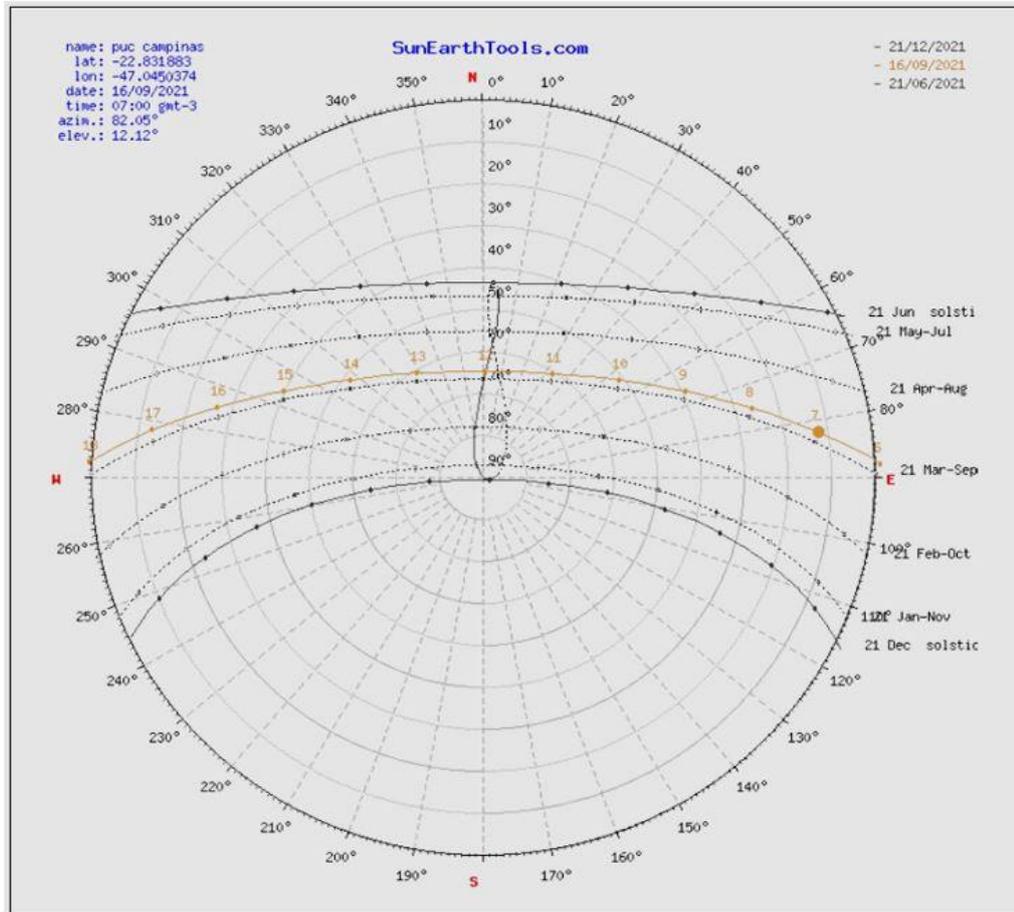
2022) com sistema gratuito online, baseado em mapas que fornecem informações sobre recursos solares e o potencial de energia fotovoltaica global.

O acompanhamento da trajetória solar durante os dias de coleta foi realizado como auxílio do aplicativo online SunPositions (STONEKICK, 2021) .

A Figura 10 ilustra a carta solar obtida através da referência (SUN EARTH TOOLS,2021), para o local de coleta através de suas coordenadas geográficas lat-22.831883,lon -47.045023 no dia 16/09/2021, com o posicionamento inicial da coleta marcado pelo ponto às 7:00h na linha de trajetória solar em laranja na carta. Com base nestas referências, são registrados os ângulos de percurso do sol e os ângulos formados entre este percurso e a superfície de ambos os painéis fotovoltaicos a cada hora.

A metodologia utilizada de acompanhar a geometria solar e as condições do local, permitem uma projeção das condições do ambiente e a influência destas condições ambientais especificadas na geração dos painéis fotovoltaicos em diferentes posições de cobertura ou fachadas, podendo se estender como método para a obtenção de resultados esperados para cada mês ou período do ano, durante as diferentes estações através de avaliação da carta solar de cada região específica no mundo e utilizando os dados climáticos ambientais.

Figura 10– Carta solar do dia 16/09/2021 para o local da coleta de dados.

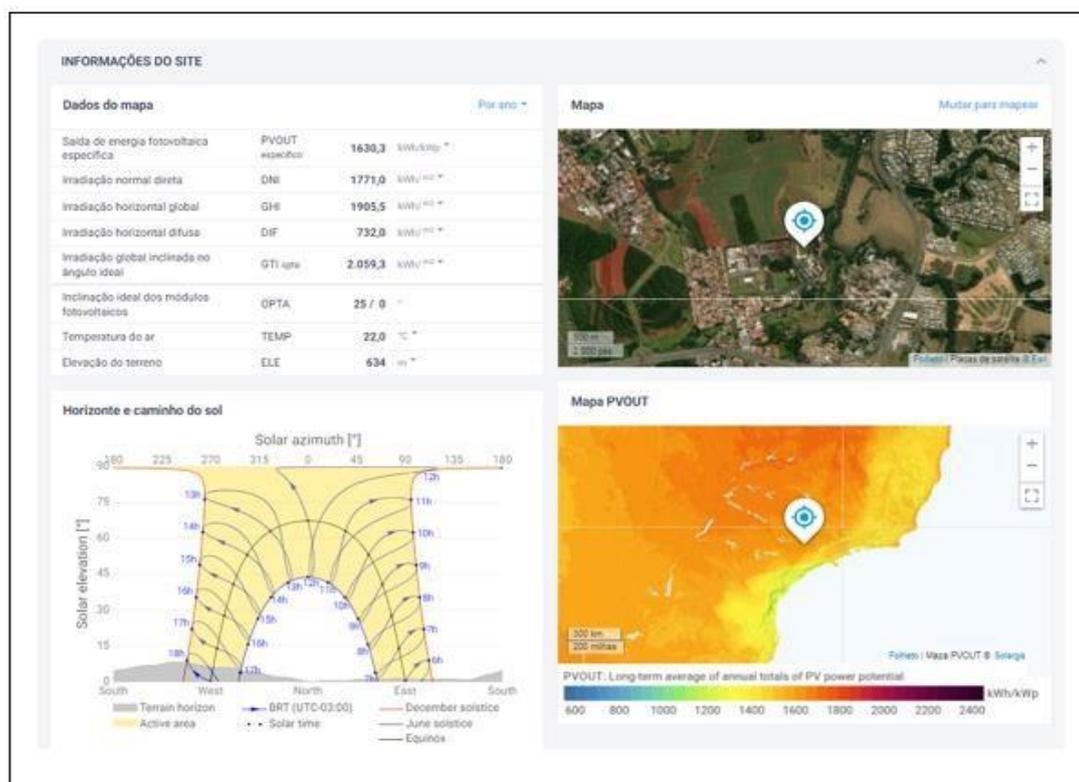


Fonte: (SUN EARTH TOOLS, 2021)

Através destas ferramentas, foram referenciados os ângulos entre o posicionamento do Sol e a superfície do painel ao longo de cada dia de coleta como também as médias globais de irradiação normal, direta e inclinada para o local, assim como as médias de temperatura e capacidade de geração fotovoltaica para a região, as quais foram obtidas pelo aplicativo gratuito do site Atlas Solar Global que proporciona diversos dados atualizados de eletricidade fotovoltaica e radiação solar.

A Figura 11 mostra um exemplo da diversidade de informações obtidas na referência (GLOBAL SOLAR ATLAS, 2022) voltadas a análise de radiação solar, temperatura e possibilidade de geração fotovoltaica pelo SolarGIS. As informações dos aplicativos, juntamente com dados ambientais climáticos gerados pelo CEPAGRI (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura) fazem parte do processo de validação dos dados coletados.

Figura 11 - Informações da referência utilizadas para a análise de radiação solar.



Fonte: Adaptado de (GLOBAL SOLAR ATLAS, 2022)

Junto a obtenção de informações ambientais e climáticas, com finalidade de complementar a caracterização geométrica solar, foi realizado, de modo bastante simplificado, o acompanhamento fotográfico horário do céu de um ponto fixo, abrangendo a área onde os equipamentos se encontram instalados durante a coleta. A principal contribuição desta metodologia de monitoramento é fornecer dados climáticos complementares das condições de nebulosidade e iluminação, as quais, junto aos demais fatores ambientais, influenciam na geração fotovoltaica.

Os registros fotográficos são de grande importância, durante o período em que foram realizadas as coletas, durante o final do inverno e início da primavera, em que há variações importantes de temperatura e, conseqüentemente, das condições atmosféricas, contribuindo para formação passageira de nuvens de diferentes densidades e possibilidade de ocorrerem precipitações leves durante a coleta.

O acompanhamento prático das condições meteorológicas foi realizado de forma bastante simplificada, apenas através da análise de registros fotográficos para identificação da presença de nebulosidade e suas variações. A classificação dos

diferentes tipos de nuvens foi efetuada por meio dos conceitos e informações presentes no atlas internacional de nuvens 1975 (OMM, 1975; FITZGERALD, 2017).

A metodologia aplicada nesse caso foi desenvolvida a partir do estudo de artigos e trabalhos da literatura científica, que abordam a importância da análise meteorológica e de irradiação solar na previsão de geração de energia solar fotovoltaica como (SHAYANI, 2006; PEREZ; PEREZ, 2009; INMAN; PEDRO; COIMBRA, 2013; LARSON; COIMBRA, 2018; YOUSIF et al., 2018; SAMU et al., 2021)

As imagens foram obtidas por meio de uma câmera digital sem nenhum recurso específico, somente com o intuito de registrar pontualmente as condições do céu a cada hora. Os registros fotográficos do céu foram comparados com os dados coletados de temperatura e umidade relativa do ar obtido nos mesmos respectivos horários.

O ponto utilizado para os registros fotográficos está localizado a 82,5 metros de distância dos equipamentos instalados para coleta e uma altura aproximada de 4,5 metros acima do nível do ponto de coleta, proporcionando uma abertura de visão bastante ampla do campo e do céu.

A Figura 12 apresenta uma imagem realizada pela câmera às 16:00h do dia 24/09/2021, durante a coleta, registrando a visualização do campo com os equipamentos instalados e face norte do céu e suas características meteorológicas.

Figura 12–Imagem registrada do local do experimento para auxílio na análise e classificação dos tipos de nuvem observados ao longo do dia de coleta.



Fonte: Autor

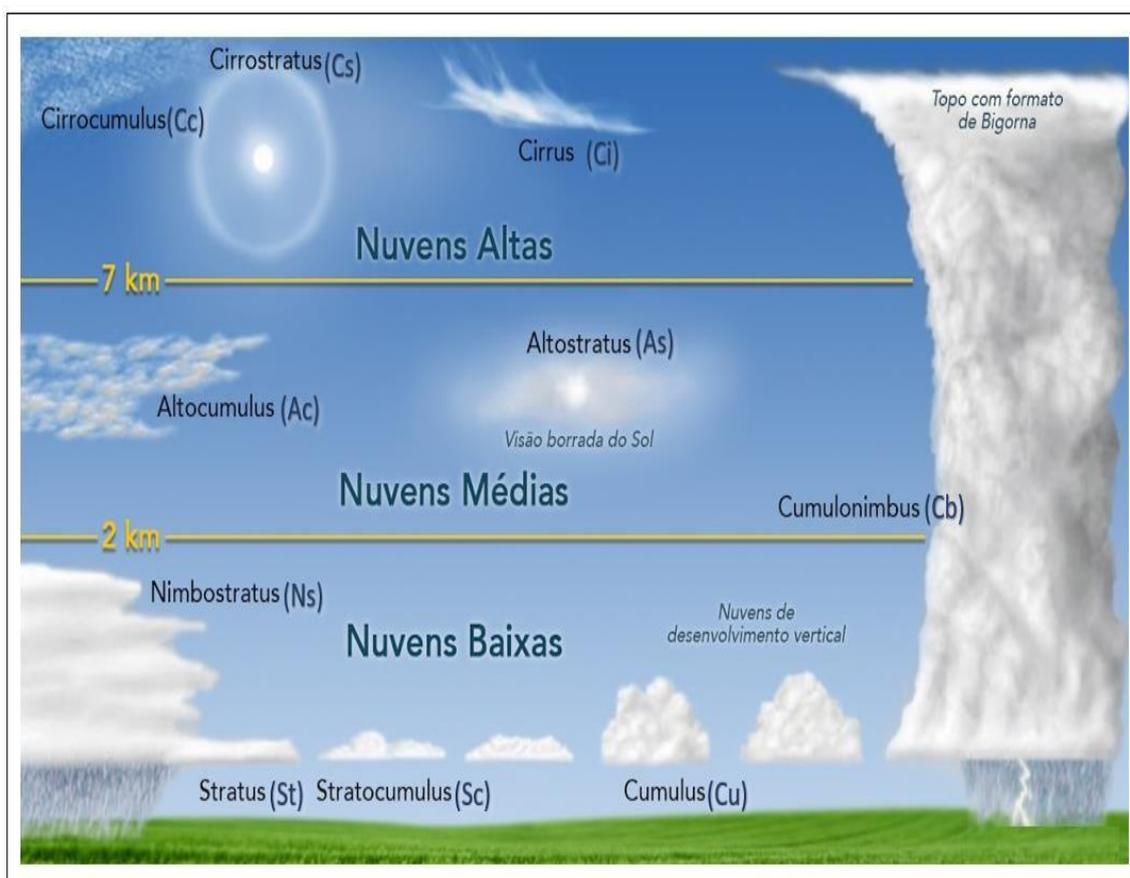
De acordo com o Atlas Internacional das Nuvens, padronizado pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2021), as nuvens são classificadas segundo dois critérios básicos: a aparência e a altitude na qual ela normalmente se encontra no céu. De acordo com a aparência, as nuvens se diferenciam por sua forma e distribuição, que são resultado das condições atmosféricas de temperatura, umidade, pressão e correntes de ar ou massas de ar, que promovem a mudança na concentração e formato das nuvens, que se dividem em três tipos: Cirrus (Ci), Cumulus (Cu) e Stratus (St).

As nuvens Cirrus (Ci) possuem formas fibrosas, ocupando posições altas no céu, acima de 6 mil metros, sua cor é branca com formas características mais finas. As nuvens Stratus (St) são camadas que ocupam uma grande parte ou toda a camada mais baixa no céu, tendenciado a concentrar-se em volumes mais densos, tendo formas mais arredondadas ou formar concentrações densas e mais escuras, proporcionando precipitações (nuvens de chuva) chamadas de Nimbostratus (Ns). Já as nuvens Cumulus (Cu) são massas geralmente individuais com formas arredondadas clássicas, utilizadas na representação ilustrativa de nuvens, com aparência de domos e volumes salientes brancos que ocupam grande parte da camada baixa do céu, até aproximadamente 2000 metros de altura, variando sua forma para Stratocumulus (Sc), de formato mais alongado conforme incidência dos ventos.

Qualquer nuvem apresenta uma destas formas básicas ou é formada por uma combinação delas, sendo importante salientar que em grande parte do tempo é observada a presença de mais de um tipo de nuvem no céu, devido a constantes variações de temperatura e pressão atmosférica, fazendo com que as nuvens mudem de forma e de altura. Quanto à altura as nuvens são agrupadas em quatro grupos: nuvens altas, médias, baixas e nuvens com desenvolvimento vertical.

Nuvens altas normalmente se encontram acima de 6000 metros de altitude; nuvens médias, geralmente estão entre 2000 a 6000 metros; nuvens baixas localizam-se a até 2000 metros, enquanto as formações de nuvens verticais abrangem mais de uma faixa de altura, de acordo com sua formação e concentração nebulosa conforme as informações presentes no International Cloud Atlas (FITZGERALD, 2017) e no informativo digital (WMO, 2021) . A Figura 13 ilustra o posicionamento, altura e classificação dos 10 tipos de nuvens definidos conforme os padrões da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2021).

Figura 13—Ilustração dos 10 tipos de nuvens pela Organização Meteorológica Mundial.

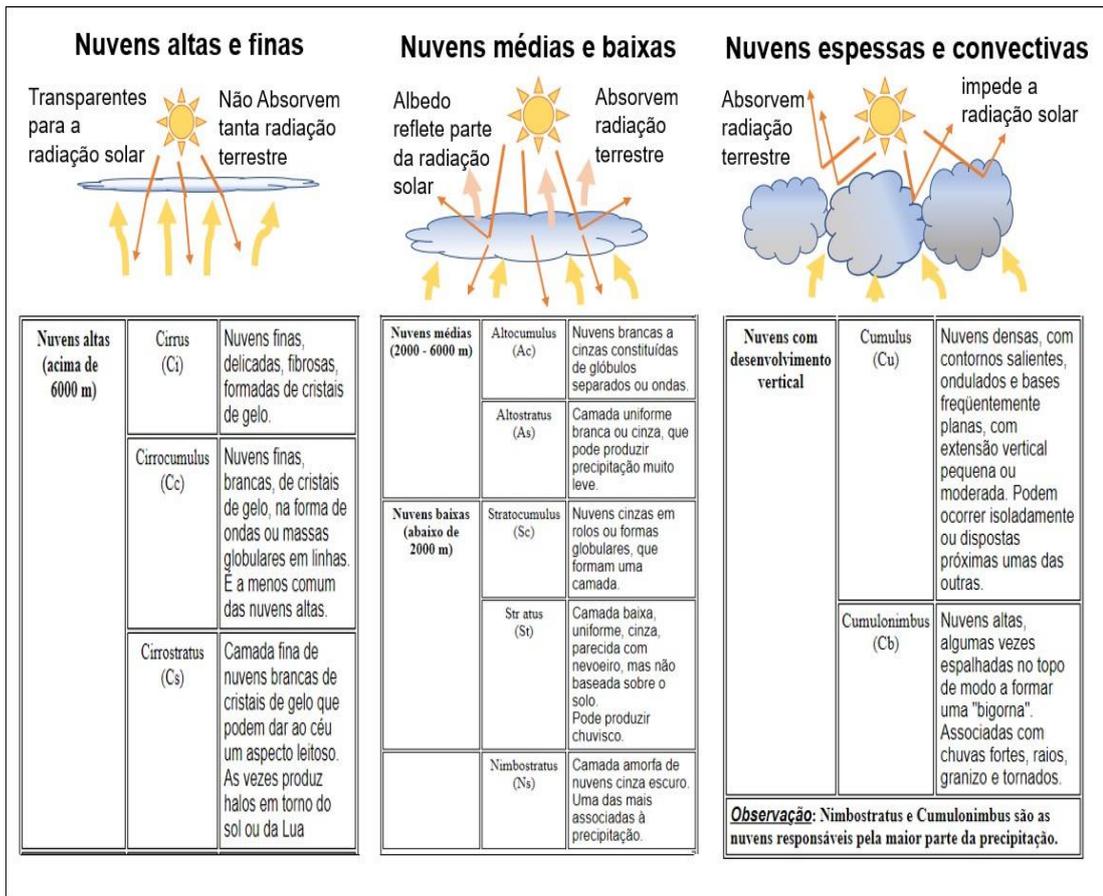


Fonte: Adaptado de (WMO, 2021)

De acordo com a altura em que se encontram sua forma aparente e tipo, as nuvens ocasionam diferentes índices de obstrução de radiação solar, isso devido a sua densidade e composição de gases, partículas de poluição, vapor de água e gelo, podendo reduzir a radiação solar direta que chega até um sistema fotovoltaico, pois parte desta radiação tem seu espectro de luz espalhado ou dissipado, e parte dessa radiação é absorvida variando conforme tipo de nuvem, sua densidade, formação e faixa abrangente no céu.

A Figura 14 representa um modelo esquemático simplificado, onde são apresentados os 10 tipos classificados de nuvens, sua altura e sua tendência a obstrução de radiação solar, conforme suas características e disposição no céu. Por meio desta metodologia, é possível identificar a possibilidade de ocorrência de obstrução através da identificação de tipologia e gênero de cada nuvem registrada fotograficamente a cada hora de coleta.

Figura 14– Esquemático de classificação dos 10 principais tipos de nuvens .



Fonte: Adaptado de (WMO, 2021)

Para uma completa identificação do percentual de Albedo solar ocasionado pelas nuvens sua composição e densidade, os índices de obstrução da radiação, os comprimentos de onda e espectros luminosos que chegam ao painel, entre outras especificações não são abordados nesta metodologia de trabalho abrindo espaço para esta conciliação em trabalhos futuros desta linha de pesquisa. Este trabalho se limita à identificação da ocorrência de diferentes formações de nebulosidade durante os dias de coleta e se existe a possibilidade de influência na radiação solar direta recebida no painel ou ocorrência de precipitações ligadas a variações de temperatura e umidade relativa do ar local.

A classificação da nebulosidade através do registro visual das imagens torna mais fácil e intuitiva a caracterização das condições locais, luminosidade e variabilidade climática, auxiliando na compreensão dos resultados de geração de energia dos painéis, além de apontar o quanto as condições ambientais influenciam nos resultados de geração, direcionando as melhores condições para futuras utilizações

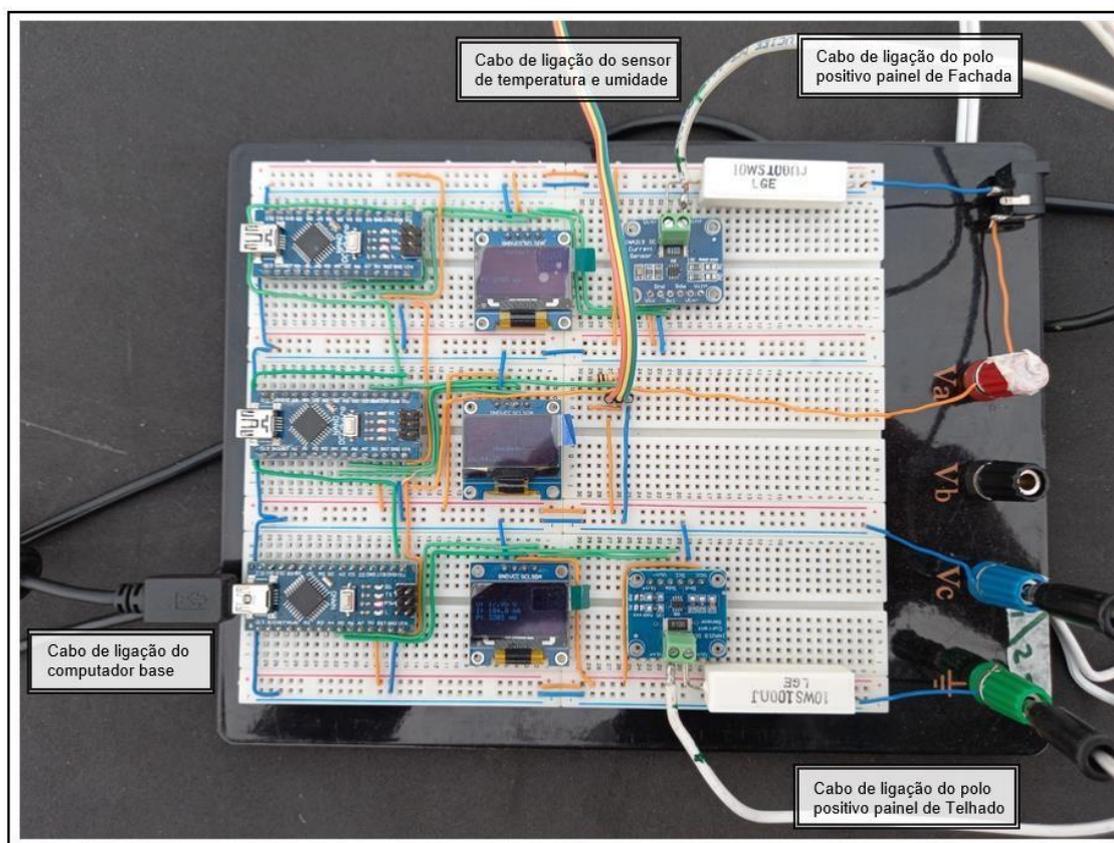
de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações.

3.4 Detalhamento da coleta de dados utilizando o sistema de monitoramento

O procedimento diário de coleta de dados se iniciava antes mesmo do nascer do Sol. Todo o equipamento de coleta era transportado até o ponto de coleta, marcado no campo de futebol com pequenas cunhas de madeira que identificavam onde posicionar cada um dos protótipos estruturais para colocação dos painéis. O procedimento de montagem das estruturas, os painéis e a instalação do abrigo meteorológico com o sensor ocorriam por volta das 5:30h. Após posicionadas, as estruturas são alinhadas por meio de uma bússola e auxílio de um aplicativo para direcionamento das faces para o norte verdadeiro. Este dado é de fundamental importância pois é a partir do norte verdadeiro que são traçadas todas as informações pela carta solar e demais aplicativos de monitoramento.

Depois de conferidos os ângulos e orientação das estruturas, era realizada a fixação das duas placas fotovoltaicas que também tinham sua inclinação conferida por nível digital. Uma vez posicionados e conferidos os ângulos, era ligado o cabo do sensor de temperatura e umidade e os cabos dos painéis fotovoltaicos à placa de prototipagem, para que essa pudesse ser ligada ao computador base (notebook). A Figura 15 ilustra as ligações provindas dos painéis fotovoltaicos, a ligação do sensor de temperatura e a ligação da protoboard com o cabo do computador base o qual transmite as informações e fornece alimentação à placa.

Figura 15 – Ligação dos painéis, sensor de temperatura e umidade e computador na placa de prototipagem.



Fonte: Autor

As informações de temperatura e umidade relativa do ar provenientes do sensor DHT22 e as tensões, correntes e potência provenientes dos sensores INA219 são enviadas aos microcontroladores.

Todo o equipamento era exposto cerca de uma hora antes do início efetivo da coleta, para a estabilização das condições de temperatura dos painéis e o clima locale principalmente do sensor de temperatura e umidade no abrigo meteorológico. Esse procedimento buscava evitar que variações de temperatura na adaptação do sensor fossem registradas no início da coleta, possibilitando que os painéis fotovoltaicos iniciassem a coleta na temperatura ambiente, buscando maior qualidade e precisão nos resultados registrados.

A atividade de coleta efetiva diária iniciava-se às 7:00h com a ativação do software de monitoramento no computador base, e a realização do primeiro registro fotográfico do dia. Os dados de temperatura do ar e de umidade relativa do ar

coletados eram validados a partir de comparação com os, dados climáticos fornecidos pelo CEPAGRI. O procedimento de coleta se encerrava às 17h e foi repetido do dia 08/09/2021 a 01/10/2021. Nesse período, foram selecionados 10 dias para a realização das coletas de dados de acordo com a disponibilidade do local de testes e da ausência de chuva.

As imagens registradas a cada hora das condições de nebulosidade, auxiliam na compreensão das variações da temperatura e formações de nuvens que possam interferir na intensidade de radiação solar direta nos módulos.

A análise da formação de nebulosidade registrada nas imagens durante o experimento não determinava o percentual de obstrução que a nuvem ocasiona na incidência solar barrando ou refletindo parte dela, mas auxilia na interpretação e conferência dos resultados.

A título ilustrativo, a Figura 16 apresenta a sequência de registros fotográficos do dia 29/09/2021, dia escolhido por apresentar uma diversidade de formações de nuvens ao longo do dia, podendo facilmente ser identificadas visualmente conforme a metodologia de identificação definida no International Cloud Atlas (OMM, 1975; FITZGERALD, 2017).

Por meio de uma avaliação visual das imagens sequenciais horárias que compõem a figura, é possível acompanhar uma composição mais dispersa de pouca concentração, formada de nuvens baixas, Stratus (St) no céu logo no início da manhã, permitindo boa incidência solar e luminosidade, indicando uma temperatura amena e pouca variação na corrente de ar.

Próximo ao horário do meio dia, observa-se uma maior concentração de nuvens de faixas de altura média entre 2000 a 6000 de altitude. Por conta do aumento da temperatura, é identificado a transição entre a formação de nuvens Cumulus (Cu), passando a Altocumulus (Ac), que ocasionam maior obstrução da irradiação solar direta. No decorrer da tarde, é possível observar a presença de instabilidade através da variação de nuvem tendenciando dispersão e alterando sua altura por conta da influencia da termica proveniente do aquecimento do solo, variando a nebulosidade entre Stratus (St) mais baixas e Altostratus (As) mais altas no céu.

Figura 16– Sequência de registros fotográficos realizados em 29/09/2021



Fonte: Autor

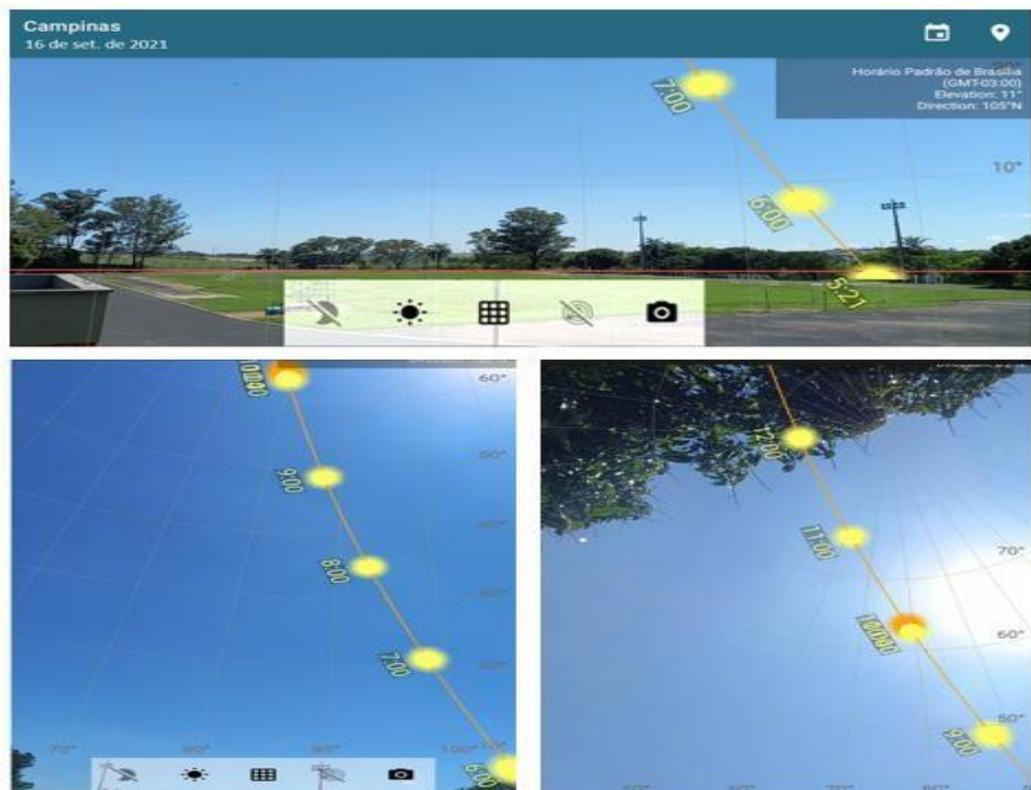
Durante o período de coleta de dados, além dos registros fotográficos, foi realizado, complementarmente, o acompanhamento da trajetória solar através da utilização do aplicativo SunPosition, aplicativo desenvolvido pela Stonekick aplicativos em sua versão atualizada (STONEKICK, 2021). Com o aplicativo instalado, a câmera utilizada proporciona, quando apontado para o céu, a exibição da posição exata do sol sobre a imagem da câmera como o AR (área de referência) do nascer ao pôr do sol, bem como o caminho solar percorrido em uma visão de câmera com efeito de realidade aumentada para qualquer dia do ano e em qualquer localização global.

Sua tela de dados também apresenta as circunferências principais de azimute e altura solar ao longo do percurso do Sol, as referências de coordenadas geográficas, e o horário GMT (Horário do Meridiano de Greenwich) ou conhecido como fuso horário UTC+0, ou seja 0 horas a diante do UTC (tempo universal coordenado), que no caso do local do experimento fica na faixa GMT-03:00, conforme horário padrão de Brasília. A utilização do aplicativo de forma visual auxilia a

localização solar acompanhada na carta solar impressa e proporciona a visualização do Sol posicionado junto a formações de nebulosidade mais densas, uma vez que o aplicativo se utiliza da imagem do céu em tempo real sob qualquer condição de nebulosidade que esteja sendo registrada pela câmera. Junto a imagem gerada pela câmera o aplicativo indica através de uma malha virtual gerada os ângulos referentes ao posicionamento da carta solar indicando o azimuth e a altura solar na qual o sol se encontra no momento registrado e a previsão de trajetória solar do dia completo dividido pontualmente em horas para registro pontual horário permitindo a previsão do posicionamento sequencial do sol.

A Figura 17 apresenta algumas das imagens obtidas com a utilização do aplicativo de forma aleatória, localizando a posição do Sol ao longo de sua trajetória no local do experimento, que somados ao acompanhamento pela carta solar possibilitam precisão dos ângulos de radiação direta que atingem a superfície dos painéis, e são utilizadas como ferramentas para definir o espaço amostral de ângulos de azimuth e altura solar mais favoráveis para cada painel durante o período analisado.

Figura 17– Registros da trajetória solar realizada através da utilização do aplicativo no local durante os experimentos



Fonte: Autor

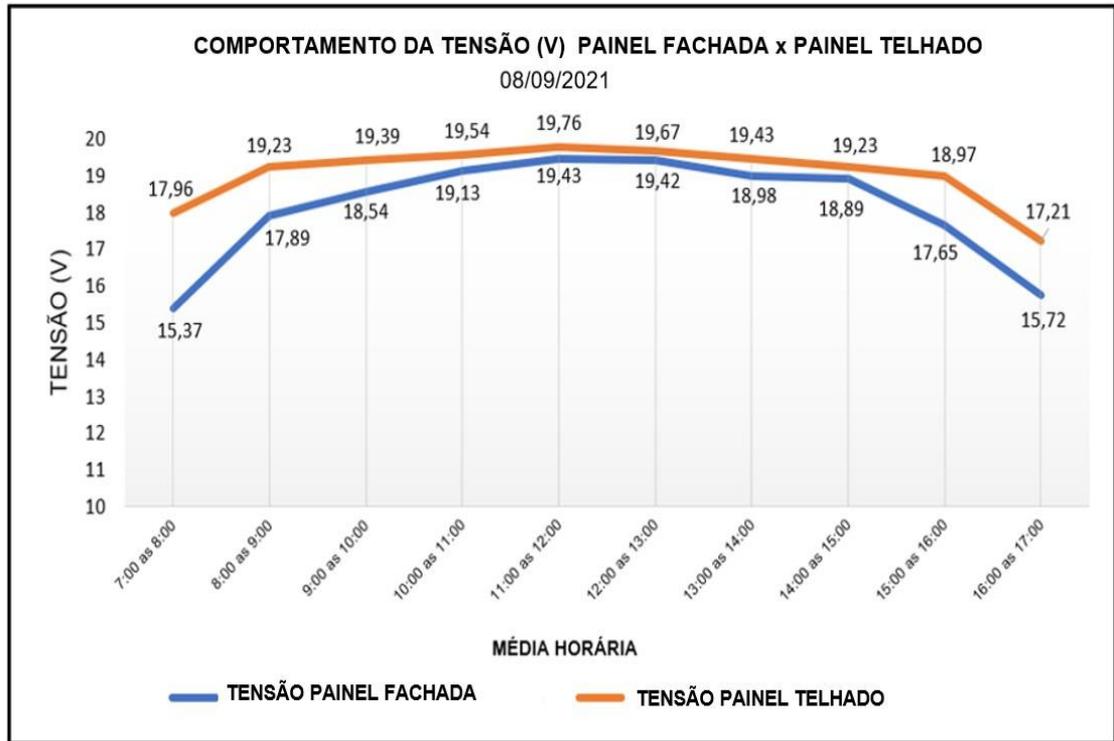
4. Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita no capítulo anterior. Conforme citado anteriormente, foram coletados dados referentes a 10 dias, entretanto, foram selecionados, para apresentação neste documento, os resultados mais significativos com relação a tendências de comportamento observadas.

4.1 Análise comparativa do comportamento da tensão, corrente e potência para os painéis posicionados na cobertura e na fachada

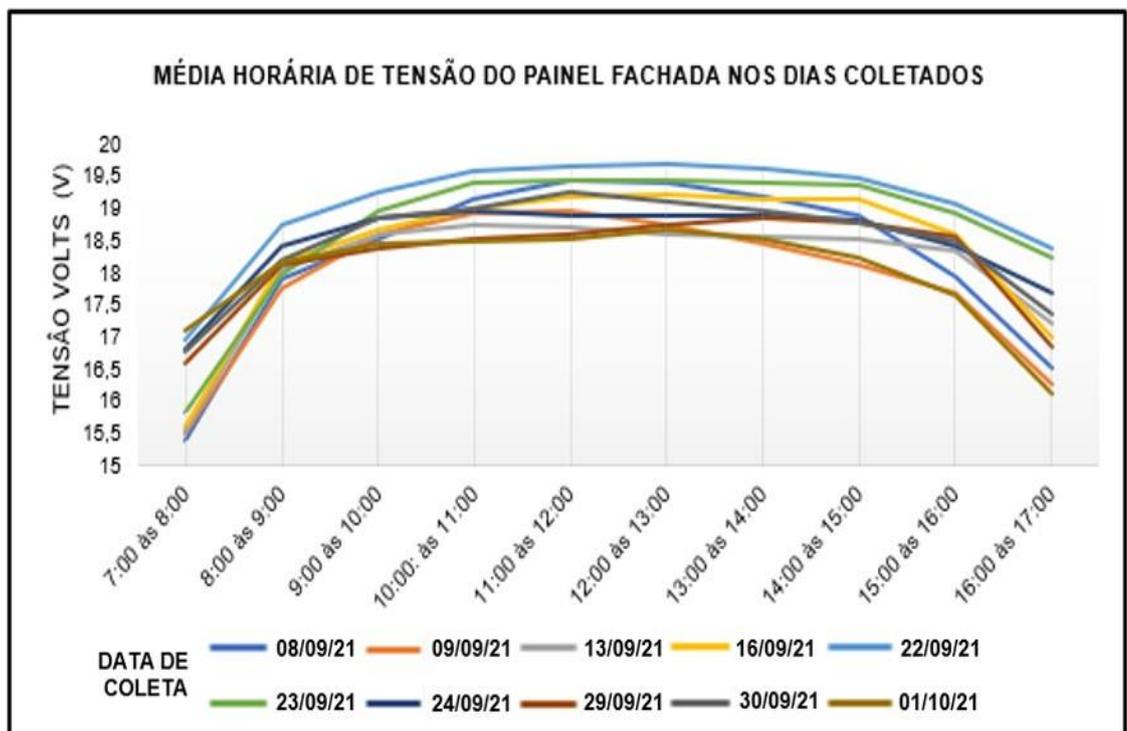
A Figura 18 apresenta a comparação entre o comportamento da tensão do painel na cobertura (telhado) e do painel na fachada, ao longo do período de medição no dia 08/09/2021. Observando as variações presentes nas curvas de tensão dos dois painéis, nota-se que, em nenhum momento, os valores de tensão do painel na fachada superam os valores do painel no telhado. Essa característica se repete nos resultados de todos os 10 dias de coleta realizados, conforme Figura 19 (painel fachada) e Figura 20 (painel telhado), assim como o comportamento da tensão ao longo do dia, evidenciando o aumento e posterior decréscimo da geração ao longo do dia.

Figura 18– Comportamento da tensão média horária dos painéis fachada e telhado no dia 08/09/2021



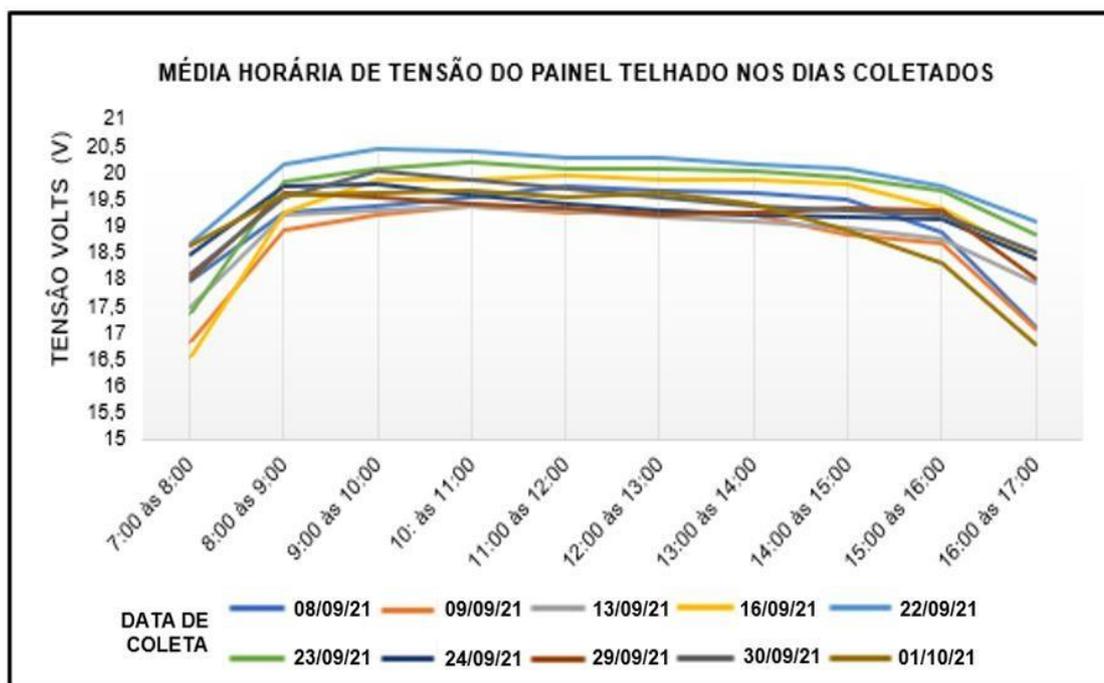
Fonte: Autor

Figura 19 – Comportamento da tensão do painel fachada através da média horária de cada dia de coleta realizado



Fonte: Autor

Figura 20 – Comportamento da tensão do painel no telhado através da média horária de cada dia de coleta realizado

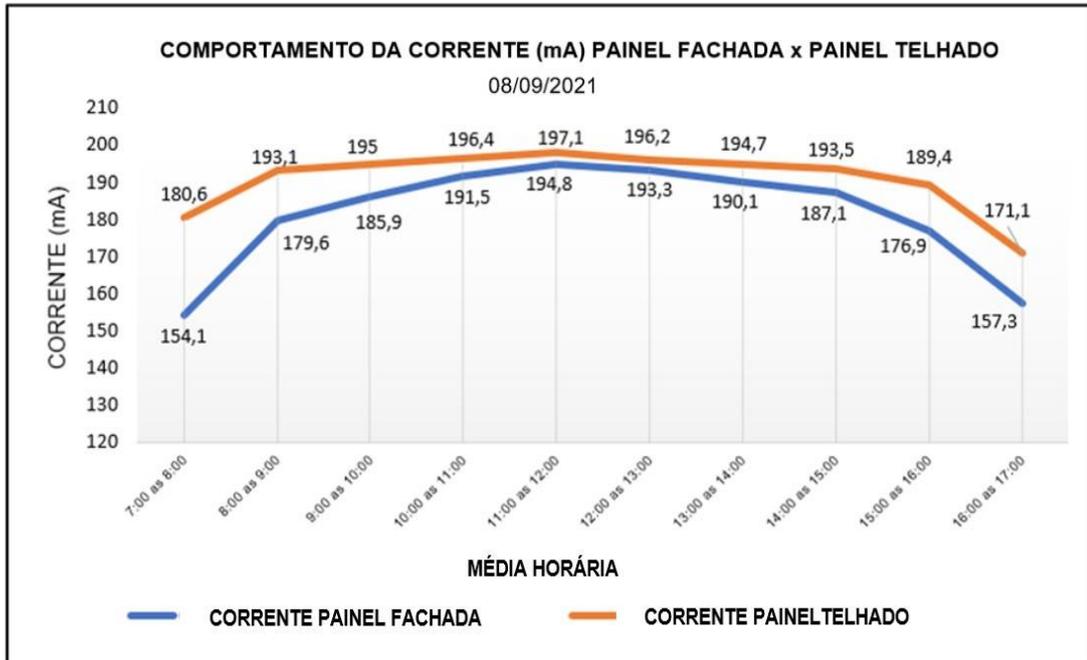


Fonte: Autor

Analisando as Figuras 18, 19 e 20, nota-se uma elevação da tensão entre as 7:00h (início da coleta) até aproximadamente 11:00h. Após esse período de crescimento da tensão, os valores de alguns dias passam por um pequeno período de estabilização antes da diminuição da tensão, principalmente, os valores gerados pelo painel no telhado. Este comportamento é mais facilmente identificado nos dias em que os picos de geração foram um pouco mais baixos como, por exemplo, nos dias 16 e 29 de setembro.

Nos dias em que a geração alcançou picos de resultados mais evidentes, como, por exemplo, nos dias 22 e 23, nota-se que logo ao atingir o valor máximo ocorre uma queda mais acentuada. Este comportamento se dá, principalmente, pelo fato do painel na fachada (orientada a norte), alcançar sua maior geração próximo do meio dia, onde os fatores ambientais envolvidos como temperatura e posicionamento solar lhe são mais favoráveis, promovendo o pico de intensidade de modo breve, com redução dos valores de forma gradativa até o final da coleta às 17:00h. Os valores de tensão mais elevados ocorreram, predominantemente, no período das 9:00h às 15:00h, tendo como média dos valores de tensão 19,13V para o painel no telhado e 18,19V para o painel na fachada. A Figura 21 apresenta as curvas das correntes geradas pelos painéis no dia 08/09/2021.

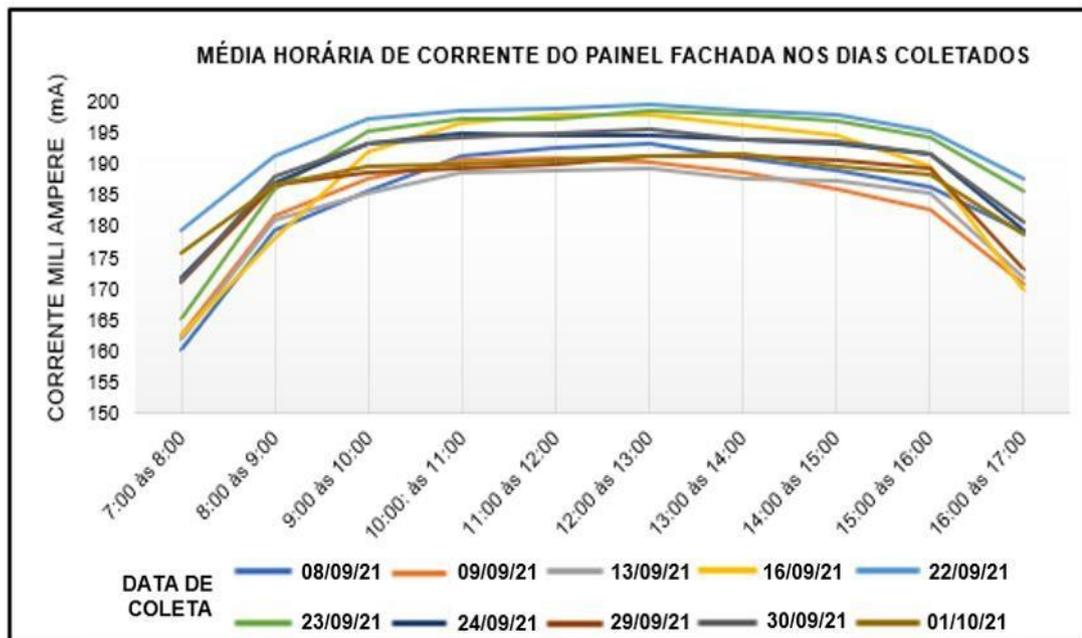
Figura 21– Comportamento da corrente gerada pelos painéis fachada e telhado no dia 08/09/2021



Fonte: Autor

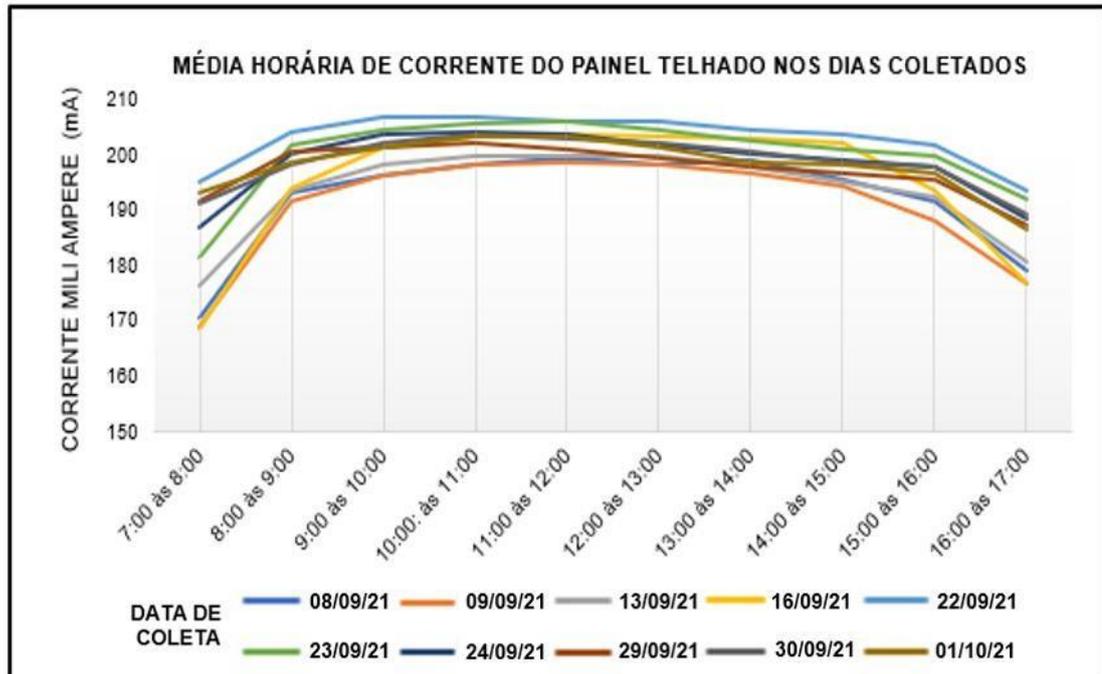
As Figuras 22 e 23 apresentam o comportamento das correntes geradas no paineln fachada e no telhado, respectivamente, considerando os dias de coleta.

Figura 22– Comportamento da corrente gerada pelo painel fachada para todos os dias de coleta



Fonte: Autor

Figura 23– Comportamento da corrente gerada pelo painel no telhado para todos os dias de coleta.



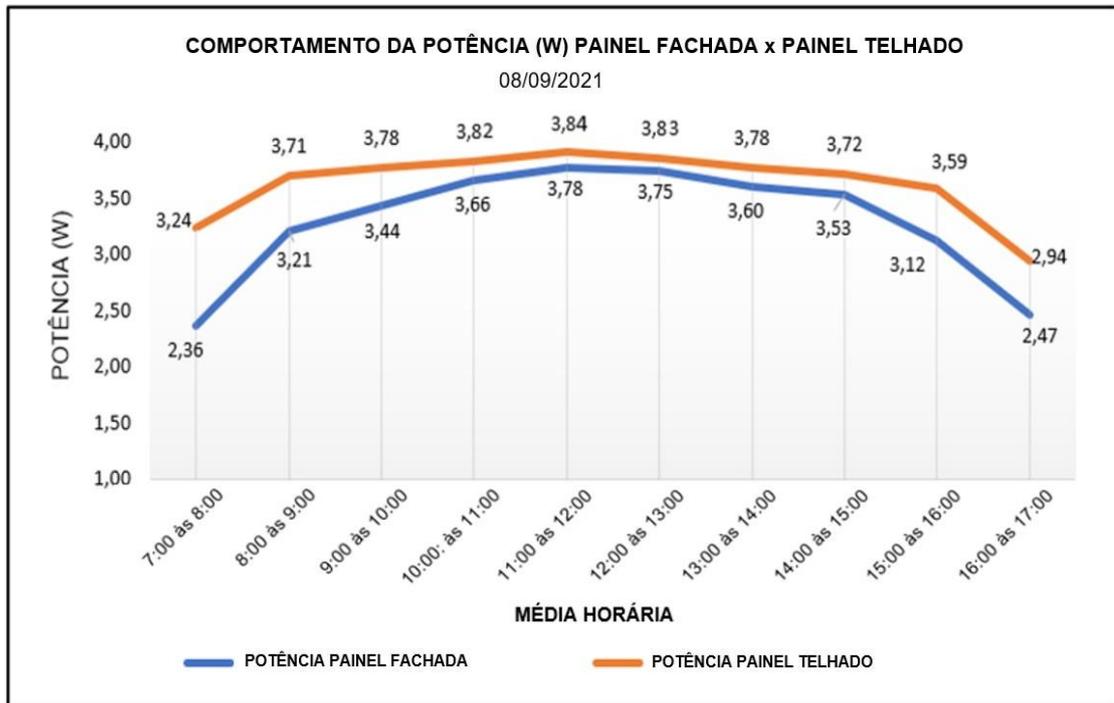
Fonte: Autor

Analisando-se as curvas referentes às correntes geradas (Figuras 22 e 23), nota-se um comportamento, ao longo do dia, semelhante ao da tensão.

A determinação da potência foi realizada através dos dados de tensão provenientes da saída de cada painel ligado a um sensor INA219 e uma resistência cerâmica provendo a corrente elétrica e fornecendo estas informações ao seu respectivo microcontrolador Arduino, que por sua vez faz a leitura das grandezas de tensão e corrente para calcular a potência por meio do código inserido em sua programação multiplicando o resultado das grandezas.

A Figura 24 apresenta o comportamento da potência gerada pelos 2 painéis (fachada e telhado) durante o dia 08/09/2021.

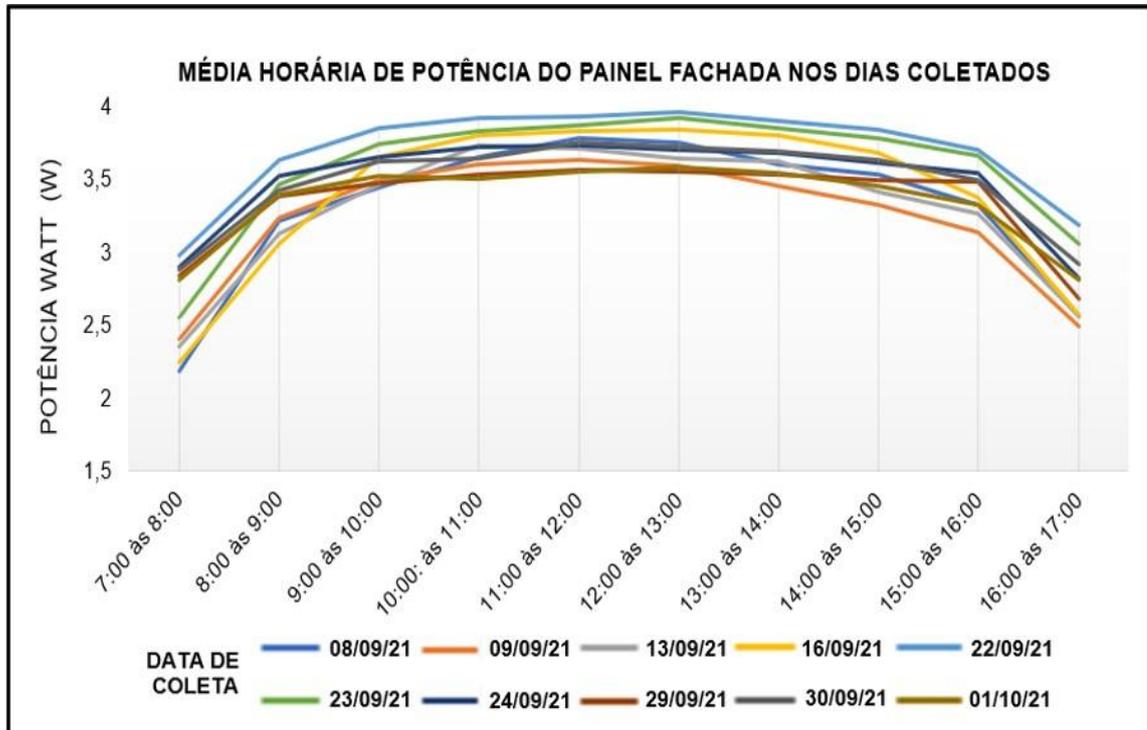
Figura 24 – Comportamento da média horária de potência gerada pelos painéis fachada e telhado no dia 08/09/2021



Fonte: Autor

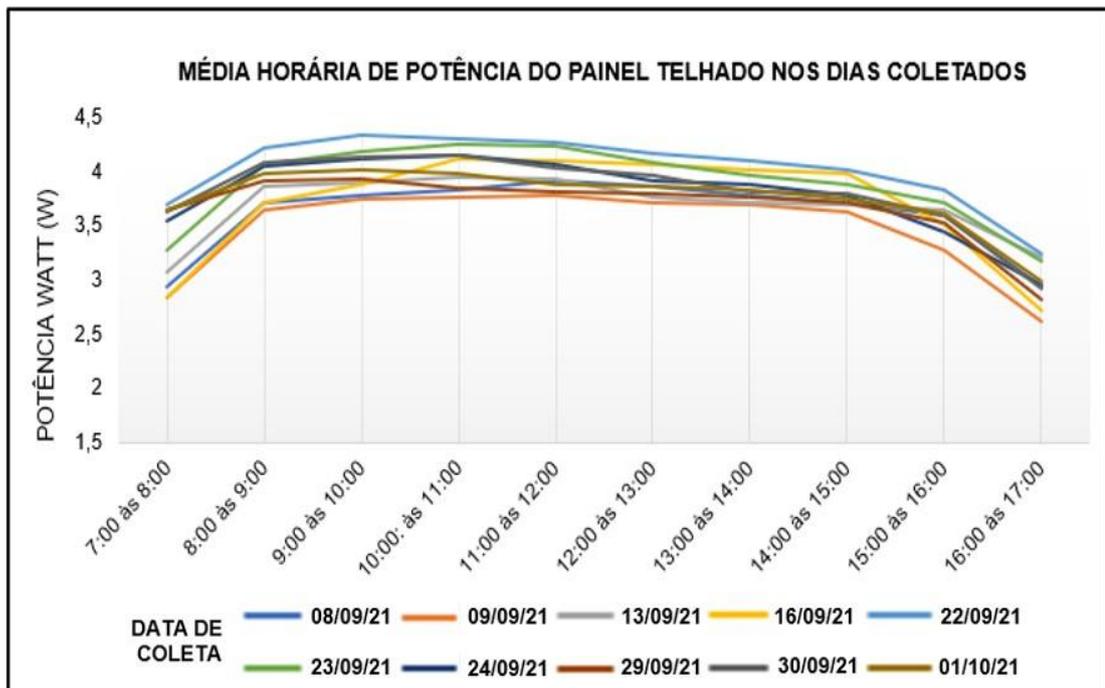
Nota-se que o comportamento da potência, ao longo do dia, é semelhante ao da tensão e da corrente. Esse mesmo comportamento pode ser observado nas Figuras 25 e 26 que apresentam o comportamento da potência gerada pelos painéis na fachada e no telhado ao longo de todos os dias de coleta.

Figura 25 – Comportamento da média horária de potência gerada pelo painel fachada para todos os dias de coleta



Fonte: Autor

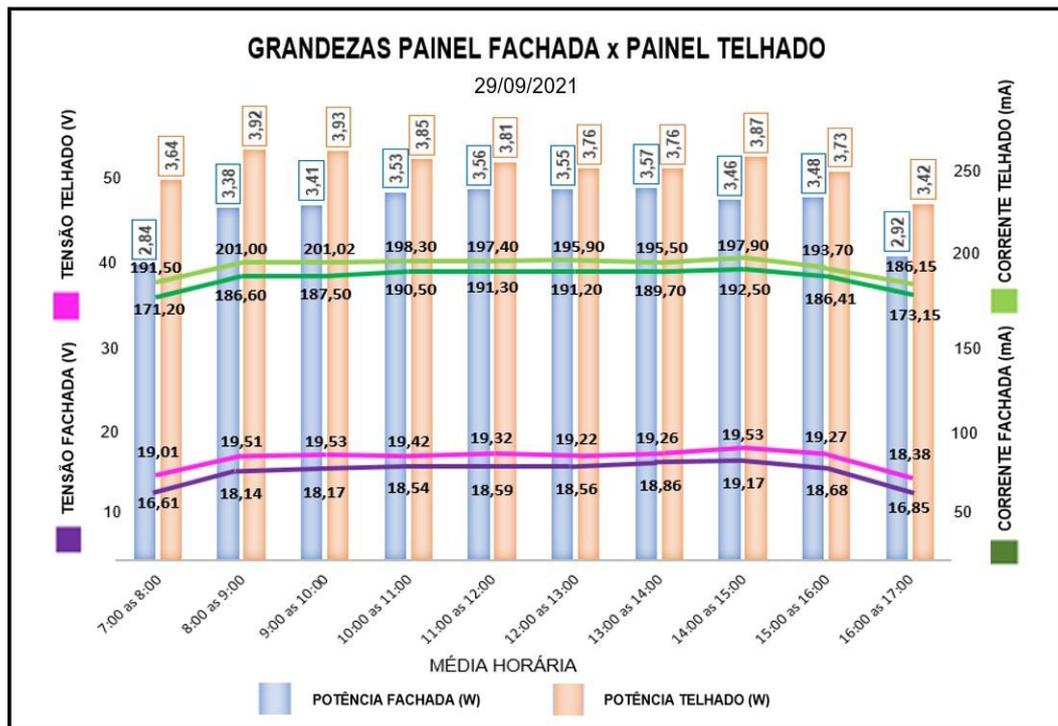
Figura 26 – Comportamento da média horária de potência gerada pelo painel telhado para todos os dias de coleta.



Fonte: Autor

A Figura 27 apresenta uma síntese de todas as grandezas (tensão, corrente e potência) para o dia 29/09/2021. O comportamento dessas grandezas foi semelhante para todos os dias de coleta.

Figura 27– Comportamento da média horária de tensão, corrente e potência dos painéis telhado e fachada para cada hora de coleta do dia 29/09/2021



Fonte: Autor

Da análise da Figura 27, nota-se que o painel na fachada obteve os maiores valores de potência no período das 11:00h até as 15:00h, tendo seus resultados mais próximos do painel no telhado entre as 11:00h e as 13:00h, período em que recebe maior incidência solar direta em sua superfície, tendo a tendência de manter essa alta por mais tempo com a diminuição dos valores de geração próximo ao final do experimento às 16:00h. A redução na potência gerada e, conseqüentemente, na geração de energia mais ao final da tarde é maior no painel na fachada, se distanciando, novamente, dos resultados do painel no telhado.

A Tabela 3 apresenta as médias horárias da tensão, corrente e potência para os dois painéis, bem como a média diária dessas grandezas para o dia 08/09/2021, apontando uma maior geração para o painel no telhado.

Tabela 3 - Características do comportamento médio horário das grandezas dos painéis fachada e telhado para o dia 08/09/2021

<i>Média Horária</i>	<i>Tensão Fachada (V)</i>	<i>Corrente Fachada (mA)</i>	<i>Potência Fachada (W)</i>	<i>Tensão Telhado (V)</i>	<i>Corrente Telhado (mA)</i>	<i>Potência Telhado (mA)</i>
7:00 às 8:00	15,37	154,1	2,36	17,96	180,6	3,24
8:00 às 9:00	17,89	179,6	3,21	19,23	193,1	3,71
9:00 às 10:00	18,54	185,9	3,44	19,39	195	3,78
10:00 às 11:00	19,13	191,5	3,66	19,54	196,4	3,83
11:00 às 12:00	19,43	194,8	3,78	19,76	197,9	3,91
12:00 às 13:00	19,42	193,3	3,75	19,67	196,2	3,86
13:00 às 14:00	18,98	190,1	3,60	19,43	194,7	3,78
14:00 às 15:00	18,89	187,1	3,53	19,23	193,5	3,72
15:00 às 16:00	17,65	176,9	3,12	18,97	189,4	3,59
16:00 às 17:00	15,72	157,3	2,47	17,21	171,1	2,94
Média Diária	18,102	181,06	3,29	19,04	190,79	3,64

Fonte: Autor

Graficamente, é observado que a curva de potência gerada pelo painel na fachada é levemente mais fechada, com suas extremidades de começo e final do período de coleta mais baixas e elevação moderada nos períodos do meio do dia.

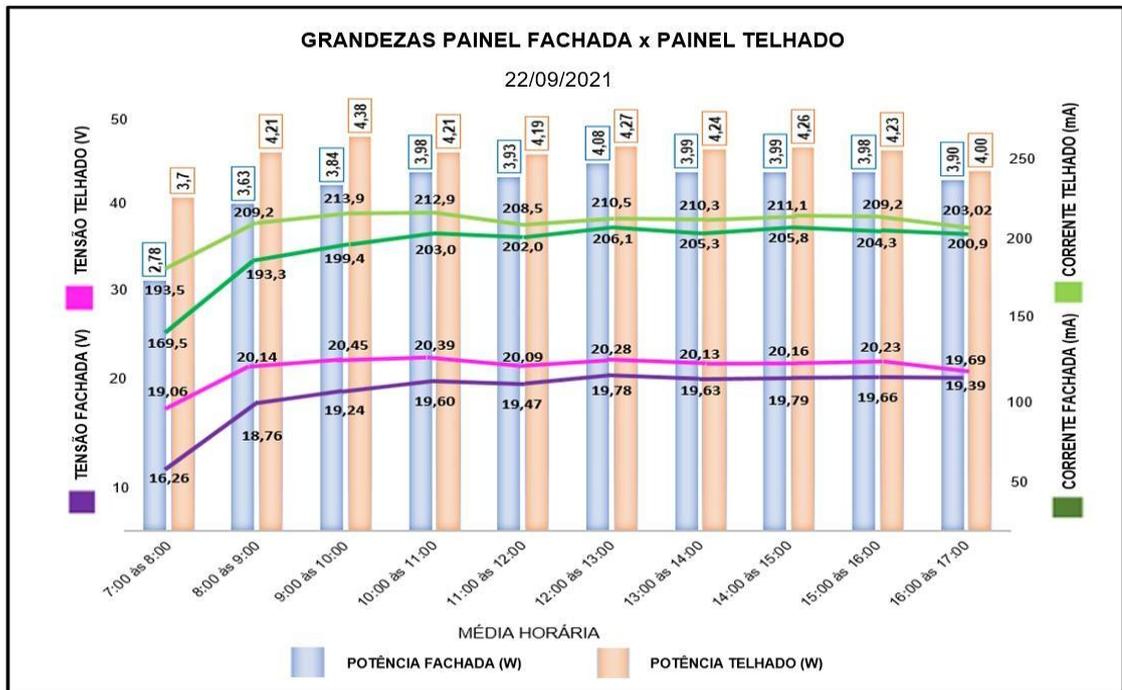
A curva de potência gerada pelo painel telhado tende a uma verticalidade menor do ponto de máximo, pois tendencialmente seus valores se elevam mais rapidamente no início da manhã e se estabilizam, mantendo uma menor variação de valores gerados no período das 10:00h às 15:00h.

Em alguns casos isolados, como mostra a Figura 28, as curvas de potência apontaram para um comportamento um pouco diferente do observado na maioria dos dias de coleta (que se comportaram como no dia 29/09/2021). Esse comportamento diferente foi verificado no dia 22/09/2021 em que as potências geradas pelos dois painéis tiveram uma tendência de crescimento semelhante no início da coleta, estabilizando às 10:00h e mantendo os valores de geração com poucas variações até as 15:00h, momento a partir do qual se inicia uma queda na potência gerada.

Este fato pode ser explicado pela influência de uma massa de ar fria que ocasionou maior variação das condições ambientais, principalmente de temperatura e umidade relativa do ar, que sofreram uma mudança severa tendo no dia 21/09/2021 alcançado o período mais quente registrado às 13:20h e iniciado rápida queda da temperatura no dia (22/09/2021) e voltando a se elevar por volta do dia 24/09/2021. Estas variações de parâmetros ocasionaram influência no comportamento dos gráficos do dia

22/09/2021 conforme pode ser visualizado na Figura 28.

Figura 28– Comportamento da média horária de tensão, corrente e potência dos painéis telhado e fachada para cada hora de coleta do dia 22/09/2021



Fonte: Autor

Os resultados médios diários das grandezas analisadas em cada um dos 10 dias de coleta em cada painel estão apresentados na Tabela 4, sendo que se refere ao painel fachada e ao painel no telhado.

Tabela 4– Resumo das médias dos valores obtidos em cada dia de coleta, considerando os painéis fachada e telhado.

Média Diária	Tensão Fachada (V)	Corrente Fachada (mA)	Potência Fachada (W)	Tensão Telhado (V)	Corrente Telhado (mA)	Potência Telhado (W)
Dia 08/09/2021	18,10	181,06	3,29	19,04	190,79	3,64
Dia 09/09/2021	16,54	170,29	2,82	17,79	181,52	3,23
Dia 13/09/2021	18,08	189,60	3,43	18,79	195,53	3,68
Dia 16/09/2021	17,82	187,34	3,40	19,06	197,46	3,77
Dia 22/09/2021	19,16	198,96	3,81	20,06	208,23	4,17
Dia 23/09/2021	18,86	195,70	3,70	19,70	203,18	4,01
Dia 24/09/2021	18,54	190,14	3,55	19,38	199,43	3,87
Dia 29/09/2021	18,22	186,01	3,34	19,26	195,84	3,78
Dia 30/09/2021	18,59	190,65	3,56	19,27	200,29	3,91
Dia 01/10/2021	17,89	182,94	3,28	19,01	194,97	3,71

Fonte: Autor

Comparando-se a potência gerada por cada painel, é constatado que o painel na fachada não gerou mais potência que o painel no telhado em nenhum dia de coleta. Tomando-se o painel no telhado como referência, foi possível calcular o percentual de geração de potência do painel na fachada com relação ao painel no telhado, conforme apresentado na última coluna da Tabela 5.

Tabela 5– Médias diárias de potência gerada pelos dois painéis e o percentual gerado pela fachada comparada ao resultado gerado pelo painel telhado

Média Diária	Potência Fachada (W)	Potência Telhado (W)	(Fachada/Telhado)x100%
Dia 08/09/2021	3,29	3,64	90,38%
Dia 09/09/2021	2,82	3,23	87,30%
Dia 13/09/2021	3,43	3,68	93,20%
Dia 16/09/2021	3,40	3,77	90,18%
Dia 22/09/2021	3,81	4,17	91,36%
Dia 23/09/2021	3,70	4,01	92,26%
Dia 24/09/2021	3,55	3,87	91,73%
Dia 29/09/2021	3,34	3,78	88,36%
Dia 30/09/2021	3,56	3,91	90,79%
Dia 01/10/2021	3,28	3,71	88,67%
Média total	3,42	3,77	90,42%

Fonte: Autor

Os resultados apresentados na Tabela 5 mostram que o painel na fachada proporcionou uma geração de 90,42% do valor total gerado pelo painel no telhado durante o período de coleta, ou seja, o painel na fachada teve uma geração de potência 9,58% menor que o painel no telhado. Assim, pode-se considerar que o painel na fachada pode contribuir de forma significativa com a geração em uma edificação, atestando a importância da utilização de sistemas fotovoltaicos também verticalmente em fachadas.

4.2 Influência da temperatura do ar, umidade relativa do ar e nebulosidade na geração dos painéis fotovoltaicos

A influência da temperatura na geração fotovoltaica é um fator bastante discutido pois embora a geração elétrica seja maior com a radiação solar mais alta em

um painel fotovoltaico, sua eficiência em contrapartida diminui à medida que sua temperatura aumenta (ÖZCAN et al., 2021).

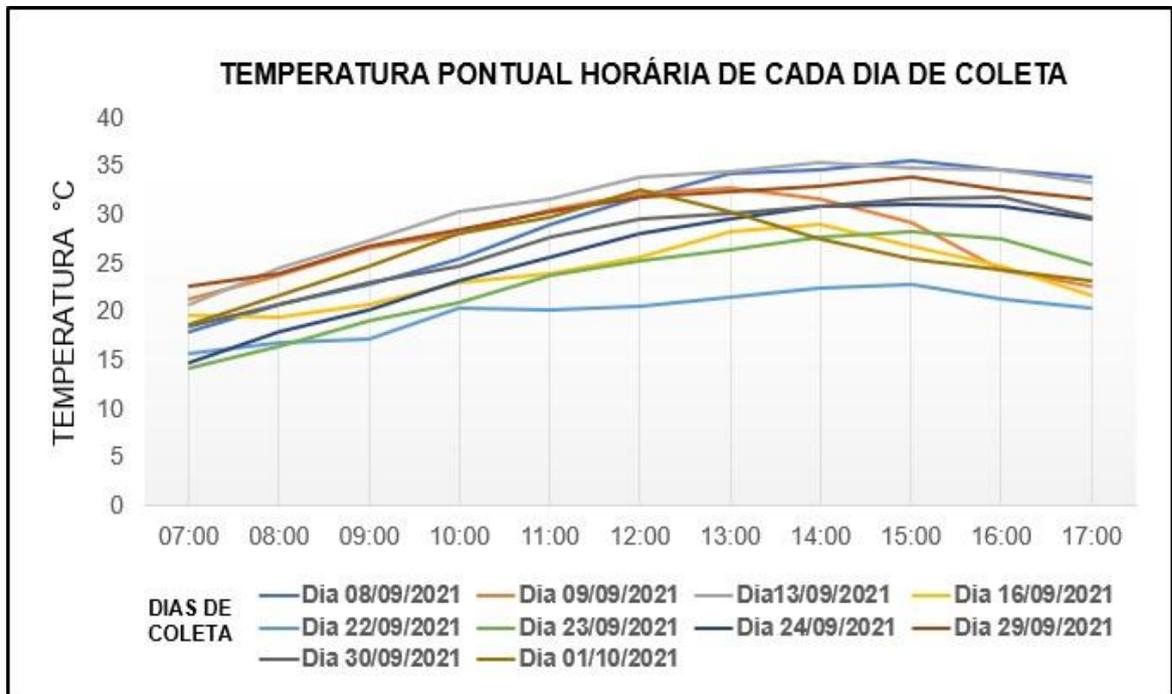
A incidência da radiação e a variação da temperatura ambiente, nebulosidade e velocidade dos ventos ocasionam uma variação na temperatura das células que compõem o módulo, provocando a diminuição no nível de tensão, e ao mesmo tempo, o ganho na corrente é quase imperceptível tendo assim a potência de saída do painel diretamente afetada.

Em média, um módulo fotovoltaico de Silício converte cerca de 4 a 17% da radiação solar recebida em eletricidade, dependendo do tipo de tecnologia das células e das condições de exposição, o que representa que aproximadamente 30% da radiação recebida sobre o painel solar é convertida em calor (GHENSEV, 2006).

Com base na importância da análise das condições climáticas e ambientais que influenciam diretamente a geração de energia dos painéis fotovoltaicos, foi realizado o monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar, e a análise comparativa de sua influência na geração do painel fachada e do painel telhado utilizando-se dos equipamentos sensores e da metodologia apresentada no capítulo anterior.

A Figura 29 apresenta de forma gráfica o comportamento pontual horário da temperatura do ar de cada um dos dez dias de coleta listados, possibilitando a visualização da elevação e queda da temperatura ao longo dos diferentes períodos e horários de coleta.

Figura 29– Comportamento pontual da temperatura do ar para todos os dias de coleta.



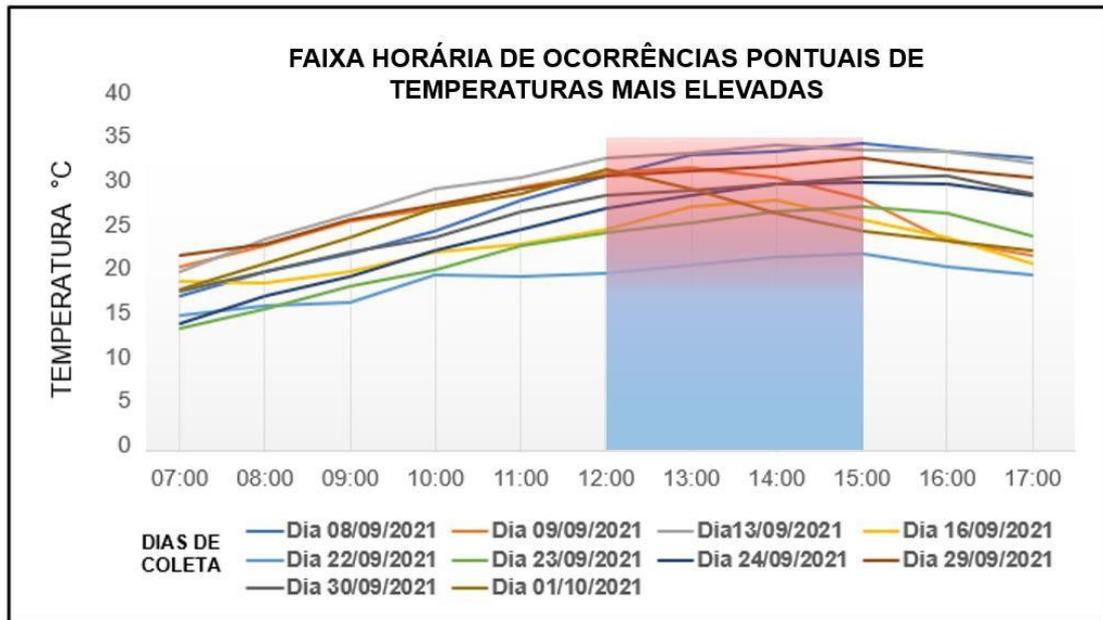
Fonte: Autor

Na Figura 29, visualiza-se uma diferença de temperatura maior entre os dias 08/09/2021 e o dia 22/09/2021 definindo os extremos de variação das curvas entre os dias coletados. Ao mesmo tempo, é identificada uma concentração maior de curvas entre as temperaturas de 20°C a 32°C com uma elevação mais homogênea até por volta das 11:00h e uma maior variação após às 13:00h e dispersão no final do período da tarde. Analisando o gráfico apresentado na Figura 29, foi identificada uma elevação mais rápida da temperatura no período da manhã se tornando mais acentuada até as 15:00h onde ocorrem em maior parte dos dias o início da diminuição de temperatura que prevalece até o término da coleta às 17:00h. As temperaturas mais baixas são identificadas no período inicial da coleta, sendo mais baixas que as temperaturas no final da coleta em todos os dias coletados.

Um período importante a ser destacado é a faixa horária na qual ocorrem as temperaturas mais elevadas registradas ao longo dos dias coletados. Esta faixa se evidencia entre as 12:00h e as 15:00h.

A Figura 30 destaca graficamente a faixa horária na qual ocorre a maior concentração de temperaturas pontuais elevadas ao longo dos dez dias de coletas realizadas para posterior comparativa com as grandezas geradas por cada painel.

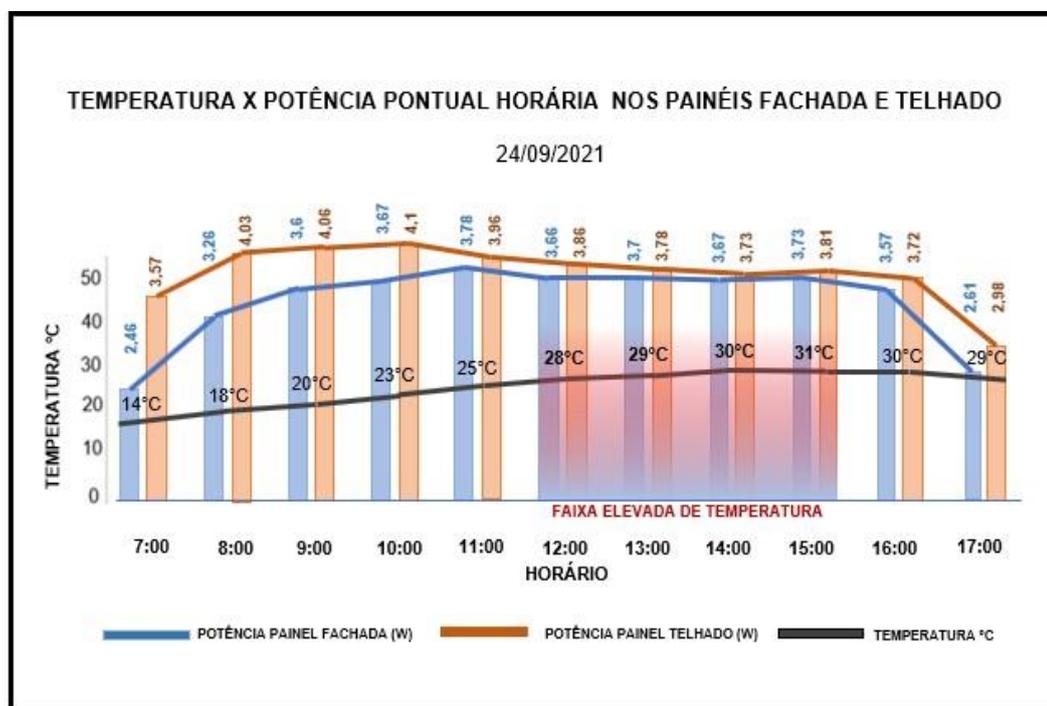
Figura 30– Representação gráfica da faixa pontual horária de concentração das temperaturas pontuais mais elevadas registradas durante a coleta



Fonte: Autor

A Figura 31 apresenta as curvas de potência gerada por cada painel em e o comportamento da temperatura no dia 24/09/2021, destacando a faixa de temperaturas mais elevadas registradas para este dia.

Figura 31 – Comportamento da temperatura e da potência gerada por cada painel no dia 24/09/2021



Fonte: Autor

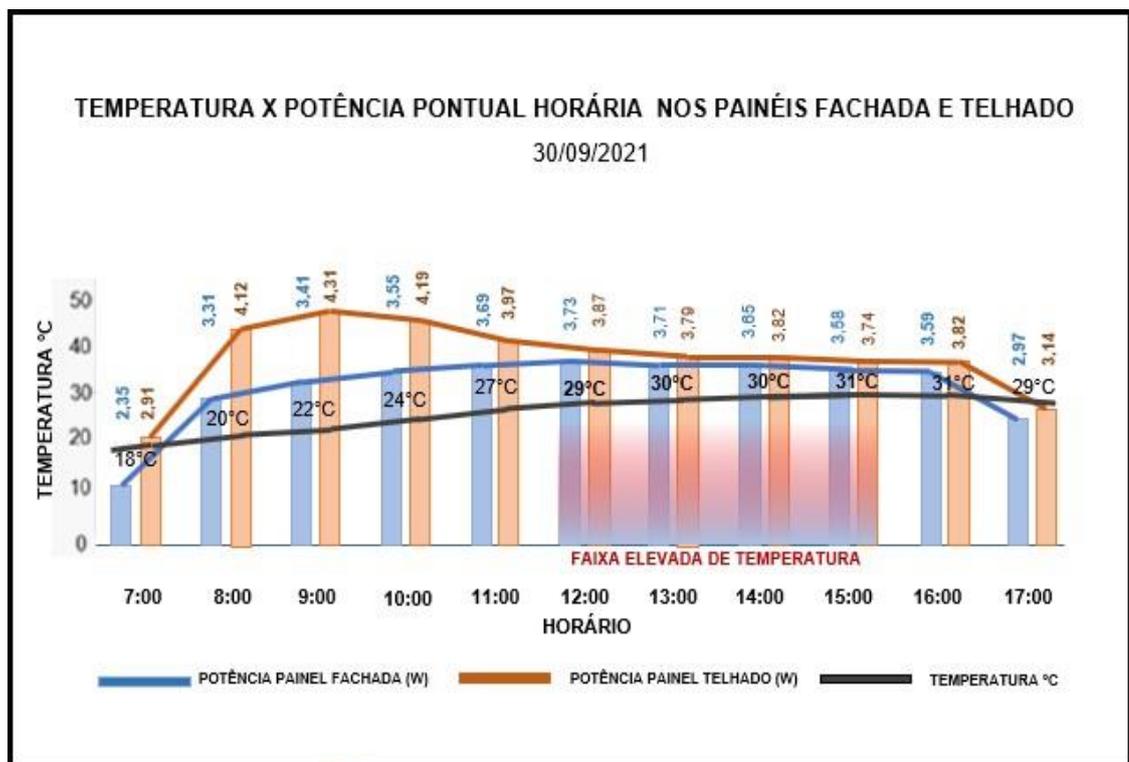
Na Figura 31 identifica-se que a temperatura às 11:00h é de 25°C passando para 28°C às 12:00h, a alta de temperatura em 3°C ocasiona uma queda visível de potência entre 11:00h e 12:00h e segue de modo mais acentuado tanto a elevação da temperatura quanto a queda de geração em ambos os painéis. É notada uma queda um pouco mais evidente na potência gerada pelo painel telhado tanto no período que antecede quanto durante a faixa mais elevada de temperatura e término do período destacado no gráfico. Durante a faixa de período destacada como de temperatura mais elevada ocorre um aumento de 3°C, e uma queda de 0,12W no painel fachada e 0,10W no painel telhado entre 11:00h e 12:00h, dentro da faixa mais elevada de temperatura ocorre uma pequena variação de 0,7°C no painel fachada e uma variação de 0,5W no painel telhado. Foi observado que dentro do espaço destacado o painel fachada variou de forma positiva com leve aumento entre 3,66W no início e 3,73W no final, enquanto o painel telhado apresenta variação de queda entre 3,86 W inicial e 3,81W no final.

Nestes resultados, são apresentadas quedas pouco expressivas de geração em ambos os painéis, sendo compatíveis aos aumentos na temperatura.

Na Figura 32, é apresentada graficamente a relação entre a faixa mais elevada de temperatura e a potência gerada por cada painel durante este período destacado para o

dia 30/09/2021 onde se observa um comportamento compatível ao registrado nos demais dias de coleta. Nota-se um aumento gradual da temperatura ao longo de todo o período de coleta, também um comportamento típico esperado de geração em cada painel conforme apresentado no exemplo da figura anterior.

Figura 32– Comportamento da temperatura e da potência gerada por cada painel no dia 30/09/2021

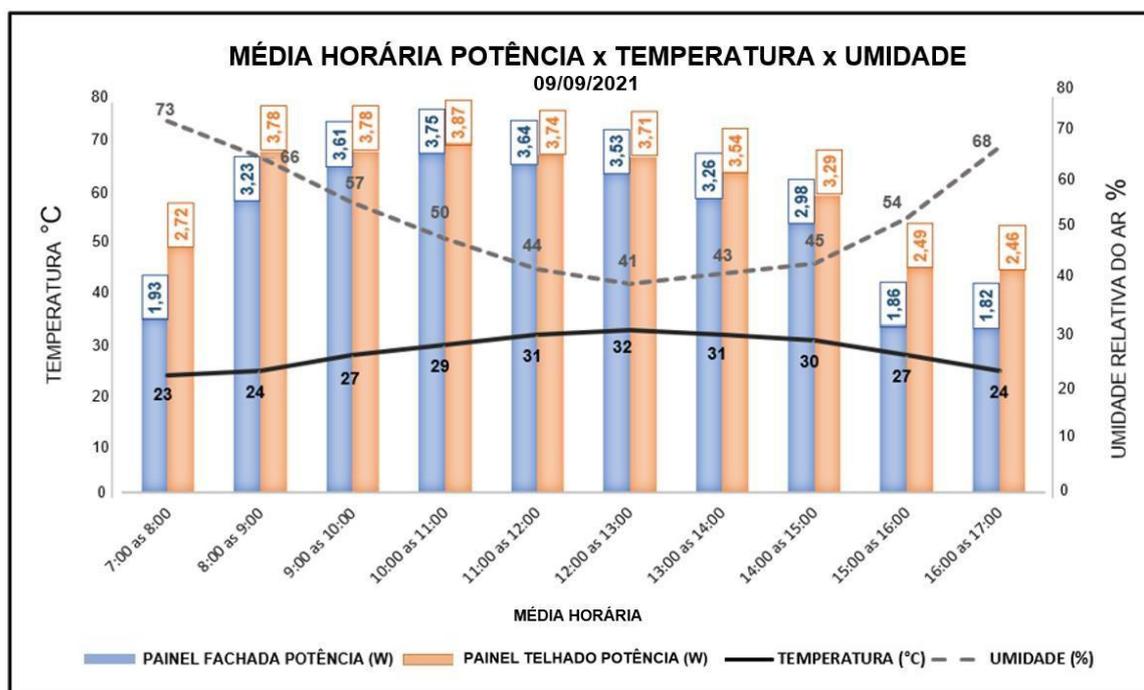


Fonte: Autor

Na Figura 32 identifica-se que a temperatura às 11:00h é de 27°C passando para 29°C às 12:00h, a alta de temperatura em 2°C que ocasiona uma queda visível de potência entre 11:00h e 12:00 horas no painel telhado e uma continuação de aumento no painel fachada, e segue de modo mais acentuado tanto a elevação da temperatura quanto a queda de geração em ambos os painéis entre 12:00h e 15:00h.

A Figura 33 apresenta o comportamento da temperatura do ar, umidade relativa do ar e potência gerada pelos dois painéis fachada e telhado no dia 09/09/2021.

Figura 33– Comportamento da média horária de temperatura, umidade e potência nos painéis telhado e fachada no dia 09/09/2021



Fonte: Autor

É observado no gráfico da Figura 33 que com o aumento da temperatura entre 11:00h e 13:00h houve uma proporcional redução na umidade relativa do ar e na geração de energia elétrica em ambos os painéis, o que leva a salientar a importância da análise e acompanhamento da temperatura e umidade relativa do ar às quais os módulos estão expostos.

Conforme esperado o aumento da temperatura e redução no percentual de umidade relativa do ar influenciam diretamente no desempenho das células fotovoltaicas que compõem os módulos (OLIVEIRA; BELCHIOR, 2021).

Um dado a ser salientado referente a temperatura e umidade relativa do ar durante os dias de experimentos de coleta foi que, no mês de setembro, durante o período de coleta dos dados, ocorreram intensas variações de temperatura e umidade relativa. Um dia antes do fim do inverno (21/09/2021), às 13:20h, foi registrada a temperatura de 37,9°C, a mais elevada temperatura para o mês de setembro desde o ano de 1989, quando tiveram início as medições do CEPAGRI. Esse fato ocorreu por conta de uma massa de ar quente persistente e um bloqueio atmosférico predominante na região de Campinas (SP), ocasionando a variação e elevação de temperatura neste dia.

A variação ocorrida no dia 21/09/2021 trouxe influências identificadas nos demais

dias sequenciais de coleta, como foi o caso identificado no dia 22/09/2021 em que a temperatura sofreu a maior queda registrada durante os 10 dias de coleta. As variações mais elevadas na mudança da temperatura foram perdendo força e se normalizando entre os dias 23 e 24/09 quando a temperatura e umidade relativa do ar chegaram aos valores convencionais registrados nos demais dias de medição conforme apresentados ao longo do trabalho.

A Tabela 6 ilustra as medições do CEPAGRI realizadas para o período de temperaturas mais elevadas registradas no dia 21/09/2021 destacando a máxima temperatura alcançada às 13:20h junto as demais informações de condições de vento, direção, chuva, entre outras mínimas de condições ambientais aferidas pelo instituto.

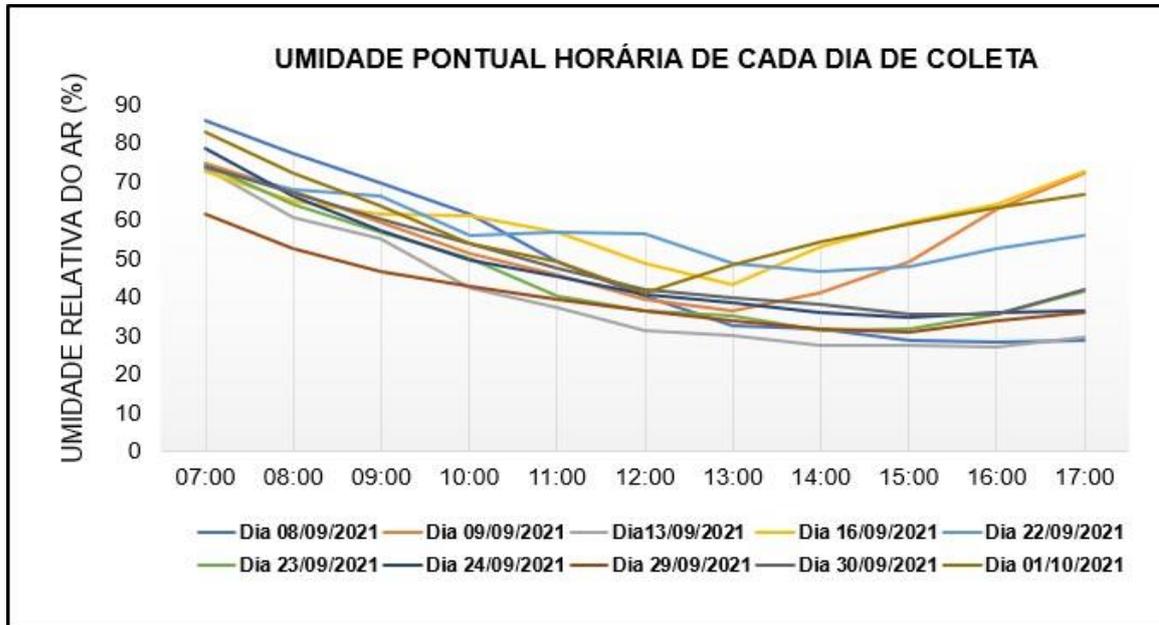
Tabela 6– Registro de temperatura no período do meio dia em 21/09/2021

Data	Horas	Direção ventos (°)	UR (%)	T(°C)	Chuva(mm)	TMáx(°C)	TMin(°C)
21/09/2021	13:00	308,5	24,59	37,39	0	37,72	37,01
21/09/2021	13:10	247	23,79	37	0	37,62	36,28
21/09/2021	13:20	290,5	23,61	37,2	0	37,94	36,30
21/09/2021	13:30	288,3	22,71	37,2	0	37,79	36,64
21/09/2021	13:40	290,7	23,51	37,29	0	37,87	36,73
21/09/2021	13:50	220,3	23,71	37,32	0	37,63	36,97
21/09/2021	14:00	289,4	22,85	37,31	0	37,75	36,94

Fonte: Adaptado (CEPAGRI)

A Figura 34 apresenta os dados de comportamento da umidade relativa do ar referentes a todos os dias de coleta realizados.

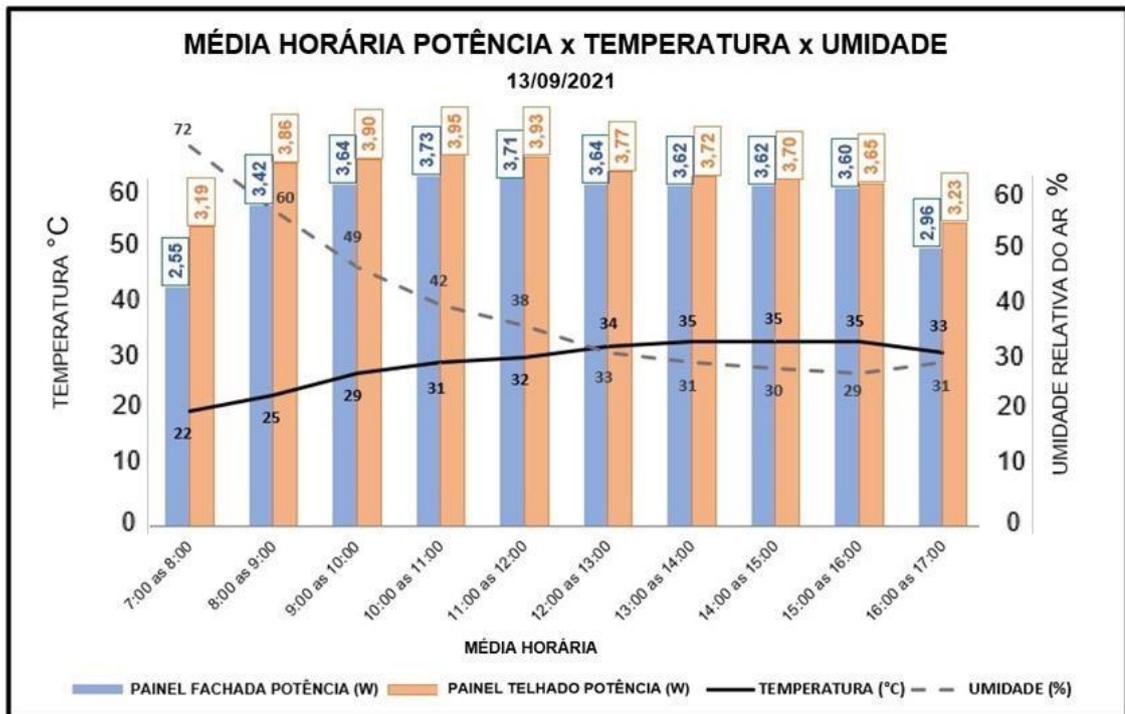
Figura 34—Comportamento pontual horário da umidade relativa do ar em todos os dias de coleta



Fonte: Autor

A Figura 35 apresenta todas as grandezas medidas para cada painel no dia 13/09/2021. De modo bastante representativo as curvas de temperatura e umidade relativa do ar se cruzam próximo ao meio dia, período em que se inicia a faixa mais elevada de temperatura e conseqüentemente a faixa mais baixa de umidade, atestando a relação inversamente proporcional esperada para essas duas grandezas.

Figura 35–Comportamento da temperatura, umidade relativa do ar e potência gerada pelos painéis no dia 13/09/2021.



Fonte: Autor

Através da análise do período de maior elevação de temperatura, comparadaas máximas de geração alcançada por cada painel no dia 13/09/2021 identificou-se conforme esperado, que o painel fachada foi menos influenciado diretamente durante sua exposição à radiação solar e consequentemente pela temperatura, pois sua elevação de potência ocorre em momento posterior ao do painel telhadotendo sua geração mais favorecida próximo do meio dia, enquanto o painel detelhado tem sua geração favorecida entre as 9:00h e 11:00h, assim como sua redução de geração também é percebida em período anterior ao do painel fachada.

Dentre os fatores diretamente influentes na temperatura do ar e na umidade relativa estão as condições climáticas e meteorológicas, como ventos, movimentação de massas de ar incidentes na região, concentração de nebulosidade e precipitações decorrentes do ciclo hídrico natural.

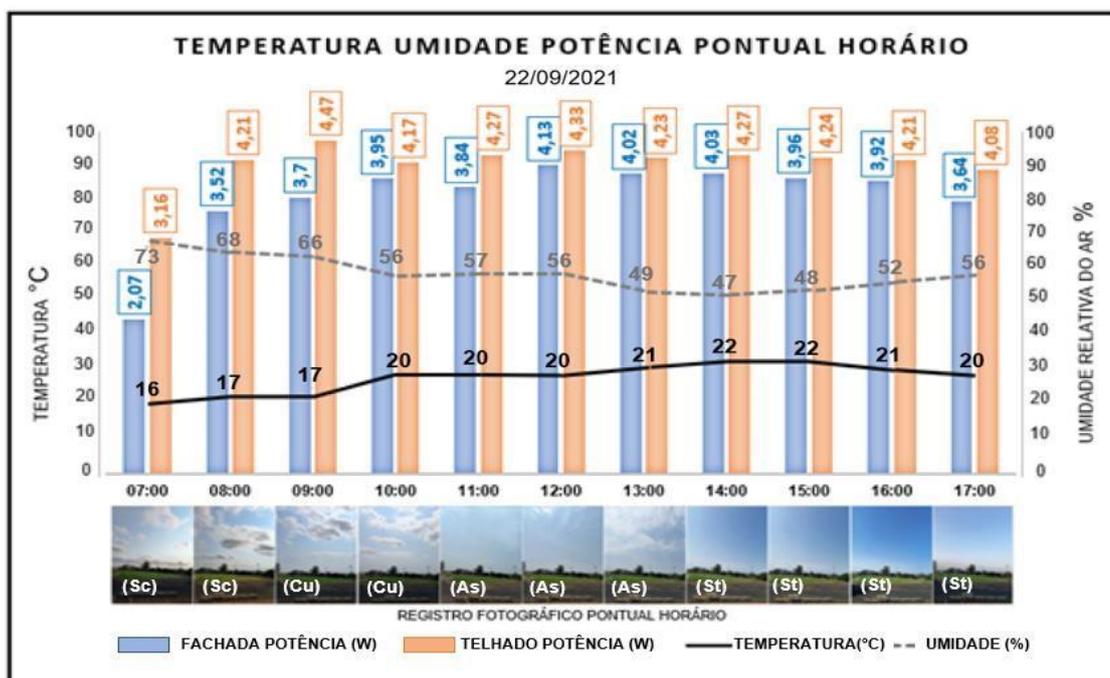
Visando monitorar as condições de nebulosidade durante as coletas, foi realizado, conforme descrito no Capítulo 3, o registro fotográfico horário da face norte do céu no local de coleta onde foram instalados os painéis.

O registro fotográfico permitiu, de forma simplificada, analisar algumas das principais

variações de nebulosidade ocorrentes, conforme classificações exemplificadas pelo Atlas Internacional de Nuvens, principal publicação utilizada internacionalmente para classificação de nuvens (FITZGERALD, 2017). Deve-se destacar que a análise realizada, com relação à influência da nebulosidade, foi superficial¹, sendo necessários aprofundamentos metodológicos para conclusões mais significativas.

Com base nas informações obtidas através do estudo do atlas, foram especificados os principais tipos de nuvens presentes durante o período de coleta, sendo registrados fotograficamente e classificados de acordo com a altitude em que ocorrem, a forma como são agrupadas ou se dispõem no céu, ocasionando coberturas de diferentes densidades e características em sua formação e variação. A Figura 36 ilustra os registros de grandezas realizado no dia 22/09/2021.

Figura 36–Comportamento pontual da temperatura, umidade relativa do ar, nebulosidade e potência gerada pelos painéis no dia 22/09/2021



Fonte: Autor

Nessa Figura, junto aos registros fotográficos realizados a cada hora, é possível identificar as iniciais de nomenclatura científica estabelecida para o nome da formação de tipo de nuvem, conforme exemplificado no Capítulo 3 deste trabalho.

Na Figura 36, nota-se que nos momentos em que o céu se apresentou

parcialmente obstruído (nublado) de modo que impedisse parcialmente a radiação solar direta nos painéis, houve conseqüentemente, uma pequena redução na geração

relativa em ambos os painéis. A obstrução parcial da radiação solar direta nos módulos ocorre decorrente da passagem, formação ou concentração de nuvens, estando relacionada a fatores como o tipo de nuvem e sua densidade, a concentração na qual se encontra no céu, sua altura, posição e movimentação.

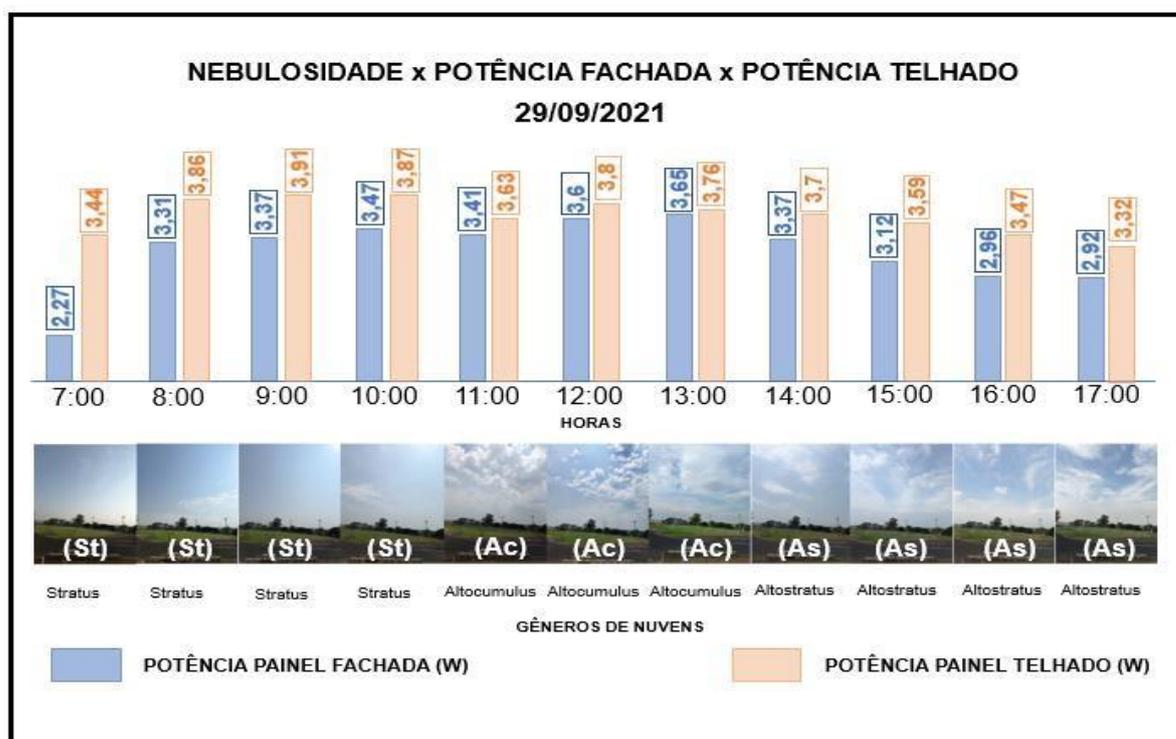
Neste trabalho, a ocorrência de nebulosidade afetou de forma diferente os painéis de fachada e telhado, devido à posição em que cada um se encontra instalado. Dessa forma, dependendo do período do dia em que a obstrução solar ocorra, poderá afetar mais diretamente o painel fachada ou o painel telhado.

Para explicação deste comportamento, foi adotado o exemplo ocorrido no dia 29/09/2021 (Figura 37), onde é possível identificar claramente a maior concentração de nuvens do gênero *Alto cumulus* às 11:00h, provocando queda na geração de ambos os painéis.

Tendo identificado que a obstrução afeta os dois painéis de forma diferente, é visível que ocorreu uma queda maior na geração de potência do painel telhado que se encontrava com valores mais elevados estando no final de seu período horário mais favorável de geração, que na data analisada ocorre entre às 9:00h e 11:00h, tendenciado a uma queda após este horário, o que fica ainda mais evidente com a queda somada à ocorrência da obstrução parcial do Sol naquele momento.

No painel fachada, é possível visualizar a queda de potência de forma menos evidente, porém não menos prejudicial pois no período de ocorrência da obstrução o painel fachada iniciava seu período de geração mais favorável que naquela data ocorreria entre as 11:00h e 13:00h horas, tendo assim interrompido momentaneamente sua elevação da potência o que em valores quantificados torna o ocorrido prejudicial à geração do painel de fachada.

Figura 37– Representação gráfica da queda de potência no painel fachada e no painel telhado provocada pela obstrução na presença de nebulosidade.



Fonte: Autor

Na manhã do dia 29/09/2021, a ocorrência de nebulosidade foi composta inicialmente por nuvens Stratocumulus (Sc), formações de espacialidade abrangente, pouca concentração e média densidade, com características mais horizontais, que no decorrer do período da manhã, devido ao aumento de temperatura, foram se verticalizando e se transformando em nuvens do tipo Altocumulus (Ac), um pouco mais densas e espaçadas entre si.

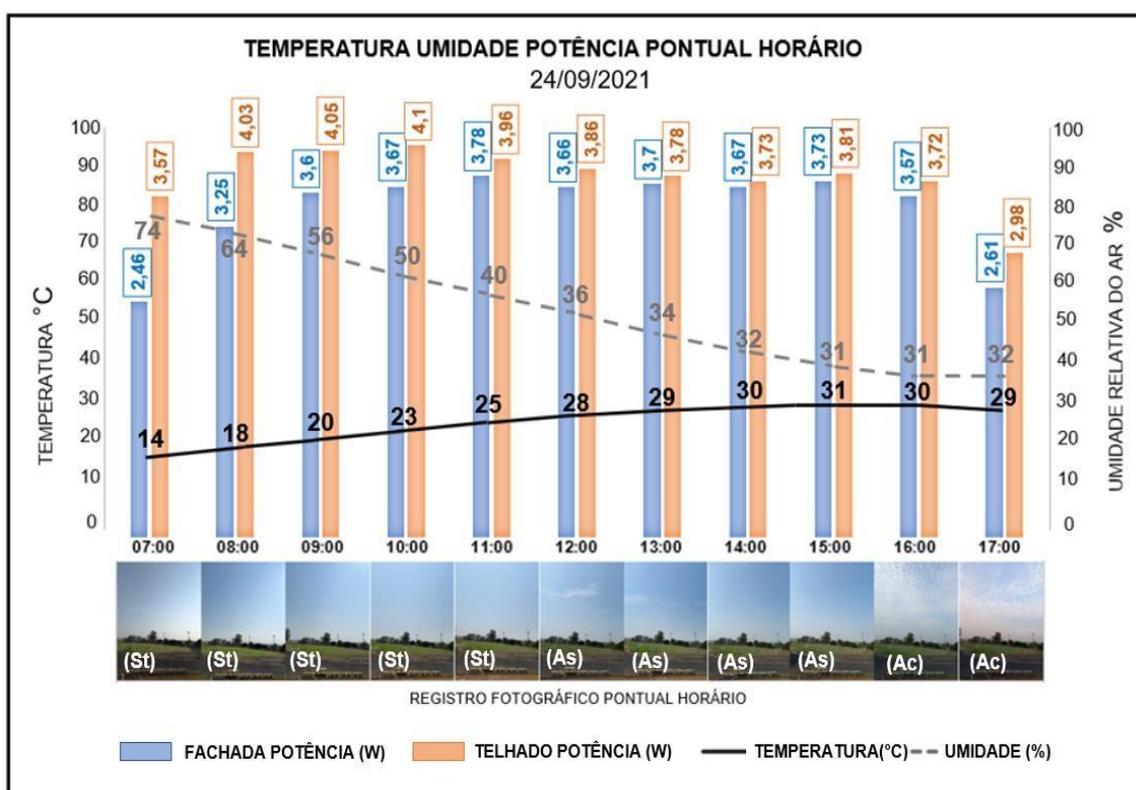
Com o passar do tempo, essas nuvens vão perdendo a forma arredondada e seguem subindo no céu próximo das 11:00h começando a formar-se de forma mais alta e em maior área de cobertura. Posteriormente, tornaram-se mais rarefeitas na parte alta do céu, voltando a predominância do gênero Stratus (St), ocupando de forma pouco densa a parte baixa do céu no final da tarde, junto a queda de temperatura.

É importante salientar que a geração de potência nos painéis não depende exclusivamente e não é medida pela quantidade ou tipos de nuvens no céu, mas que o fator de nebulosidade está intrinsecamente ligado à quantidade de radiação solar

que chega ao painel, a temperatura e umidade relativa do ar no local e temperatura de operação das células fotovoltaicas.

Na sequência, a Figura 38 ilustra o comportamento da temperatura, umidade e potência junto a registros fotograficos pontuais horários do dia 24/09/2021, trazendo a importância e a influência das grandezas ambientais na geração de cada painel.

Figura 38—Comportamento pontual horário de temperatura, umidade relativa do ar e potência dos painéis fachada e telhado no dia 24/09/2021



Fonte: Autor

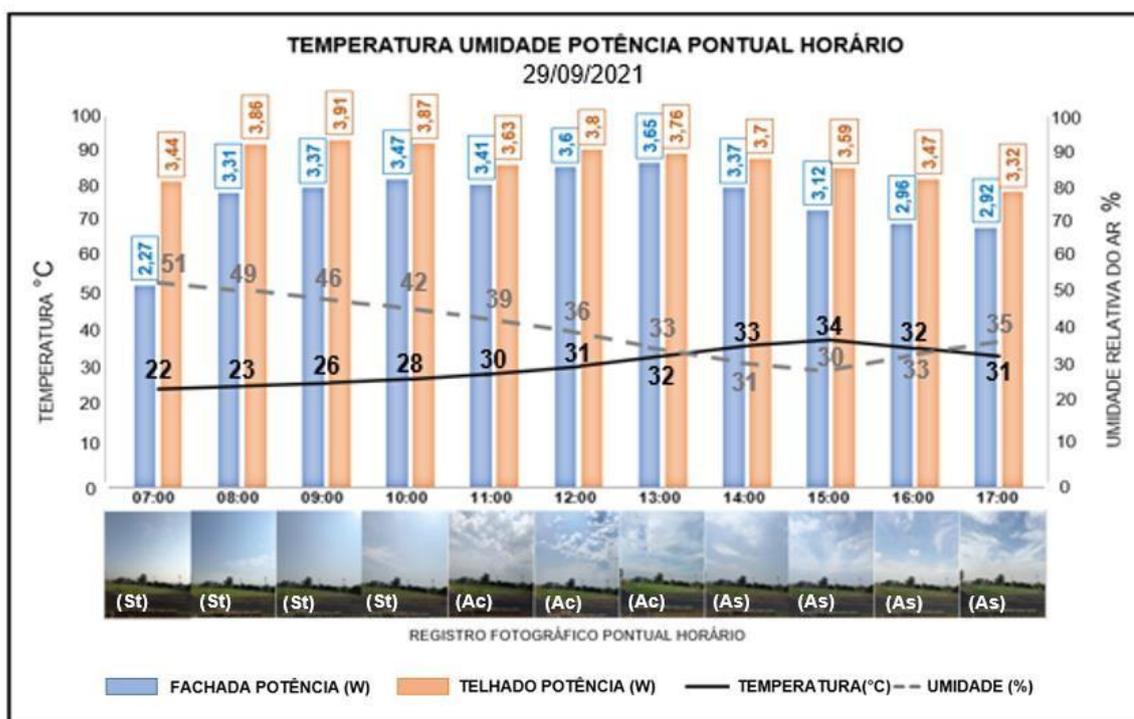
Na coleta realizada dia 24/09/ 2021 houve o aumento gradativo da temperatura ao longo de toda a manhã e maior parte da tarde, decaindo minimamente após atingir sua máxima de 30,98 °C às 15:30h, diminuindo até às 17:00h (final da coleta) com a respectiva variação na umidade durante o mesmo período de aumento da temperatura, estando os dados coletados compatíveis com os resultados de medição obtidos através do (CEPAGRI) para o período analisado. A geração de energia ao longo do dia se mostrou bastante alta e com poucas variações, assim como as condições do céu também não sofreram grandes mudanças, permanecendo praticamente com poucas formações de

nuvens durante todo o dia com a breve passagem

de formação de nuvens Altocumulus (Ac) no final da tarde entre 16:00h e 17:00h, com elevado índice de desobstrução nos painéis durante toda a coleta .

A Figura 39 apresenta o comportamento da temperatura, umidade relativa do ar e potência dos dois painéis junto aos registros fotográficos realizados com os dados coletados ao longo do dia 29/09/2021.

Figura 39—Comportamento pontual horário de temperatura, umidade relativa do ar e potência dos painéis fachada e telhado no dia 29/09/2021



Fonte: Autor

Nota-se uma elevação no índice de geração em ambos os painéis no início da manhã conforme, comportamento identificado anteriormente e a elevada temperatura inicial de coleta ocorrendo a máxima pontual horária logo às 9:00h no painel telhado, gerando 3,91W, e posteriormente, às 13:00h com o painel fachada alcançando 3,65 W conforme registro pontual horário representado no gráfico.

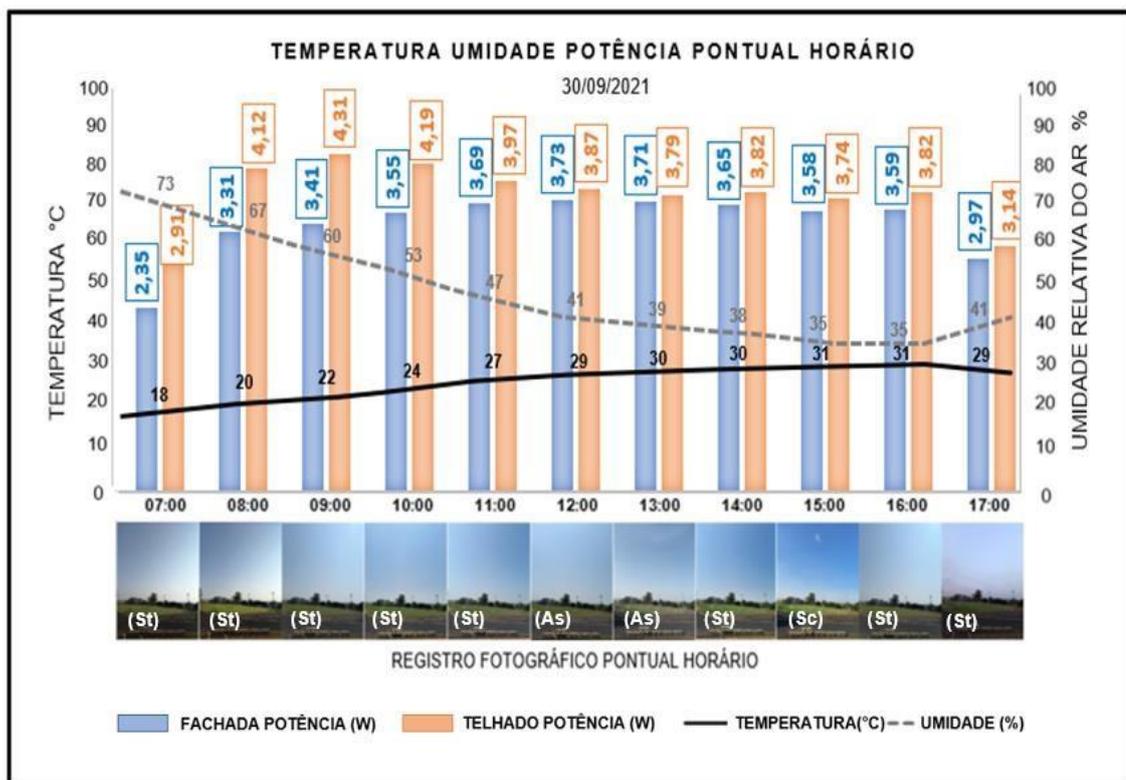
Na Figura 40 são apresentados os resultados pontuais horários que caracterizam o comportamento da temperatura, umidade, potência dos dois painéis e os registros fotográficos horários realizados no dia 30/09/2021.

O dia foi caracterizado pela formação de poucas nuvens durante todo o dia devido à menor variação de temperatura, as formações de nuvens foram de baixa densidade

e bastante rarefeitas, estando distribuídas de maneira quase imperceptível, com algumas variações de altura e caracterizando a mesma dispersão de formação no céu.

Do início da manhã até próximo do meio dia, a formação predominante foi do tipo Stratus(St), nuvens baixas que se apresentam em camadas homogêneas e suaves, transformando-se no tipo Altostratus (As) com o ganho de temperatura e altura conseqüentemente no início da tarde, permitindo ainda maior incidência solar direta nos módulos. Porém o aumento de incidência solar e a elevação de temperatura não aumentaram a geração em nenhuma das posições de painéis, mantendo a estabilidade de geração durante a tarde com uma queda no final do período vespertino entre as 16:00h e 17:00h.

Figura 40—Comportamento pontual horário de temperatura, umidade relativa do ar e potência dos painéis fachada e telhado no dia 30/09/2021



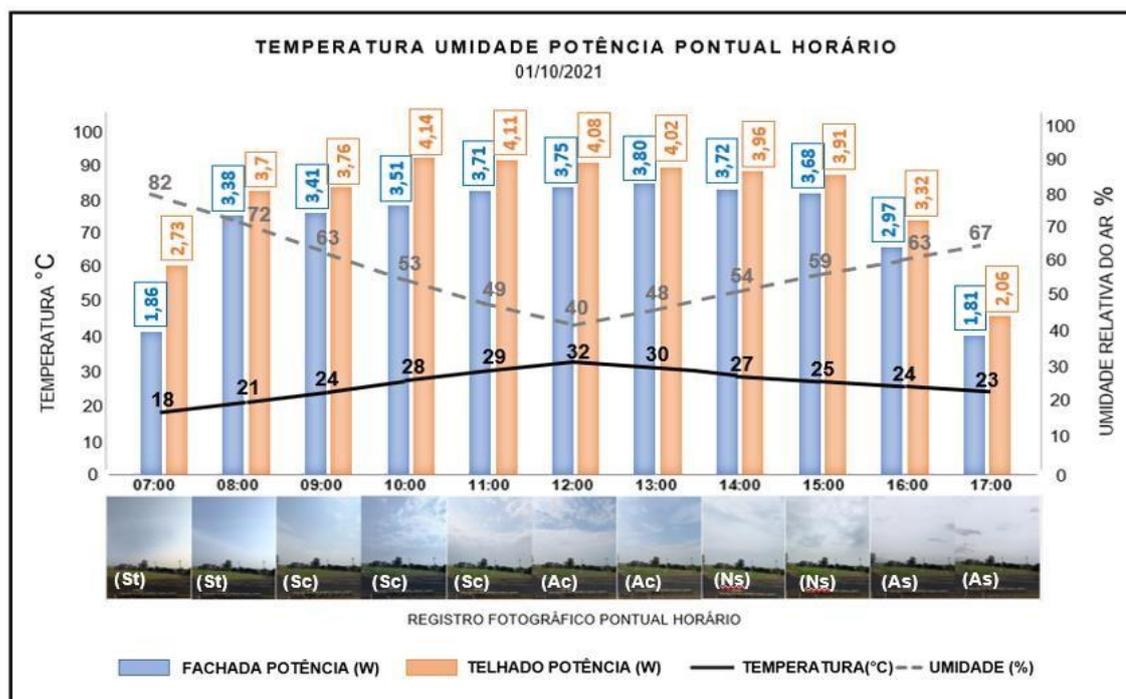
Fonte: Autor

A relação de geração entre os painéis ocorreu dentro da tendência esperada, conforme descrito na média dos demais dias, com um rápido aumento na geração no início da manhã, principalmente pelo painel telhado, que atinge sua geração máxima pontual horária de 4,31W às 9:00h, enquanto o painel fachada atinge sua máxima horária de 3,73W às 12:00h, confirmando que o painel fachada alcança sua maior geração no

período horário entre às 11:00h e 13:00h.

A Figura 41 apresenta o comportamento da temperatura, umidade relativa do ar e potência dos dois painéis junto aos registros fotográficos realizados ao longo do dia 01/10/2021.

Figura 41–Comportamento pontual horário de temperatura, umidade relativa do ar e potência dos painéis fachada e telhado no dia 01/10/2021



Fonte: Autor

Os registros fotográficos indicam um céu claro com uma leve camada de nuvens Stratus (St) no início da manhã, ganhando forma e verticalidade de Stratocumulus (Sc) cobrindo parcialmente a radiação de luz direta do Sol próximo às 10:00h. Posteriormente, as nuvens se modificam para o tipo Nimbostratus (Ns), acinzentadas, entre 15:00h e 16:00h aparentando a vinda de leve precipitação, mas logo é dispersa pelo vento no final da tarde entre as 16:00h e 17:00h.

A máxima potência pontual horária do painel telhado ocorre às 10:00h, atingindo 4,14W e o painel fachada obtendo sua máxima pontual horária às 13:00h, gerando 3,80W.

A Tabela 7, a seguir mostra a relação entre grandezas máximas e mínimas de temperatura, umidade e potência em cada dia de coleta.

Tabela 7–Médias diárias de temperatura, umidade e potência dos painéis fachada e telhado em cada dia de coleta.

Média Diária	Temperatura Local (°C)	Umidade Relativa do Ar (%)	Potência Fachada (W)	Potência Telhado (W)
Dia 08/09/2021	29,4	47,49	3,29	3,64
Dia 09/09/2021	27,86	54,75	2,82	3,23
Dia 13/09/2021	31,4	38,93	3,43	3,68
Dia 16/09/2021	24,11	67,35	3,40	3,77
Dia 22/09/2021	20,12	56,30	3,81	4,17
Dia 23/09/2021	23,13	43,88	3,70	4,01
Dia 24/09/2021	25,84	46,18	3,55	3,87
Dia 29/09/2021	30,02	38,72	3,34	3,78
Dia 30/09/2021	27,39	47,80	3,56	3,91
Dia 01/10/2021	26,35	58,28	3,29	3,71

Fonte: Autor

Os resultados de temperatura e umidade relativa do ar se mostram influentes na potência relativa dos painéis, sendo a umidade relativa do ar inversamente proporcional à temperatura.

Verifica-se, na Tabela 7, que os dias de maior geração dos painéis foram os dias de temperaturas mais baixas. Como principais exemplos, tem-se o dia 22/09 que apresentou média de temperatura de 20,12°C com geração do painel fachada em 3,81W e o painel telhado com 4,17W, e o dia 23/09 com média diária de temperatura em 23,13°C e geração dos painéis em 3,70W no painel fachada e 4,01W no painel telhado.

Outro resultado observado foi de que o painel telhado sofre maior influência da temperatura, o que pode ser constatado com a redução de sua geração nos dias mais quentes onde aproximam-se os resultados de geração de ambos os painéis como no dia 13/09, em que se registrou a maior média diária de temperatura e uma maior proximidade dos valores de potência entre os painéis comparados aos dias mais frios.

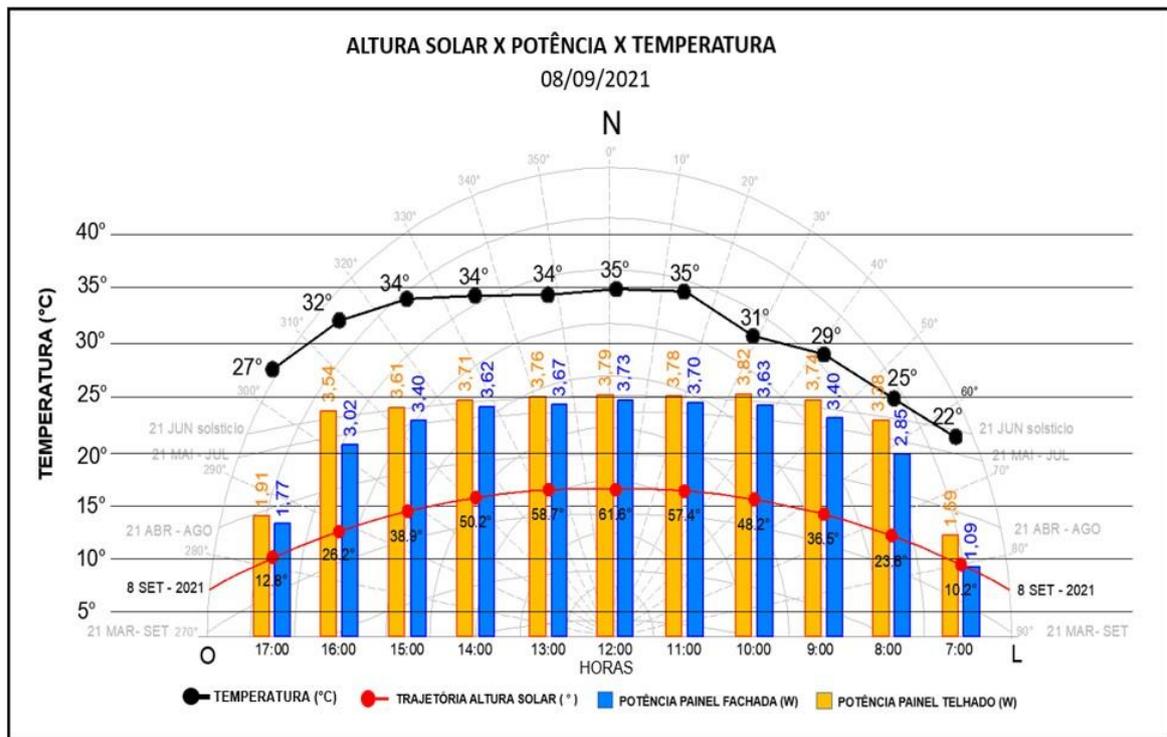
O resultado da maior influência da temperatura no painel telhado ocorre devido a sua posição, a qual ocasiona maior exposição de sua superfície (células fotovoltaicas) a incidência direta do Sol e, conseqüentemente, ganho de temperatura ao longo do dia.

4.3 Influência da orientação solar na geração dos painéis fotovoltaicos

A orientação solar é fundamental para a geração de energia nos painéis

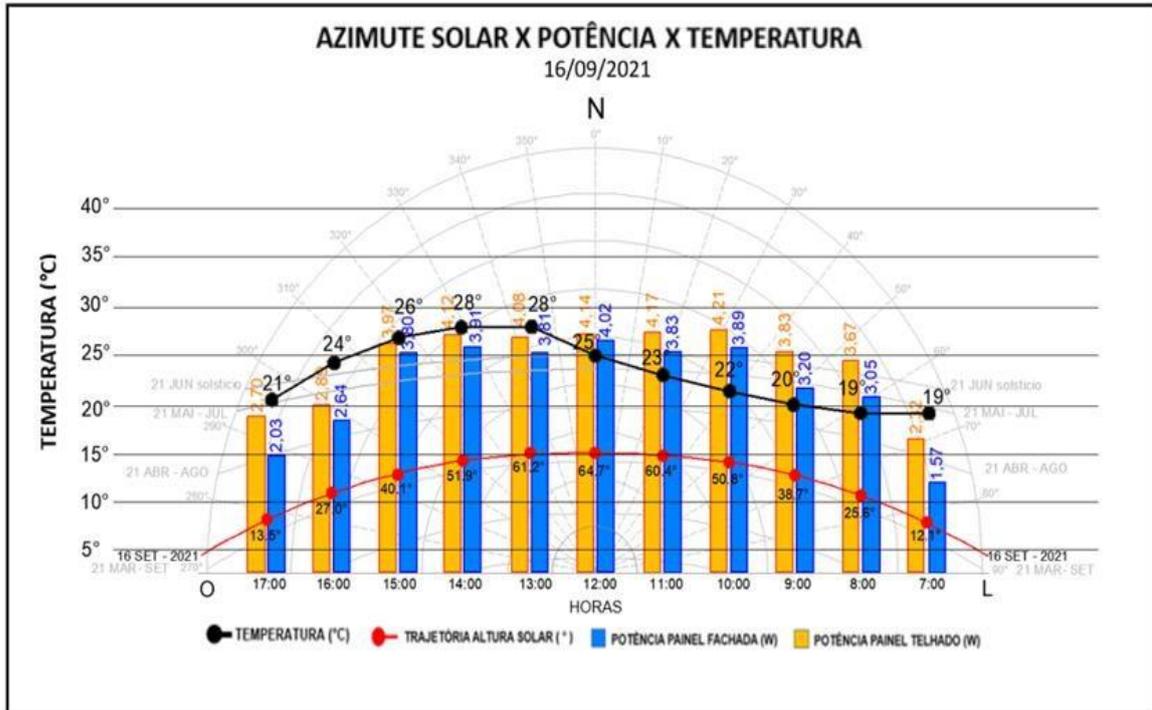
fotovoltaicos e foi analisada através dos ângulos de azimute e da altura solar. Os resultados apresentados partem das análises da altura e azimute solar e sua relação com a potência gerada por cada painel. As Figuras 42, 43 e 44 mostram este comportamento.

Figura 42- Comportamento da altura solar, temperatura do ar e potência gerada pelos painéis no dia 08/09/2021



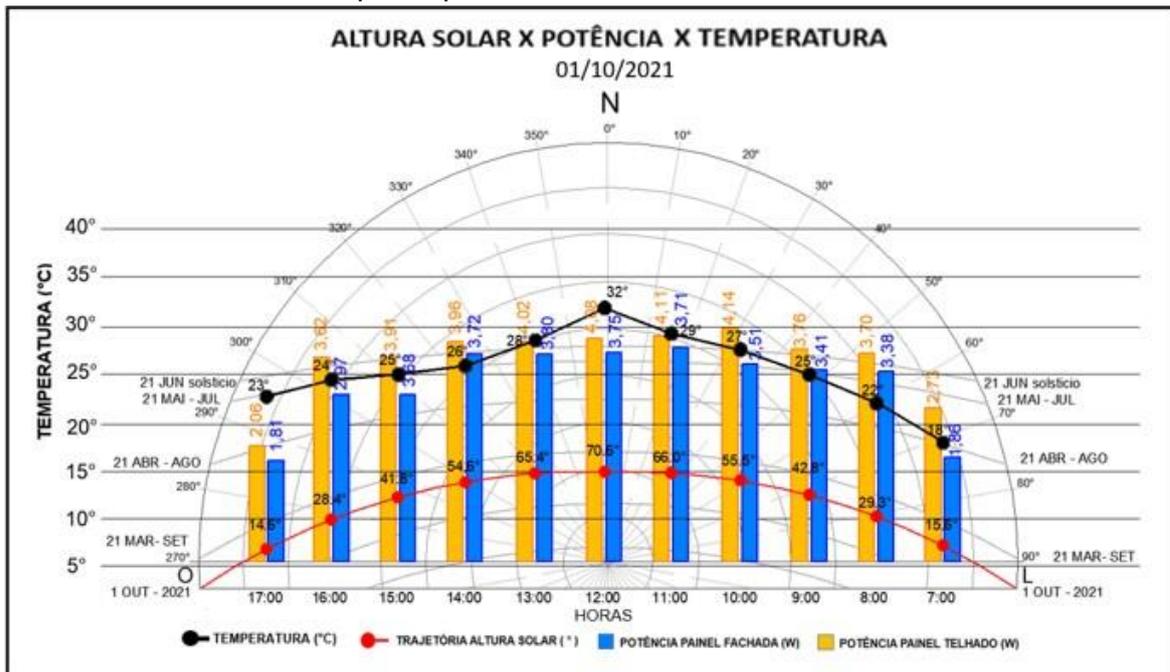
Fonte: Autor

Figura 43- Comportamento da altura solar, temperatura do ar e potência gerada pelos painéis no dia 16/09/2021



Fonte: Autor

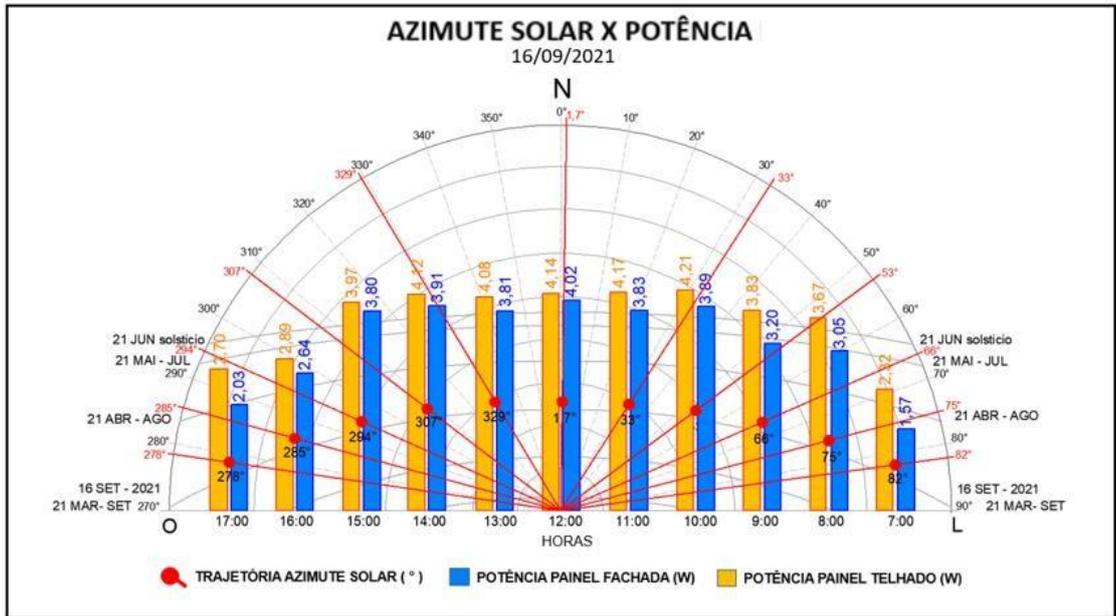
Figura 44- Comportamento da altura solar, temperatura do ar e potência gerada pelos painéis no dia 01/10/2021



Fonte: Autor

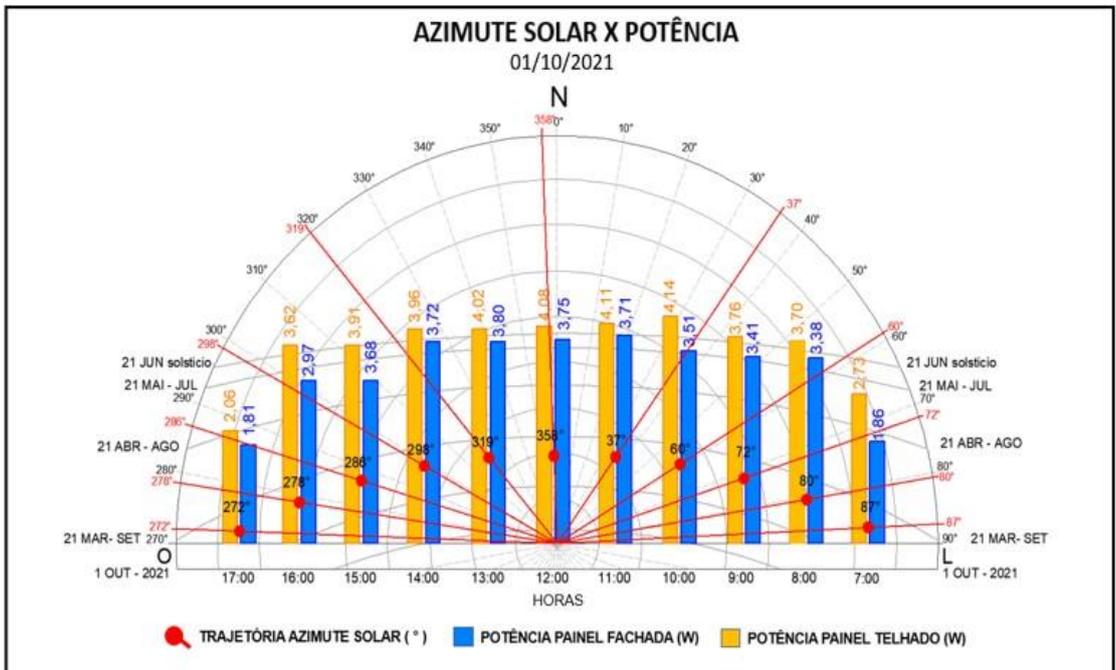
No dia 08 verifica-se um aumento da geração em ambos os painéis no período

Figura 46 - Comportamento horário do azimute solar e da potência gerada pelos painéis no dia 16/09/2021.



Fonte: Autor

Figura 47 - Comportamento horário do azimute solar e da potência gerada pelos painéis no dia 01/10/2021.

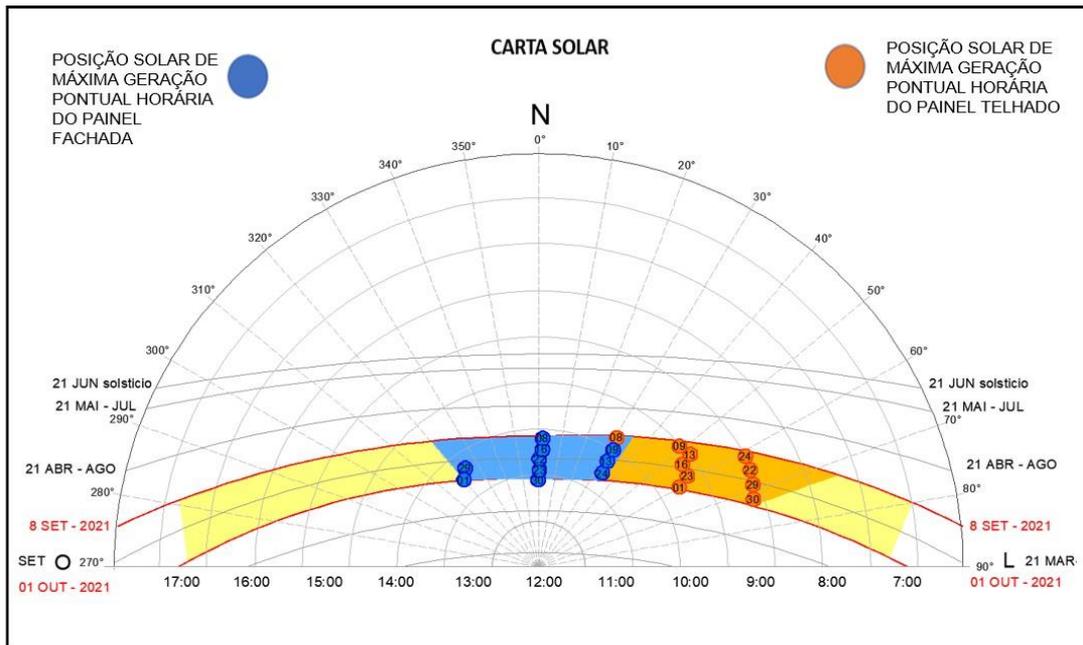


Fonte: Autor

A Tabela 8 e figura 48 apresentam a potência máxima de cada dia de coleta. Para o painel na fachada, os melhores desempenhos ocorreram no período aproximado das 11:00h e 13:00h. Já para os painéis do telhado, o melhor desempenho ocorre aproximadamente entre 9:00h e 11:00h.

cada dia de coleta. Para o painel na fachada, a concentração dos melhores desempenhos ocorreu no período aproximado das 11:00h e 13:00h representados na cor azul já para os painéis do telhado, o melhor desempenho ocorre com a maior concentração aproximadamente entre 9:00h e 11:00h representados em laranja.

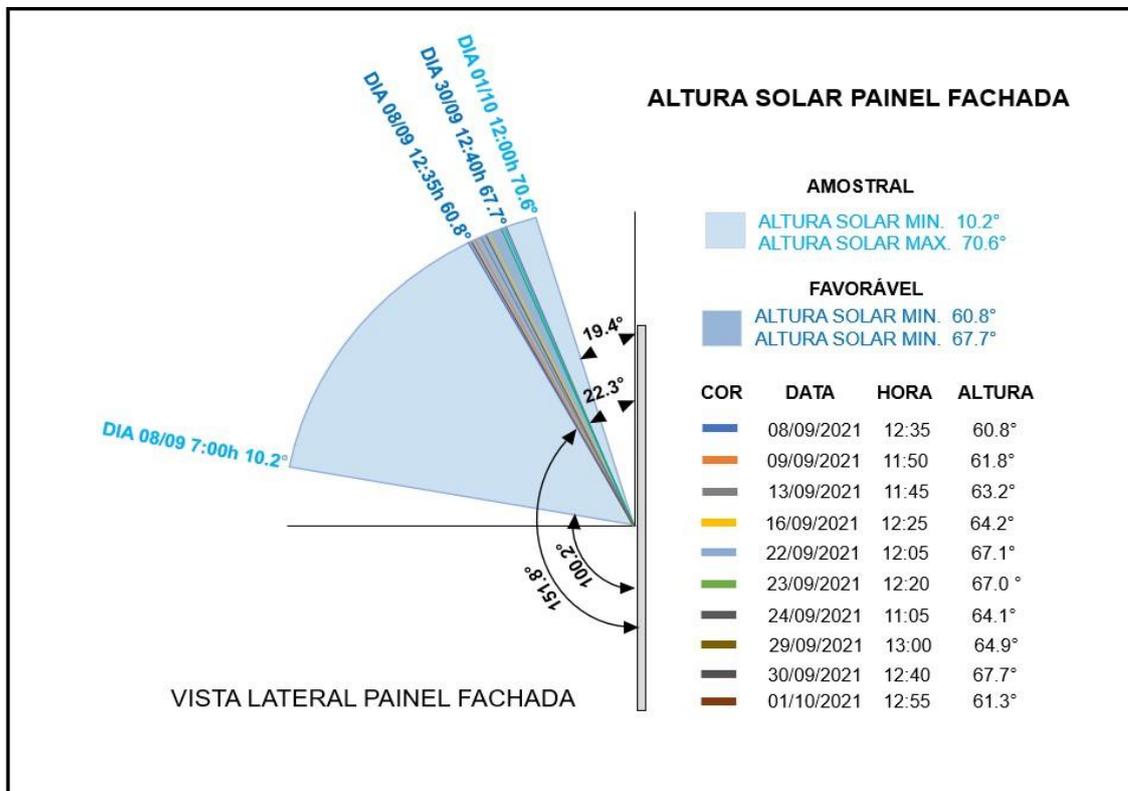
Figura 49– Potência máxima dos painéis, fachada e telhado, contendo o dia de coleta.



Fonte: Autor

Considerando a faixa da altura solar no período de coleta, $10,2^\circ$ a $70,6^\circ$, a figura 50 mostra a potência máxima do painel da fachada no período de coleta. Considerando a normal da fachada, verifica-se que o melhor desempenho está na faixa de $22,3^\circ$ a $28,2^\circ$. Ou seja, durante o período das 12:00h às 13:00, altura solar entre $60,8^\circ$ a $67,0^\circ$.

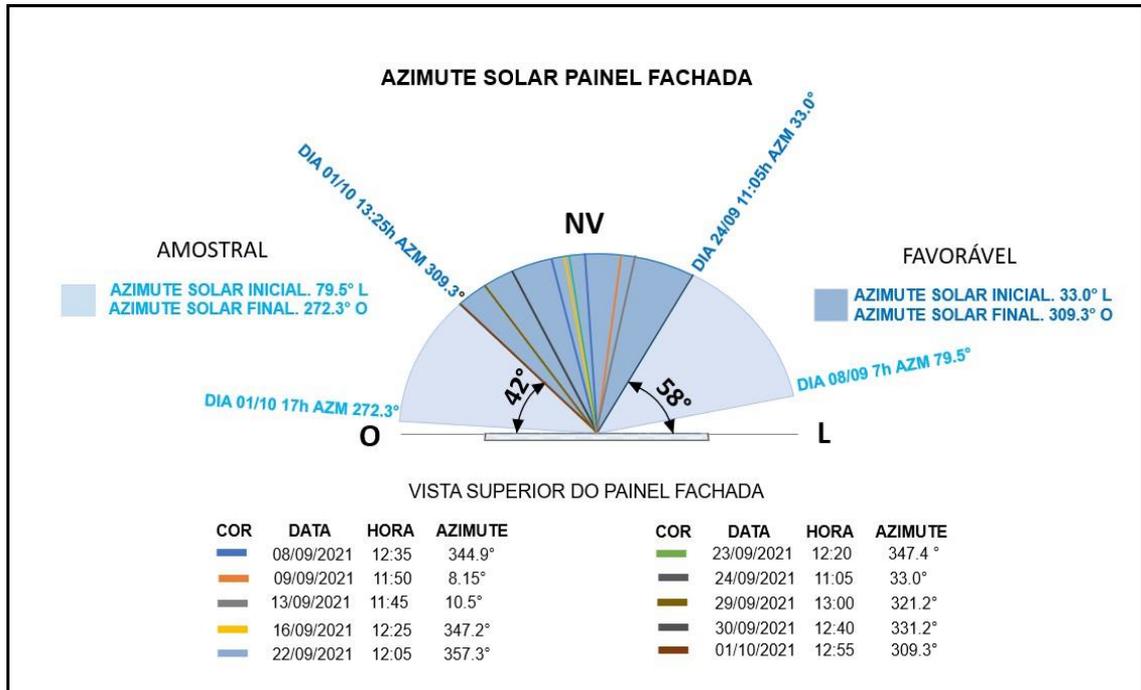
Figura 50– Potência máxima do painel da fachada em função da altura solar



Fonte: Autor

Em adição, a figura 51 mostra o desempenho do painel da fachada considerando a faixa azimutal do período de coleta, 79,5° a 272,3°. Ao avaliar a posição solar, partindo do plano horizontal no sentido anti-horário, verifica-se que o melhor desempenho está na faixa de 58,0° a 138,0. Ou seja, considerando a normal do painel da fachada, entre os ângulos de +32 e -48°. Ou seja, quando o sol está posicionado próximo da normal da fachada.

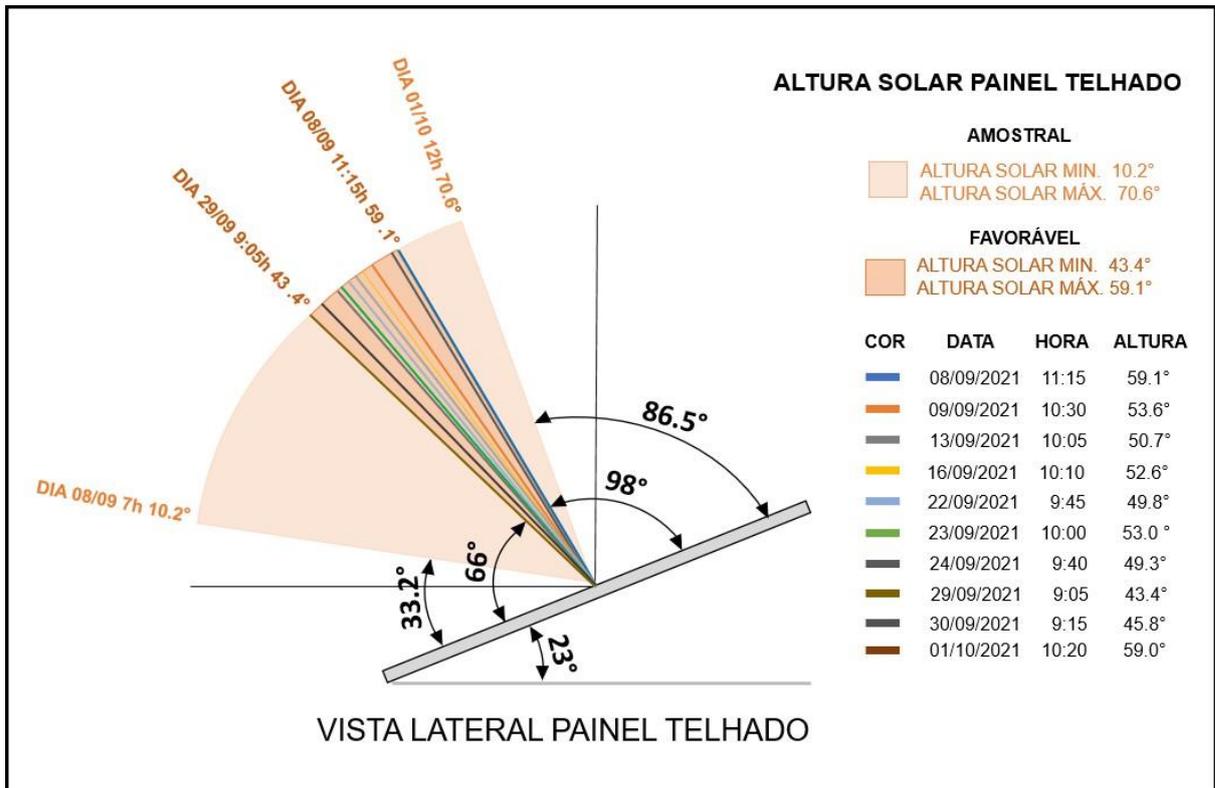
Figura 51– Potência máxima do painel da fachada em função do azimute solar



Fonte: Autor

A figura 52 mostra a potência máxima do painel do telhado no período de coleta na faixa da altura solar no período de coleta, 10,2° a 70,6°. Considerando o plano do painel no sentido horário, verifica-se que o melhor desempenho está no intervalo de 98,0° a 114,0. Ouseja, no intervalo de altura solar entre 43,4° a 59,1° e período entre 9:00h e 11:00h.

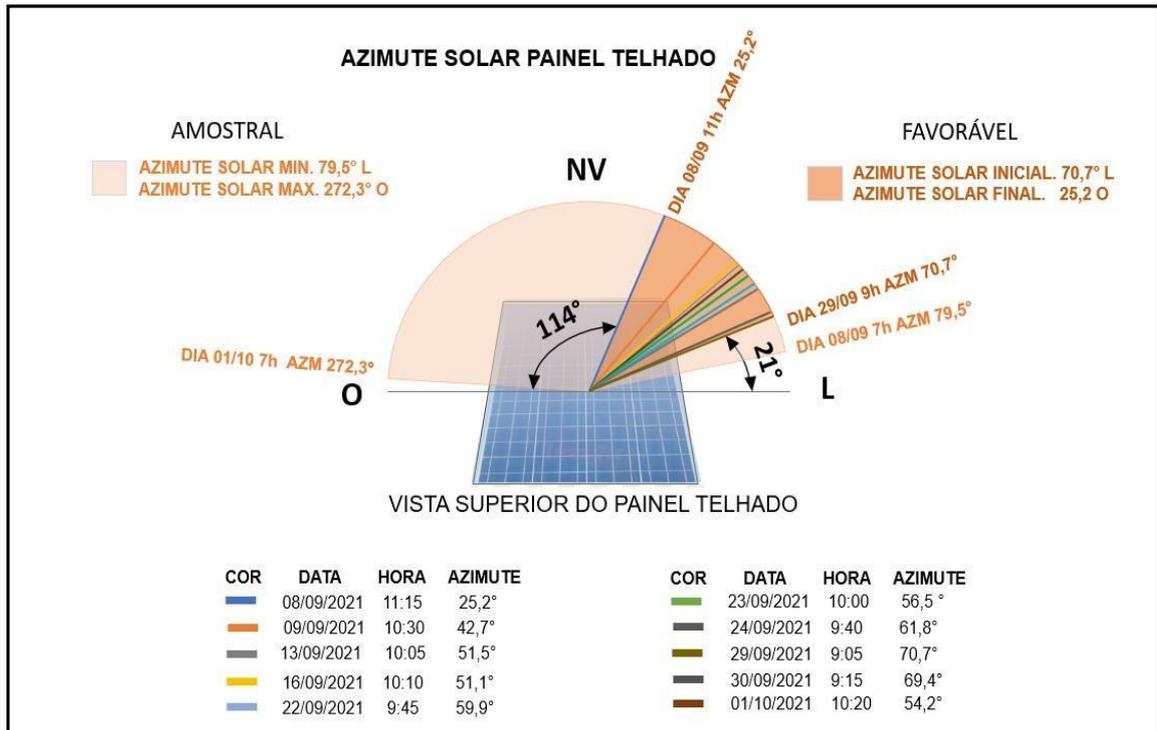
Figura 52– Potência máxima do painel do telhado em função da altura solar



Fonte: Autor

A figura 53 mostra o desempenho do painel da fachada considerando a faixa azimutal do período de coleta, 79,5° a 272,3°. Ao avaliar a posição solar partindo do plano horizontal no sentido anti-horário, verifica-se que o melhor desempenho está no intervalo de 21,0° a 66,0°. Ou seja, o painel do telhado apresenta melhor desempenho no período da manhã, entre 9:00h e 11:00h, intervalo azimutal de 25,2° a 79,5°.

Figura 53– Potência máxima do painel do telhado em função do azimute solar



Fonte: Autor

5. Conclusões

Este trabalho tratou da avaliação comparativa do desempenho de painéis fotovoltaicos aplicados (BAPVs), emulando sua utilização em telhados e fachadas de edificações, estando expostos durante o período de experimentos às mesmas condições de ambiente.

Com os módulos orientados para uma mesma direção estabelecida, foram analisados condicionantes ambientais e climáticos como posicionamento solar, nebulosidade, temperatura e umidade relativa do ar, relacionando-os com os dados de geração dos painéis como tensão, corrente e potência.

Neste trabalho, o intuito foi identificar se a utilização dos módulos FVs em fachadas é eficiente comparada à utilização mais tradicional em telhados e coberturas de edificações.

Nesse sentido, o painel telhado sempre gerou mais potência que o painel fachada. Entretanto, de forma mais específica, os resultados obtidos mostraram que a geração do painel fachada foi, em média, apenas 9,58% menor do que a geração do painel telhado. Este resultado atesta que a geração fotovoltaica em fachadas pode contribuir

de forma significativa com a geração de edificações no meio urbano.

Com relação ao período do dia que resulta em maior geração, o painel fachada obteve os melhores valores no período das 11:00h até as 15:00h, tendo seus resultados mais próximos do painel telhado entre as 11:00h e as 13:00h, período em que recebe frontalmente maior incidência solar direta em sua superfície, tendenciado a diminuição dos valores de geração entre 12:00h e 15:00h por conta do aumento da temperatura. Foi identificado, também, que o painel telhado aquece mais rapidamente tendo uma perda um pouco maior de potência que o painel fachada durante a faixa horária mais quente do dia. Além disso, próximo ao final do experimento, por volta das 16:00h, a redução na geração de energia até o final da tarde é sutilmente maior no painel fachada se distanciando novamente dos resultados do painel telhado.

Mais ainda, foi observada também a influência da temperatura e da umidade relativa do ar na geração dos painéis, mostrando que quanto maior a incidência solar direta no painel, maior é sua geração e mais rápida é a aquisição de temperatura por conta da superfície do painel, alcançando sua máxima geração e uma redução sequencial na geração de modo mais lento. Estes resultados são observados ao longo de todo o experimento, tendo a incidência solar fundamental importância para a eficiência de ambos os painéis. Estando ambos direcionados para o norte verdadeiro, o painel emulando telhado obteve maior aproveitamento da incidência solar desde o início do período da manhã, enquanto o painel emulando fachada obteve maior aproveitamento da incidência do final da manhã ao início da tarde. Ou seja, o painel da fachada apresentou melhor desempenho no período das 12:00h às 13:00, altura solar entre $60,8^\circ$ a $67,0^\circ$. Enquanto o painel do telhado obteve seu desempenho máximo entre 9:00h e 11:00h, intervalo azimutal de $25,2^\circ$ a $79,5^\circ$. O monitoramento fotográfico de formações de nebulosidade no local do experimento demonstrou a influência de formações de nuvens na obstrução parcial da radiação solar direta nos módulos, mesmo sendo em sua maior parte as formações de nuvens de baixa a média altura e de pouca concentração. Devido a sua menor periodicidade de ocorrência, as formações de nebulosidade de maior densidade não vieram a ocasionar grandes variações nos resultados apontados ao longo deste trabalho, mesmo sendo possível identificar a ocorrência destas formações e a consequente redução de geração, foram fatos isolados ocorridos durante o período de coletas realizadas, mas junto as demais informações e resultados obtidos são de

fundamental importância na composição do estudo de influenciados fatores climáticos e ambientais na geração dos painéis em diferentes posições avaliadas neste estudo apresentado.

Conclui-se, pela metodologia adotada neste trabalho, que os parâmetros ambientais e a posição do Sol exercem influência no desempenho da geração do painel em posição telhado e em posição de fachada. Os resultados de geração obtidos durante todo o dia, mostraram a possibilidade do painel na fachada atuar complementando a geração do painel no telhado, possibilitando gerações máximas em horários consecutivos, validando a importância da utilização dos painéis em ambas as posições.

Entretanto, podem ser realizadas melhorias nos métodos utilizados neste trabalho, e que possibilitarão elaborar análises mais aprofundadas e completas acerca do desempenho dos sistemas fotovoltaicos em telhados e fachadas, considerando a utilização dos mais diversos módulos FVs sejam estes aplicados ou integrados a edificações como objeto de estudo.

Como sugestões para trabalhos futuros propõe-se:

- Ensaiar com sistemas BAPV e BIPV posicionados verticalmente emulando a utilização em fachadas e identificar a diferença de temperatura operacional nos módulos fotovoltaicos e as possíveis influências e variações na geração potência.
- Aprimorar métodos de simulação que permitam através da comparação do percentual de nebulosidade (Fator de Visão do Céu) e identificação de tipos de nuvens, calcular a obstrução na radiação solar que atinge a superfície dos módulos fotovoltaicos e, conseqüentemente, a variação na geração de potência.
- Determinar a correlação entre as grandezas medidas nesse trabalho e a radiação solar e a velocidade do vento (grandezas que não foram medidas nesse trabalho).
- Desenvolver formas de integração entre o monitoramento meteorológico com imagens de satélites prevendo condições ambientais e climáticas futuras e através delas definir posicionamentos e direções mais favoráveis para a utilização de

sistemas fotovoltaicos de acordo com a região de interesse, estimando inclusive projeções futuras de geração para próximas décadas, visto que a vida útil estimada de um módulo fotovoltaico de silício é de, aproximadamente, três décadas.

Referências:

AGATHOKLEOUS, R. A.; KALOGIROU, S. A. Status, barriers and perspectives of building integrated photovoltaic systems. *Energy*, v. 191, p. 116471, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116471>>.

ANDRES CALCABRINI 2021 Simulation study of the electrical yield of various PV module topologies in partially shaded urban scenarios_ Leitor avançado da Elsevier.pdf., [s.d.].

AOSONG ELETRONICS. Guangzhou Aosong Eletronic Ltd. Disponível em: <<http://www.aosong.com/en/products-22.html> > .2022 Acesso em 20 fev 2022

ASSOA, Y. B. et al. Study of a building integrated bifacial photovoltaic facade. *SolarEnergy*, v.227,n.September,p. 497–515, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.09.004>>.

BAIG, H. et al. Increasing efficiency of perovskite solar cells using low concentrating photovoltaic systems. *Sustainable Energy and Fuels*, v. 4, n. 2, p. 528–537, 2020.

BARBÓN, A. et al. Analysis of the tilt and azimuth angles of photovoltaic systems in non-ideal positions for urban applications. *Applied Energy*, v. 305, n. June 2021, p. 117802, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117802>>.

BELUSSI, L. et al. A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. *Journal of Building Engineering*, v. 25, n. March, p. 100772, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jobee.2019.100772>>.

CARDOSO, J.M. de M. SISTEMAS BAPVS E BIPVS: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA INTEGRAÇÃO E APLICAÇÃO de Josué Marcos de Moura Cardoso. 2019. Pontifícia Universidade Católica de Campinas 2019.

CATITA, C. et al. Extending solar potential analysis in buildings to vertical facades *Computers and Geosciences*, v. 66, p.1–12, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2014.01.002>>.

CHEN, W. et al. Predicting diffuse solar irradiance on obstructed building façades under irregular skyline patterns for various ISO/CIE standard skies. *Journal of Building Engineering*, v. 40, n. March, p. 102370, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102370>>.

CHEN, X. M. et al. General method to obtain recommended tilt and azimuth angles for photovoltaic systems worldwide. *Solar Energy*, v. 172, n. November 2017, p. 46–57, 2018.

CHEN, X. M. et al. Are the optimum angles of photovoltaic systems so important? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 124, n. February, 2020.

CHU, Y. et al. Intra-hour irradiance forecasting techniques for solar power integration: A review. *iScience*, v. 24, n. 10, p. 103136, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103136>>.

ESCLAPÉS, J. et al. A method to evaluate the adaptability of photovoltaic energy on urban façades. *Solar Energy*, v. 105, p. 414–427, 2014.

FITZGERALD, R. J. International Cloud Atlas. *Physics Today*, v. 70, n. 5, p. 76–76, 2017.

FREITAS, S. et al. Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 41, p. 915–931, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.060>>.

FREITAS, S.; CENTENO, M. Solar façades for future cities. v. 31, n. December, p. 73–79, 2019.

GAVIRIA, L. R.; PEREIRA, F. O. R.; MIZGIER, M. O. Influência da configuração urbana na geração fotovoltaica com sistemas integrados às fachadas. *Ambiente Construído*, v. 13, n. 4, p. 07–23, 2013.

GHENSEV, A. *Materiais E Processos De Fabricação De Células Fotovoltaicas*. p. 154, 2006.

GHOSH, A. 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, 2020.

GLOBAL SOLAR ATLAS. Fornecedor global de dados solares e serviços de avaliação de energia solar e fatores relacionados. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/map>>. Acesso em 15 jan 2022.

GONÇALVES, J. E. et al. Performance of building integrated photovoltaic facades: Impact of exterior convective heat transfer. *Applied Energy*, v. 287, p. 116538, 2021.

GONÇALVES, J. E.; VAN HOOFF, T.; SAELENS, D. Simulating building integrated photovoltaic facades: Comparison to experimental data and evaluation of modelling complexity. *Applied Energy*, v. 281, n. June 2020, 2021.

HACHANA, O.; TINA, G. M.; HEMSAS, K. E. PV array fault Diagnostic Technique for BIPV systems. *Energy and Buildings*, v. 126, p. 263–274, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.031>>.

HAFEZ, A. Z. et al. Tilt and azimuth angles in solar energy applications – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 77, n. April, p. 147–168, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.131>>.

INMAN, R. H.; PEDRO, H. T. C.; COIMBRA, C. F. M. Solar forecasting methods for renewable energy integration. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 39, n.6,p.535–576,2013.Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2013.06.002>>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. BIPV Design and Performance Modelling: Tools and Methods, 2019.

IZQUIERDO, S.; RODRIGUES, M.; FUEYO, N. A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy*, v. 82, n. 10, p. 929–939, 2008.

JACOBSON, M. Z. et al. 100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight All-Sector Energy Roadmaps for 139 Countries of the World. *Joule*, v. 1, n. 1, p. 108–121,2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.005>>.

LAI, C. M.; HOKOI, S. Solar façades: A review. *Building and Environment*, v. 91, p. 52–165, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.007>>.

LARSON, D. P.; COIMBRA, C. F. M. Direct power output forecasts from remote sensing image processing. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, v. 140, n. 2, 2018.

LÓPEZ-ESCALANTE, M. C. et al. Photovoltaic modules designed for architectural integration without negative performance consequences. *Applied Energy*, v. 279, n. September, 2020.

LU, M.; LAI, J. H. K. Building energy: A review on consumptions, policies, ratingschemes and standards. *Energy Procedia*, v. 158, p. 3633–3638, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.899>>.

NG, K. M.; ADAM, N. M.; AB KADIR, M. Z. A. Experimental investigation of shading façade-integrated solar absorber system under hot tropical climate. *Journal of BuildingEngineering*, v. 23, n. March 2018, p. 136–143, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.01.031>>.

OLIVEIRA, J. C. de; BELCHIOR, F. N. Energia elétrica produzida por um sistemafotovoltaico versus dados meteorológicos – uma aplicação da correlação de pearson / Electricity produced by a photovoltaic system versus meteorological data - anapplication of pearson correlation. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 5, p.52075–52088, 2021. Disponível em: <https://brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/30314>>.

OMM. l'Atlas international des nuages Volume 1 : manuel de l'observation des nuages et des autres météores. p. 188, 1975.

ÖZCAN, Z. et al. Cooling channel effect on photovoltaic panel energy generation. *SolarEnergy*, v. 230, n. September, p. 943–953, 2021.

PEREZ, R.; PEREZ, M. A Fundamental Look At Energy Reserves For The Planet. The International Energy Agency SHC program Solar Update, v. 50, n. April, p. 4–6, 2009. Disponível em: <<http://www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/2015-11-A-Fundamental-Look-at-Supply-Side-Energy-Reserves-for-the-Planet.pdf>>.

PINHO, J.; GALDINO, M.A. MANUAL. [s.l:s.n.]

POLO, J. et al. Photovoltaic generation on vertical façades in urban context from open satellite-derived solar resource data. *Solar Energy*, v. 224, n. June, p. 1396–1405, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.011>>.

PORTOLAN DOS SANTOS, Í.; RÜTHER, R. Limitations in solar module azimuth and tilt angles in building integrated photovoltaics at low latitude tropical sites in Brazil. *Renewable Energy*, v. 63, p. 116–124, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.008>>.

QUESADA, G. et al. A comprehensive review of solar facades. Opaque solar facades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 5, p. 2820–2832, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.078>>.

REDWEIK, P.; CATITA, C.; BRITO, M. Solar energy potential on roofs and facades inan urban landscape. *Solar Energy*, v. 97, p. 332–341, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.036>>.

RITZEN, M. J. Environmental impact assessment of building integrated photovoltaics: numerical and experimental carrying capacity based approach. n. 2017, p. 217, 2017.

ROMERO RODRÍGUEZ, L. et al. Assessment of the photovoltaic potential at urban level based on 3D city models: A case study and new methodological approach. *Solar Energy*, v. 146, p. 264–275, 2017.

RÜTHER, R. Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. [s.l.: s.n.]

SAMU, R. et al. Applications for solar irradiance nowcasting in the control of microgrids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 147, n. April, p. 111187, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111187>>.

SÁNCHEZ-PANTOJA, N.; VIDAL, R.; PASTOR, M. C. Aesthetic perception of photovoltaic integration within new proposals for ecological architecture. *Sustainable Cities and Society*, v. 39, n. February, p. 203–214, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.027>>.

SÁNCHEZ, E.; IZARD, J. Performance of photovoltaics in non-optimal orientations: An experimental study. *Energy and Buildings*, v. 87, p. 211–219, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.035>>.

SARETTA, E.; CAPUTO, P.; FRONTINI, F. A review study about energy renovation of building facades with BIPV in urban environment. *Sustainable Cities and Society*, v. 44, n. September 2018, p. 343–355, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.002>>.

SCOGNAMIGLIO, A. “Photovoltaic landscapes”: Design and assessment. A critical review for a new transdisciplinary design vision. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 55, p. 629–661, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.072>>.

SHAYANI, R. a. Medição do rendimento global de um sistema fotovoltaico isolado utilizando módulos de 32 células. 2006.

SI, Z. et al. Photovoltaic power forecast based on satellite images considering effects of solar position. *Applied Energy*, v. 302, n. May, p. 117514, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117514>>.

STANCIU, C.; STANCIU, D. Optimum tilt angle for flat plate collectors all over the World - A declination dependence formula and comparisons of three solar radiation models. *Energy Conversion and Management*, v. 81, p. 133–143, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.016>>.

STONEKICK. Aplicativo de visualização da Posição do sol e Demo Sunrise. Disponível em: <<https://stonekick.com/sunposition.html>>. Acesso em 24 ago 2021.

SUN EARTH TOOLS. Ferramentas para designers e consumidores de energia solar disponível em: <https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=pt>.

Acesso em 13 ago 2021

TOLEDO, C. et al. Building Integrated Photovoltaics (BIPV) vs. Building Attached Photovoltaics (BAPV): balance between energy production and architectural design. XX International Congress on Project Engineering, n. July, p. 1861–1869, 2016.

VALIN, M. D. O. J. et al. Análise da relação entre abrigos meteorológicos alternativos para pontos pixos e o comportamento de variáveis termo-higrométricas. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 18, p. 157–179, 2016.

VULKAN, A. et al. Modeling the potential for PV installation in residential buildings in dense urban areas. *Energy and Buildings*, v. 169, p. 97–109, 2018.

WANG, F. et al. A minutely solar irradiance forecasting method based on real-time skyimage-irradiance mapping model. *Energy Conversion and Management*, v. 220, n. May, 2020.

WMO. Organização Meteorológica Mundial. Disponível em: <<https://cloudatlas.wmo.int/en/clouds-special.html>>. Acesso em 12 ago 2021

WU, X. F. et al. Integrated design of solar photovoltaic power generation technology and building construction based on the Internet of Things. *Alexandria Engineering Journal*, v.61, n.4, p.2775–2786, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.08.003>>.

YANG, J. et al. Understanding land surface temperature impact factors based on local climate zones. *Sustainable Cities and Society*, v. 69, n. November 2020, p. 102818, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102818>>.

YANG, Y. et al. Potential analysis of roof-mounted solar photovoltaics in Sweden. *Applied Energy*, v.279, n. October, p.115786, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115786>>.

YOUSIF, N. et al. Title. Journal of Physical Therapy Science, v. 9, n. 1, p. 1–11, 2018. Disponível

em:<http://dx.doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.07.010><http://dx.doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.07.010><https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.07.010>

ZHOU, X. et al. Impacts of solar-absorbing aerosol layers on the transition of stratocumulus to trade cumulus clouds. Atmospheric Chemistry and Physics, v. 17, n.20, p. 12725–12742, 2017.