

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

JOSUÉ MARCOS DE MOURA CARDOSO

SISTEMAS BAPVS E BIPVS: AVALIAÇÃO DO
DESEMPENHO DA INTEGRAÇÃO E APLICAÇÃO DE
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS A ELEMENTOS
CONSTRUTIVOS

CAMPINAS
2019

JOSUÉ MARCOS DE MOURA CARDOSO

**SISTEMAS BAPVS E BIPVS: AVALIAÇÃO DO
DESEMPENHO DA INTEGRAÇÃO E APLICAÇÃO DE
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS A ELEMENTOS
CONSTRUTIVOS**

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

Orientadora: Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota.

PUC-CAMPINAS

2019

Ficha catalográfica elaborada por Vanessa da Silveira CRB 8/8423 Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

621.31244 Cardoso, Josué Marcos de Moura.
C268s Sistemas BAPVs e BIPVs: avaliação do desempenho da integração e aplicação de módulos fotovoltaicos a elementos construtivos / Josué Marcos de Moura Cardoso.- Campinas: PUC-Campinas, 2019.
279 f.

Orientador: Lia Toledo Moreira Mota.
Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2019.
Incluem anexos e bibliografias.

1. Geração de energia fotovoltaica. 2. Redes sensoriais. 3. Análise térmica. I. Mota, Lia Toledo Moreira. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. III. Título.


CDD – 23. ed. 621.31244

JOSUÉ MARCOS DE MOURA CARDOSO


**SISTEMAS BAPVS E BIPVS: AVALIAÇÃO DO
DESEMPENHO DA INTEGRAÇÃO E APLICAÇÃO DE
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS A ELEMENTOS
CONSTRUTIVOS**

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.


Dissertação defendida e aprovada em 27 de fevereiro de 2019 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. Claudia Cotrim Pezzuto
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Yuzo Iano
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Este trabalho é dedicado à toda comunidade LGBTQIA+. Somos resitência e estaremos presentes em todos os espaços mostrando nossa qualificação acima de qualquer preconceito. Permanecemos fortes, unidos e sobrevivendo!

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho foi possível graças as ideias, auxílio e ajuda de várias pessoas e instituições que com suas respectivas contribuições colaboraram com a elaboração da proposta apresentada neste escopo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de fomento que possibilitou a execução deste trabalho durante os anos de 2017, 2018 e 2019.

À Pontifícia Universidade Católica de Campinas pela infraestrutura concedida como os laboratórios do CEATEC, bem como por todo aparato tecnológico utilizado para compor a bancada instrumentada associada aos ensaios efetuados.

Ao Centro de Tecnologia da Informação Renato Alencar (CTI) pela confecção do módulo fotovoltaico adaptado com células de silício policristalino construído pelo Laboratório de Energia Fotovoltaica (LEF). Agradeço os colaboradores Homero Schneider e Giuliano Maiolini pela disponibilidade e pela elaboração do módulo fotovoltaico que foi muito útil nas análises idealizadas para este trabalho.

Agradeço também os colaboradores da Divisão de Tecnologias Tridimensionais do CTI, Pedro Noritomi e Leonardo Mendes pela execução das simulações dentro do *software* ANSYS que somaram-se aos resultados alcançados com esta obra.

Aos técnicos dos laboratórios do CEATEC da PUC-Campinas pelo auxílio na confecção das partes componentes da bancada de testes. Ao técnico do Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas, Igor, pela ajuda com a elaboração dos corpos de prova na forma dos blocos de concreto. Aos técnicos da Maquetaria pela prestatividade em elaborar as caixas de isolamento térmico, bem com os suportes em madeira utilizados nos ensaios em bancada. Aos técnicos do Laboratório de Meios de Transmissão, Eduardo Veiga e Fernando, por toda a ajuda fornecida.

Em especial, agradeço aos técnicos Fabiano Gonçalves e Jacqueline Neves (Laboratório de Conforto Térmico) por todo o suporte dado para a execução deste trabalho. Com a

ajuda deles, a metodologia pôde ser efetuada com êxito. Agradeço, em especial, ao Fabiano pela prestatividade em me auxiliar a cada passo idealizado para a elaboração deste trabalho.

À minha orientadora Professora Lia Toledo Moreira Mota pelos anos de trabalho e pelo acompanhamento ao longo de mais esta etapa da minha vida acadêmica.

Agradeço à Professora Cláudia Pezzuto pela prestatividade em me auxiliar no delineamento de diversas etapas associadas a este trabalho. Sem sua ajuda a concepção e execução do mesmo não seria possível.

Aos professores e professoras que me inspiraram, e continuam inspirando, desde meus primeiros instantes enquanto estudante. A concretização deste trabalho é reflexo de todas as experiências que me possibilitaram acreditar nos meus sonhos e seguir adiante, mesmo com todas as dificuldades.

Agradeço à Engenheira Valéria Cristina pelo empréstimo do equipamento fotovoltaico associado à bancada de testes. Obrigado pelos anos de amizade e por estar sempre presente quando precisei.

Ao Engenheiro Mestre Marcelo Soeira pela ajuda com os dados de radiação solar e por colaborar com suas ideias dentro do contexto montado nesta dissertação.

À Engenheira Ângela Alves por colaborar com o contato junto ao CTI agilizando os processos de simulação dentro do *software* ANSYS.

Ao Engenheiro Hermes Loschi por colaborar com o delineamento desta pesquisa. Com sua ajuda e suporte foi possível explorar as potencialidades das minhas ideias, sendo que com suas ponderações esta obra, de fato, tomou forma e se expandiu alcançando os objetivos almejados.

Ao Engenheiro Everton Dias pela amizade e por colaborar com a escrita deste trabalho.

Agradeço ao Partido dos Trabalhadores (PT) por oferecer o Programa Universidade para Todos (PROUNI) o qual foi essencial para que eu pudesse conquistar o tão sonhado

diploma em uma universidade. Agradeço a iniciativa e a possibilidade de transformar meus sonhos em realidade.

Aos meus pais, Euracimar e Rosileia, por acreditarem em mim, por fazer dos meus sonhos a realização deles. Agradeço por me ensinarem a ter senso de justiça, por me mostrarem que com humildade e honestidade é possível conquistar tudo o que se deseja. Apresento a eles as minhas escolhas pois eles me apresentaram a vida.

À minha Tia Eura por exercer papel fundamental em minha vida, principalmente me influenciando a sempre buscar a educação enquanto ferramenta de transformação em vida. Se escolhi me tornar educador foi devido à ela.

À minha Tia Geralda por ser nosso ponto de equilíbrio e amor absoluto.

Aos meus irmãos Cristiane, Taciane, Raul, Bernardo e Luan pelo amor, companherismo, amizade e suporte, em todos esses anos de vida.

Aos meus sobrinhos Heitor e Heloisa por renovarem o amor de nossa família trazendo paz e luz aos nossos corações. Amarei vocês eternamente.

À Lucy por ser um exemplo de mulher forte e determinada, agradeço por todos os ensinamentos e cuidado.

Ao Paulo por estar sempre presente quando precisei.

Ao Jhonatas agradeço pelo companherismo e amor durante esse tempo de relacionamento. Obrigado por tudo.

À família Corrêa de Almeida Teixeira (Chico, Beatriz, Maria Clara, Maria Luíza e Noah) agradeço por terem me mostrado que com os mecanismos disponibilizados pelo PROUNI, que independente da origem de qualquer um, seria possível eu conseguir conquistar minha graduação em engenharia. Obrigado pelos anos de amizade e por todos ensinamentos transmitidos à mim.

Às amigas de vida, Amanda Araújo, Tati Bernardes, Tati Cardoso e Paula Lima por mantermos o contato após tantos anos de amizade. Agradeço a oportunidade de compartilhar as experiências dessa vida juntos.

Aos amigos que a vida me trouxe em Campinas: Mirian Heloise, Mayara Sonehara, Beatriz Trombeli, Carolina Alvim, Monise Alves, Isabella da Silva, Isabella Garcia, Amanda Martins, Mariana Lima, Amanda Medicina, Giovanna Zamuner, Samara Medicina, Lucio Arantes e Lucas Aquino. Agradeço a chance de podermos vivenciar tantas experiências juntos e levo um pouco de cada um de vocês dentro do meu coração.

Ao universo por alinhar as pessoas mais importantes e incríveis em minha vida. Imensa gratidão por poder compartilhar minha existência com essas pessoas.

Aos seres da cidade e aos povos das florestas.

Marielle Franco presente.

RESUMO

CARDOSO, Josué Marcos de Moura Cardoso. *Sistemas BAPVs e BIPVs: Avaliação do Desempenho da Integração e Aplicação de Módulos Fotovoltaicos a Elementos Construtivos*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2019.

Os *Building Applied Photovoltaics* (BAPV) e *Building Integrated Photovoltaic* (BIPV) despontaram-se no cenário das edificações agregando as funcionalidades energéticas dos módulos fotovoltaicos às fachadas e telhados das edificações. Entretanto, os módulos FVs são altamente sensíveis à configuração climática e às condições ambientais, como também são influenciados pelo método de fixação onde são implementados. Fatores como temperatura ambiente, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar e também a forma como eles são aplicados/integrados às edificações exercem influência direta na eficiência dos módulos FVs. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo realizar a montagem de uma rede de sensores para monitoramento dos parâmetros associados aos módulos FVs tais como tensão e corrente elétrica de saída, bem como a temperatura de operação desses equipamentos e também para coleta de dados inerentes à temperatura superficial do elemento construtivo. Os fatores ambientais foram coletados por uma estação meteorológica. Uma câmera termográfica também foi associada à bancada de simulações dos sistemas BAPVs e BIPVs. Foram realizadas simulações dentro do *software* ANSYS acerca do comportamento do calor em sistemas BIPVs. Como resultados identificou-se que a velocidade do vento, por exemplo, cumpre papel essencial no resfriamento das células, sendo que para uma velocidade média de 0,4 m/s a temperatura de operação das células pode reduzir cerca de 7%. Outro parâmetro identificado nas análises foi a umidade relativa do ar que pode ocasionar uma redução de 9% na temperatura de operação dos módulos.

Palavras-chave: módulos fotovoltaicos, sistemas BAPVs, sistemas BIPVs, desempenho térmico em edificações.

ABSTRACT

CARDOSO, Josué Marcos de Moura. BAPVS and BIPVS Systems: Evaluation of the Performance of the Integration and Application of Photovoltaic Modules to Constructive Elements. Masters Dissertation. Postgraduate Program in Urban Infrastructure Systems, Pontifical Catholic University of Campinas, Campinas, 2019.

Building Applied Photovoltaics (BAPV) and Building Integrated Photovoltaic (BIPV) have emerged in the building landscape by adding the energetic functionalities of photovoltaic modules to facades and roofs of buildings. However, the PV modules are highly sensitive to the climatic configuration and environmental conditions. Some factors such as ambient temperature, relative air humidity, wind speed, solar radiation and also the method they are applied or integrated to the buildings have a direct influence on the efficiency of the PV modules. The aim of this work was to set up a sensors network to monitor the parameters associated with FVs, such as voltage and electric current, as well as the temperature of operation of this equipment and to collect datas inherent to temperature surface of the building element. The environmental factors were collected by a weather station. A thermographic camera was also associated with the simulations of the BAPVs and BIPVs systems. Simulations were performed within the ANSYS software to verify the behavior of heat transference in BIPVs systems. As results it has been identified that wind speed, for example, plays a key role in cooling the cells, and for an average velocity of 0.4 m/s the operating temperature of the cells can reduce by about 7%. Another parameter identified in the analyzes was the relative humidity of the air that can cause a reduction of 9% in the operating temperature of the modules.

Key-words: *photovoltaic modules, BAPVs system, BIPVs system, thermal performance in buildings.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração dos movimentos de rotação e translação do planeta Terra com seu eixo (Norte-Sul) inclinado em $23,5^\circ$	44
Figura 2 – Hierarquia dos elementos fotovoltaicos.....	46
Figura 3 – Exemplificação das camadas e regiões constituintes de uma célula FV de silício cristalino.....	50
Figura 4 – Circuito elétrico correspondente de uma célula fotovoltaica.	52
Figura 5 – Gráfico demonstrativo da curva associada à potência de uma célula FV relacionada com a tensão (V) e corrente (I).	53
Figura 6 – Exemplificação da distribuição das camadas e junções em uma célula composta por CdTe de segunda geração.....	57
Figura 7 – Ilustração esquemática de uma célula FV de multijunção de terceira geração.	58
Figura 8 – Exemplos de células FVs de primeira, segunda e terceira geração compostas por mc-Si (a), pc-Si (b), a-Si (c) e composto orgânico (d), respectivamente.....	59
Figura 9 – Esquemático das partes constituintes de um módulo fotovoltaico.	62
Figura 10 – Exemplos de módulos FVs compostos por células de pc-Si (a) e células orgânicas (b).	63
Figura 11 – Influência das resistências R_s (a e b) e R_{SH} (c e d) no comportamento da corrente (I) e da potência (W) em um módulo FV.....	69
Figura 12 – Elementos climáticos contribuintes para a eficiência elétrica de módulos fotovoltaicos.	74
Figura 13 – Gráficos das curvas de tensão (à direita) e potência (à esquerda) para diferentes valores de irradiação solar (W/m^2).	75
Figura 14 – Gráficos das curvas de corrente (à direita) e potência (à esquerda) para valores diferentes de T_a	75
Figura 15 – Processo de transferência de calor entre as partes de um módulo FV.....	79
Figura 16 – Esquemático elétrico da malha de resistências e capacitâncias, ilustrando o comportamento de um módulo FV nos processos de transferência de calor.....	79
Figura 17 – Exemplos de edifícios com sistemas BAPVs com módulos FVs aplicados às fachadas ou aos telhados.....	85
Figura 18 – Exemplos de sistemas BIPVs com os módulos FVs integrados ao envelopamento construtivo.	86

Figura 19 – Exemplos de sistemas BAPV (a) com a aplicação dos módulos FVs em telhados e BIPV (b) com os módulos integrados ao telhado situados na Noruega.	87
Figura 20 – Configurações urbanas e seus respectivos potenciais de aproveitamento da radiação solar incidente para aplicação de módulos FVs.	91
Figura 21 – Exemplificação dos processos de transferência de calor e incidência de massa de ar em um sistema BAPV.	94
Figura 22 – Exemplificação da troca de calor por condução presente em um sistema BIPV.	95
Figura 23 – Exemplos de Sistemas BIPVs integrados à cobertura em teto modular (a) e em telhas de cerâmica (b).	99
Figura 24 – Protótipos contendo sistemas BIPVs (módulos FVs com revestimentos cerâmicos) colocados em campo para coleta de dados; (a), (b), (d) – células FVs de mc-Si; (c) – células de pc-Si.	100
Figura 25 – Comportamento da tensão e da corrente elétrica para diferentes valores de temperatura ambiente.	114
Figura 26 – Esquemático da bancada de testes composta para o monitoramento dos sistemas BAPV e BIPV propostos.	142
Figura 27 – Diagrama complementar e ilustrativo das partes necessárias para desenvolvimento da rede de sensores.	143
Figura 28 – Elementos associados à rede de monitoramento dos sistemas BAPVs e BIPVs em bancada.	146
Figura 29 – Composição do nó sensor associado à rede de monitoramento.	147
Figura 30 – Esquemático ilustrativo da distribuição das conexões dos dispositivos do nó sensor ao barramento SDA e SCL disponibilizado pelas entradas A4 e A5 do Arduino Nano.	149
Figura 31 – Rede de sensores desenvolvida para monitoramento e aferição dos dados de temperatura superficial, de tensão e corrente elétrica.	150
Figura 32 – Camadas de vedação para isolamento do MCP9700A para confecção dos sensores de T_s	152
Figura 33 – Passo a passo da confecção do sensor de temperatura superficial e de temperatura de operação adotando o MCP9700A.	154
Figura 34 – Sonda de temperatura superficial Testo 445 usada para calibração dos sensores elaborados com o MCP9700A.	154
Figura 35 – Posicionamento das sondas e dos sensores de temperatura de superfície e de operação dos módulos FVs para as simulações contendo os sistemas BIPVs (a) e (b); e BAPVs (c) e (d), respectivamente.	155

Figura 36 – Corpos de prova em concreto para emulação do sistema BIPV com caixa de isolamento para as laterais.	160
Figura37 – Caixas de isolamento elaboradas para os ensaios dos sistemas BIPVs.	160
Figura 38 – Corpos de prova elaborados para emulação dos sistemas BAPVs.	161
Figura 39 – Tecnologias de módulos FVs utilizadas nas análises dos sistemas BAPV e BIPV.	164
Figura 40 – Camadas de materiais envolvidos no processo de confecção do módulo FV com células orgânicas	165
Figura 41 – Camadas de materiais utilizados para confecção do módulo FV com células de pc-Si.	165
Figura 42– Máquina termográfica modelo Ti100 da fabricante FLUKE utilizada na bancada de testes vinculada aos ensaios.	166
Figura 43 – Estação meteorológica adotada na bancada de testes vinculada aos ensaios.....	169
Figura 44 – Bancada de testes simulando os sistemas BIPVs com a caixa de isolamento térmico no Ensaio I realizado no dia 13/12/18.	172
Figura 45 – Bancada de testes simulando os sistemas BIPVs com a caixa de isolamento térmico no Ensaio II efetuado no dia 14/12/2018.	172
Figura 46 – Instrumentação da bancada composta para realização do Ensaio III ocorrido no dia 17/12/18.....	173
Figura 47 – Caracterização da bancada para simulações do sistemas BIPVs para o Ensaio IV com o isolamento das laterais efetuado no dia 07/01/2018.....	173
Figura 48 – Espaçamento colocado entre o bloco de concreto e o módulo FV para os ensaios envolvendo os sistemas BAPVs.....	174
Figura 49 – Caracterização dos ensaios realizados com os sistemas BAPVs alternando o espaçamento entre o bloco de concreto e o módulo FV (células orgânicas e pc-Si – adaptado).	176
Figura 50 – Exemplos dos sistemas BIPVs simulados no <i>software</i> ANSYS.....	178
Figura 51 – Gráfico do comportamento da tensão elétrica de saída (V_{SAIDA}), corrente de saída (I_{SAIDA}) e G_{SOLAR} ao longo do tempo para o Ensaio I.	182
Figura 52 – Comportamento da T_s nos blocos de concreto com o sistema BIPV no Ensaio I e o comportamento da T_a ao longo do dia do Ensaio I.	184
Figura 53 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio I.....	185
Figura 54 – Imagens termográficas dos sistemas BIPVs no início das simulações (a, b, c) e ao final do experimento (d, e, f).....	186

Figura 55 – Gráfico do comportamento da tensão elétrica de saída ($V_{SAÍDA}$), corrente de saída ($I_{SAÍDA}$) e G_{SOLAR} ao longo do tempo para o Ensaio II.	188
Figura 56 – Comportamento da T_S nos blocos de concreto inseridos nas simulações com o sistema BIPV no Ensaio II e o comportamento da T_a ao longo do dia do Ensaio II.	189
Figura 57 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio II.....	190
Figura 58 – Imagens termográficas dos sistemas BIPVs no início das simulações (a, b, c) e ao final do experimento (d, e, f).....	191
Figura 59 – Gráfico dos valores de tensão e corrente para os módulos FVs pc-Si (V_1 e I_1) e células orgânicas (V_2 e I_2) e G_{SOLAR} retirados do Ensaio III.	193
Figura 60 – Comportamento da T_S nos blocos de concreto com o sistema BIPV no Ensaio III e o comportamento da T_a ao longo do dia do Ensaio III.	194
Figura 61 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio III.....	195
Figura 62 – Figuras termográficas dos sistemas BIPVs no início das simulações (a, b, c) e ao final do experimento (d, e, f).....	197
Figura 63 – Imagens capturadas às 18 horas e 01 minuto no dia 17/12/2018 ao final do Ensaio III para visualização do comportamento térmico dos blocos de concreto utilizados na simulação dos sistemas BIPVs e do o concreto puro.....	197
Figura 64 – Gráfico do comportamento da tensão elétrica ($V_{SAÍDA}$), corrente ($I_{SAÍDA}$) e G_{SOLAR} ao longo do tempo para o Ensaio IV.	199
Figura 65 – Comportamento da T_S nos blocos de concreto com o sistema BIPV e o comportamento da T_a ao longo do dia do Ensaio IV.....	200
Figura 66 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio IV.	201
Figura 67 – Figuras termográficas dos sistemas BIPVs no início das simulações (a, b, c) e ao final do experimento IV (d, e, f).	202
Figura 68 – Gráfico do comportamento da tensão elétrica de saída ($V_{SAÍDA}$), corrente de saída ($I_{SAÍDA}$) e G_{SOLAR} ao longo do tempo para o Ensaio V.....	204
Figura 69 – Comportamento das temperaturas T_S , T_{OP} nos blocos de concreto com o sistema BAPV e o comportamento da T_a ao longo do dia.	205
Figura 70 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio V.	206
Figura 71 – Imagens termográficas retiradas do Ensaio V contendo os sistemas BAPVs com o módulo de pc-Si (a) e com as células orgânicas (b) – início do experimento; e imagens da superfície do bloco de concreto voltada ao módulo FV (c e d).	207
Figura 72 – Gráfico do comportamento da tensão elétrica ($V_{SAÍDA}$), corrente ($I_{SAÍDA}$) e G_{SOLAR} ao longo do tempo para o Ensaio VI.	209

Figura 73 – Comportamento da T_s , T_{OP} e T_a nos sistemas BAPVs coletadas durante o Ensaio VI.	210
Figura 74 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio VI.	211
Figura 75 – Imagens termográficas retiradas do Ensaio VI contendo os sistemas BAPVs com o módulo de pc-Si (a) e com as células orgânicas (b) e da superfície do bloco de concreto ao final do experimento (c e d).	212
Figura 76 – Gráfico do comportamento da tensão elétrica ($V_{SAÍDA}$), corrente ($I_{SAÍDA}$) e G_{SOLAR} ao longo do tempo para o Ensaio VII.	214
Figura 77 – Comportamento da T_s , T_{OP} e T_a nos sistemas BAPVs coletadas durante o Ensaio VII.	215
Figura 78 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio VII.	216
Figura 79 – Imagens termográficas retiradas do Ensaio VII contendo os sistemas BAPVs com o módulo de pc-Si (a e b) e com as células orgânicas (d e e) – início da coleta; e ao final do experimento dos blocos de concreto (c e f).	217
Figura 80 – Gráfico do comportamento da tensão elétrica ($V_{SAÍDA}$), corrente ($I_{SAÍDA}$) e G_{SOLAR} ao longo do tempo para o Ensaio VIII.	219
Figura 81 – Comportamento da T_s , T_{OP} e T_a nos sistemas BAPVs coletadas durante o Ensaio VIII.	220
Figura 82 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio VIII.	221
Figura 83 – Imagens termográficas retiradas do Ensaio VIII contendo os sistemas BAPVs com o módulo de pc-Si (a) e com as células orgânicas (b) – início da coleta; e ao final do experimento dos blocos de concreto (c e d).	222
Figura 84 – Gráfico do comportamento da tensão elétrica de saída ($V_{SAÍDA}$) e da corrente de saída ($I_{SAÍDA}$) ao longo do tempo para o Ensaio IX.	224
Figura 85 - Comportamento das temperaturas T_s , T_{OP} nos blocos de concreto inseridos nas simulações com o sistema BAPV no Ensaio IX e o comportamento da T_a ao longo do dia.	225
Figura 86 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio IX.	226
Figura 87 – Imagens termográficas retiradas do Ensaio IX contendo os sistemas BAPVs com o módulo de pc-Si (a) e com as células orgânicas (b) – início da coleta; e ao final do experimento dos blocos de concreto (c e d).	227
Figura 88 – Gráfico do comportamento da tensão elétrica de saída ($V_{SAÍDA}$) e da corrente de saída ($I_{SAÍDA}$) ao longo do tempo para o Ensaio X.	229
Figura 89 – Comportamento das temperaturas T_s , T_{OP} nos blocos de concreto inseridos nas simulações com o sistema BAPV no Ensaio X e o comportamento da T_a ao longo do dia.	230

Figura 90 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio X.	231
Figura 91 – Imagens termográficas retiradas do Ensaio IX contendo os sistemas BAPVs com o módulo de pc-Si (a) e com as células orgânicas (b) – início da coleta; e ao final do experimento dos blocos de concreto (c e d).	233
Figura 92 – Resultado da simulação do <i>software</i> ANSYS para o sistema BIPV com integração com o módulo FV de pc-Si onde a T_{OP} do módulo é igual a 28°C.	235
Figura 93 – Resultado da simulação do <i>software</i> ANSYS para o sistema BIPV com integração com o módulo FV de células orgânicas onde a T_{OP} do módulo é igual a 28°C.	236
Figura 94 – Resultado da distribuição do fluxo de calor no sistema BIPV com o módulo FV de pc-Si onde a T_{OP} considerada no módulo é igual à 28°C.	236
Figura 95 – Resultado da distribuição do fluxo de calor no sistema BIPV com o módulo FV de células orgânicas onde a T_{OP} considerada no módulo é igual à 28°C.	237
Figura 96 – Resultado da simulação do <i>software</i> ANSYS para o sistema BIPV com integração com o módulo FV pc-Si onde a T_{OP} do módulo é igual a 48°C.	238
Figura 97 – Resultado da simulação do <i>software</i> ANSYS para o sistema BIPV com integração com o módulo FV de células orgânicas onde a T_{OP} do módulo é igual a 48°C.	239
Figura 98 – Resultado da distribuição do fluxo de calor no sistema BIPV com o módulo FV de pc-Si onde a T_{OP} considerada no módulo é igual à 48°C.	239
Figura 99 – Resultado da distribuição do fluxo de calor no sistema BIPV com o módulo FV de células orgânicas onde a T_{OP} considerada no módulo é igual à 48°C.	240
Figura 100 – Resultado da simulação do <i>software</i> ANSYS para o sistema BIPV com integração com o módulo FV pc-Si onde a T_{OP} do módulo é igual a 64°C.	241
Figura 101 – Resultado da simulação do <i>software</i> ANSYS para o sistema BIPV com integração com o módulo FV de células orgânicas onde a T_{OP} do módulo é igual a 64°C.	242
Figura 102 – Resultado da distribuição do fluxo de calor no sistema BIPV com o módulo FV de pc-Si onde a T_{OP} considerada no módulo é igual à 64°C.	242
Figura 103 – Resultado da distribuição do fluxo de calor no sistema BIPV com o módulo FV de células orgânicas onde a T_{OP} considerada no módulo é igual à 64°C.	243
Figura 104 – Gráfico das médias dos valores dos parâmetros coletados a partir dos ensaios com os sistemas BIPVs.	248
Figura 105 – Gráfico das médias dos valores dos parâmetros coletados a partir dos ensaios com os sistemas BAPVs.	249

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de aproveitamento acerca da eficiência de diferentes tipos de tecnologias de células fotovoltaicas.....	59
Tabela 2 – Valores estabelecidos pela norma IEC 61853-1 para as condições de teste em módulos FVs.....	65
Tabela 3 – Característica de desempenho de módulos FVs associados às edificações com relação às perdas e condições climáticas locais.....	83
Tabela 4 – Especificações para cada espaço da envoltória construtiva associada, ou integrada, com módulos FVs caracterizando o BAPV ou BIPV.....	88
Tabela 5 – Características das células FVs encontradas em edifícios contendo sistemas BAPV e BIPV.	98
Tabela 6 – Valores de referência para transmitância térmica e capacidade térmica para paredes e coberturas em edificações.	103
Tabela 7 – Valores para condutividade térmica (U) e capacitância térmica (CT) para diferentes tipos de materiais associados às fachadas e às coberturas.....	104
Tabela 8 – Comparação entre os valores apresentados pelas condições padrões de teste e para temperatura nominal de operação da célula.	109
Tabela 9 – Coeficientes empíricos fornecidos pelo modelo SNL para diferentes tipos de tecnologias FVs e locais de implementação.....	112
Tabela 10 – Características referentes aos módulos FVs utilizados na bancada de testes emulando os sistemas BAPV e BIPV.	164
Tabela 11 – Resumo da caracterização dos ensaios realizados em bancada.....	171
Tabela 12 – Resumo das médias dos valores obtidos considerando os sistemas BIPVs emulados em bancada.	244
Tabela 13 – Resumo dos valores médios coletados nos ensaios envolvendo os sistemas BAPVs.	246
Tabela 14 – Valores retirados da máquina termográfica identificando a T_{OP} média dos módulos FVs no início dos ensaios e a T_s dos blocos de concreto ao final de cada ensaio.	247

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

β – Coeficiente de Variação da Tensão em Circuito Aberto

α – Coeficiente de Variação da Corrente em Curto Circuito

γ – Variação da Potência Máxima

λ_A e λ_B – Intervalo de Comprimento de Onda da Resposta Espectral

η – Fator de Rendimento de Painéis Fotovoltaicos

φ – Atraso Térmico

A – Área da Célula Fotovoltaica

a-Si – Silício Amorfo

AM – *Air Mass* (Massa de Ar)

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BAPV – *Building Applied Photovoltaic*

BIPV – *Building Integrated Photovoltaic*

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

c-Si – Silício Cristalino

CT – capacidade térmica

D_{VENTO} – direção do vento

EEZ – Edifício de Energia Zero

EVA – Etil Vinil Acetato

FF – fill factor – Fator de Forma

FREs – Fontes Renováveis de Energia

FSo – Fator solar

FV – Fotovoltaico (a) (s)

G – Irradiância Incidente

G_{SOLAR} – Irradiância Solar

HTC – *High Temperature Conditions*

I2C – *Inter-Integrated Circuit*

IEC – *International Electrotechnical Commission*

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

I – Corrente Circulante no Módulo Fotovoltaico

ID – Corrente de Saturação do Diodo

IFG – Corrente Fotogerada
I_{MP} – Corrente de Máxima Potência
I_{SAÍDA} – Corrente Elétrica do Módulo Fotovoltaico
I_{SH} – Corrente de Curto Circuito
k – Constante de Boltzmann ($1,3086 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$)
K – Condutividade Térmica do Material
LIC – *Low Irradiance Conditions*
LTC – *Low Temperature Conditions*
m – Índice Ideal para o Diodo
m-Si – Silício Monocristalino
mc-Si – Silício Multicristalino
NOCT – *Nominal Operating Cell Temperature*
NREL – *National Renewable Energy Laboratory*
OC – *Organic Cell* (Células Orgânicas)
OLED – *Organic Light-Emitting Diode*
PCM – *Phase Change Material*
PCS – *Power Conditioning System*
pc-Si – Silício Policristalino
P_{MP} – Potência de Ponto Máximo
P_{SAÍDA} – Potência de Saída
PVF – Fluoreto de Polivinil
q – carga do elétron ($1,6028 \cdot 10^{-19}$)
RC – Resistiva Capacitiva
RE – Resposta Espectral do Módulo Fotovoltaico
RH – Umidade Relativa do Ar
RN – Resoluções Normativas
RSSF – Redes de Sensores Sem Fio
RS – Resistência em Série
RSH – Resistência em Paralelo
R/W – *Read/Write*
SC – Sistemas de Cobertura
SCL – *Serial Clock*
SDA – *Serial Data*
SNL – *Sandia National Laboratory*

Si – Silício

STC – *Standard Test Conditions*

SVVIE – Sistemas de Vedação Vertical Internas e Externas

T_a – Temperatura Ambiente

T_{OP} – Temperatura de Operação da Célula Fotovoltaica

T_m – Temperatura na Parte Traseira do Módulo FV

T_{ma} – Temperatura da Massa de Ar

T_s – Temperatura Superficial

U – Transmitância Térmica

V – Tensão Elétrica

V_{MP} – Tensão de Máxima Potência

V_{OC} – Tensão de Circuito Aberto

$V_{SAÍDA}$ – Tensão de Saída do Módulo Fotovoltaico

V_{VENTO} – Velocidade do Vento

W_P – Potência de Pico

LISTA DE UNIDADES DE MEDIDA

°C – graus Celsius

μA – micro Ampere

A/Wnm – Ampere por Watt em nano metro (de onda)

A – Ampere

cm – centímetro (s)

GB – Giga Byte

GW – Giga Watt

J/K – Joule por Kelvin

K – Kelvin

kbps – kilo bits por segundo

kHz – kilo Hertz

kJ/(m².K) – kilo Joule por metro quadrado Kelvin

k/B – kilo Bytes

kWh – kilo Watt hora

mA – mili Ampere

mb – milibar

Mbps – Mega bits por segundo

MW – Mega Watt

mW/m² – miliWatt por metro quadrado

m/s – metros por segundo

mV/°C – miliVolt por grau Celsius

mV/célula°C – miliVolt por grau Celsius na célula fotovoltaica

nm – nano metro

pF – pico Faraday

V – Volts

W/m² – Watt por metro ao quadrado

W/m²nm – Watt por metro ao quadrado em nano metro (de onda)

W/m²K – Watt por metro quadrado Kelvin

Wm⁻¹°C⁻¹ – Watt metro graus Celsius

SUMÁRIO

1. Introdução	28
1.1 Contextualização do trabalho	33
1.2 Justificativa para elaboração do trabalho	34
1.3 Objetivos	35
1.3.1 Objetivo geral	36
1.3.2 Objetivos específicos	36
2.Fundamentação	teórica 39
2.1 Panorama acerca da energia solar fotovoltaica.....	39
2.1 Fatores contribuintes para disseminação da energia solar	41
2.2 Aproveitamento da energia solar – fundamentos	42
2.3 Classificação dos elementos associados aos sistemas fotovoltaicos	45
2.4 Células solares fotovoltaicas	47
2.4.1 Princípio de funcionamento: o efeito fotovoltaico.....	49
2.4.2 Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.....	51
2.4.3 Tecnologias e compostos voltados à elaboração de células fotovoltaicas.....	55
2.5 Módulos fotovoltaicos.....	61
2.5.1 Normas, leis e regulamentações internacionais relacionadas à energia fotovoltaica	64
2.5.2 Normas brasileiras aplicadas à energia solar fotovoltaica	65
2.5.3 Fatores Contribuintes para o Desempenho de Módulos Fotovoltaicos	67
2.5.4 Aplicação dos Módulos Fotovoltaicos em Edificações.....	81
3. Revisão Bibliográfica.....	105
3.1 Fatores e parâmetros contribuintes para o desempenho de módulos FVs	106
3.1.1 Influência da Temperatura de Operação das Células.....	107
3.1.1.1 Temperatura nominal de operação das células FVs (NOCT)	117

3.1.1.2	O modelo da Sandia National Laboratories (SNL)	119
3.1.2	Influência da temperatura ambiente	113
3.1.3	Influência da velocidade do vento e da direção da massa de ar	116
3.1.4	Influência da umidade relativa do ar	118
3.1.5	Sistemas BIPVs e BAPVs – impactos proporcionados à edificação e à eficiência elétrica dos módulos FVs	120
3.2	Técnicas para aferição de parâmetros ambientais e elétricos em sistemas BAPVs e BIPVs	123
3.2.1	Métodos para aferição do comportamento térmico de módulos FVs	125
3.2.1.1	Adoção de sensores de contato superficial para aferição da temperatura de operação em módulos FVs	135
3.2.1.2	Utilização de máquinas termográficas para avaliação da temperatura superficial em módulos	FVs 138
3.2.1.3	Simulações computacionais para avaliação do desempenho de módulos FVs	139
3.2.2	Estudos por simulações computacionais em edificações com sistemas BIPV e BAPV	133
3.2.3	Rede de sensores para coleta da temperatura superficial em edificações	136
4.	Materiais e Métodos	140
4.1	Rede de sensores para monitoramento dos sistemas BAPVs e BIPVs	142
4.1.1	Desenvolvimento da rede de sensores para monitoramento dos sistemas BAPV e BIPV	146
4.1.2	Elaboração dos sensores de temperatura operacional (T_{OP}) e temperatura superficial (T_S)	150
4.1.3	Algoritmo para aferição dos dados de temperatura superficial e de temperatura de operação das células FVs, tensão e corrente elétrica e o <i>software</i> supervisorio <i>Telemetry Viewer</i>	156
4.2	Elaboração dos corpos de prova em concreto	158
4.3	Módulos fotovoltaicos adotados nas simulações dos sistemas BAPV e BIPV	161

4.4 Estação meteorológica para coleta de dados ambientais e climáticos próximos à bancada de realização dos testes	167
4.5 Caracterização dos ensaios realizados em bancada com os sistemas BIPVs	169
4.6 Detalhamento dos ensaios envolvendo os sistemas BAPVs	174
4.7 Simulação no <i>software</i> ANSYS	177
5. Resultados	178
5.1 Análises a partir dos sistemas BIPVs emulados – Ensaio I – Laterais dos blocos de concreto isoladas.....	180
5.2 Análises a partir dos sistemas BIPVs emulados no Ensaio II com as laterais dos blocos de concreto não isoladas	186
5.3 Análises a partir dos sistemas BIPVs emulados no Ensaio III sem isolamento das laterais do elemento construtivo e utilizando os módulos FVs de pc-Si adaptado e contendo células orgânicas	192
5.4 Resultados retirados a partir das simulações vinculadas ao Ensaio IV com os sistemas BIPVs sem o isolamento das laterais do bloco de concreto	198
5.5 Análises a partir dos sistemas BAPVs emulados – Ensaio V com o espaçamento de 2,1 cm entre os blocos de concreto e os módulos FVs	203
5.6 Resultados do Ensaio VI emulando os sistemas BAPVs com o espaçamento de 3,5 cm entre os elementos construtivos e os módulos FVs	208
5.7 Análises a partir dos sistemas BAPVs simulados – Ensaio VII com o espaçamento os módulos FVs de pc-Si adaptado e células orgânicas e espaçamento entre de 5,5 cm entre os blocos de concreto e os módulos FVs.....	213
5.8 Resultados retirados a partir das simulações vinculadas ao Ensaio VIII com os módulos FVs de pc-Si (Eco-Worthy) e composto por células orgânicas e distanciamento entre de 2,1 cm entre os blocos de concreto e os módulos FVs	218
5.9 Análises a partir dos sistemas BAPVs simulados – Ensaio IX com o espaçamento entre os blocos de concreto e os módulos FVs de 3,5 cm	223

5.10 Resultados retirados a partir das simulações vinculadas ao Ensaio X com os módulos FVs de pc-Si (Eco-Worthy) e de células orgânicas com distanciamento de 5,5 cm entre os blocos de concreto e os módulos FVs.....	228
5.11 Simulações computacionais no <i>software</i> ANSYS.....	233
5.12 Discussões.....	243
6. Conclusões	250
Referências.....	258
Anexos.....	273

1. Introdução

Para suprir a crescente demanda energética, muitos países diversificam sua matriz com a inserção de fontes renováveis para produção de energia. Contudo, algumas dessas fontes, como a energia eólica e a energia fotovoltaica, são sensíveis às condições climáticas associadas a cada região onde são instaladas (ANEEL, 2002), (LABREN, CCST, INPE, 2017). Consequentemente, a geração de energia pode sofrer variações sazonais vinculadas ao clima local, ou mesmo pela forma como a concepção do projeto de captação do recurso natural é realizado. Essas fontes vêm de encontro ao conceito de sustentabilidade, uma vez que não produzem gases nocivos ao meio ambiente e exploram recursos abundantes na natureza. Nesse cenário, os os painéis fotovoltaicos (FVs) despontaram como fonte viável, possibilitando o aproveitamento da radiação solar para aquecimento de água para geração de energia elétrica (PRIEB, 2002), (MME/EPE, 2016), (MME/EPE, 2017).

O aprimoramento das tecnologias e compostos químicos adotados para elaboração das células FVs resultou em células com estruturas flexíveis e adaptáveis. O silício é o principal elemento adotado para confecção de células fotovoltaicas. Inicialmente, foram desenvolvidas células com silício monocristalino (m-Si) e policristalino (pc-Si), caracterizando as células de primeira geração. Posteriormente, o silício amorfo (a-Si) trouxe os filmes finos como módulos FVs já na segunda geração de células (MATTEI, et al., 2006), (FALCÃO, 2005), (AVRUTIN, IZYUMSKAYA, MORKOÇ, 2011), (ORTEGA, 2013). Anos após, outros elementos também foram inseridos na fabricação das células como os compostos Arseneto de Gálio (GaAs), Telureto de Cádmiio (CdTe), entre outros. A terceira geração contempla os compostos orgânicos como matéria prima, sendo o Antraceno ($C_{14}H_{10}$), o Tetraceno ($C_{18}H_{12}$) e o Pentaceno ($C_{22}H_{14}$) alguns dos elementos presentes nessas células FVs (MCEVOY, CASTANER, MARKVART, 2012), (AVRUTIN, IZYUMSKAYA, MORKOÇ, 2011), (NEVES, 2016).

Apesar do desenvolvimento das tecnologias fotovoltaicas, os módulos FVs têm sua eficiência prejudicada por uma série de fatores. Os módulo FVs comportam-se como circuitos eletrônicos, onde as células similarizadas aos elementos resistivos. Logo, eles

estão sujeito às falhas internas de confecção do equipamento que afetam sua potência de saída (P_{SAIDA}) (BÜHLER, 2007), (SEGUEL, 2009). Fatores ambientais e climáticos também contribuem para a eficiência dos módulos, sendo que a temperatura do ar, a temperatura de operação das células e a radiação solar são os mais discutidos na literatura (ARMSTRONG, HURLEY, 2010), (SAHRI, et al., 2013), (CANTOR, 2017). Outros parâmetros ambientais como a umidade relativa do ar, a velocidade do vento e a direção do vento também colaboram para a eficiência energética dos módulos (MEKHILEF, SAIDUR, KAMALISARVESTANI, 2012), (AL-NIMR, AL-AMMARI, 2016), (CHANDRA, AGRAWAL, CHAUHAN, 2018).

A padronização dos testes envolvendo módulos FVs é abordada e instrumentada por normas internacionais e nacionais. As normas ASTM E-1036, ASTM E1036-15 IEC 1215 adotam as condições padrões de testes STC (*Standard Tests Conditions*) com valores de 1000 W/m^2 para irradiância solar, 25°C para temperatura de operação nos módulos FVs e 1,5 de massa de ar. Outra norma que corrobora na padronização dos testes efetuados em módulos FVs é o padrão NOCT (*Nominal Operating Cell Temperature*). Esse padrão contempla as variáveis de irradiância solar, velocidade do vento, massa de ar e temperatura de operação das células delimitados nos valores de 800 W/m^2 , 1 m/s , $1,5$ e 20°C , respectivamente (ASTM, 1985), (ASTM, 1997), (BUDAY, 2011), (DHAR, SRIDHAR, AVASTHY, 2012). No Brasil, por exemplo, as normas NBR11876/EB2176 e NBR12137 trazem os mesmos valores citados nos padrões STC e NOCT aplicados aos painéis fotovoltaicos (TRINURUK, SORAPIPATANA, CHENVIDHYA, 2009), (ORTEGA, 2013), (SANTOLIN, 2014). Entretanto, em condições reais de trabalho, os módulos FVs operam em condições diferentes.

Dentre as aplicações envolvendo módulos FVs, fixados ou integrados, as edificações e casas residenciais são exemplos bem sucedidos da introdução dos módulos em áreas como a construção civil (RÜTHER, 2004), (KAYAL, 2009), (ZOMER, 2014). Esses aparatos encontram-se fixados ou integrados à envoltória de uma edificação, apresentando-se mais comumente nas fachadas ou telhados (FARKAS, ANDRESEN, HESTNES, 2012). O termo *Building Appiled/Attached Photovoltaics* (BAPV) é adotado para descrever o conceito de construções que possuem os módulos FVs aplicados em sua envoltória com estruturas de fixação auxiliares. O BAPV considera projetos já

elaborados onde os módulos FVs são aplicados à envoltória da construção. Já o termo *Building Integrated Photovoltaic* (BIPV) aborda as edificações onde os módulos FVs estão integrados aos elementos construtivos, ou mesmo assumindo a função de algumas estruturas fundamentais (OH, TAMIZHMANI, PALOMINO, 2010), (MOUSA, 2014), (RITZEN, 2017).

Portanto, além dos parâmetros climáticos e ambientais e dos fatores de confecção dos módulos FVs, o local e a forma de alocação dos módulos FVs também contribui em sua eficiência. Em aplicações contendo sistemas BAPV e BIPV, diferentes fenômenos de aquecimento e resfriamento podem ocorrer devido a suas configurações sistêmicas (KRAUTER, et al. 1999), (RÜTHER, 2004), (RÜTHER, SALAMONI, 2011), (PARK, KIM, LEIGH, 2014). Algumas características da edificação interferem na geração de energia elétrica pelos módulos. Dentre elas, a localização, a inclinação, a orientação, o sombreamento e a altura das edificações atuam diretamente no aproveitamento e eficiência dos módulos FVs em sistemas BAPV e BIPV. Os sistemas fotovoltaicos presentes nas edificações, geralmente, se concentram em maximizar a geração de energia e ignoram aspectos estéticos de harmonização das placas na envoltória construtiva (TOLEDO, et al., 2016), (BERARDI, NALDI, MATTEO, 2017).

O sistema BIPV possui os módulos FVs, ou as células FVs, integrados aos componentes construtivos de uma edificação. Trata-se de uma evolução dos conceitos aplicados ao BAPV, onde os módulos são partes integrantes do projeto da edificação, sendo acrescentados ao projeto da construção desde suas concepções primárias (DAVIS, FANNEY, DOUGHERTY, 2001), (BASNET, 2012), (RITZEN, 2017). Sendo assim, para o caso dos sistemas BIPVs outros fatores podem contribuir para a eficiência do processo de conversão fotovoltaica efetuado pelas células. Dependendo do material onde esses dispositivos são integrados, além da conjuntura climática local, o contato estabelecido entre a célula FV e o elemento construtivo pode diminuir a eficiência na geração de energia pelos módulos FVs (PENG, YANG, 2016), (RITZEN, 2017), GOOSSENS, GOVERDE, CATTLOOR, 2018), (ROSSO, et al., 2018).

Outros fatores importantes ao analisar o alcance atingido pela temperatura de operação das células FVs são os processos de transferência de calor por condução, convecção e radiação (RAMOS, 2006), (TINA, ABATE, 2008). Essa temperatura está

diretamente associada à radiação solar que incide na superfície das células. Todavia, a radiação solar também interfere no desempenho térmico da envoltória construtiva. Em sistemas BAPVs e BIPVs, portanto, além das características da própria edificação, dos fatores climáticos e ambientais, a eficiência desses sistemas pode ser modificada pelo modo como os módulos são posicionados ou integrados à edificação (PARK, KIM, LEIGH, 2014), (GAILLARD, et al., 2014), (PENG, YANG, 2016), (RITZEN, 2017). Em ambos sistemas, BAPV e BIPV, a eficiência dos módulos FVs depende de uma série de fatores, sendo que o desempenho térmico da envoltória da edificação também pode ser afetado pela forma como os módulos são dispostos ou acoplados em seu entorno.

Ao considerar os sistemas BAPVs e BIPVs, a temperatura de operação das células FVs também pode ser considerada como um importante agente nas análises envolvendo o desempenho térmico da envoltória construtiva. A temperatura da superfície dos materiais vinculados, principalmente, ao sistema BIPV pode atingir valores significativos, uma vez que a temperatura de operação das células também eleva-se conforme a incidência de radiação solar. Conseqüentemente, para o caso do sistema BIPV, o processo de transferência de calor por condução pode se comportar de forma mais expressiva. Por outro lado, nos sistemas BAPVs onde existe uma estrutura adicional de sustentação para os módulos FVs, o processo de troca de calor oriundo da aplicação se dá pela transferência de calor por convecção. Esse evento é favorecido pela distribuição do módulo FV e a envoltória construtiva, onde é estabelecida uma camada de ar. Se o módulo FV se aquece de forma significativa, o espaço entre o módulo e a edificação pode servir de meio para que o calor se propague de um lado para o outro.

Para realizar o monitoramento de sistemas BAPV e BIPV, algumas técnicas corroboram para a coleta dos dados que ilustram as situações vinculadas a cada composição sistêmica do elemento construtivo com o módulo FV (BOHÓRQUEZ, GÓMEZ e MÁRQUEZ), (ZHOU, et al., (2017), (JOVANOVIC, 2017). A partir da problemática envolvendo os módulos FVs enquanto sua alta sensibilidade aos fatores apontados, os dados de interesse podem ser coletados com o auxílio de uma rede de monitoramento contendo sensores específicos. Dentre os instrumentos básicos para avaliar os módulos FVs têm-se a estação meteorológica, o piranômetro, os sistemas de

coleta de dados dos módulos FVs (PINHO, GALDINO, 2014), (LABREN, CCST, INPE, 2017).

Outra forma de avaliar o comportamento térmico de módulos FVs é a captura de imagens termográficas por meio de câmeras com mecanismo de termografia (SILVA, 2017), (IRSHAD, JAFFREY e HAQUE). Os instrumentos citados aqui corroboram com as análises acerca do comportamento térmico não apenas dos módulos FVs, mas também dos sistemas BAPVs e BIPVs.

Uma das formas de coletar os dados de temperatura de operação de módulos FVs é a fixação de sensores específicos em sua parte traseira. Alguns trabalhos assumem que a distribuição do calor nos módulos se dá uniformemente. Esse fato é causado pela resistência térmica na parte de trás do módulo FV que é inferior à da face superior. Ainda, na face de exposição ao sol não pode haver nenhuma obstrução que gere sombreamento nas células, pois esse evento prejudica o processo de conversão fotovoltaica das células FVs. Logo, a adoção de sensores de contato direto a superfície dos módulos FVs é uma alternativa viável e confiável para as análises envolvendo a eficiência desses equipamentos. Essencialmente, a radiação solar é um fator de peso no processo de transferência de calor entre as superfícies para ambos sistemas, BAPV e BIPV (TRINURUK, SORAPIPATANA, CHENVIDHYA, (2009), (MUZATHIK, 2014), (SANTOLIN, 2016).

Assumindo a envoltória construtiva como ponto de análise no que tange ao seu desempenho térmico, a temperatura superficial em edificações pode ser monitorada com o auxílio de tecnologias e ferramentas que facilitam as análises e o entendimento da dinâmica construtiva a partir de condições e fatores característicos (SLÁVIK, CEKON, 2016). Além de favorecer o indivíduo que frequenta os espaços da edificação, a temperatura superficial em valores adequados também atua no equilíbrio térmico das zonas urbanas (MOTA, et al., 2018). O monitoramento desse parâmetro pode ser efetuado com o auxílio de redes de sensores capacitadas com transdutores para a coleta dos dados de temperatura superficial, obedecendo às normas vigentes (OLIVEIRA, 2015). Portanto, no sistema BIPV, a superfície de contato entre módulo FV e a edificação pode gerar alterações na temperatura do elemento construtivo. No caso do sistema BAPV, o espaçamento obtido entre as partes do sistema tende a gerar alterações tanto

na temperatura superficial do componente construtivo como na temperatura de operação dos módulos FVs. Para ambos os casos, uma rede de monitoramento com sensores característicos e microprocessadores adequados garante a coleta efetiva dos dados.

Portanto, a inserção dos painéis FV em edificações no contexto dos sistemas BAPV e BIPV fomenta discussões e análises amplas que podem ser traçadas para avaliar o desempenho dos módulos FVs, ou mesmo para traçar o comportamento da envoltória da edificação ao receber tecnologias fotovoltaicas em seu entorno. As redes de sensores sem fio (RSSF) são vantajosas ao oferecer os recursos necessários para realizar as leituras de parâmetros como a temperatura superficial e ainda a eficiência elétrica dos módulos FVs, em termos da energia gerada pelos painéis.

Juntamente com outros equipamentos, como estação meteorológica e máquina termográfica, alguns métodos contribuem para coleta dos dados encontrados na literatura e que atuam na eficiência dos sistemas BAPV e BIPV. Parâmetros como temperatura superficial, temperatura de operação das células, tensão e corrente elétrica dos módulos FVs, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar e radiação solar são as principais variáveis que influenciam o comportamento dos sistemas apontados. Uma vez coletados, esses dados embasam pesquisas e estudos que colaboram no entendimento desses novos tipos de edificações.

1.1 Contextualização do trabalho

Com a disseminação dos módulos fotovoltaicos no contexto das edificações, novos tipos de construções surgem agregando eficiência energética em um dos setores que mais consome energia no mundo, o da construção civil. A geração de energia fotovoltaica reúne aspectos econômicos, sociais, ambientais e políticos dentro do conceito de mini ou microgeração, distribuída. No que tange à economia, novas possibilidades de mercado, assim como novos modelos de negócio podem ser traçados, contemplando a energia solar fotovoltaica enquanto insumo com valor agregado.

A inserção dos módulos FVs na sociedade contribui para a disseminação das fontes renováveis no meio urbano, aproximando os cidadãos das tecnologias voltadas para fornecimento de energia limpa. Mesmo com a eficiência baixa dos módulos, as fontes baseadas em energia solar são opções limpas e renováveis, sendo que o recurso solar encontra-se abundantemente na natureza. Na esfera política, é necessário que as leis traçadas para as questões inerentes às edificações e à zona urbana contemplem essa inserção dos módulos FVs, sendo que diferentes impactos podem surgir para o usuário, ou para o ambiente ao redor.

Portanto, as análises e estudos que vislumbram identificar, ou analisar, o comportamento dos sistemas BAPV e BIPV contribuem para as discussões acerca das novas edificações do mundo contemporâneo. Atualmente, as edificações são projetadas para garantir sua eficiência energética, ao passo que os pilares da sustentabilidade são introduzidos em todas as etapas de elaboração de um ambiente construído.

Sendo assim, a análise do comportamento dos elementos envolvidos nos sistemas BAPV e BIPV se constitui em uma abordagem com desdobramentos aplicados às questões da edificação, ou mesmo da eficiência e resposta dos módulos FVs quando inseridos nesses contextos. Como consequência, as técnicas e materiais adotados para elaboração de uma edificação podem ser direcionados para alavancar a eficiência energética e, ainda, garantir o conforto dos ocupantes.

1.2 Justificativa para elaboração do trabalho

Os módulos fotovoltaicos têm seu funcionamento prejudicado por fatores climáticos, ambientais, por questões de fabricação e também por condições inerentes ao método de fixação deles (BAPV ou BIPV). Os parâmetros de temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar e temperatura de operação das células são investigados na literatura como agentes degradativos da eficiência elétrica dos módulos FVs (DAVIS, FANNEY, DOUGHERTY, 2001), (TRINURUK, SORAPIPATANA, CHENVIDHYA, 2009), (PARK, KIM, LEIGH, 2014), (SANTOLIN, 2016).

Os sistemas BAPV e BIPV inseridos nas edificações têm sua eficiência degradada pelos fatores ambientais e climáticos, mas também pelas condições de fixação no entorno da edificação. Especialmente os processos de transferência de calor entre as partes dos sistemas fornecem insumo para verificações e análises voltadas tanto ao desempenho térmico da edificação, quanto para a eficiência dos módulos FVs. Portanto, os estudos voltados para a compreensão do comportamento dos sistemas BAPV e BIPV pode sugerir adequações e métodos para alocação dos módulos FVs, bem como esboçar pontos positivos e negativos acerca da viabilidade de qual sistema é mais indicado, considerando toda a dinâmica que contempla as edificações associadas e/ou integradas com as tecnologias fotovoltaicas.

Um ponto a ser salientado é que as normas brasileiras de desempenho térmico ainda não consideram os módulos FVs enquanto elementos presentes em edificações. Apesar de tecnologias consolidadas e amplamente aplicadas aos edifícios, não encontram-se nessas normas citações, esquemas, proposições, técnicas ou mesmo manuais que corroborem para a efetiva aderência dos módulos FVs às fachadas ou aos telhados residenciais e prediais. Logo, os estudos direcionados a identificar e avaliar os sistemas BAPV e BIPV podem favorecer os debates envolvendo as fontes renováveis de energia no ambiente construído.

1.3 Objetivos

A partir da evolução das tecnologias utilizadas para confecção de células FVs, e considerando os sistemas BAPVs e BIPVs como contexto de aplicação dos módulos FVs, este escopo propõe-se a elaborar uma bancada instrumentada para coleta de dados oriundos de sistemas BAPVs e BIPVs. Dados como temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do vento, temperatura superficial do elemento construtivo, temperatura de operação, tensão e corrente elétrica dos módulos FVs, participam das análises acerca da eficiência desses sistemas e contribuem para reforçar

a inserção de fontes renováveis de energia em diferentes contextos, como é o caso da construção civil.

1.3.1 Objetivo geral

Este escopo se baseia na elaboração de uma bancada instrumentada para simulações contendo sistemas BAPVs e BIPVs concebidos com diferentes tipos de tecnologias FVs. Pretende-se instrumentar uma rede de monitoramento e coleta de dados para avaliação da eficiência dos módulos FVs quando submetidos às características básicas de integração e aplicação dos módulos FVs à envoltória construtiva. Ainda, outros instrumentos e equipamentos serão adicionados para captura de dados oriundos dos sistemas vislumbrados. Os sistemas idealizados serão submetidos a condições reais de trabalho para averiguações acerca da transferência de calor, e outros fenômenos que podem ocorrer considerando os sistemas BAPVs e BIPVs.

1.3.2 Objetivos específicos

Este trabalho objetiva-se a instrumentar uma bancada para coleta de dados contendo os instrumentos, equipamentos e dispositivos necessários para aferir os dados de interesse. Almeja-se compor uma bancada para simulação de sistemas BAPVs e BIPVs aplicados a condições reais de trabalho. Para tal, alguns delineamentos são necessários para conduzir a concepção idealizada para esta obra.

- A partir do arsenal bibliográfico consultado pretende-se realizar a coleta de parâmetros elétricos, ambientais e climáticas com o auxílio de diferentes instrumentos, ferramentas e instituições para visualizar a relação existente entre os dados coletados e a eficiência dos módulos FVs;

- Dados comuns a todos ensaios serão: temperatura (T_a) e umidade relativa do ar (RH), radiação solar (G_{SOLAR}), velocidade do vento (V_{VENTO}), tensão ($V_{SAÍDA}$) e corrente elétrica ($I_{SAÍDA}$); sendo que esses dois últimos parâmetros referem-se aos módulos FVs. Conseqüentemente, a partir dos dados coletados serão realizadas verificações acerca da contribuição de cada parâmetro no desempenho dos sistemas BAPVs e BIPVs;

- Com a metodologia proposta neste escopo pretende-se elaborar uma rede de sensores para monitoramento dos dados provenientes dos sistemas BAPVs e BIPVs. Para tal, sensores de temperatura (superficial e de operação dos módulos FVs), bem como sensores de tensão (V) e corrente (I) foram incrementados à rede, com microcontrolador específico para processamento dos dados. Associada à rede ainda está contida uma base para armazenamento e visualização dos dados;

- Juntamente à bancada instrumentada para coleta dos dados, será adotada uma estação meteorológica para aferência dos dados climáticos e ambientais de interesse, como T_a , V_{VENTO} e RH. Os dados de radiação solar (G_{SOLAR}) foram solicitados ao CEPAGRI da Unicamp, para que as análises dos sistemas BAPV e BIPV contivessem os dados apresentados no referencial teórico;

- Ao vislumbrar o sistema BIPV, a superfície de contato entre o módulo FV e o elemento construtivo gera fluxos de calor transferidos por condução. Logo, a rede de sensores será projetada com as adaptações necessárias para a coleta dos dados de temperatura superficial (T_s), resultado da integração do módulo com o concreto. Com isso, será possível identificar se este tipo de integração do módulo FV ao elemento construtivo também é fator contribuinte para a eficiência do sistema BIPV;

- Almeja-se efetuar testes com os sistemas BAPVs variando a distância entre o módulo FV e o elemento construtivo, conforme proposto na literatura. A rede de sensores nesse caso será instrumentada com os elementos necessários para coleta dos dados de temperatura superficial (T_s) e de operação (T_{OP}) dos módulos FVs. Tais procedimentos serão efetuados com caráter experimental, mediante consultas efetuadas nas referências bibliográficas;

- Considerando a evolução da indústria voltada a produção de células FVs, este trabalho pretende aplicar e integrar módulos FVs com tecnologias de células FVs diferentes aos sistemas BAPVs e BIPVs simulados. O intuito é verificar o comportamento

desses sistemas a partir da tecnologia assumida em cada ensaio. Com os resultados, cada tipo de tecnologia FV pode ser caracterizada como a opção mais vantajosa para os sistemas BAPVs ou BIPVs;

- Este trabalho visa a simulação dos sistemas BIPVs no *software* ANSYS que realiza análises termodinâmicas acerca de materiais com relação de interpolação dos dados. Com essas análises será possível averiguar o comportamento do elemento construtivo internamente, complementando os dados coletados pela bancada instrumentada;

- À bancada de realização dos ensaios pretende-se associar equipamentos profissionais e fornecidos pela PUC-Campinas para calibração e adaptação da rede de sensores idealizadas para este trabalho. Uma máquina termográfica será colocada em bancada para gerar análises dos sistemas BAPVs e BIPVs simulados em cada ensaio;

- Ainda, pretende-se pelos dados oriundos da estação meteorológica e do CEPAGRI relacioná-los de forma analítica esforçando-se para identificar os principais pontos atenuantes da eficiência dos módulos FVs. Assim como os dados provenientes da rede de monitoramento possibilitarão identificar qual tipo de tecnologia fotovoltaica mais se degrada pela alteração (elevação ou decaimento) dos parâmetros ambientais e pela forma como o módulo FV é fixado à edificação.

2. Fundamentação teórica

Uma das formas de aproveitar a energia solar é através do processo de conversão pelo efeito fotovoltaico. Nesse sentido, quando analisado o panorama das fontes renováveis de energia no mundo, os painéis FVs destacam-se como uma das principais formas para a geração de energia limpa e sustentável. Alguns fatores corroboram para a consolidação dessa fonte como: novos modelos de tecnologias e negócios; aumento da eficiência dos painéis solares; o aprimoramento das técnicas de aplicação e a fabricação das células semicondutoras; incentivos governamentais e políticas públicas favorecendo a diversificação da matriz energética; redução dos custos inerentes aos processos de fabricação, manipulação e implementação, entre outros (REN21, 2017).

2.1 Panorama acerca da energia solar fotovoltaica

A sociedade contemporânea consome uma significativa quantidade de energia, sendo que existem perspectivas de crescimento dessa demanda ano após ano. Dados da *International Energy Agency* (IEA) apontam o crescimento de 1,6% do consumo energético anual, avaliando o período de 2010 a 2030. Boa parte desse consumo é suprido por combustíveis de origens fósseis que ainda são caracterizados como as fontes com maior investimento em diferentes nações (IEA, 2010), (IRENA, 2012), (ORTEGA, 2013), (IRENA, 2016). Entretanto, com o previsível esgotamento dos combustíveis não renováveis, novas fontes alternativas para geração de energia elétrica surgiram e se tornaram parcela importante da matriz energética de muitos países. Nesse aspecto, a disponibilização do recurso energético deve garantir a acentuada demanda oriunda dos diversos setores da sociedade (ANEEL, 2002), (ANEEL, 2008), (LABREN, CCST, INPE, 2017).

Nesse ínterim, a energia solar é uma fonte limpa que, continuamente, desponta no cenário energético mundial. A partir dos raios solares, os sistemas coletores de radiação

e os painéis fotovoltaicos promovem o aquecimento de água, a geração de potência mecânica e também a geração de energia elétrica (PRIEB, 2002), (LUQUE, HEGEDUS, 2003). Aponta-se que, no ano de 2015, foram registrados 229,3 GWp de capacidade instalada no mundo, avaliando a produção de energia por painéis fotovoltaicos (IRENA, 2016), (SPE, 2016). No Brasil, a capacidade instalada dos sistemas fotovoltaicos atingiu a marca de 1097 MWp, considerando o ano de 2017 (MME, EPE, 2017). Esses valores evidenciam a tendência mundial do setor em busca de fontes alternativas de energia com os esforços voltados à sustentabilidade.

Desta maneira, as tecnologias fotovoltaicas emergem na dinâmica energética mundial como reflexo dos preços competitivos alcançados, atualmente, pelos elementos associados a esses sistemas. Através da radiação solar, é possível gerar energia térmica ou energia elétrica (pelo efeito fotovoltaico). Logo, os arranjos fotovoltaicos trazem, como vantagem, a adaptabilidade de instalação, dependendo, essencialmente, da disponibilidade de luz incidente para seu funcionamento efetivo. Mais ainda, a utilização dos painéis fotovoltaicos favorece a geração distribuída de energia nos centros urbanos com plantas de médio e pequeno porte, sendo que essas últimas encontram-se instaladas em edifícios e construções residenciais e comerciais. Dentro do conceito de geração distribuída, a energia produzida é consumida no local, enquanto o restante (se houver) ainda pode ser disponibilizado na rede de distribuição de energia elétrica. No caso do Brasil, a disseminação da energia solar fotovoltaica colabora para a redução das perdas inerentes ao Sistema Interligado Nacional (SIN), pois as microusinas de geração estão mais próximas dos consumidores (RÜTHER, 2004), (LABREN, CCST, INPE, 2017).

Nos primeiros meses de 2018, por exemplo, a produção de energia por meio da conversão fotovoltaica chegou a 3846 MWh em escala global. Apesar dos números discretos, quando comparada com outras gerações, essa é a fonte que mais se expande no setor energético mundial, sobretudo se analisado o período de 2008 a 2018 (U.S. EIA, 2018). No Brasil, as usinas fotovoltaicas participaram com uma potência de 346 MW, segundo dados do Balanço Energético Nacional, com o ano base de 2016 (MME, EPE, 2017).

Especificamente, a geração de energia através de painéis FVs cresceu 40%, considerando o período de 2000 a 2016 mundialmente. Na análise de outras fontes como a eólica e a hídrica, ambas obtiveram crescimento de 16% e 3%, respectivamente, no mesmo período. Outras perspectivas apontam que, até o ano de 2050, os sistemas fotovoltaicos proverão cerca de 11% da energia consumida em escala global, com produção de 4500 TWh por ano. Na Europa, por exemplo, até o ano de 2011, havia o total de 51 GW de capacidade instalada vinculada aos equipamentos fotovoltaicos (EPIA, 2012). Mesmo com as grandes crises econômicas que se alastraram por muitos países, na década de 2010, é possível identificar o potencial de produção dos sistemas solares-fotovoltaicos enquanto geradores de energia (ORTEGA, 2013).

2.1 Fatores contribuintes para disseminação da energia solar

A progressiva participação dos painéis FVs enquanto recurso gerador de energia elétrica, no mundo, ilustra novos panoramas para o setor energético. As usinas e os empreendimentos nesse segmento destacam-se pelo elevado número de instalações. Até meados dos anos 90, grande parte dos sistemas fotovoltaicos era caracterizada por fontes autônomas, não interligadas, suprimindo a demanda de consumidores específicos ou singulares, como é o caso de algumas residências, zonas rurais e provedores de serviços de telecomunicações. Já em 2009, a capacidade instalada dos painéis FVs chegou a 23 GW. Em 2015, a capacidade de energia acumulada por esse tipo de geração chegou a 227 GW em escala global (EPIA, 2012). Ademais, até o ano de 2030, estima-se que a capacidade instalada dessa fonte de energia atinja valores entre 1,760 GW e 2,5 GW, participando com a porcentagem de 8% a 13% da produção global de energia. Esses valores evidenciam, portanto, o fortalecimento das tecnologias FVs enquanto fonte para fornecimento de energia elétrica (IRENA, 2010), (IRENA, 2016).

A geração de energia através da radiação solar contribui em diferentes aspectos para o desenvolvimento socioeconômico, político, ambiental e energético de determinada região, visto que tal fonte de energia pode ser empregada em pontos diversos,

dependendo, necessariamente, da incidência solar relevante. Esse tipo de geração proporciona a valorização da mão de obra qualificada, gerando emprego para regiões remotas e fortalecendo a economia local. No âmbito dos ecossistemas e do meio ambiente, a geração é considerada como uma das mais limpas, sobretudo por não produzir resíduos degradantes ao ar, água e solos.

Nas esferas políticas, a energia solar incentiva o debate da sustentabilidade, bem como acarreta o avanço do assunto para os patamares legislativos, fortalecendo as normas, diretrizes e leis destinadas à geração de energia renovável no Brasil e no mundo. Em suma, as discussões acerca dessas questões solidificam o compromisso das nações em construir um ambiente saudável para as futuras gerações. Dentre as vantagens observadas no setor energético, salienta-se a viabilidade da diversificação da matriz energética, explorando recursos variados para assegurar o fornecimento de energia elétrica ao longo do ano.

Outro quesito que tende a corroborar para a disseminação das fontes renováveis de energia (FREs) no meio urbano é a consolidação dos veículos elétricos. Esse transporte alternativo não agride o meio ambiente com gases poluentes (EPE, 2012), entretanto, somam valores consideráveis de carga (W) ao sistema local de abastecimento de energia, podendo acarretar sobrecarga nas redes de fornecimento. Ao analisar o contexto urbano, é necessário fornecer uma infraestrutura robusta e eficiente, com abastecimento para os usuários, uma vez que os postos capazes de realizar tal recarga requerem segurança energética para não comprometer setores que dependem desse tipo de transporte (EPE, 2016). Essa infraestrutura pode fazer uso dos painéis fotovoltaicos como fonte de abastecimento.

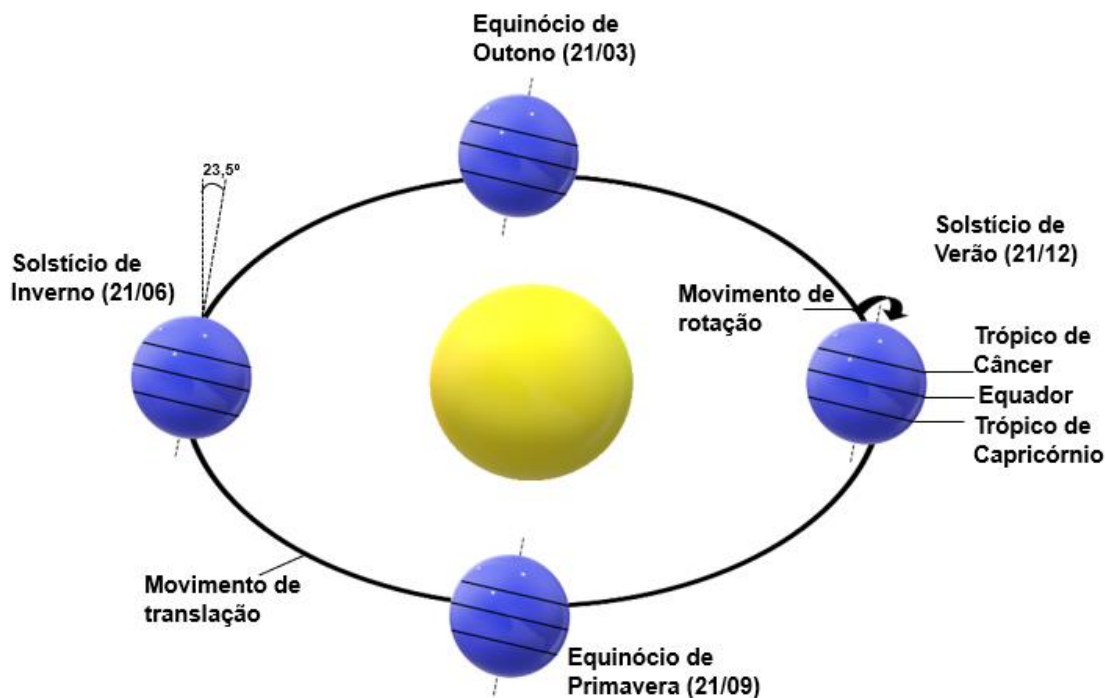
2.2 Aproveitamento da energia solar – fundamentos

A energia oriunda do Sol é uma alternativa vantajosa, sustentável e promissora. Em linhas gerais, boa parte dessa energia que permeia a atmosfera terrestre, cerca de 81%, concentra-se na faixa de comprimentos de ondas desde o visível até o infravermelho.

Essa energia é essencial em diversos processos térmicos, químicos e físicos presentes no ecossistema, sendo eles naturais ou artificiais. Na natureza, por exemplo, a radiação solar atua no processo de fotossíntese da flora, no ciclo das bacias hidrográficas, incluindo a dinâmica dos oceanos, por meio de ciclos de evaporação e precipitação. A irradiância solar (W/m^2), incidente em um ponto da superfície da Terra, é a combinação de duas componentes, direta e difusa. Os raios solares que alcançam o planeta pela irradiância direta não sofrem os processos de absorção e espalhamento impostos pelas camadas e composição da atmosfera. Por outro lado, a irradiância difusa é o resultado de todos os raios dispersados pelos gases, partículas e elementos atmosféricos (ANEEL, 2002), (PINHO, GALDINO, 2014), (NEVES, 2016), (LABREN, CCST, INPE, 2017).

A quantidade de energia solar que atinge a superfície terrestre depende de diversos quesitos, como os movimentos de translação e rotação que o planeta executa ao longo do ano; a inclinação de $23,5^\circ$ com relação ao plano equatorial; os fatores geográficos como latitude, longitude e altitude e as condições meteorológicas. A radiação solar, ao penetrar a atmosfera, sofre três fenômenos, essencialmente: reflexão (30%), transmissão e absorção (70%), tendo em vista que os valores apontam uma estimativa do que ocorre na atmosfera. Todos esses fatores contribuem para a concentração da incidência luminosa em um ponto qualquer do planeta Terra. Conforme demonstrado na ilustração da Figura 1, o planeta Terra percorre uma trajetória elíptica que, somada à inclinação do globo, resulta nas quatro estações do ano (ANEEL, 2002), (LUQUE, HEGEDUS, 2003), (NEVES, 2016), (ORTEGA, 2013), (PINHO, GALDINO, 2014), (LABREN, CCST, INPE, 2017).

Figura 1 – Ilustração dos movimentos de rotação e translação do planeta Terra com seu eixo (Norte-Sul) inclinado em $23,5^\circ$.



Fonte: adaptado de (LABREN, CCST, INPE, 2017).

O mercado associado às fontes de energia renovável, como é o caso da energia solar, apresenta expressiva expansão ao longo das últimas décadas (REN21, 2017). Os sistemas de captação da radiação solar podem ser empregados em diversas aplicações, com finalidades específicas mas, principalmente, para o aquecimento de fluidos e para geração de eletricidade (PINHO, GALDINO, 2014). A produção de energia por pequenos geradores próximos às cargas acarreta em vantagens em âmbito social, econômico e ambiental. Sendo assim, com essas tecnologias, é possível melhorar o nível de tensão nas horas de maior consumo nos perímetros urbanos, bem como promover a diversificação da matriz energética (RÜTHER, 2004), (RÜTHER, SALAMONI, 2011), (ANEEL, 2016). Todos esses processos de captação e conversão dos raios solares são obtidos graças às coletores solares que transformam, diretamente, a energia do Sol em calor, pelo efeito termoelétrico, e aos painéis fotovoltaicos que transformam a energia solar, diretamente, em energia elétrica, pelo efeito fotovoltaico (LUQUE, HEGEDUS, 2003), (FALCÃO, 2005).

2.3 Classificação dos elementos associados aos sistemas fotovoltaicos

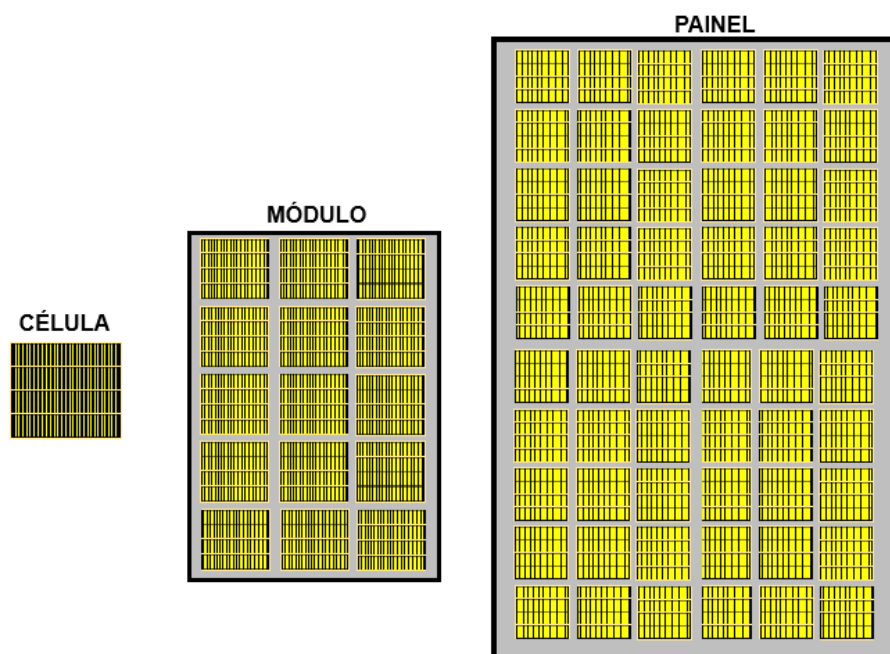
A norma brasileira ABNT NBR 10899 de 2006 – revisada em 2013 – traz a classificação das partes componentes de um sistema fotovoltaico, tais como (ABNT, 2006), (ABNT, 2013), (ORTEGA, 2015):

- células fotovoltaicas, que consistem em partículas de elemento semicondutor com a capacidade de gerar eletricidade a partir da energia solar;
- módulos fotovoltaicos, que são aglomerações de células fotovoltaicas, encapsuladas e vedadas com material impermeável, pois elas estão interligadas para promover o fluxo da corrente elétrica;
- painéis fotovoltaicos, que são as conexões de elementos menores, como os módulos fotovoltaicos, eletricamente conectados para fornecimento de energia e abastecimento de cargas.

A partir da ilustração contida na Figura 2, é possível compreender as partições de cada elemento do arranjo fotovoltaico. A partir dessa perspectiva, a eficiência do painel fotovoltaico depende da distribuição espectral da radiação solar em sua superfície. A alocação de várias células unidas concebe um módulo fotovoltaico (BÜHLER, 2007), (DHAR, SRIDHAR, AVASTHY, 2012). Ao associar diversos módulos, têm-se os arranjos fotovoltaicos comumente encontrados em edifícios e residências, junto aos telhados e partes superiores, ou mesmo às fachadas prediais nas faces laterais (RÜTHER, 2004), (CRONEMBERGER, CAAMAÑO-MARTÍN, SÁNCHEZ, 2012).

Os desempenhos de um sistema fotovoltaico são diferentes das paredes externas do edifício convencionais em termos térmicos, além disso, também influenciam na mudança na demanda de energia do edifício e no desempenho energético. Em suma, o sistema fotovoltaico na face sul do edifício pode reduzir o ganho de calor no verão e também reduzir significativamente a demanda de energia para o ar condicionado do edifício (RITZEN 2017), (ZHOU, et al., 2017).

Figura 2 – Hierarquia dos elementos fotovoltaicos.



Fonte: adaptado de (DHAR, SRIDHAR, AVASTHY, 2012).

Os painéis fotovoltaicos utilizam, como princípio básico de funcionamento, o efeito fotovoltaico (THOMAS, GRAINER, 1999), (PRIEB, 2002), (LUQUE, HEGEDUS, 2003). Esse efeito ocorre devido às junções atômicas e propriedades físico-químicas do silício (Si), tratado com adições para melhorar o seu aproveitamento enquanto substância fotoelétrica. Trata-se, portanto, de um elemento semiconductor que, através do processo de conversão fotovoltaica, transforma a radiação solar em energia elétrica (RÜTHER, 2004), (FALCÃO, 2005), (BÜHLER, 2007). Dessa maneira, em virtude das suas junções atômicas, o elemento químico Si é altamente sensível a perturbações caloríficas. Logo, a quantidade de energia produzida por um módulo fotovoltaico está diretamente associada às condições da envoltória ambiental e meteorológica em que o mesmo é (NORDMANN, CLAVADETSCHER, 2003), (TINA, SCROFANI, 2008), (ROUHOLAMINIA, et al., 2016).

A absorção de calor pelos componentes do módulo FV atua, diretamente, em seu desempenho. Ademais, vários fatores participam do desempenho térmico da conjuntura fotovoltaica. Enquanto a radiação solar influencia no potencial elétrico do equipamento, temperaturas elevadas interferem negativamente na eficiência das células semicondutoras (NORDMANN, CLAVADETSCHER, 2003), (ALMEIDA, 2008),

(VILLALVA, GAZOLI 2012) e (LABREN, CCST, INPE, 2017). À vista disso, fatores ambientais também exercem influência na produção de energia dos painéis, como temperatura ambiente, velocidade do vento, direção do vento, irradiância solar e umidade relativa do ar (MATTEI, et al., 2006), (TINA, SCROFANI, 2008). A compreensão acerca do comportamento dos módulos FVs é essencial para garantir o fornecimento do recurso energético aos que dependem desses sistemas (KENE, OLWAL, CHOWDHURY, 2017).

Conforme determinado pela *American Society for Testing and Materials*, norma ASTM E-1036, e pela *International Electrotechnical Commission*, norma IEC 1215, as condições padrões para realização de testes com módulos fotovoltaicos devem obedecer aos valores de 1000 W/m^2 para irradiância solar, 25°C de temperatura superficial nos módulos FVs e 1,5 AM (*air mass* – massa de ar) (ASTM, 1985), (ASTM, 1997), (DHAR, SRIDHAR, AVASTHY, 2012). No Brasil, as normas NBR11876/EB2176 e NBR12137/MB378 também consideram os mesmos valores (PRIEB, 2002), (ORTEGA, 2013). Todavia, os valores apontados por essas normas consideram condições de ensaios realizadas em laboratório, sendo que, em situações reais de trabalho, os painéis FVs estão submetidos à situações ambientais e climáticas plurais. Em virtude disso, as características elétricas dos painéis são afetadas pela intensidade luminosa, pela temperatura de operação das células e pelos requisitos da carga, essencialmente (SICK, ERGE, 1996), (DUBEY, 2013), (SANTOLIN, 2016).

2.4 Células solares fotovoltaicas

A célula solar fotovoltaica é o elemento responsável por converter a radiação solar em eletricidade e calor. Ainda no século XIX, mais precisamente em 1839, o físico Edmond Becquerel analisou o comportamento elétrico de certos materiais ao serem expostos à luz. Através de um procedimento experimental, o físico demonstrou que eletrodos formados por duas placas, uma de platina e outra de prata, ao serem imersos em líquido eletrólito formavam uma diferença de potencial. Já em 1873, Willoughby Smith demonstrou o fenômeno da fotocondutividade do Selênio (Se). Anos após, o Se passou

a ser utilizado na indústria de painéis FVs para conversão de energia elétrica, atingindo valores de eficiência entre 1% e 2%. Assim, o silício (Si) passou a ser utilizado para fins de confecção de células solares em 1940, uma vez que os processos para purificação desse elemento atingiram patamares suficientes para garantir a eficiência de até 6%, avaliando sua composição monocristalina (PRIEB, 2002), (LUQUE, HEGEDUS, 2003), (FALCÃO, 2005), (MCEVOY, CASTANER, MARKVART, 2012), (ORTEGA, 2013).

O silício é um dos elementos mais abundantes nos meios naturais, além disso, a participação dele na indústria eletrônica e fotovoltaica é comum. Trata-se de um elemento tetravalente com quatro elétrons em sua camada de valência¹. Os átomos de Si compartilham seus elétrons entre si, formando, assim, os oito elétrons ideais na última camada desse elemento. Em temperatura ambiente, esse semiconductor possui condutividade elétrica. Nesse contexto, esse é o resultado de elétrons que ganham energia térmica a ponto de romper as ligações atômicas, formando lacunas no cristal. Conseqüentemente, é estabelecida uma diferença de potencial entre os átomos do conjunto cristalino, em que uma parte adquire cargas positivas (p) em excesso, sendo que, em outras partes, cargas negativas (n) despontam em número elevado. Entretanto, estruturas cristalinas contendo apenas o Si não são eficientes o suficiente para atingir um potencial elétrico satisfatório, logo, outros elementos são associados para melhorar o desempenho das células FVs (DEL CUETO, 2002), (PRIEB, 2002), (LUQUE, HEGEDUS, 2003), (PINHO, GALDINO, 2014).

Por conseguinte, afim de aprimorar a eficiência de conversão das células FVs desde a recepção dos fótons solares até o fluxo de corrente elétrica (I), os processos de dopagem conciliando outros elementos químicos são empregados amplamente na indústria eletrônica. Assim, a partir desse processo, a condutividade elétrica do semiconductor é aumentada drasticamente. Os elementos como o Fósforo (P) e Boro (B) contribuem com suas ligações pentavalentes e trivalentes nas regiões contíguas do cristal, nas regiões n e p, respectivamente. Como resultado, tem-se uma junção característica, a junção p-n, caracterizando, fundamentalmente, os semicondutores. A

¹ Camada de valência – na configuração atômica de um elemento químico é a última camada que está apta a receber ou a doar elétrons, favorecendo as ligações químicas e quânticas (PINHO, GALDINO, 2014).

região n possui concentração superior de elétrons livres, ao passo que a região p tem elementos de carga positiva em maior número (PRIEB, 2002), (LUQUE, HEGEDUS, 2003), (FALCÃO, 2005), (ZILLES, et al., 2012).

2.4.1 Princípio de funcionamento: o efeito fotovoltaico

A transformação da radiação solar em energia elétrica é resultado do fenômeno físico denominado Efeito Fotovoltaico. Nas células FVs, caracterizadas pelos elementos semicondutores, as propriedades elétricas e químicas favorecem a conversão fotovoltaica. A junção p-n, ao se formar, promove uma difusão de elétrons no cristal do semicondutor, logo, na região n ocorre uma migração de elétrons para a região p. Paralelamente, as lacunas oriundas da camada p também transbordam para a região n. Do acúmulo e do movimento de íons positivos (+) e íons negativos (-) nas respectivas regiões n e p, surge um campo elétrico (E). Ele é oposto à difusão original e se concentra no limite entre as duas regiões. Portanto, a corrente elétrica vinculada à difusão é compensada pela formação de outra corrente inerente ao campo elétrico. Como resultado, em seu estado natural, o cristal do semicondutor encontra-se eletricamente equilibrado. Em virtude desses fatores, o estado é quebrado quando os fótons, presentes nos raios solares, incidem sobre o material (PRIEB, 2002), (LUQUE, HEGEDUS, 2003), (ZILLES, et al., 2012).

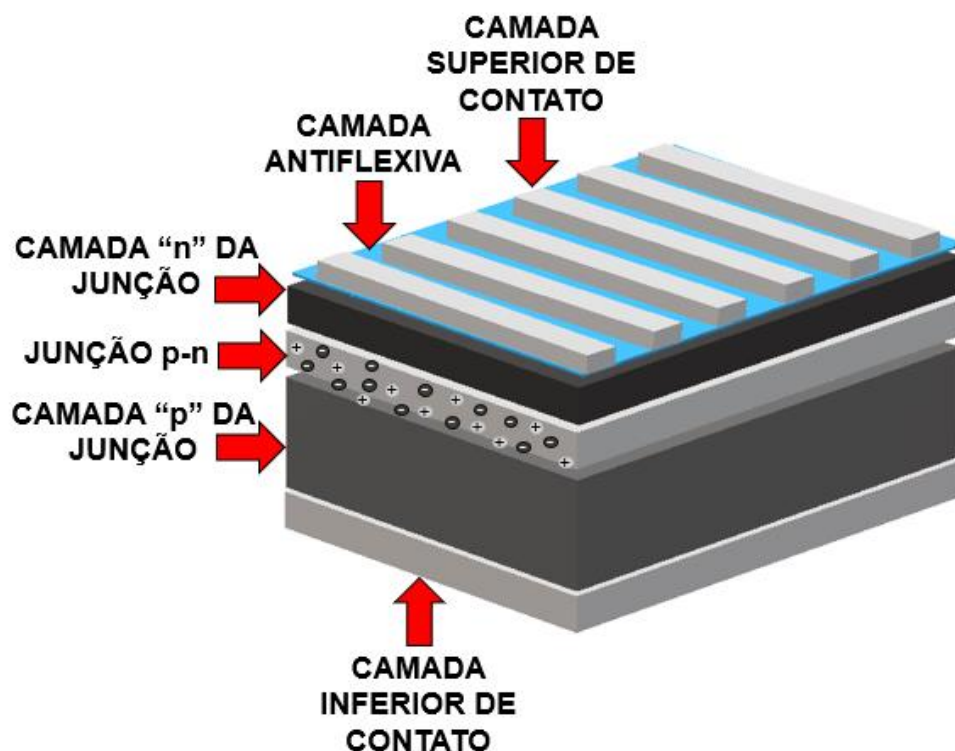
Os elétrons presentes nas bandas de valência dos átomos do semicondutor absorvem energia de fontes luminosas, sobretudo onde existe a concentração de fótons. Ao penetrar as regiões do cristal semicondutor, o fóton consegue romper o estado inerte dos elétrons (-) e das lacunas (+). Da banda de valência, o elétron vai para a banda de condução², tornando-se livre. Somado ao campo elétrico descrito acima, o elétron é transmitido para a região n, sendo que, paralelamente, as lacunas se movem para a

² Banda de condução – como a banda de valência é térmica e eletricamente inerte, suas camadas são preenchidas por elétrons. Já a banda de condução possui preenchimento parcial. As bandas de um átomo descrevem a condução elétrica de um elemento (PINHO, GALDINO, 2014).

região p. Os pares, elétron/lacuna, são resultados da concentração incidente dos fótons (PRIEB, 2002), (LUQUE, HEGEDUS, 2003), (DOBRZANSKI, et al., 2013).

Por meio da ilustração contida na Figura 3 identificam-se as regiões e as camadas presentes nas células FVs de silício cristalino, bem como a disposição de cada componente. Os terminais das células FVs possuem compostos metálicos em ambas as partes, superior e inferior. Na parte frontal, essa colocação é feita em forma de grade para favorecer a penetração da luz. As camadas p e n são apontadas separadamente, a título de exemplificação. A região semicondutora corresponde à junção p-n, onde circulam os elétrons e se formam as lacunas. Na faixa externa superior da célula há a adição de elementos com alto índice de absorção da incidência luminosa que minimizam perdas por reflexão dos feixes de luz. A camada superior de vedação da célula é composta por material antirreflexivo que favorece a absorção dos feixes luminosos. A camada inferior dá suporte para o equipamento fotovoltaico (SHAH, et al., 1999), (PRIEB, 2002,) (FALCÃO, 2005), (DOBRZANSKI, et al., 2013).

Figura 3 – Exemplificação das camadas e regiões constituintes de uma célula FV de silício cristalino.



Fonte: adaptado de (AVRUTIN, IZYUMSKAYA, MORKOÇ, 2011).

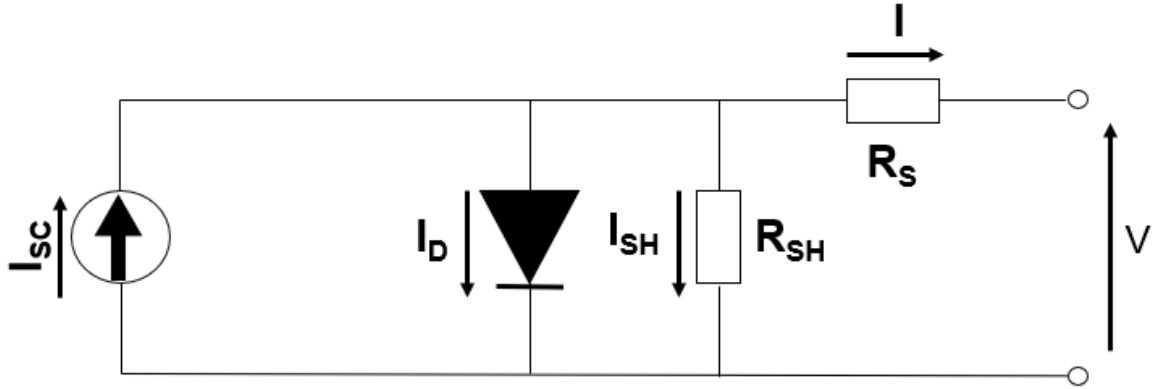
2.4.2 Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica

Com o intuito de padronizar a forma como os módulos FVs são testados, a *International Electrotechnical Commission* elaborou a norma IEC 60904-3 (IEC, 1998), em que determina as *Standard Test Conditions* (STC), condições padrões de testes, para três fatores: radiação solar 1000 W/m^2 ; massa de ar (AM) igual a 1,5; temperatura de operação do módulo FV em 25°C . Esses valores devem ser considerados nas análises dos principais parâmetros de um módulo FV, são eles: corrente de curto circuito (I_{SH}), tensão de circuito aberto (V_{OC}), potência máxima do módulo (P_{MP}), tensão de máxima potência (V_{MP}), corrente de máxima potência (I_{MP}), temperatura normal de operação (NOCT) e fator de forma (FF), ou *fill factor*, (PRIEB, 2002), (SEGUE, 2009), (AVRUTIN, IZYUMSKAYA, MORKOÇ, 2011).

A incidência de fonte luminosa no semicondutor promove a articulação de elétrons e lacunas nas constituições atômicas do cristal. As junções p e n acumulam cargas positivas e negativas, respectivamente. Sendo assim, uma diferença de potencial é estabelecida e é denominada tensão de circuito aberto (V_{OC}). Se cada região dessa junção for conectada em terminais metálicos condutivos (alumínio e prata são os mais comuns), associados a uma carga, origina-se uma fotocorrente (I_{SH}), proporcional à radiação solar incidente. Por meio dos componentes eletrônicos ilustrados na Figura 4, observa-se o circuito de uma célula FV cujo diodo representa esse elemento sem incidência luminosa. A corrente (I) que flui pelo resistor em série (R_s) é o resultado da Equação 1 mostrada abaixo. A corrente no diodo I_D é expressa pela Equação 2, enquanto a corrente que circula pelo resistor em paralelo (R_{SH}), é apresentada na Equação 3 (PRIEB, 2002), (LUQUE, HEGEDUS, 2003), (SEGUEL, 2009), (ZILLES, et al., 2012), (ORTEGA, 2013).

$$I = I_{SH} - I_D - I_{SH} \quad (1)$$

Figura 4 – Circuito elétrico correspondente de uma célula fotovoltaica.



Fonte: adaptado de (PRIEB, 2002).

A corrente que passa pelo diodo (I_D) pode ser expressa em função da tensão (V), sendo que esse parâmetro pode ser descrito pela Equação 2. Onde: I_0 é corrente de saturação sem a incidência de fonte luminosa; V é a tensão aplicada aos terminais do diodo; q é a carga do elétron ($1,6028 \cdot 10^{-19}$); m é o índice ideal para o diodo (variando entre 1 e 2, no caso do Si monocristalino); k é a constante de Boltzmann ($1,3086 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$); T_{OP} é a temperatura absoluta da célula FV (PRIEB, 2002).

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV}{mKT_{OP}}} - 1 \right) \quad (2)$$

A corrente da carga R_{SH} , I_{SH} , obedece às leis de Kirchhoff que relaciona as tensões e as correntes em um ponto, ou nó, como é proposto pela Equação 3.

$$I_{SH} = \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (3)$$

Ao combinar as Equações 2 e 3 aos termos presentes na Equação 1, tem-se como Equação para a corrente (I) no resistor em série (R_S) a Equação 4 (PRIEB, 2002), (FALCÃO, 2005).

$$I = I_{SH} - I_0 \left\{ \left(e^{\frac{e(V+IR_S)}{mKT_{cel}}} - 1 \right) \right\} - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (4)$$

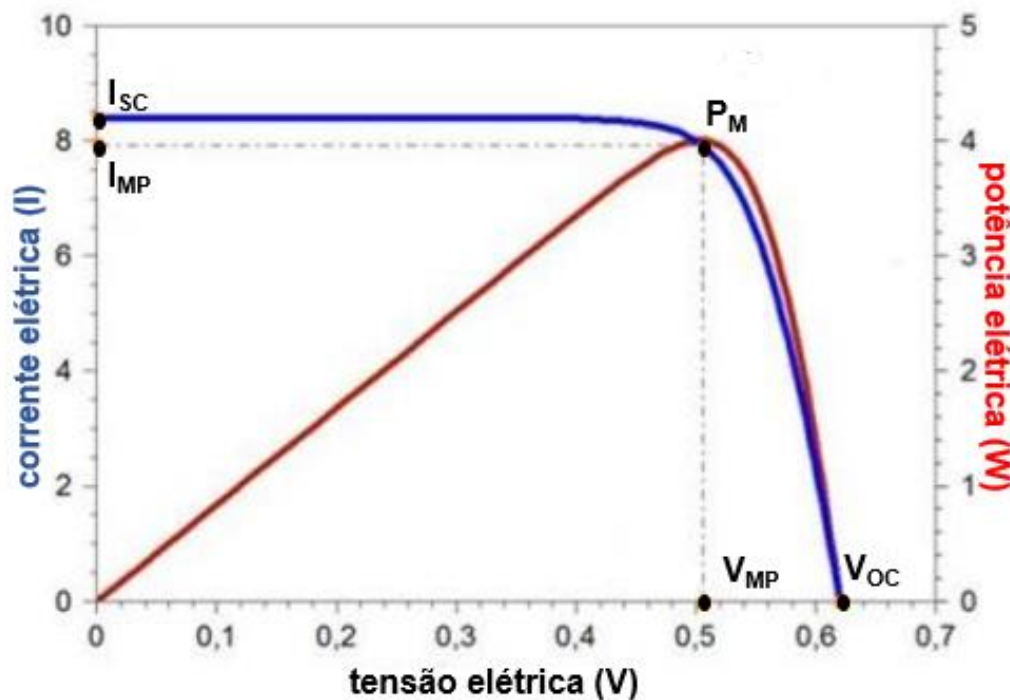
Em um módulo FV com células conectadas em série, a corrente oriunda do circuito elétrico relativo pode ser expressa através da Equação 5 cujo número de células (N_C) é considerado nos cálculos matemáticos (PRIEB, 2002), (FALCÃO, 2005).

$$I = I_{SH} - I_0 \left\{ \left(e^{\frac{e(V+IR_S)}{N_C m k T_{cel}}} - 1 \right) \right\} - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (5)$$

A relação obtida entre a corrente (I) e a tensão (V), no caso das células fotovoltaicas expressa a curva característica de funcionamento de um painel fotovoltaico. Sem a incidência de luz, a célula fotovoltaica comporta-se como um diodo de junção p-n, com a tensão atuando em circuito aberto (V_{OC}) e a corrente em curto circuito (I_{SH}) (PRIEB, 2002), (SEGUEL, 2009).

Através da Figura 5 podem ser observadas as particularidades de uma célula FV em operação com a incidência luminosa. Quando não há carga associada aos terminais, a tensão (V_{OC}) e a corrente (I_{SH}) são máximas, não obstante, a potência elétrica (P) resultante é nula (PINHO GALDINO, 2014), (LASNIER, HANG, 1990, apud SANTOLIN, 2016). O melhor valor de potência elétrica (P_M) é o resultado da combinação dos valores de tensão e corrente ótimos e desejáveis, ambos são resultados da combinação da V_{MP} e I_{MP} (SANTOLIN, 2016).

Figura 5 – Gráfico demonstrativo da curva associada à potência de uma célula FV relacionada com a tensão (V) e corrente (I).



Fonte: adaptado de (SANTOLIN, 2016).

Os parâmetros retratados pela Figura 5 podem ser calculados por equações específicas. A V_{OC} (V) é expressa pela Equação 6 e depende da relação entre a corrente gerada pela incidência dos fótons (I_{FG}) e pela corrente de saturação do diodo (I_D) (PRIEB, 2002), (SEGUEL, 2009), (NEVES, 2016). Logo, onde: k é a constante de Boltzmann ($1,3086 \cdot 10^{-23}$ J/K); q é carga do elétron ($1,6028 \cdot 10^{-19}$); T_{OP} é a temperatura absoluta da célula FV (K); I_D é a corrente que circula pelo diodo (A) – representando a célula fotovoltaica –; I_{FG} é a corrente fotogerada (A):

$$V_{OC} = \frac{kT_{OP}}{q} \ln \left(\frac{I_{FG}}{I_D} + 1 \right) \quad (6)$$

A corrente de curto circuito (I_{SH}) representa a máxima corrente gerada por uma célula FV quando seus terminais se encontram em curto, ou seja, sem nenhuma carga associada. Ela é intimamente ligada à incidência luminosa no material semiconductor, dependendo, portanto, desse fluxo para atingir seu valor ótimo e, ainda, da área de concepção da célula. As propriedades ópticas associadas ao conjunto fotovoltaico, como absorção e reflexão, também exercem influência nesse parâmetro. A Equação 7 expõe os termos necessários para cálculo da I_{SH} , sendo eles: A a área da célula FV (m^2); $G(\lambda)$ a irradiância espectral (W/m^2nm); $R_E(\lambda)$ a resposta espectral do dispositivo FV (A/Wnm); λ_A e λ_B representam o intervalo de comprimento de onda da resposta espectral (nm) (SEGUEL, 2009), (PINHO, GALDINO, 2014), (NEVES, 2016).

$$I_{SH} \approx I_{FG} = A \int_{\lambda_A}^{\lambda_B} G(\lambda) R_E(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

Outro parâmetro importante na análise da eficiência de células FVs é o Fator de Forma (FF), ele é obtido a partir da razão entre a máxima potência (P_{MP}) e o produto resultante da I_{SH} (A) e a V_{OC} (V). A Equação 8 traz essa relação e depende das resistências em série (R_s) e paralelo (R_{SH}) mostrado na ilustração da Figura 5. Onde: P_{MP} potência máxima (W); V_{MP} (V) e I_{MP} (A) tensão e corrente de máxima potência, respectivamente (SEGUEL, 2009), (BUDAY, 2011), (NEVES, 2016).

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{OC} I_{SH}} = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (8)$$

Os fabricantes de painéis FVs disponibilizam um fator importante vinculado ao rendimento ou à eficiência de conversão (η) do equipamento. Esse parâmetro relaciona a quantidade máxima de energia produzida pelo painel (P_{MP}) com o valor da irradiância incidente (G) à área da superfície das células semicondutoras (A). Com a finalidade de tornar esse valor mais compreensivo, no comércio, ele é multiplicado por 100, e é expresso em porcentagem. A Equação 9 expressa essa relação (FALCÃO, 2005), (SANTOLIN, 2016).

$$\eta = \frac{P_{MP}}{AG} = \frac{V_{MP}I_{MP}}{AG} \quad (9)$$

Uma das formas mais utilizadas para caracterizar a eficiência elétrica de uma célula FV é através do gráfico de corrente pela tensão (curva IxV) (Figura 5) que reflete o comportamento desse dispositivo enquanto qualidade e desempenho (PRIEB, 2002), (LUQUE, HEGEDUS, 2003). Inclusive, a primeira norma brasileira voltada ao assunto da conversão fotovoltaica adota esse gráfico como característica básica para determinação das propriedades elétricas de módulos fotovoltaicos, a ABNT NBR 10899/TB-328 (ABNT, 2013).

Contudo, existem diferentes constituições e composições associadas às células fotovoltaicas. Classificadas em gerações, elas são distribuídas em grupos onde certas particularidades contemplam cada tecnologia. Logo, aspectos estruturais são diferentes, bem como o potencial de geração de energia de cada elemento semicondutor.

2.4.3 Tecnologias e compostos voltados à elaboração de células fotovoltaicas

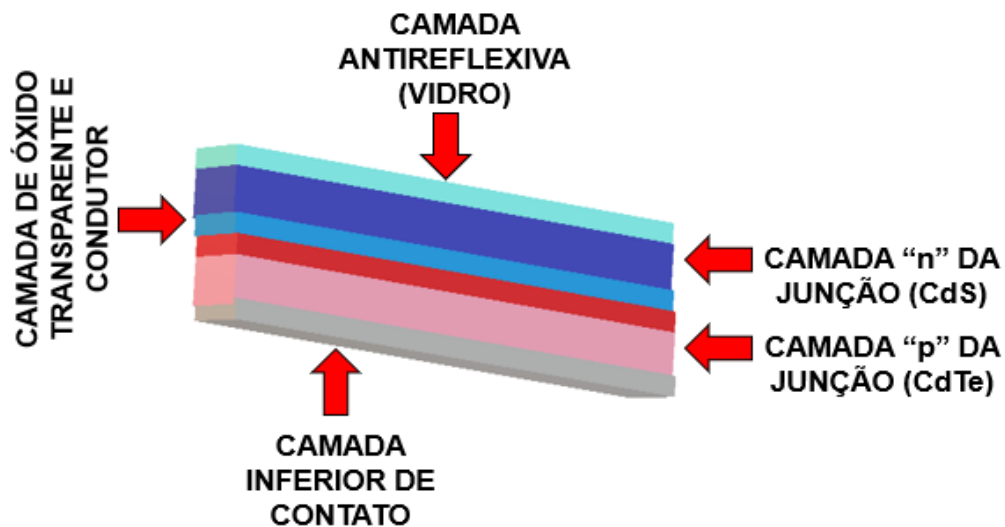
O Si cristalino (c-Si) é um elemento primordial utilizado na fabricação de componentes eletrônicos, como é o caso das células FVs (DEL CUETO, 2002), (LUQUE, HEGEDUS, 2003), (MATTEI, et al., 2006). Ele pode apresentar-se em três estruturas principais: monocristalina (mc-Si), policristalina (pc-Si) e amorfo (a-Si). Outros elementos também são adicionados para melhorar a condutividade elétrica nesses compostos, aguçando, assim, a junção p-n presente nos semicondutores. São encontrados outros compostos

químicos inorgânicos semicondutores como o Arseneto de Gálio (GaAs), o Telureto de Cádmi (CdTe), o Disseleneto de Cobre-Índio (CIS), o Fosfeto de Índio-Gálio (GaInP), entre outros. Já acerca dos compostos orgânicos adotados na fabricação das células FVs são citados: o Antraceno ($C_{14}H_{10}$), o Tetraceno ($C_{18}H_{12}$) e o Pentaceno ($C_{22}H_{14}$) (FALCÃO, 2005), (MCEVOY, CASTANER, MARKVART, 2012), (ORTEGA, 2013), (NEVES, 2016).

As células FVs de mc-Si são consideradas as mais adequadas para fins comerciais. Com uma eficiência entre 15% e 25%, elas traduzem as células FVs de primeira geração. A V_{OC} desse tipo de célula chega a 0,6V, sendo que a V_{MP} atinge 0,5V (PRIEB, 2002). Em sua distribuição policristalina, o silício (pc-Si) compõe células disponibilizadas com preços mais acessíveis, já que os processos de refino do elemento químico são menos apurados. As células são formadas por cristais minúsculos, agrupados para fins de conversão fotovoltaica. Em células FVs com $1,09\text{ cm}^2$ a eficiência fica em torno de 20% (RÜTHER, 2004), (MATTEI, et al., 2006), (KAZMERSKI, 1999 apud FALCÃO, 2005).

O silício amorfo, a-Si, constitui as células FVs com eficiência elétrica reduzida em torno de 7% a 11%. A configuração física do elemento se difere da estrutura cristalina, entretanto, ainda assim, permanece com suas propriedades de condutividade elétrica. Esse composto favoreceu a elaboração de módulos FVs flexíveis, com peso e espessura menores, quando comparados com outras tecnologias de células FV. Ademais, eles podem se apresentar em compostos semitransparentes e amplamente versáteis (SHAH, et al., 1999), (FALCÃO, 2005), (PINHO, GALDINO, 2014). As eficiências citadas, aqui, foram obtidas em condições laboratoriais (BELTRÃO, 2008), (AVRUTIN, IZYUMSKAYA, MORKOÇ, 2011). A representação ilustrativa contida na Figura 6 esboça a composição em camadas de uma célula FV de silício amorfo, conhecida, também, como célula de segunda geração.

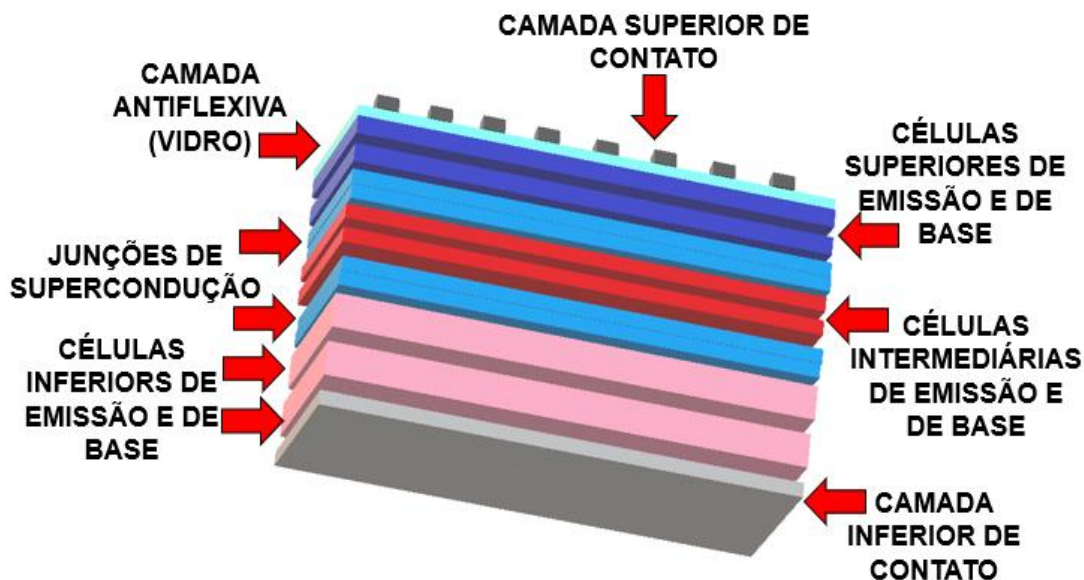
Figura 6 – Exemplificação da distribuição das camadas e junções em uma célula composta por CdTe de segunda geração.



Fonte: adaptado de (AVRUTIN, IZYUMSKAYA, MORKOÇ, 2011).

Já na terceira geração de células FVs, os dispositivos são confeccionados para melhor otimizar a energia contida nos fótons (radiação solar). Boa parte da energia contida nos raios solares não é convertida em eletricidade. Como resultado dos efeitos do próprio equipamento e das condições meteorológicas e locais, a energia solar acaba transformando-se em calor. Uma das formas de otimizar o processo de captação e conversão dessa energia é a utilização de células de multijunção. Sendo assim, tais células são constituídas por subcamadas de células com elementos condutores de energia mais elaborados, conforme apresentado pela imagem da Figura 7. Nesse tipo de multijunção, as células são sobrepostas umas sobre as outras, melhorando o aproveitamento do espectro solar e diminuindo o efeito do aquecimento excessivo nesse tipo de equipamento (AVRUTIN, IZYUMSKAYA, MORKOÇ, 2011), (KOWAR, DANIEL, 2016), (NEVES, 2016).

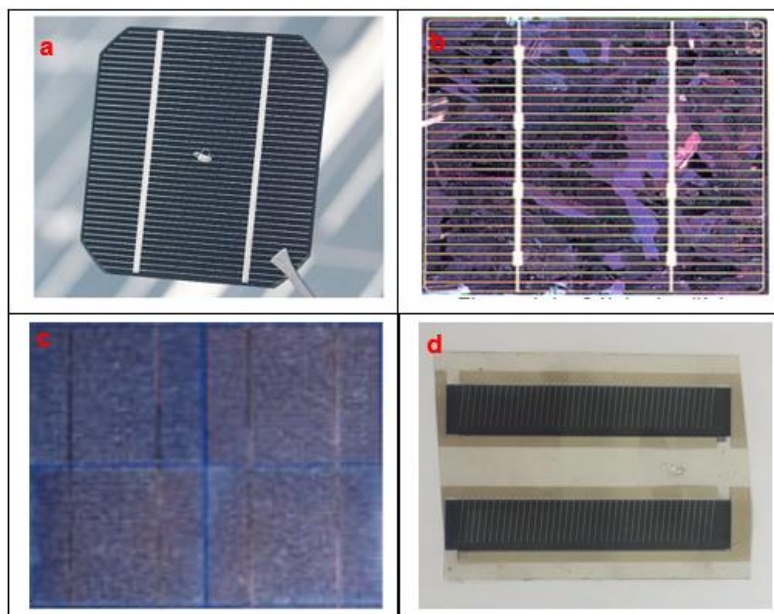
Figura 7 – Ilustração esquemática de uma célula FV de multijunção de terceira geração.



Fonte: adaptado de (AVRUTIN, IZYUMSKAYA, MORKOÇ, 2011).

As ilustrações presentes nas Figura 8 (a), (b), (c) e (d) apresentam as distribuições e configurações físicas de cada tipo de célula FV, exemplificando as concepções visuais de cada uma delas no que concerne a sua estrutura. Pela imagem contida na Figura 8 (a), tem-se a estrutura de uma célula FV com mc-Si. A abordagem trazida pela Figura 8 (b) representa uma célula FV composta por pc-Si. A imagem da Figura 8 (c) retrata um tipo de célula FV com a-Si. Finalmente, a Figura 8 (d) traz uma célula FV constituída por material orgânico, a título de exemplificação (CRESESB/CEPEL, 1999), (PINHO, GALDINO, 2014). A Tabela 1 apresenta, de forma sucinta, as características de eficiência de conversão fotovoltaica de diferentes tecnologias de captação da radiação solar.

Figura 8 – Exemplos de células FVs de primeira, segunda e terceira geração compostas por mc-Si (a), pc-Si (b), a-Si (c) e composto orgânico (d), respectivamente.



Fonte: (a) e (b) (PINHO, GALDINO, 2014); (c) (CRESESEB/CEPEL, 1999); (d) autor.

Tabela 1 – Valores de aproveitamento acerca da eficiência de diferentes tipos de tecnologias de células fotovoltaicas.

Tecnologia de célula fotovoltaica		Eficiência (%)
Silício	mc-Si	25 ± 0,5
	pc-Si	20,4 ± 0,5
	filmes finos em estruturas de metal/polímero de vidro reutilizável	20,1 ± 0,4
Silício amorfo e nanocristalino	Amorfo (a-Si) (filme fino)	10,1 ± 0,3
	Nanocristalino (nc-Si)	10,1 ± 0,2
Células orgânicas (filmes finos)		10,7 ± 0,3

Fonte: adaptado de (PINHO, GALDINO, 2014).

O *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) adota uma abordagem considerando, principalmente, os elementos químicos empregados para fabricação de células FVs. A separação consiste em: células de multijunção; células de Si cristalino; células constituídas de GaAs com junção unitária; filmes finos e, finalmente, tecnologias emergentes (PINHO, GALDINO, 2014), (NREL, 2015), (NEVES, 2016). Em outras

perspectivas, as células fotovoltaicas são classificadas em gerações, onde suas peculiaridades e particularidades são consideradas para o agrupamento de cada tecnologia (LUQUE, HEGEDEUS, 2003), (FALCÃO, 2005), (MCEVOY, CASTANER, MARKVART, 2012), (ORTEGA, 2013). Tais gerações são divididas em:

- a) 1ª geração: são as primeiras células lançadas no mercado, basicamente, caracterizam-se pela presença de células de mc-Si e pc-Si e, ainda, de GaAs (Arseneto de Gálio). Os módulos contendo essas células são encontrados em aplicações para geração de energia próxima à carga (edificações, residências, prédios comerciais). Sua representação pode ser observada através das ilustrações das Figura 8 (a) e (b). Esse tipo de tecnologia ainda domina o mercado de captação e conversão fotovoltaica no mundo (cerca de 90% de toda geração do mundo consiste em módulos e painéis FVs de silício, essencialmente);
- b) 2ª geração: possui o a-Si como elemento essencial e se destaca por sua constituição através de filmes finos. Os elementos químicos mais comuns nessa geração são o CdTe (Telureto de Cádmio) e CuInGaSe₂ (Disseleneto de Cobre, Índio, Gálio). Um exemplo desse tipo de célula está retratado na Figura 8 (c). Os filmes finos apresentaram um discreto crescimento ao longo das últimas décadas e hoje participam com cerca de 10% da produção de energia por painéis solares no mundo;
- c) 3ª geração: são as tecnologias mais recentes associadas ao aproveitamento da radiação solar. Essa geração abrange as células confeccionadas por meio de compostos orgânicos. Elas são sensibilizadas por corantes, com baixa eficiência, e também adotam compostos de multijunção com alto aproveitamento de conversão FV, contudo, possuem elevado preço comercial. A Figura 8 (d) apresenta um modelo recente de célula orgânica.

A associação de diversas células FVs compõe os módulos e os painéis fotovoltaicos empregados para geração de energia elétrica e aquecimento de fluidos, principalmente. O desenvolvimento associado à confecção desses elementos agrega diversos elementos químicos que transformaram o cenário voltado às tecnologias de células fotovoltaicas. Uma vez que o principal ganho nos novos modelos de células FVs é a flexibilidade em sua configuração física, os cenários de aplicação dos módulos podem

se expandir consideravelmente. Como resultado, esses equipamentos tendem a adentrar diferentes contextos onde a aplicação e/ou integração desses equipamentos favorecem a geração de energia a partir de pontos de fixação distintos.

2.5 Módulos fotovoltaicos

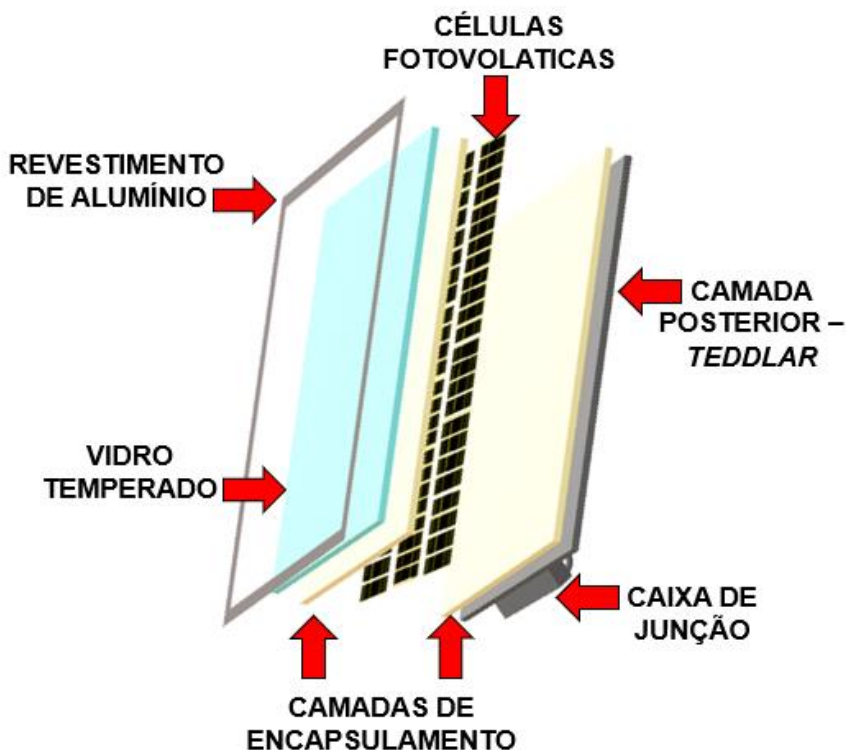
Os módulos fotovoltaicos são elaborados com a associação de células FVs conectadas em série ou em paralelo. Com a utilização de materiais apropriados, os dispositivos semicondutores são colocados entre várias camadas de componentes vedativos para não haver quebra das células e também para impedir o contato delas com qualquer tipo de impureza ou umidade (ORTEGA, 2013), (SANTOLIN, 2016), (MME, 2017), (REN21, 2017).

A partir da Figura 9, é possível observar a composição de um módulo FV com a disposição de cada parte utilizada para compor o equipamento. Dessa maneira, o revestimento de alumínio é adotado para protegê-lo de impactos e compactar todas as partes da estrutura, conferindo, assim, rigidez mecânica e facilitando sua colocação em diferentes pontos. Na camada superior é posto algum vidro com baixo teor de ferro para melhorar a absorção da radiação solar, minimizando as reflexões que podem vir a ocorrer. As camadas de encapsulamento, superior e posterior, colaboram para manter as células FVs alinhadas e sem contato com as demais partes do módulo (PRIEB, 2002), (PINHO, GALDINO, 2014), (SANTOLIN, 2016).

Geralmente, no processo, utilizam-se polímeros termoplásticos transparentes com baixo índice de reflexão dos raios solares. Esse material possui características de isolamento elétrico e também colabora para não haver contato com umidade e outros tipos de impurezas pelas células FVs. Na literatura da área, o EVA é citado como elemento mais comum usado nas camadas superiores e o PVF (*teddlar*) nas camadas inferiores, de modo que o segundo sela as camadas de encapsulamento. A caixa de junção presente na ilustração concentra o fluxo da corrente produzida no equipamento para posterior associação com a rede de abastecimento de energia, ou mesmo com os

consumidores de forma local (PRIEB, 2002), (PINHO, GALDINO, 2014), (SANTOLIN, 2016).

Figura 9 – Esquemático das partes constituintes de um módulo fotovoltaico.



Fonte: adaptado de (SANTOLIN, 2016).

A configuração em forma de circuito elétrico de um módulo fotovoltaico é similar ao apresentado pelo esquema elétrico contido na Figura 4 (PRIEB, 2002). A corrente produzida nos coletores FVs, por meio do efeito fotovoltaico, é contínua (CC). A tensão de operação (V_{OP}) do módulo FV é o resultado do produto do número de células pela tensão de cada célula (em torno de 0,5V). Em cada ilha (contendo um número específico de células FVs) é colocado um diodo de “bypass” em paralelo. Esse procedimento evita danos ao equipamento caso alguma célula seja sombreada, ou se houver curto-circuito em algum dispositivo. Dessa maneira, esse percurso é um caminho alternativo para o fluxo da corrente e que evita maiores danos ao módulo FV (LUQUE, HEGEDUS, 2003), (BELTRÃO, 2008), (PINHO, GALDINO, 2014).

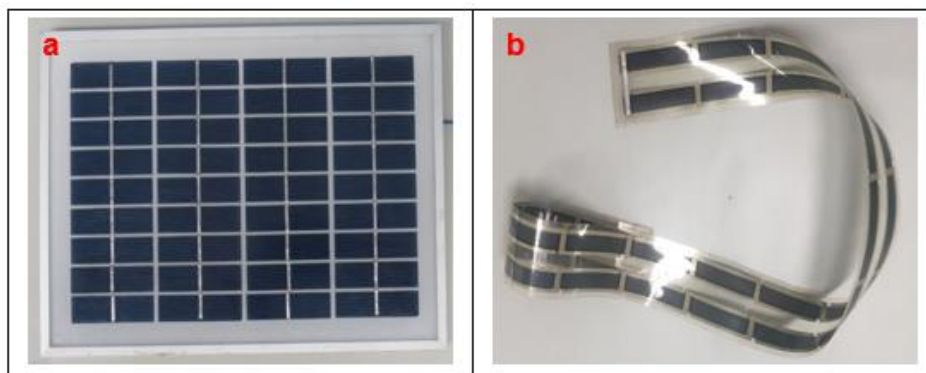
O esquemático elétrico do módulo FV equivale a uma fonte de corrente em paralelo (I_{SH}) com um diodo (D). Nessa perspectiva, salienta-se que se trata de um circuito

aproximado, sendo que em uma célula FV verdadeira, existem perdas inerentes a outros fatores. Para exemplificar os danos inerentes às células, duas resistências são associadas ao circuito, R_{SH} e R_s . A R_{SH} corresponde à diminuição da tensão através de nocividades ôhmicas do próprio material semicondutor. A R_s , em paralelo, refere-se aos distúrbios ocasionados pelo campo eletromagnético da junção (p-n), nas duas faces da célula (SICK, ERGE, 1996), (LUQUE, HEGEDUS, 2003), (DHAR, SRIDHAR, 2012), (SANTOLIN, 2016).

A imagem trazida pelas Figura 10 (a) e (b) apresenta dois módulos FVs a título de exemplificação. A Figura 10 (a) apresenta um módulo FV comercial composto por células de pc-Si. A Figura 10 (b) traz a representação de um módulo FV em filme fino composto de células orgânicas. Eles caracterizam-se como equipamentos flexíveis, com peso reduzido, fácil manuseio e fixação. A geração de energia desses equipamentos também é reduzida, não atingindo valores expressivos de tensão (V) e corrente (I). Contudo, esses módulos FVs trazem uma nova perspectiva acerca das possibilidades de inserção desses equipamentos em diferentes contextos e aplicações.

Por exemplo, no caso da construção civil, eles podem estar associados às janelas, persianas, portas, portões, e afins, uma vez que não requerem uma estrutura física adicional para implementação. O módulo FV contido na Figura 10 (b) é fornecido pela fabricante *InfinityOPV* e é denominado *Organic Solar Tape*. As células são aderidas a uma fita adesiva, onde, ao estabelecerem uma conexão em série, podem ser aplicadas às mais variadas superfícies.

Figura 10 – Exemplos de módulos FVs compostos por células de pc-Si (a) e células orgânicas (b).



Fonte: Autor.

2.5.1 Normas, leis e regulamentações internacionais relacionadas à energia fotovoltaica

Os valores fundamentais incrementados nas análises contendo equipamentos fotovoltaicos são determinados conforme disponibiliza a IEC, através das normas IEC 60068, 60410, 61215 e 61853-1-2-3-4. Essas normas apresentam as condições básicas para a confecção dos módulos FVs, como acoplamento de vedação adequado, resistência do equipamento a impactos e outros problemas, potencial de conversão da radiação solar em energia elétrica e, ainda, a taxa de degradação do equipamento ao longo do tempo. A potência de saída ($P_{SAÍDA}$) de um módulo FV é disponibilizada por fabricantes comerciais, considerando condições padrão de teste (STC). A norma IEC 60904 determina que, em painéis de c-Si, a intensidade de radiação deve obedecer à escala de 1000 W/m^2 , 1,5 AM e a temperatura de operação do módulo deve estar em 25° (BUDAY, 2011), (SANTOLIN, 2016),

Todavia, as condições reais de trabalho às quais um módulo FV está submetido, geralmente, não abrangem os valores apontados na STC. O valor da $P_{SAÍDA}$ é útil quando se deseja comparar tecnologias FVs sob as mesmas condições. No entanto, esse método não é útil para descrever o funcionamento de módulos FVs submetidos às condições ambientais com ampla variedade. Assim, fabricantes de painéis FVs podem fornecer outros parâmetros como o coeficiente de temperatura de tensão e a corrente para que usuários consigam traçar a curva de I-V. A norma ASTM E1036-96, fornecida pela *American Society for Testing and Materials* engloba esse contexto de aplicação dos módulos FVs (MARION, et al., 1999). Assim, são apontadas outras normas apresentadas pela ASTM:

- a) ASTM E772 – Terminologia de conversão para energia solar;
- b) ASTM E927 – Especificações para testes de simulação com conversores solares fotovoltaicos;
- c) ASTM E2527-15 – Metodologias padronizadas de teste para verificação do desempenho elétrico de módulos fotovoltaicos com concentrador terrestre e sistemas submetidos a luz natural;

d) ASTM E1036-15 – Metodologias padronizadas de teste para verificação do desempenho elétrico de módulos fotovoltaicos e painéis utilizando células de referência;

e) ASTM E1328 – Terminologia relativa à conversão de energia solar fotovoltaica.

Partindo do mesmo princípio de padronização para os testes direcionados a estabelecer o potencial de geração de energia de módulos FVs, a *International Electrotechnical Commission* (IEC) também propôs algumas normas, tais quais a IEC 61853-1. Especificamente, essa norma considera os valores contemplados na Tabela 2, que englobam características ambientais, até as condições de testes padrão (STC). As caracterizações para avaliação da potência de módulos FVs incluem: condições de altas temperaturas (HTC); temperatura nominal de operação da célula (NOCT); condições de baixas temperaturas (LTC); condições de baixas irradiâncias (LIC). Os valores apontados para cada condição aparecem na Tabela 2. A proposta trazida pelo IEC é melhorar os métodos de aferição do desempenho de módulos FVs, observando e avaliando outros fatores e não só as STCs. Através dessa norma, também são determinados os padrões e diretrizes para classificação dos módulos FVs com base na energia (watt-horas) e na taxa de desempenho (PR) (BUDAY, 2011).

Tabela 2 – Valores estabelecidos pela norma IEC 61853-1 para as condições de teste em módulos FVs

Descrição	I (W/m ²)	T _{op} (°C)	T _a (°C)	V (m/s)	AM
STC	1000	25	-	-	1,5
HTC	1000	75	-	-	1,5
LTC	500	15	-	-	1,5
NOCT	800	20	-	1	1,5
LIC	200	25	-	-	1,5

Fonte: adaptado de (BUDAY, 2011).

2.5.2 Normas brasileiras aplicadas à energia solar fotovoltaica

No Brasil, a temática voltada à geração FV de energia ganhou discussões com cunho normativo e legislativo na década de 1990. Nesse período, duas comissões foram elaboradas para promover o debate sobre o tema e, assim, padronizar as práticas através de normas. A Associação Brasileira de Normas Técnicas forma, então, a Comissão de Estudo de Sistemas Fotovoltaicos (CE – 03:802.01) e a Comissão de Estudo de Instalações Elétricas de Baixa Tensão (CE – 03:064.01), ambos vinculados ao Comitê Brasileiro de Eletricidade (ABNT/CB-03) (ORTEGA, 2013). Dentre as normas estabelecidas têm-se:

- a) NBR12137/MB3478 – (1991) – Módulos fotovoltaicos (ABNT, 1991);
- b) NBR 14200 (1998) – Acumulador chumbo-ácido estacionário ventilado para sistemas fotovoltaicos, ensaios (ABNT, 1998);
- c) NBR 11704 (2008) – Sistemas fotovoltaicos, classificação (ABNT, 2008);
- d) NBR11876/EB2176 – (2010) – Módulos fotovoltaicos (ABNT, 2010);
- e) NBR IEC 62116 (2012) – Procedimento de ensaio de anti-Ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (ABNT, 2012);
- f) NBR 10899 (2013) – Energia solar fotovoltaica (ABNT, 2013a);
- g) NBR 16149 (2013) – Sistemas fotovoltaicos (FV) – características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição (ABNT, 2013b);
- h) NBR 16150 (2013) – Sistemas fotovoltaicos (FV) – características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição, procedimento de ensaio de conformidade (ABNT, 2013c);
- i) NBR 16274 (2014) - Sistemas fotovoltaicos conectados à rede, requisitos Mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho (ABNT, 2014).

Aponta-se, ainda, algumas políticas públicas no Brasil para incentivo, proliferação, e adoção dos painéis solares em edificações e empreendimentos. As Resoluções Normativas (RN) 481 e 482 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) colaboraram para reduzir uma série de obstáculos inerentes ao cenário energético da época e responsáveis por impedir a expansão da participação de energia fotovoltaica na

matriz energética do país. A partir da RN 482, do ano 2012, determinou-se que o cidadão brasileiro pode ser agente contribuinte na geração de energia com FREs associadas aos seus empreendimentos. Outros pontos da norma tratavam da geração distribuída de energia, bem como dos sistemas compensatórios desse recurso. Essas RNs foram revisadas em 2015 através da RN 687 e mais detalhes foram acrescentados a todo escopo da geração fotovoltaica por pequenos produtores e também por edificações (ANEEL, 2012), (ORTEGA, 2013), (NAKANO, 2017).

2.5.3 Fatores Contribuintes para o Desempenho de Módulos Fotovoltaicos

O desempenho de módulos fotovoltaicos possui certa complexidade de avaliação quando analisado em aplicações práticas e reais (DEL CUETO, 2002). Muitos fabricantes de arranjos FVs fornecem informações básicas do circuito elétrico correspondente à associação das células fotovoltaicas, considerando as condições de teste padrão (STC), contudo, em ambiente controlado (MARION, et al., 1999), (PRIEB, 2002). Valores como potência máxima de saída (P_{MP}), corrente de curto circuito (I_{SH}), tensão de circuito aberto (V_{OC}), máxima tensão (V_{MP}) e corrente (I_{MP}) em operação são expressos tendo em vista as condições mínimas de irradiância (1000 W/m^2), temperatura da célula fotovoltaica (25°C) e massa de ar (1,5). Entretanto, em situações reais de trabalho e em um local exposto às intempéries ambientais, climáticas e meteorológicas, esses números são amplamente variados (BUDAY, 2011), (KOEHL, et al., 2011), (SANTOLIN, 2016), (NEVES, 2016).

O desempenho dos módulos FVs está associado a diferentes fatores que envolvem desde os elementos utilizados na confecção da estrutura física do equipamento até as questões da envoltória da edificação onde eles são fixados (LUQUE, HEGEDUS, 2003), (ROUHOLAMINIA, et al., 2014). Os procedimentos de fabricação adotados na elaboração de todas as partes do arranjo FV são fundamentais para a absorção da radiação, principalmente nas questões de reflexão dos raios solares. Os materiais e texturas anexados na superfície das células FVs exercem papel fundamental para a

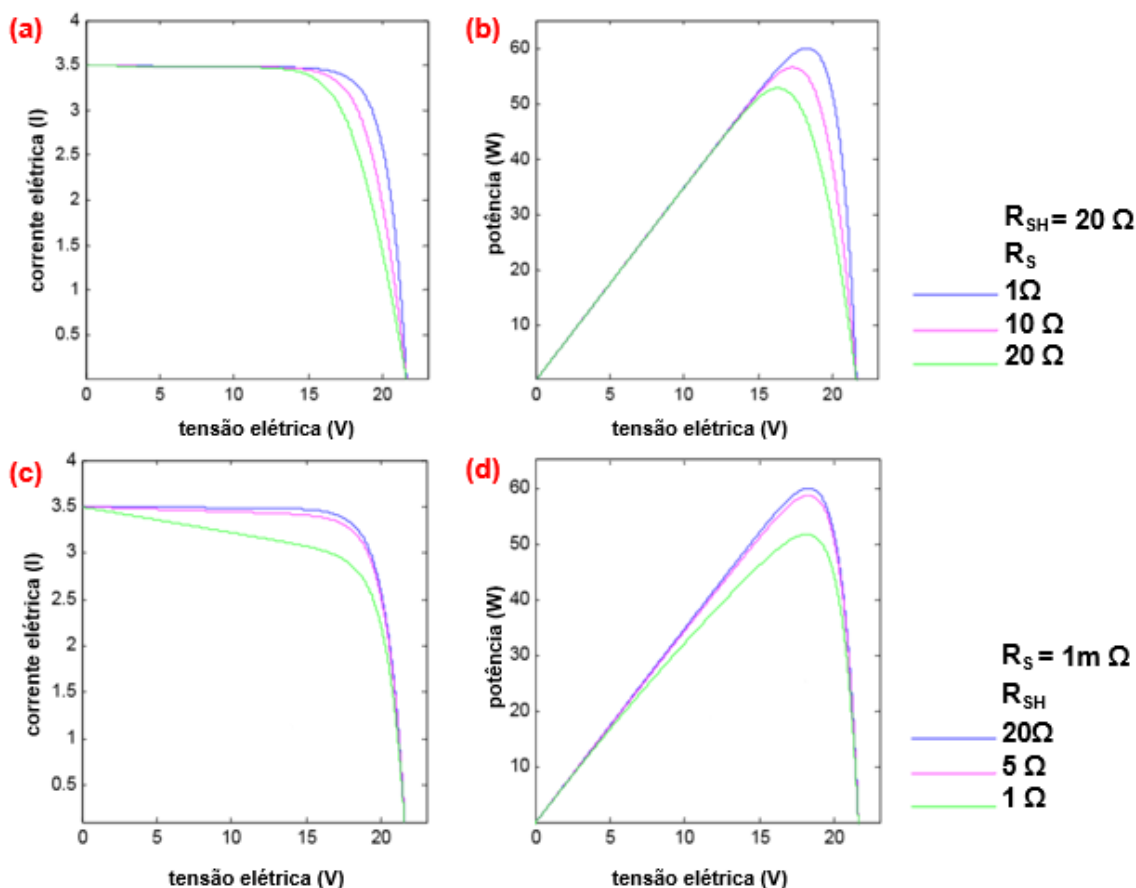
penetração da incidência luminosa, confinando os feixes de luz refletidos dentro da célula, potencializando o efeito fotovoltaico (FALCÃO, 2005), (BÜHLER, 2007).

2.5.3.1 *Influência das resistências internas do módulo FV*

A partir da similaridade do funcionamento das células FVs como circuitos elétricos, onde elementos resistivos estão dispostos em série e em paralelo (Figura 4), alguns efeitos são provocados na $P_{SAÍDA}$ do painel, considerando o comportamento fundamental de circuitos eletrônicos. Ambas as resistências interferem no fator de preenchimento do módulo FV (PRIEB, 2002). Desse modo, tais resistências reduzem o potencial de geração de energia dos módulos FVs (BÜHLER, 2007). A resistência em série, R_S , atua na curva característica I-V quando o módulo atinge sua potência máxima, P_{MP} . Nesse mesmo ponto, o módulo se comporta como uma fonte de tensão e identifica-se, também, que a resistência em paralelo, R_{SH} , regula o módulo FV enquanto o mesmo funciona como fonte de corrente (SEGUEL, 2009).

Estes efeitos são apresentados pelos gráficos das Figura 11 (a), (b), (c) e (d) cujos pontos de máxima potência, P_{MP} , são deslocados com o acréscimo dos valores das resistências. Nos gráficos das Figura 11 (a) e (b), observa-se o comportamento da corrente (I) e da potência (W) em função da tensão, com diferentes valores para a R_S , e com R_{SH} igual a 20 Ω . A elevação do valor de R_S ocasiona a diminuição da $P_{SAÍDA}$ no módulo FV. Já os gráficos contidos nas Figura 11 (c) e (d) demonstram a reação da resposta da corrente (I) e da potência (W) compreendendo o valor de R_S igual a 1 Ω e variando os valores de R_{SH} . A interferência de R_{SH} é diferente do caso anterior, onde R_S era aumentada. Sendo assim, ao diminuir o valor associado a R_{SH} , nota-se um aumento na $P_{SAÍDA}$, como pode ser constatado no gráfico da Figura 11(d) (SEGUEL, 2009).

Figura 11 – Influência das resistências R_S (a e b) e R_{SH} (c e d) no comportamento da corrente (I) e da potência (W) em um módulo FV.



Fonte: adaptado de (SEGUEL, 2009).

2.5.3.2 Influência das características elétricas e mecânicas no desempenho dos módulos FVs

O modelo elétrico equivalente de uma célula FV apontado pela Figura 4 auxilia na compreensão do comportamento elétrico desse componente, considerando um circuito com apenas um diodo, por exemplo. Esse é o circuito mais simples e corresponde a uma célula ideal de silício. Durante o processo, perdas eventuais são inerentes à arquitetura do equipamento fotovoltaico. No modelo elétrico proposto, elas são representadas pelas resistências R_S (série) e R_{SH} (paralelo). Ao utilizar os valores fornecidos pela STC, os

fabricantes de módulos FVs viabilizam as características e funcionalidades básicas dos equipamentos (PRIEB, 2002), (SEGUEL, 2009).

Em um arranjo fotovoltaico, as células são os principais componentes (DEL CUETO, 2002), (LUQUE, HEGEDUS, 2003). Todavia, pelo processo natural de dilatação térmica dos materiais associados à composição do módulo FV, oriundos do aquecimento e resfriamento constante do equipamento, ao longo do tempo, alguns problemas podem surgir e interferir drasticamente em seu desempenho. Esse evento afeta todas as partes que integram o aparato FV que, conseqüentemente, perde seu potencial de conversão, afetando, assim, a $P_{SAÍDA}$. Conectores, terminais, trilhas de condução, materiais de encapsulamento, borda de proteção, camadas superiores e posteriores, todos são influenciados pelo aumento gradativo de calor (DUBEY, SARVAIYA, SESHADRI, 2012), (HERRMANN, 2010 apud SANTOLIN, 2016).

Portanto, a partir dos desgastes inerentes ao processo de aquecimento e resfriamento frequente, o rendimento geral de módulos FVs é prejudicado. Logo, problemas físicos podem surgir na estrutura, como rachaduras e trincas que, eventualmente, permitem a incidência de umidade e impurezas, ademais, o próprio circuito elétrico é afetado. Ao se quebrar, pequenas porções das células ficam isoladas e também interferem negativamente na $P_{SAÍDA}$ do módulo FV. Outro efeito degradante ocorre nas células FVs que, por meio de quebras minúsculas, origina o aumento das resistências internas nesses pontos. Trata-se dos *hotspots*, ou pontos superquentes, que desvanecem parte da energia produzida nas células. Esses eventos causam desequilíbrios térmicos e o aquecimento demasiado no equipamento. Conseqüentemente, uma série de anomalias elétricas surgem no módulo FV (SANTOLIN, 2016).

Dentre as anormalidades que ocorrem no módulo FV, citam-se:

a) Pontos de superaquecimento – os *hotspots* são manchas pontuais com temperatura acentuada em um módulo FV –. Eles ocasionam aumento da resistência interna em que a corrente gerada pela célula FV acaba transformando-se em calor (perda). É importante salientar que esses problemas são resultados do processo de fabricação do módulo FV. Ao sobrepôr as múltiplas camadas de material encapsulante para proteger as células, elas podem estabelecer contato mecânico,

drástico ao processo de conversão fotovoltaica (WOHLGEMUTH, HERRMANN, 2005), (SANTOLIN, 2016);

b) *Coldspots* – quando as células FVs se quebram, ou partes delas se deterioram, elas permanecem isoladas, de certa forma, do circuito elétrico do painel. É um ponto de degradação da eficiência do painel FV que atua de forma negativa na $P_{SAÍDA}$ (MANSOURI, et al., 2012, apud SANTOLIN, 2016) (SANTOLIN, 2016);

c) Descasamento das resistências – as células são conectadas aos módulos de forma paralela e serial –. Algumas células podem ter comportamento resistivo superior as outras. Assim, elas também se aquecerão em maior quantidade e de forma homogênea em toda sua área. Geralmente, esses erros estão vinculados aos processos de fabricação dos módulos FVs, cujas células com potencial de conversão e geração diferente são postas em série na mesma ilha (CROZIER, et al., 2015, apud SANTOLIN, 2016), (SANTOLIN, 2016);

d) Constrição e mau contato dos elementos condutivos – esses eventos estão normalmente associados aos processos de fabricação dos módulos FVs –. O desempenho elétrico deles é influenciado pelos materiais que os compõem (DUBEY, SARVAIYA, SESHADRI, 2012). É provável que ao estabelecer os contatos internos com material inadequado ou de má qualidade, as soldas interfiram nas ilhas das células. Assim, nesses pontos de conexão entre os elementos condutivos têm-se o mesmo processo de superaquecimento ou de isolamento térmico de alguma porção das células (WOHLGEMUTH, HERRMANN, 2005), (SPAGNOLO, et al., 2012, apud SANTOLIN, 2016). As camadas de material isolante, caso falhem, permitem que a umidade oriunda do ambiente externo atinja os condutores internos, podendo, ainda, provocar o rompimento dos mesmos (SANTOLIN, 2016).

As anomalias citadas têm, em comum, o aquecimento excessivo de partes dos módulos FVs, cujas células são os principais agentes afetados. Esses distúrbios contribuem para o desequilíbrio térmico dos arranjos FVs, uma vez que os parâmetros de tensão (V) e corrente (I) são degradados a partir do acúmulo de sucessivos desgastes e problemas (WOHLGEMUTH, HERRMANN, 2005), (SANTOLIN, 2016). A temperatura exerce papel fundamental no desempenho das células FVs. Quanto maior for a temperatura de operação (T_{OP}) que a célula alcança, menor será seu potencial de

conversão fotovoltaica. Logo, a eficiência elétrica e a $P_{SAÍDA}$ do módulo FV dependem, diretamente, da T_{OP} (DUBEY, SARVAIYA, SESHADRI, 2012). O monitoramento da T_{OP} dos módulos FVs é uma alternativa para a discretização das características elétricas de trabalho em condições reais dos painéis solares (TINA, SCROFANI, 2008).

2.5.3.3 *Influência dos fatores e elementos ambientais na eficiência dos módulos FVs*

Os elementos climáticos compõem a caracterização do clima em um ponto qualquer da superfície terrestre, sendo eles: pressão e umidade atmosférica, temperatura ambiente, vento, precipitação pluviométrica e radiação solar. Fundamentalmente, os módulos FVs têm seu funcionamento afetado por dois elementos climáticos, sendo eles: a temperatura ambiente e a irradiação solar. A radiação solar propaga-se no espaço constituído por cargas e massas, com certa velocidade, onde estão presentes as ondas eletromagnéticas que, por sua vez, carregam consigo os campos: elétrico e magnético. Já o processo de irradiação é um fenômeno que ocorre sem a presença, necessariamente, de um corpo material/físico. Portanto, no caso da energia solar, ela é irradiada pelo Sol e recebida pelos semicondutores presentes nas células FVs onde ocorre o processo de conversão da luz em energia elétrica através do efeito fotovoltaico.

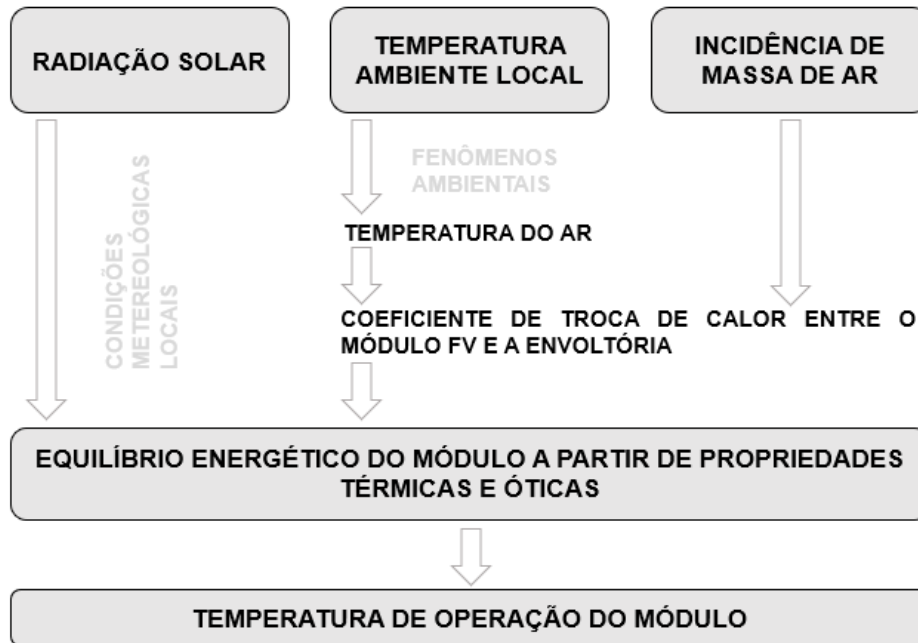
Na literatura, existem diversos trabalhos com o foco em estabelecer as relações entre a eficiência de módulos FVs com os elementos climáticos: temperatura ambiente e radiação solar (CANTOR, 2017). Além de considerar esses dois fatores, o fluxograma apresentado na Figura 12 mostra que o deslocamento da massa de ar se junta aos outros dois elementos citados de maneira que ele seja um elemento contribuinte na eficiência de módulos FVs (AMY, 2006 apud CANTOR, 2017). A radiação solar incidente em um local é sensível aos fatores meteorológicos e fenômenos presentes na atmosfera. A concentração dos gases, a presença de materiais particulados, os efeitos de espalhamento, entre outros fatores, contribuem para a dispersão ou concentração dos raios solares (NEVES, 2016). As propriedades de conversão das células FVs são

influenciadas, diretamente, pelos elementos climáticos, uma vez que, quanto maior a incidência de radiação solar nas células, maior será a produção de energia elétrica (PRIEB, 2002), (KOEHL, et al., 2011), (PINHO, GALDINO, 2014), (ROUHOLAMINIA, et al., 2014).

O potencial de geração elétrica dos módulos FVs está intimamente ligado à radiação solar (PRIEB, 2002), (LUQUE, HEGEDUS, 2003), (SEGUEL, 2009). Trata-se de uma relação proporcional em que as células alcançam seu desempenho satisfatório ao receberem a incidência de luz contínua e sem eventuais desvios e fenômenos óticos (FALCÃO, 2005). A corrente elétrica produzida graças à junção p-n do silício é acrescida com o aumento da intensidade do fluxo luminoso. Em termos matemáticos, tensão (V) e corrente (I) obedecem a uma função exponencial, sendo que a variação de (V) sob diferentes intensidades de irradiância segue forma logarítmica (BÜHLER, 2007). Em síntese, os raios solares são afetados pelas condições meteorológicas e atmosféricas, logo, toda a dinâmica climática e ambiental têm atuação direta no potência elétrica dos módulos FVs (ARMSTRONG, HURLEY, 2010), (NEVES, 2016), (LABREN, CCST, INPE, 2017).

Os gráficos da Figura 13 ilustram o comportamento das curvas de I-V e P-V de um módulo FV terrestre para diferentes valores de irradiação solar (1000 W/m^2 , 800 W/m^2 , 600 W/m^2). A corrente de curto circuito (I_{SH}) é diretamente afetada pelo aumento desse quesito, enquanto a tensão de circuito aberto (V_{OC}) aumenta em uma escala logarítmica. Nesses gráficos, é importante salientar que a temperatura ambiente (25°C) é constante (PRIEB, 2002), (SEGUEL, 2009), (NEVES, 2016), (CANTOR, 2017).

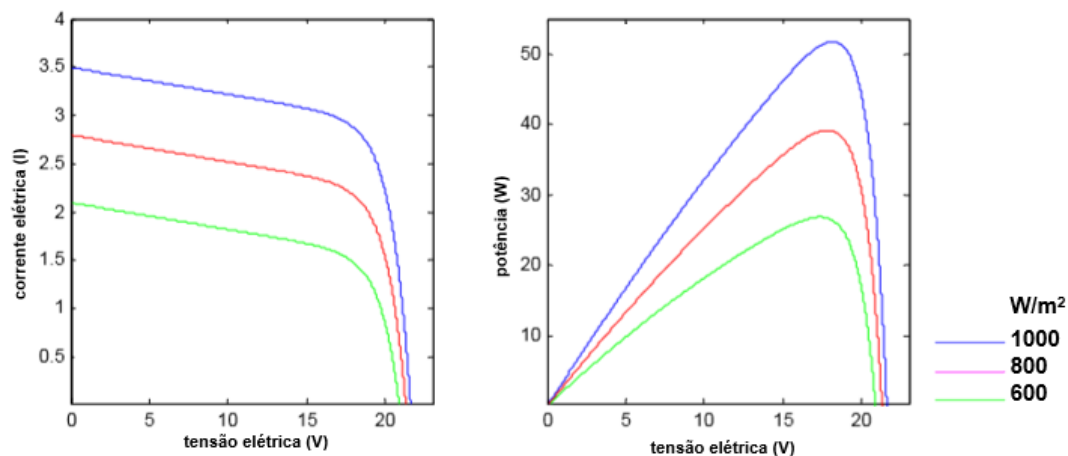
Figura 12 – Elementos climáticos contribuintes para a eficiência elétrica de módulos fotovoltaicos.



Fonte: adaptado de (CANTOR, 2017).

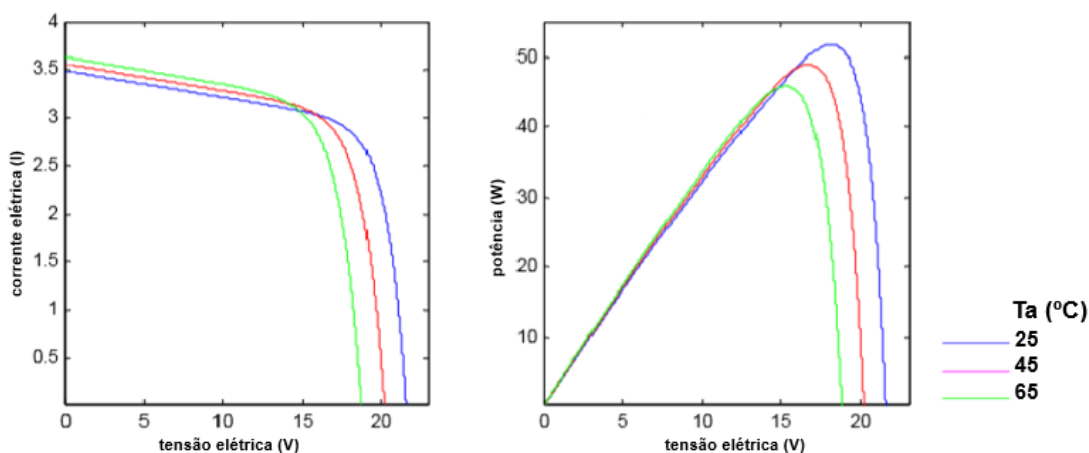
Nesse contexto, a temperatura ambiente (T_a) também exerce papel fundamental no desempenho dos módulos FVs (PRIEB, 2002), (TINA, SCROFANI, 2008). Ela atua, principalmente, nas células semicondutoras que têm seu funcionamento afetado pela elevação desse elemento climático (BELTRÃO, 2008), (CANTOR, 2017). A temperatura de operação das células (T_{OP}) obedece uma relação inversamente proporcional à T_a , logo, quando a temperatura se eleva, a tensão decai. Outro efeito provocado pelo aumento da T_a é uma alteração mínima, mas perceptível, na corrente de curto circuito (I_{SH}) para valores baixos de tensão. Assim, a P_{MP} , potência do ponto máximo, resulta em valores significativamente menores (SEGUEL, 2009), (DHAR, SRIDHAR, AVASTHY, 2012). Os gráficos da Figura 14 apontam a resposta da relação de I-V e P-V para valores diferentes de temperatura. Nota-se que a P_{MP} sofre uma diminuição do valor final com o aumento da temperatura.

Figura 13 – Gráficos das curvas de tensão (à direita) e potência (à esquerda) para diferentes valores de irradiação solar (W/m^2).



Fonte: adaptado de (SEGUER, 2009).

Figura 14 – Gráficos das curvas de corrente (à direita) e potência (à esquerda) para valores diferentes de T_a .



Fonte: adaptado de (SEGUER, 2009).

Os efeitos da T_a e das condições climáticas variadas são avaliadas por Beltrão (2008) através de análises no clima do Nordeste Brasileiro, mais precisamente, em duas localidades do estado de Pernambuco, Recife e Araripina, onde foram analisadas situações reais de implementação dos módulos FVs. No procedimento, foram utilizadas tecnologias FVs de silício monocristalino. No caso da cidade de Araripina, devido aos fatores climáticos e ambientais, os módulos FVs obtiveram 10% a mais de eficiência do que em Recife. Entretanto, como em ambas as cidades o alcance de T_a supera o valor

determinado pelas normas e pelas STCs, a energia oriunda dos equipamentos estudados é 10,2% menor do que seria impondo a T_{OP} ao padrão de 25°C.

Santolin (2016) aponta que, para um módulo FV constituído de células de silício policristalino com uma área aproximada de 0,5 m² e sem problemas internos ou de fabricação, o rendimento é de até 16,7%. As STCs consideradas contemplam valores de T_{OP} igual a 25,5°C e irradiação solar de 850 W/m². Como resultado, a $P_{SAÍDA}$ é de 71 W. O autor ainda assinala que, para cada grau acrescido de temperatura, o painel reduz em 0,5% sua $P_{SAÍDA}$, além de o rendimento também diminuir para 16,6%. O aumento da T_a , a cada grau Celsius, provoca a elevação da I_{SH} e queda na V_{OC} , cuja proporção de acréscimo não é proporcional a ponto de resultar em um equilíbrio entre esses parâmetros. Consequentemente, 1°C diminui em 0,5% a potência efetiva fornecida pelo módulo FV.

Ao avaliar diferentes módulos FVs com tecnologias de células semicondutoras diversas, Neves (2016) demonstra o comportamento desses equipamentos, analisando uma série de condições e efeitos espectrais atmosféricos na cidade de Cachoeira Paulista. O estudo conclui que a radiação solar segue a dinâmica da atmosfera no local e atua nos valores alcançados pela corrente (I) nos aparatos avaliados. A tecnologia contendo silício amorfo, por exemplo, foi mais afetada pelos efeitos espectrais do que as células de silício monocristalino. Tal fato é proveniente das próprias peculiaridades da formação estrutural do elemento Si que possui resposta espectral em um intervalo menor de comprimentos de ondas provindas dos feixes de luz. Dessa maneira, trata-se de um dado importante quando é considerada a real aplicação das tecnologias FVs em uma localidade qualquer.

Outro parâmetro muito importante na análise de eficiência de módulos FVs é a temperatura de operação (T_{OP}) das células FVs. Como todo elemento semicondutor, as células solares são sensíveis ao calor. Esse fator influencia o processo de conversão fotovoltaica, contribuindo para a diminuição da $P_{SAÍDA}$, uma vez que usuários dos sistemas FVs são diretamente afetados por essa degradação. A efetiva compreensão do comportamento das células FVs ao longo do ano e abrangendo as variedades climáticas e sazonais podem, inclusive, determinar o preço da energia produzida pelos módulos FVs por hora (kWh). Ademais, os fabricantes dos arranjos FVs não consideram as

condições reais de trabalho dos equipamentos em campo. As STCs não são capazes de fornecer exatamente o potencial de geração de energia nessas circunstâncias (SAHRI, et al., 2013).

Com o aumento da T_{OP} , o desempenho das células FVs é significativamente reduzido, assim, tanto a eficiência elétrica dos módulos FVs quanto a $P_{SAÍDA}$ dependem desse parâmetro. As correlações propostas na literatura representam, em suma, equações de eficiência de forma simplificada voltadas aos conjuntos fotovoltaicos aplicados e/ou alicerçados em estruturas autônomas, concentradores FVs, arranjos associados às edificações, entre outros. O próprio material associado à confecção do painel ou módulo FV exerce um papel fundamental na absorção de calor pelo equipamento. Outro fator importante é a altitude das localidades onde os arranjos são implementados. Em regiões com altas altitudes, o desempenho desses módulos apresenta melhor capacidade de geração de energia, visto que a temperatura ambiente nesses lugares é mais amena (DUBEY, SARVAIYA, SESHADRI, 2013). Entretanto, outros elementos climáticos atuam diretamente na T_{OP} das células FVs, inclusive, pelos processos de troca de calor com o ambiente (ROUHOLAMINIA, et al., 2014), (SANTOLIN, 2016).

2.5.3.4 *Influência da transferência de calor*

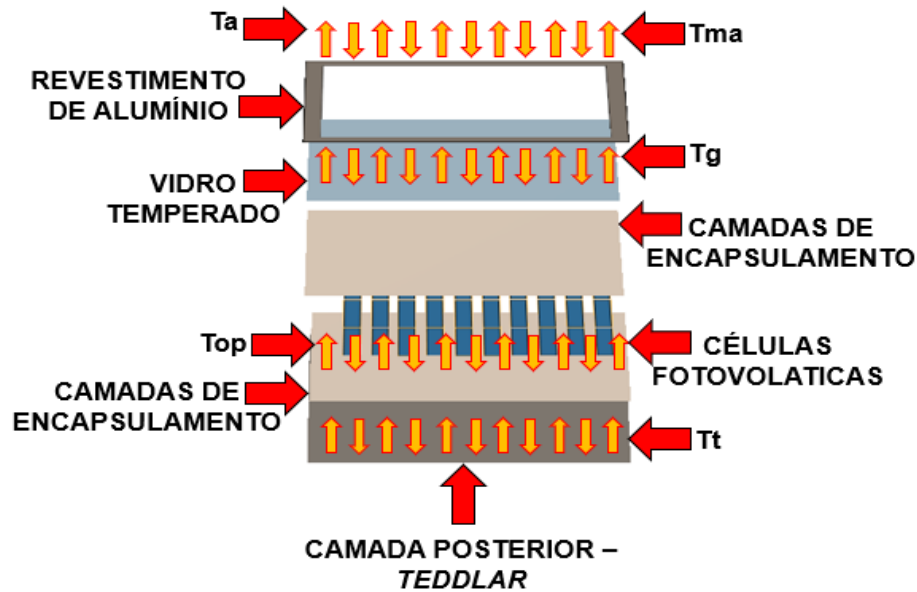
O fenômeno denominado como radiação eletromagnética faz com que a energia de um corpo, ou material, seja transportada para outro por meio das ondas eletromagnéticas, sem que haja um meio para essa propagação (NEVEZ, 2016). A T_{OP} de um módulo FV obedece a proporção de aquecimento do equipamento FV com o ambiente externo onde é implementado, bem como pela quantidade de radiação solar recebida. A radiação solar aliada aos problemas inerentes à confecção dos módulos FVs (fabricação), bem como a troca de calor com ambiente ao redor, somam-se como fatores contribuintes para o comportamento da T_{OP} nos equipamentos FVs e sua eventual elevação. Desse modo, o calor produzido no conjunto FV é influenciado pelas

transferências de calor através dos processos de condução, convecção e radiação (SANTOLIN, 2016).

A transferência de calor por condução ocorre por meio das interações entre os átomos do material em questão. As moléculas, ao receberem o calor em excesso, vibram vigorosamente fazendo a colisão entre as próprias partículas do material (SOUZA, 2014, apud, CANTOR, 2017). No caso dos módulos FVs, a troca de calor acontece entre os componentes do equipamento e também com o meio ambiente. Conforme apontado pela ilustração da Figura 9, os módulos FVs são constituídos por diferentes tipos de materiais, logo, é possível aproximar a troca de calor entre as partes componentes do conjunto FV, adotando como analogia um circuito elétrico resistivo-capacitivo (RC) (ARMSTRONG, HURLEY, 2010). As temperaturas envolvidas nesse processo de transferência estão representadas na demonstração da Figura 15, onde: T_g (temperatura do vidro); T_{OP} (temperatura de operação das células FVs); T_t (temperatura do *teddlar*); T_a (temperatura ambiente); T_{ma} (temperatura da massa de ar) (TINA, SCROFANI, 2008).

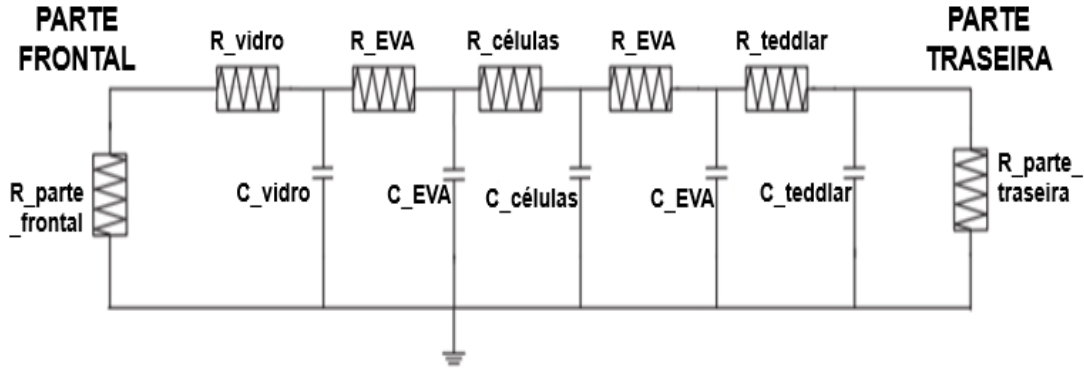
Os módulos FVs podem ser aproximados pelo circuito elétrico composto pela associação de resistências e de elementos capacitivos, configurando, assim, um circuito elétrico resistivo capacitivo. (RC), conforme o esquemático da Figura 16. Analogamente, esse diagrama elétrico corrobora nas interpretações sobre o comportamento térmico dos módulos FVs, considerando as malhas de resistência e as associações com os capacitores. Assim, é possível visualizar a relação acerca da transferência de calor entre as partes componentes dos equipamentos FVs, Figura 15, como as camadas de encapsulamento (EVA), a camada antirreflexiva frontal (vidro), os elementos semicondutores (células FVs), a caixa de junção (*teddlar*) e, finalmente, a parte inferior traseira. Todo material possui como característica a condutividade térmica, sendo que, no caso dos módulos FVs, esse fator está atrelado às condições de elaboração dos mesmos, bem como a qualidade dos materiais utilizados em sua confecção (ARMSTRONG, HURLEY, 2010), (SANTOLIN, 2016).

Figura15 – Processo de transferência de calor entre as partes de um módulo FV.



Fonte: adaptado de (TINA, SCROFANI, 2008).

Figura 16 – Esquemático elétrico da malha de resistências e capacitâncias, ilustrando o comportamento de um módulo FV nos processos de transferência de calor.



Fonte: adaptado de (ARMSTRONG, HURLEY 2010).

A radiação solar banha a superfície terrestre e fomenta boa parte dos processos de aquecimento e, conseqüentemente, de transferência de calor por parte dos materiais. No caso desse fenômeno, a energia é irradiada pelas ondas eletromagnéticas sem haver transporte de matéria e sem a necessidade de contato direto entre os corpos, trata-se, portanto, de um processo de troca constante (KOEHL, et al., 2011), (NEVES, 2016), (CANTOR, 2017). A radiação térmica se perde por meio da disseminação dessa energia para o meio ambiente com o espalhamento das ondas eletromagnéticas – abrangendo

os espectros de luz visível até o infravermelho, com seus respectivos comprimentos de onda –. Especificamente, nos módulos FVs, esse efeito ocorre devido à composição dos agentes da camada frontal (vidro) e traseira (*teddlar*) e, ainda, pela própria estrutura de vedação nas laterais (alumínio) (SANTOLIN, 2016).

A transferência de calor por meio do processo de convecção ocorre quando existe o transporte de matéria oriundo da movimentação em grande escala dos átomos dos fluidos envolvidos do transporte do fluxo de energia. Resumidamente, esse efeito ocorre com mais significância em líquidos e gases. A partir da diferença de temperatura entre duas faces, ou regiões, ou partes de um mesmo material, a densidade do meio entre elas é modificada. Esse meio, sendo líquido ou gasoso, se agita de forma a normalizar a densidade entre as partes (SOUZA, 2014, apud, CANTOR, 2017).

Na análise das implementações mais comuns dos painéis FVs, que são os telhados e regiões superiores de edificações no geral (RÜTHER, 2004), o vento (ar) se desloca continuamente e favorece a transferência de calor por convecção nos módulos FVs. Como resultado, a parte frontal se esfria mais rapidamente que a parte traseira, gerando, portanto, um desequilíbrio térmico no conjunto FV. Contudo, como a incidência das massas de ar são imprecisas, a T_a , em alguns casos, pode ser menor que a T_{OP} das células FVs, sendo que a direção do vento ainda influencia as regiões do equipamento que se resfriam (KAPLANI, KAPLANIS, 2014), (SANTOLIN, 2016).

Além das questões climatológicas, ambientais e meteorológicas, a forma como os módulos fotovoltaicos estão associados às edificações, por exemplo, também exerce influência nos processos de aquecimento dos conjuntos FVs. Em algumas regiões como no Arizona, Estados Unidos, os módulos associados às edificações atingem cerca de 90°C a 95°C durante os dias mais quentes do verão (OH, TAMIZHMANI, PALOMINO, 2010). Nesse caso, mitigar o comportamento térmico dos módulos FVs acoplados às residências desempenha um papel importante para o direcionamento da economia e da indústria voltadas ao setor cuja geração da energia pode ser identificada a partir das variáveis de modelagem térmica com o foco na redução do custo do kWh da energia produzida (SCHAMS, TAMIZHMANI, 2011).

2.5.4 Aplicação dos Módulos Fotovoltaicos em Edificações

Um fator favorável ao desenvolvimento da geração de energia descentralizada, principalmente em zonas urbanas, é o consumo de energia oriundo das edificações, em suma, elas contemplam os setores: comercial, residencial e os prédios públicos (THOMAS, GRAINER, 1999), (RÜTHER, 2004), (LIMA, 2012). O Balanço Energético Nacional de 2017 (BEN17), com base no ano de 2016, assinala que esses empreendimentos corresponderam a 50% na participação do consumo total de energia no Brasil. Dados da *U.S. Energy Information Administration* (EIA) para o BEN17 mostram que houve crescimento de 2% no consumo desse recurso analisando o mesmo período (MME/EPE, 2017). Nessas circunstâncias, a associação de fontes renováveis de energia junto à construção civil tem se tornado uma opção promissora, transformando esses espaços em edificações energeticamente mais eficientes (RÜTHER, SALAMONI, 2011), (ANTONIOLLI, et al., 2016).

Os painéis FVs se consolidaram enquanto ferramenta produtiva e com custo-benefício acessível e, em virtude disso, a implementação deles em edificações tem sido frequente no mundo todo (THOMAS, GRAINER, 1999), (LIMA, 2012), (LABREN, CCST, INPE, 2017). Nesse sentido, a presença desses painéis em edificações demonstra que é possível mesclar tecnologia, arquitetura e comportamento social em prol de um ambiente sustentável. Entre as vantagens de associá-los às edificações, citam-se (RÜTHER, 2004):

- a) Adaptabilidade: não requerem disponibilidade de espaços extras;
- b) Fornecimento de energia em horários estratégicos;
- c) Contribuem para reduzir perdas no processo de transmissão-distribuição de energia;
- d) Substituem elementos construtivos convencionais;
- e) Promovem a modernização do ambiente construído do ponto de vista arquitetônico e energético;
- f) Colaboram para a automação energética; etc.

Perante a própria evolução da indústria orientada à geração fotovoltaica, as células semicondutoras apresentaram consideráveis mudanças no que tange à técnica de aplicação, flexibilidade, durabilidade e rendimento energético. Esse processo foi fundamental para a disseminação das tecnologias fotovoltaicas no mundo todo. Conseqüentemente, várias possibilidades podem surgir, sobretudo se considerar a aplicação dos módulos fotovoltaicos que, a partir de então, podem estar associados às janelas, portas, sacadas, clara-bóias, paredes, telhados, entre outros elementos. É inegável, portanto, que tais associações contribuem efetivamente para a ampliação do tema acerca das fontes renováveis de energia no meio urbano, elevando o tema para a realidade cotidiana dos cidadãos.

Os empreendimentos em edificações ainda exercem participação considerável no consumo de energia em escala global, logo, transformar esses lugares em ambientes autoprodutores de energia elétrica contribui de maneira considerável para amenizar os impactos desse consumo contínuo e progressista (SICK, ERGE, 1996), (RÜTHER, 2004), (ZOMER, 2014). A partir das adaptações para garantir o conforto de seus ocupantes, esse consumo se tornou ainda maior. Equipamentos de aquecimento, ou resfriamento, por exemplo, desempenharam um papel significativo no crescimento da demanda energética para o setor residencial (LIMA, 2012). Contudo, o despontamento dos painéis/módulos FVs viabilizou a inserção desses aparatos na construção civil de forma positiva (NAKANO, 2017), (RITZEN, 2017). Assim, devido às novas composições das células FVs que devem prover maior flexibilidade e adaptabilidade aos módulos FVs, eles podem ser inseridos em diferentes pontos do envelopamento construtivo (MOULA, 2014).

Nordmann e Clavadetscher (2003) elaboraram um trabalho extenso apontando o funcionamento de diferentes tipos de associações de módulos FVs em edificações de diferentes países. A Tabela 3 apresenta uma síntese acerca dos valores coletados. No total, foram analisados 18 sistemas FVs conectados à rede elétrica, e o desempenho de cada um demonstrou que são necessárias algumas ações para melhor adaptar os módulos FVs às edificações. Ainda nesse escopo, os processos de fabricação dos equipamentos devem garantir a funcionalidade efetiva dos módulos para, assim, prolongar seu tempo de vida. Os sistemas autônomos e de teto plano apresentaram

menor aumento de temperatura. Já em telhados inclinados, com a aplicação de módulos FVs, faz-se necessário um espaço entre os dois elementos para favorecer a passagem de vento. No caso das fachadas, a tecnologia adotada deve ter particularidades para facilitar o resfriamento do arranjo FV e da tipologia construtiva.

Tabela 3 – Característica de desempenho de módulos FVs associados às edificações com relação às perdas e condições climáticas locais

Ponto de aplicação	P _{SAÍDA} (kW)	T _a média anual (°C)	T _{OP} do módulo (°C)	Aumento da T _{OP} com relação à T _a	Perdas (%)
Integração ao teto inclinado	9,4	17	85	55	11,3
Fachada	20,1	15	64	52	7,2
Teto inclinado	4,7	6	48	22	-2,1
Teto plano	22,7	16	55	25	3,8
Auto-sustentável	3,6	21	65	26	5
Outros	2	15	59	20	1,7

Fonte: adaptado de (NORDMANN, CLAVADETSHER, 2003).

2.5.4.1 Sistemas *Building Applied Photovoltaic* e *Building Integrated Photovoltaic*

O envolvimento construtivo pode ser adotado enquanto espaço para captação de energia solar e uma posterior conversão em energia elétrica. Os módulos FVs podem estar associados, ou integrados, às fachadas, aos telhados ou a qualquer tipo de componente construtivo (NORDMAN, CLAVADETSCHER, 2003), (RÜTHER, 2004). Os sistemas FVs denominados *Building Applied Photovoltaic* (BAPV) e *Building Integrated Photovoltaic* (BIPV) mesclam as funcionalidades dos equipamentos de conversão solar FV com a infraestrutura da edificação local (ZOMER, 2014), (NAKANO, 2017). Esses sistemas podem promover a geração de energia limpa às instalações, ou para regiões maiores, auxiliando não apenas o suprimento de energia para os consumidores locais,

como também favorecendo um ambiente mais sustentável (GAILLARD, et al., 2014), (MOUSA, 2014), (RITZEN, 2017). As ilustrações trazidas na Figura 17 e na Figura 18 apresentam construções contendo sistemas BAPVs e sistemas BIPVs, respectivamente.

Os sistemas coletores solares e fotovoltaicos, quando integrados em um edifício, tornam-se parte do projeto geral e também, muitas vezes, elementos da própria construção. Do ponto de vista econômico, é necessário que os módulos FVs sejam adaptados ao envelope da edificação para que não sejam necessários investimentos extras na estrutura de suporte para suas alocações (BASNET, 2012). Nesse contexto, o conjunto BAPV consiste em painéis FVs aderidos à edificação já pronta, considerando, ou não, perspectivas visuais e estéticas. A principal aplicação desses elementos está nos telhados, com o foco na eficiência de geração de energia do painel, uma vez que, nesses espaços, a incidência de radiação solar ocorre em maior concentração (RÜTHER, 2004), (NAKANO, 2017). O sistema BIPV segue as características da edificação onde são integrados, obedecendo os aspectos como orientação e inclinação, visto que eles são visualizados no projeto da construção desde sua idealização (PARK, KIM, LEIGH, 2014), (ZOMER, 2014), (RITZEN, 2017).

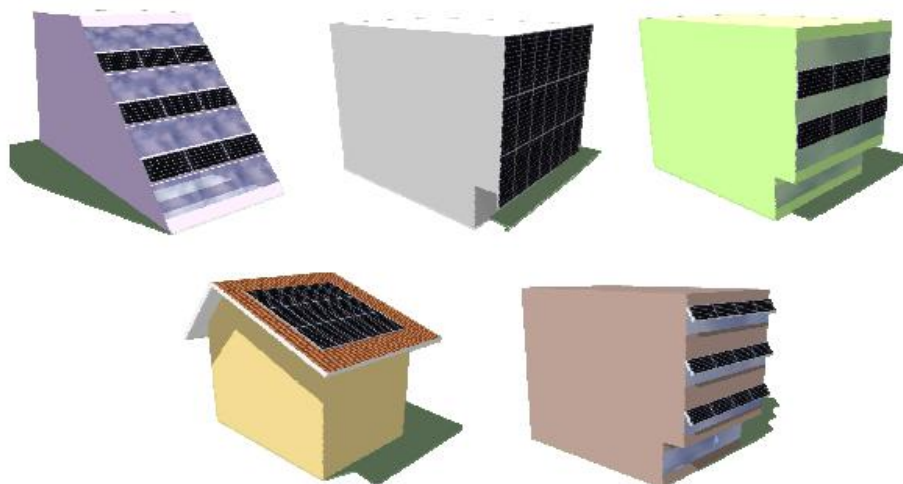
Compreender e aprimorar as técnicas de aplicação e integração dos módulos FVs contribui para otimizar a quantidade de energia produzida e que, por fim, será utilizada pelos consumidores locais. Portanto, é importante conhecer o projeto e a operação do sistema FV no processo de planejamento inicial de uma edificação. Dessa maneira, essas premissas colaboram para evitar problemas com sombreamento e eventuais gastos adicionais para confecção de estruturas adaptativas (KRAUTER, et al., 1999), (IMENES, 2016). Nas edificações, as principais aplicações dos módulos FVs são: as fachadas, contempladas pelas paredes, cortinas, janelas com vidros adaptados; os telhados, telhas e terraços; sistemas de sombreamento que incluem protetores solares, guarda-sóis fixos e móveis e coberturas contra chuva (KAYA, 2009).

O estudo promovido por Imenes (2016) aponta que ainda são raros e de difícil acesso os dados referentes à radiação solar que chegam aos sistemas BAPV e BIPV. O trabalho mencionado avaliou treze instalações com sistemas contendo módulos FVs na Noruega, mais precisamente, dentro do contexto de um programa amplo de desenvolvimento e fomento para proliferação desses tipos de construção. Não obstante, o próprio clima local

é apontado como um fator determinante para a efetiva alocação dos sistemas BAPVs e BIPVs onde os equipamentos FVs devem ser elaborados a partir das características climáticas e sazonais locais. Os edifícios mais eficientes energeticamente são os BAPVs onde os módulos são implementados aos telhados.

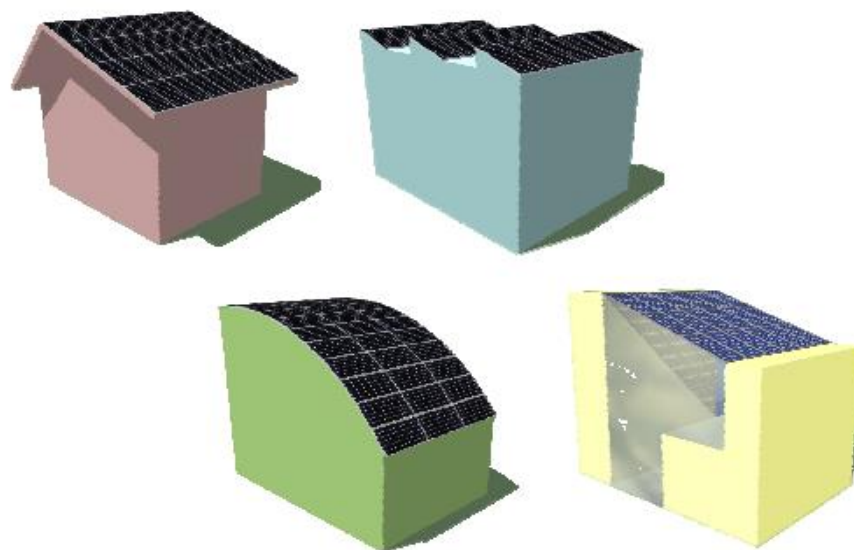
Didoné, Pereira e Wagner (2014), a partir de seus estudos, mostraram que no Brasil, por exemplo, os sistemas BIPVs podem se tornar uma alternativa interessante para empreendimentos que almejam ser edifícios de energia zero (EEZ). No projeto foram simuladas a implementação de um edifício BIPV nas cidades de Fortaleza, Ceará, Florianópolis e Santa Catarina, ambas as cidades com condições ambientais distintas. A partir de um modelo específico de edifício, foi demonstrado que, para Florianópolis, é necessário um número maior de módulos FVs a fim de suprir a demanda energética. A aplicação dos módulos à envoltória, principalmente em partes superiores, obteve maior rendimento com cerca de 35% para Florianópolis e 38% para Fortaleza. Nas janelas onde houve a aplicação de células semitransparentes, elas produziram cerca de 21% da energia gerada pelo sistema BAPV em Florianópolis e para a cidade Fortaleza teve aproveitamento de 11%.

Figura 17 – Exemplos de edifícios com sistemas BAPVs com módulos FVs aplicados às fachadas ou aos telhados.



Fonte: ZOMER (2014).

Figura 18 – Exemplos de sistemas BIPVs com os módulos FVs integrados ao envolvimento construtivo.



Fonte: adaptado de ZOMER (2014).

A partir das ilustrações contidas nas Figura 19 (a) e (b), é possível destacar as diferenças entre os sistemas BAPVs e BIPVs. Os casos mais recorrentes de BAPVs apresentam os módulos FVs constituídos de células de mc-Si e pc-Si, ainda da primeira geração de elementos fotovoltaicos. Os arranjos são alocados em edificações e prédios já construídos onde os arranjos fotovoltaicos são aplicados em sua envoltória, em suma, em partes mais elevadas. Os sistemas BIPVs correspondem à evolução do BAPV, considerando os elementos FVs como partes do envolvimento construtivo. Trata-se, então, de um passo importante na indústria da construção civil para a incorporação mais efetiva das fontes renováveis de energia, inclusive nas zonas urbanas.

Os sistemas BAPVs e BIPVs contém os dispositivos fotovoltaicos como participantes ativos da conjuntura arquitetônica, além da principal função que é a geração de energia. Em linhas gerais, eles podem desempenhar o mesmo papel de paredes, tetos, superfícies, portas, janelas, e afins, substituindo esses elementos tradicionais (BASNET, 2012), (PARK, KIM, LEIGH, 2014). A associação e/ou integração dos módulos FVs às edificações promovem vantagens como a garantia do fornecimento do recurso

energético em momentos estratégicos ao longo do dia (BASNET, 2012), (NAKANO, 2017).

Figura 19 – Exemplos de sistemas BAPV (a) com a aplicação dos módulos FVs em telhados e BIPV (b) com os módulos integrados ao telhado situados na Noruega.



Fonte: adaptado de IMENES (2016).

Concentualmente, os BIPVs são projetados para atender às necessidades relativas às degradações oriundas da exposição às intempéries ambientais, bem como já assumindo o tempo de vida natural do sistema FV. Em princípio, existem outros parâmetros importantes ao vislumbrar a implementação de um sistema FV em uma edificação, como a inclinação local, a orientação do prédio, os possíveis sombreamentos oriundos das redondezas, a posição geográfica, além de questões inerentes ao invólucro do edifício, como a umidade. A *University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland* e a *Solar Energy Application Centre* determinam algumas classificações para sistemas BAPVs e BIPVs, considerando o local de aplicação ou integração das placas fotovoltaicas na envoltória construtiva. Entre as áreas de aplicação têm-se telhados planos, fachadas, telhados inclinados etc. A Tabela 4 apresenta essas informações (NAKANO, 2017).

Tabela 4 – Especificações para cada espaço da envoltória construtiva associada, ou integrada, com módulos FVs caracterizando o BAPV ou BIPV.

GRUPOS	CLASSIFICAÇÃO
Telhados inclinados	Telhas solares; Painéis metálicos; Vidros solares; Telhado opaco/transparente; Telhas ou ardósias; Sistemas de montagem sobre telhados.
Telhados planos e curvos	Clarabóias; Telhados semitransparente; Vidro solares; Membranas solares.
Fachadas	Sistemas para sombreamento; Sistema solar passivo; Janelas; Aparadores; Sistemas de revestimento;
Outros	Projetos customizados; Estruturas urbanas; Mobiliários.

Fonte: adaptado de NAKANO, (2017).

2.5.4.1 *Fatores que influenciam na eficiência de edificações com sistemas BAPV e BIPV*

As condições climáticas e os fatores ambientais associados à região onde se encontra o empreendimento contendo o sistema BAPV ou BIPV são mandatórias no desempenho dos módulos FVs (TIAN, et al., 2007). Nesse esquema, as células obedecem às características do clima local, como radiação solar, temperatura, velocidade do vento, umidade relativa do ar, entre outros (OH, TAMIZHMANI, PALOMINO, 2010). A eficiência elétrica dos painéis FVs é inversamente proporcional ao aumento da temperatura do equipamento FV. Por exemplo, em células de silício cristalino, a cada grau Celsius de temperatura acrescida a V_{OC} decai cerca de 0,37% enquanto I_{SH} aumenta cerca de 0,5%, sendo que a P_{SAIDA} do módulo se degrada cerca de 0,5% nesse processo de aquecimento contínuo. Em tecnologias de filmes finos esse

decaimento pode chegar a 0,21% a cada grau de temperatura aumentado (KING, et al., 1997, apud KAYAL, 2009).

Além do conforto para seus ocupantes e do apreço estético, os sistemas BAPVs e BIPVs abrangem questões ambientais e estruturais. Entre os fatores ambientais, a radiação solar que incide na edificação, bem como a temperatura média sazonal no local, as condições climáticas locais e o sombreamento das estruturas devido à presença de árvores próximas e à latitude do local atuam na orientação e na inclinação ideal do sistema BIPV. Os fatores estruturais englobam os requisitos de energia de um edifício (demanda) que influenciam o tamanho do sistema e os requisitos de operação e manutenção do sistema FV. Sendo assim, todos esses fatores devem ser levados em consideração durante os estágios do projeto à medida que o objetivo é alcançar o maior valor possível de eficiência energética para o sistema BIPV (EIFFERT, KISS, 2000).

Os processos de aquecimento por condução, convecção e radiação também contribuem para o desempenho térmico da edificação e para a eficiência elétrica dos módulos FVs. Dessarte, cada tipo de material utilizado no envelope construtivo, incluindo telhados e paredes associados aos painéis FVs, contribuem, de certa forma, para a efetividade do sistema FV. O espaço entre a edificação e o módulo FV, *gap*, para as fachadas possui uma eficácia mais impactante ao comparar os efeitos dessas mesmas lacunas nos terraços ou telhados (PARK, KIM, LEIGH, 2014), (PENG, YANG, 2016).

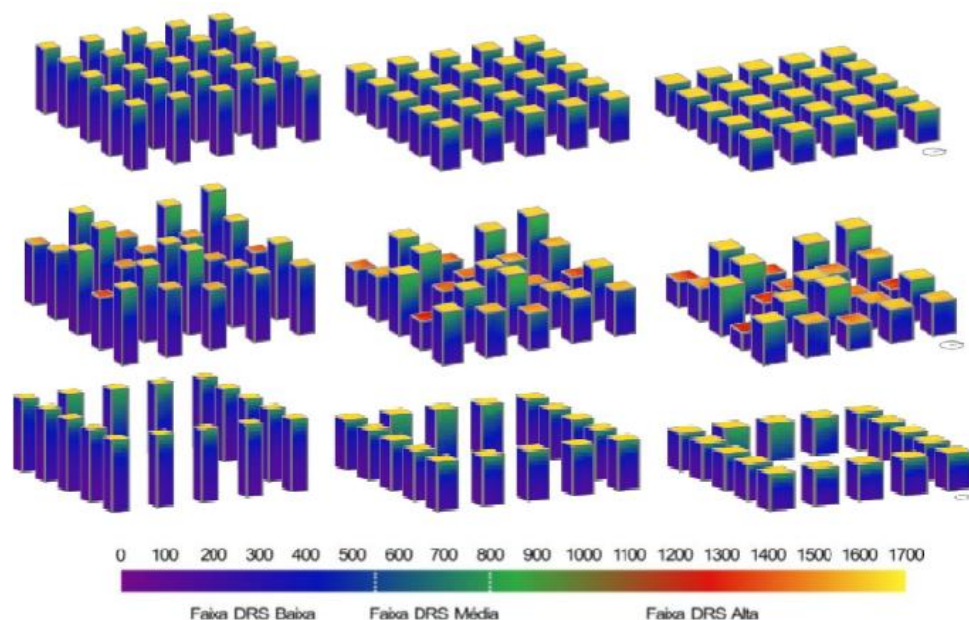
As coberturas dos edifícios em plano horizontal possuem o melhor aproveitamento de radiação solar, segundo o estudo elaborado por Silvestre e Pereira (2014). No caso avaliado pelos autores, foi identificado que os edifícios simulados podem ter tecnologias FVs associadas em suas envoltórias, tanto nas laterais quanto nas partes superiores, pois a localização de cada um exerce influência direta no aproveitamento solar pelos módulos FVs. Contudo, ao comparar a produtividade das fachadas com relação aos telhados, esses espaços possuem produtividade abaixo de 50%. A demanda oriunda do local de instalação dos sistemas BIPVs também é um fator importante a ser ponderado nas análises que focam na eficiência dos módulos FVs. Outro princípio importante ao avaliar os sistemas BIPVs é a sazonalidade das estações ao longo do ano. No verão, a média diária de kWh/m²/dia alcança valores significativos nos três edifícios estudados,

em contrapartida, no inverno, apresenta os números de menor alcance para a quantidade de energia produzida por metro quadrado em um dia.

Ao considerar que a inserção dos sistemas BAPVs e BIPVs ocorrem em cidades e grandes metrópoles, a configuração urbana, portanto, tem papel fundamental em sua eficiência energética. O entorno construído atua diretamente no sombreamento enfrentado por edifícios que são elaborados, em grande parte, sem a ideia de aproveitamento dos raios solares para fins de conversão fotovoltaica ou térmica. Entretanto, a disponibilidade dos espaços em edificações deve ser avaliada concebendo a demanda pontual para que, conseqüentemente, sejam otimizadas as partes prediais para receber os coletores solares. A conjuntura urbana e seu progressivo adensamento, torna-se um quesito fundamental e deve ser inserido nas articulações desenvolvidas no contexto dos sistemas FVs em edificações (GAVIRIA, MIZGIER, PEREIRA, 2013).

Através das simulações elaboradas por Gaviria, Mizgier e Pereira (2013) e ilustradas pela Figura 20, é possível identificar três tipologias urbanas em que os autores realizaram algumas simulações. Os módulos FVs utilizados pelos autores nos testes efetuados são constituídos de silício policristalino aderidos em superfícies opacas. As três configurações urbanas analisadas são: uniforme, mista e com o miolo de quadra. Para cada agrupamento de edificações alguns resultados foram obtidos e demonstraram que para os cenários uniformes e mistos a incidência de radiação no envelope construtivo, fachada e telhado, são similares. Entretanto, salienta-se que o desempenho de cada prédio obedece uma relação particular e restrita ao próprio local. No caso do cenário com miolo de quadra as fachadas voltadas para o centro obtiveram melhores resultados do que a face orientada para o norte. Ademais, as coberturas foram os espaços com maior potencial de incidência solar para associação de módulos FVS, no entanto, as fachadas também se comportaram positivamente para a utilização direcionada ao aproveitamento fotovoltaico.

Figura 20 – Configurações urbanas e seus respectivos potenciais de aproveitamento da radiação solar incidente para aplicação de módulos FVs.



Fonte: adaptado de GAVIRIA, PEREIRA, MIZGIER, (2013).

A forma como um edifício é posicionado em relação ao sol influencia diretamente no desempenho térmico e energético do mesmo. O azimute, ou desvio do sul verdadeiro, tem um efeito similar ao da inclinação (adotada para fixação dos painéis FVs) ao se considerar a produção de energia pelos sistemas BAPVs e BIPVs (KAYAL, 2009). O comportamento disperso das superfícies da edificação para associação, ou integração, com módulos FVs também indica que a orientação é um parâmetro importante ao relacionar demanda e geração de energia nessas edificações. Tanto a orientação quanto a inclinação do edifício contribuem diretamente para a geração efetiva de energia. Uma vez que existe uma dependência direta dessa produção com a incidência da radiação solar direta, difusa e do albedo³, que é a reflexão dos raios nos arredores, traçar as faces de uma construção para o melhor usufruto das tecnologias FVs também corrobora para a eficiência energética da edificação (RÜTHER, 2004), (GAVIRIA, PEREIRA, MIZGIER, 2013), (MOUSA, 2014), (ZOMER, 2014).

Antoniolli et al. (2016) propuseram um trabalho avaliando vinte residências do estado de Santa Catarina, no Brasil, cujos autores verificaram duas possíveis

³ Albedo – trata-se de uma fração da radiação solar que atinge à superfície terrestre e é refletida pelo ambiente local (como obstáculos, vegetação, solo, terrenos rochosos (PINHO, GALDINO, 2014)).

associações de módulos FVs a essas construções. Assim, partindo do princípio da máxima geração anual, com a melhor inclinação para captação da radiação solar, e da integração efetiva dos painéis FVs ao envelope construtivo das residências, respeitando a inclinação local. Durante o processo, foram verificadas as premissas econômicas e o retorno do investimento requisitado para os sistemas BAPVs idealizados. Para as construções contendo coberturas com desvio azimutal de $\pm 90^\circ$ houve redução de 10% na produtividade do sistema BAPV ideal, previamente simulado e idealizado. Já os sistemas BAPVs com inclinação em torno de -12° à 18° e desvio azimutal em zero, a geração de energia decaiu cerca de 3%. Portanto, a inclinação a qual um sistema BAPV é imposta interfere diretamente em seu potencial de geração de energia.

Em um estudo realizado por Kayal (2009), a autora demonstra que, para módulos FVs posicionados de forma vertical com orientação do sul para o sudeste/sudoeste, a produção de energia cresce cerca de 10%, ao se considerar kWh/ano. Para orientações voltadas ao leste-oeste, a geração de energia declina cerca de 8%. Em outro levantamento de dados proposto pela autora, aponta-se que módulos FVs posicionados à latitude com inclinação de 40° podem ter aumento em 28% de sua eficiência elétrica, quando comparados aos módulos fixados a 90° para a cidade de Nova York (EUA). No entanto, esse comportamento não é o mesmo durante todo o ano. O ângulo de inclinação também é proporcional à quantidade de luz solar difusa incidente, pois a radiação difusa é menos dependente da direção do fluxo de luz. A partir dessa lógica, as áreas com condições de meio sol, por exemplo, a eficácia da inclinação será reduzida.

Para os geradores FVs o sombreamento é um ponto crítico. A dispersão da luz em módulos FVs deve ocorrer de forma homogênea para que a produção de energia seja satisfatória. As obstruções causadas por elementos urbanos como postes, árvores e outras edificações, antes, podem ocasionar sombras em uma célula FV que, estando conectadas as outras células resultarão em uma redução significativa no rendimento do módulo FV ($P_{SAÍDA}$). O sombreamento parcial, ou total, é um dos principais agravantes ao abordar a integração/aplicação de módulos FVs em edificações (RÜTHER, 2004), (KAYA, 2009). O adensamento urbano, muito frequente nas grandes metrópoles, acaba por favorecer o surgimento de obstruções severas em muitas construções, impedindo, então, o aproveitamento da radiação solar no local (ZOMER, 2014).

Nas primeiras horas do dia e nas últimas horas da tarde, os índices de sombreamento tendem a ser maiores do que no restante do dia, conforme proposto por ZOMER, (2014). Nas simulações realizadas pela autora foi constatado que, se uma parte do arranjo fotovoltaico, cerca de 50% é sombreada logo pela manhã, esse evento não prejudica o rendimento energético do mesmo. Nessa perspectiva, o sombreamento afeta drasticamente a radiação direta que chega às células, contudo, ela não interfere significativamente na porção de radiação difusa. A autora utiliza dois edifícios como pontos de observação para explicar suas análises, sendo um presente na Universidade Federal de Santa Catarina e outro na cidade de Cingapura. Os métodos e simulações adotados pela estudiosa mostraram que o índice de sombreamento anual nas localidades foi satisfatório para prever a geração de energia por sistemas BIPVs com sombreamento parcial.

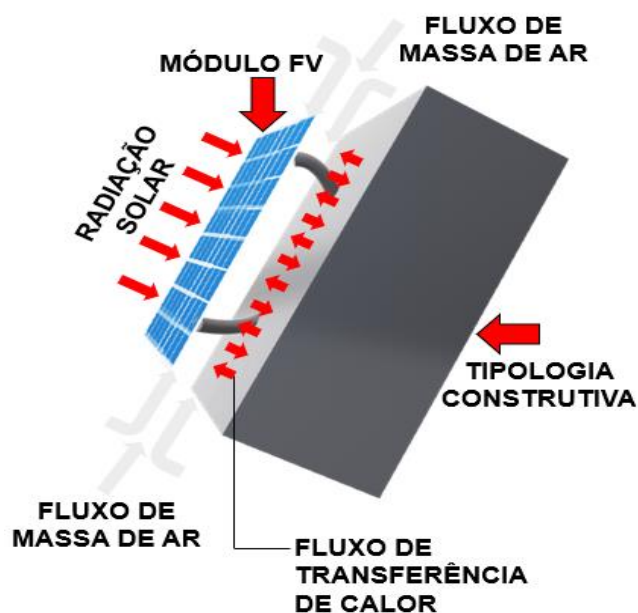
A temperatura de operação (T_{OP}) das células está atrelada à localização do edifício bem como às condições ambientais e climáticas regionais (KAYAL, 2009). A T_{OP} nos casos dos sistemas BIPVs podem alcançar valores muito superiores aos citados nas condições padrões de teste (STC) e no padrão NOCT, haja vista o contato estabelecido entre a edificação (telhado, fachada) com o módulo FV. Já nos sistemas BAPVs, a T_{OP} alcança patamares elevados por consequência dos locais de instalação dos módulos que são expostos continuamente ao ar livre. O desempenho elétrico do módulo FV degrada-se à medida que a T_{OP} se eleva. Outro fator importante é a vida útil desses equipamentos, pois também é comprometida por temperaturas elevadas. Desse modo, ao atingirem T_{OP} expressivas, a taxa de reação de vários mecanismos internos, incluindo as células FVs e as ligações intrínsecas, desgastam-se consideravelmente (NORDMANN, CLAVADETSCHER, 2003), (SCHAMS, TAMIZHMANI, 2011).

Para os sistemas BAPVs, além da aplicação direta dos módulos FVs diretamente à tipologia construtiva, as lacunas colocadas entre esses elementos também podem exercer influências e danificar ainda mais o processo de conversão fotovoltaica para sistemas projetados de maneira equívoca. Em contrapartida, se as premissas elaboradas abrangendo os parâmetros naturais da edificação (localização, orientação, inclinação) são utilizados em prol da eficiência energética local, essas mesmas lacunas podem favorecer o esfriamento das células FVs, evitando, assim, o aquecimento do

sistema BAPV/BIPV (NORDMANN, CLAVADETSCHER, 2003), (SCHAMS, TAMIZHMANI, 2011), (PENG, YANG, 2016).

O processo de transferência de calor em um sistema BAPV é demonstrado através da ilustração contida na Figura 21. De maneira específica, esse caso detém uma estrutura de sustentação para fixação do módulo FV à tipologia construtiva. A incidência da radiação solar provoca dois efeitos de aquecimento no sistema BAPV, sendo que esse processo afeta tanto o módulo FV quanto a tipologia construtiva. Esse evento é resultado dos regimes de transferência de calor por convecção e radiação, ambos explicados acima. O espaço oriundo da estrutura de fixação do sistema BAPV pode ser benéfico para algumas edificações, partindo do princípio de que esse espaço foi projetado para receber os módulos FVs satisfatoriamente, favorecendo a circulação de ar entre módulo FV e fachada/teto da edificação. Por isso, o fluxo de massa de ar e o vento que percorrem nesse espaçamento tende a amenizar a ocorrência de valores elevados de temperatura em ambas partes do sistema BAPV.

Figura 21 – Exemplificação dos processos de transferência de calor e incidência de massa de ar em um sistema BAPV.



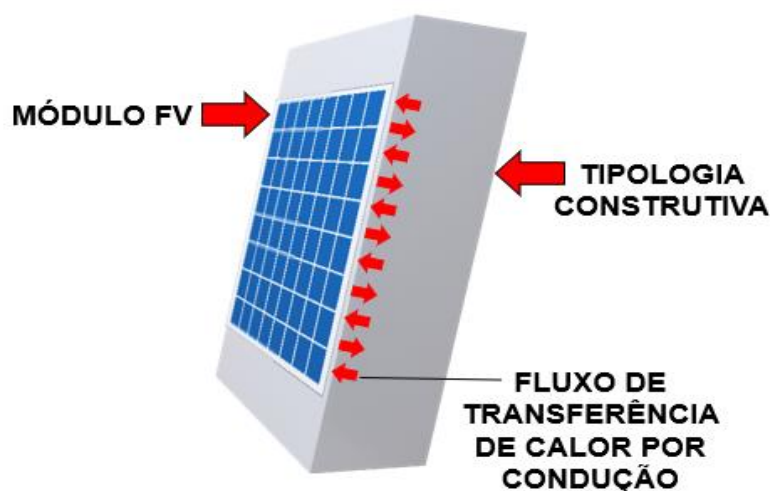
Fonte: adaptado de TRINURUK, SORAPIPATANA, CHENVIDHYA (2009).

Além da associação mais comum dos módulos FVs, como é proposto pela ilustração da Figura 21, em alguns casos, o equipamento FV pode ser aplicado, diretamente, sobre

o envelope construtivo, seja no telhado ou mesmo ao concreto (paredes, pilastras e afins). Como apontado, o arranjo FV em condições ambientais e climáticas específicas alcança valores consideravelmente altos na temperatura de operação das células FVs.

Ao abordar o sistema BIPV, esse fato pode ocasionar, no elemento construtivo integrado ao módulo FV, distúrbios térmicos oriundos das altas temperaturas atingidas pelos elementos fotovoltaicos. Conseqüentemente, por meio dos processos de condutividade térmica dos materiais integrados à conjuntura FV e também à edificação, o componente construtivo também pode se aquecer consideravelmente. Para exemplificar esse evento, a Figura 22 apresenta o processo de transferência de calor por contato direto estabelecido entre as partes componentes do sistema BIPV.

Figura 22 – Exemplificação da troca de calor por condução presente em um sistema BIPV.



Fonte: autor.

Sendo assim, é de se esperar que, apesar de promissor, quando analisado o contexto da infraestrutura urbana com suas complexidades e demandas, ambas configurações sistêmicas, BAPV e BIPV, provocam diferentes impactos voltados à eficiência elétrica dos módulos FVs, ou mesmo ao desempenho térmico da envoltória construtiva. Logo, essas novas tipologias construtivas trazem novas perspectivas para análises e estudos que podem favorecer a identificação das melhores tecnologias fotovoltaicas a serem utilizadas para confecção desses sistemas. Ou ainda, apontar qual o tipo de sistema é o mais adequado para implementação, considerando a configuração climática, ambiental e urbana do local almejado.

Desta forma, ao traçar as premissas adequadas, os sistemas BAPV e BIPV podem angariar ricos resultados de eficiência energética e ainda beneficiar o desempenho térmico da edificação. Além das aplicações às partes construtivas como fachadas e telhados, outros elementos podem receber as células FVs em aplicações, ou integrações produtivas. Entretanto, a compreensão adequada do comportamento térmico desses sistemas pode propiciar implementações mais acertivas dos módulos FVs ao envolvente construtivo. Sendo assim, esse trabalho objetiva-se em averiguar a relação existente entre a eficiência dos sistemas BAPV e BIPV, considerando a dinâmica climática local, bem como o tipo de associação e integração dos módulos FVs ao elemento construtivo, analisando ainda diferentes tipos de tecnologias de células FVs.

2.5.4.2 *Aplicação de células FVs em elementos da construção civil*

Uma das formas de espalhar os conceitos dos sistemas BAPVs e BIPVs na grande área da construção civil é a aplicação ou a integração das células FVs diretamente nos materiais adotados na confecção dos empreendimentos. A partir das novas concepções das células fotovoltaicas, como é o caso das células orgânicas é importante salientar que um mercado amplo de oportunidades surge e tende a corroborar com a disseminação dessas tecnologias em um dos setores que mais consome energia e produz resíduos ao redor do mundo. Uma vez que as novas tecnologias fotovoltaicas trazem propriedades físicas mais harmônicas e características visuais mais interessantes, a inserção delas pode se dar em diferentes partes do envelopamento construtivo. As fachadas com seus diferentes materiais, ou mesmo os telhados, com suas diversas composições, podem receber as células FVs de forma satisfatória, colaborando, assim, com a eficiência energética local e também para a reduzir a emissão de gases poluentes do efeito estufa (edifícios de emissão zero, EEZ).

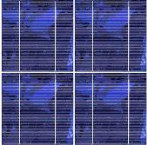



Os sistemas BAPVs são considerados as principais aplicações dos módulos FVs no setor da construção civil (OH, TAMIZHMANI, PALOMINO, 2010). Alguns materiais utilizados em edificações contendo sistemas BAPV e BIPV são apresentados na

Tabela 5. Tradicionalmente, os painéis são aplicados à envoltória da edificação por meio de estruturas concebidas após a construção pronta, no caso do BAPV. Entretanto, com o desenvolvimento da indústria vinculada à elaboração de células FVs, pode-se idealizar esses elementos como partes da construção, substituindo, ou mesmo sendo introduzidas aos elementos comuns (portas, janelas, claraboia, etc.). Nesse caso, o edifício caracteriza-se como BIPV.

Neste contexto, são utilizados módulos da primeira geração, constituídos de c-Si, mc-Si e pc-Si. Somada a participação desses equipamentos, identifica-se que eles são mais presentes no setor da construção civil, correspondendo, aproximadamente, a mais de 85% das tecnologias FVs encontradas nesses espaços. Outras tecnologias como os filmes finos, inseridos na segunda geração de células FVs, aparecem no cenário das edificações com participação de 10,3%. Assim, observando a terceira geração de células FVs, as células orgânicas, têm-se a presença de apenas 0,1% delas nesse setor, sendo que essa participação pode ser alavancada com a consolidação do mercado e das técnicas de aplicação dos elementos FVs em edificações (FARKAS, ANDRESEN, HESTNES, 2012).

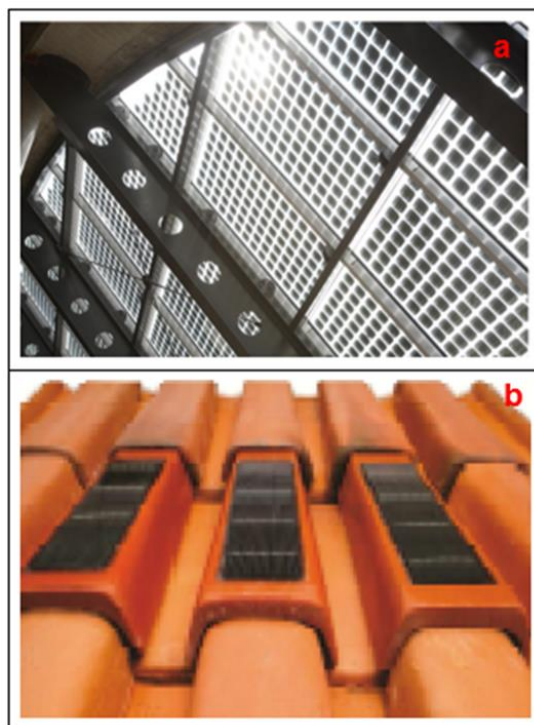
Costumeiramente, como elementos construtivos presentes nas fachadas dos edifícios têm-se o vidro e os materiais adotados para elaboração de telhas. A imagem representativa da Figura 23 (a) apresenta o vidro fotovoltaico. Trata-se, nessa perspectiva, da aplicação direta das células fotovoltaicas sobre duas camadas de vidro, previamente preparados para absorção dos raios solares. O espaçamento entre as células FVs também é importante para garantir a luminosidade dentro do ambiente, favorecendo o conforto visual dos ocupantes. Outra aplicação das células FVs é apresentada na ilustração da Figura 23 (b) onde as células estão diretamente associadas às telhas. Por meio de processos específicos de fabricação, as telhas foram otimizadas para melhorar o desempenho térmico, uma vez que, ao integrar às células em sua superfície, foi possível obter resultados positivos de geração de energia nos terminais das células FVs (BODON, PELEGRINI, HEEMANN, 2013).

Tabela 5 – Características das células FVs encontradas em edifícios contendo sistemas BAPV e BIPV.

Tecnologia	Sobreposição de Camadas	Filmes Finos		Células Orgânicas
Material Semicondutor	silício			TiO ₂
Composição química	<p>c-Si</p> 	<p>pc-Si</p> 	<p>a-Si</p> 	
Eficiência das Células (STC)	16 - 17%	14 - 15%	5 - 7%	4 - 5%
Retorno de Investimento	2, 3 ou 5 anos	2 à 3 anos	0,8 à 1 ano	-
Aderência no mercado da construção civil	42,2%	45,2%	10,3%	0,1%
Características da Célula	superfícies homogêneas			translúcidas
Características do Painel	células padronizadas na coloração, tamanho e propriedades		flexíveis com reflexão óptica	Flexíveis com reflexão óptica

Fonte: adaptado de (FARKAS, ANDRESEN, HESTNES, 2012).

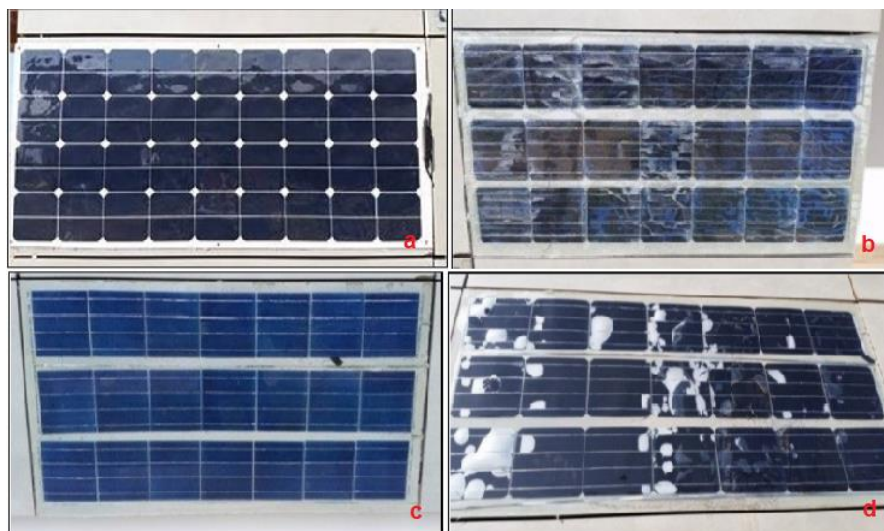
Figura 23 – Exemplos de Sistemas BIPVs integrados à cobertura em teto modular (a) e em telhas de cerâmica (b).



Fonte: adaptado de BODON, PELEGRINI, HEEMANN, (2013).

Com o intuito de avaliar a aplicação de módulos FVs a elementos da construção civil, Rosso et al. (2018) desenvolveram uma metodologia englobando diferentes tecnologias fotovoltaicas inseridas em componentes cerâmicos. As imagens trazidas pela Figura 24 mostram a integração dos módulos FVs em blocos cerâmicos. As células FVs adotadas nas configurações dos módulos das Figura 24 (a), (b) e (d) foram elaboradas com mc-Si. Já o módulo da Figura 24 (c) foi confeccionado com células de pc-Si. O intuito do trabalho foi avaliar o comportamento dos sistemas BIPVs quando aplicados às intempéries do ambiente aberto. Ao comparar os módulos FVs após um certo período de tempo, identificou-se que, em um dos casos, (Figura 24(d)) houve o surgimento de bolhas internas no equipamento, gerando, inclusive, algumas fissuras grandes o suficiente para expor as células sem nenhuma proteção. O projeto elaborado pelos autores considerou superfícies ventiladas, permitindo, então, constatar-se que elas são produtivas do ponto de vista elétrico, além de propiciar a integração dos módulos FVs ao envelope construtivo.

Figura 24 – Protótipos contendo sistemas BIPVs (módulos FVs com revestimentos cerâmicos) colocados em campo para coleta de dados; (a), (b), (d) – células FVs de mc-Si; (c) – células de pc-Si.



Fonte: adaptado de Rosso et al. (2013).

2.5.4.3 Normas voltadas ao desempenho térmico em edificações

Dentre outras vantagens, os sistemas BAPV e BIPV ajudam a minimizar os impactos ambientais originários das construções em geral, que produzem demasiada emissão de gases do efeito estufa, bem como consomem energia progressivamente. Salienta-se que as normas inerentes ao contexto das edificações ainda não contemplam os módulos FVs enquanto elemento construtivo (BIPV), ou mesmo como elemento adicional ao envolvente construtivo (BAPV). Logo, as análises e estudos direcionados as diversas contribuições desses sistemas as edificações corroboram com a expansão do tema, mesclando os conceitos de eficiência energética desses espaços condierando o dinamismo das aplicações BAPV e BIPV.

Além de todas as questões energéticas e tecnológicas propiciadas pelos BAPV e BIPV, as construções que recebem esse tipo de equipamento devem garantir que impactos negativos não sejam gerados no desempenho térmico de sua envoltória. Nos casos onde o método adotado é a integração, BIPV, o comportamento térmico desse

sistema deve ser dotado de mecanismos que amenizem o impacto proveniente das altas temperaturas das células FVs. Sendo que essa elevação de temperatura pode ser transferida ao elemento construtivo, desequilibrando o movimento natural de troca de calor entre a envoltória construtiva e o meio ambiente. A aplicação dos módulos FVs nas fachadas e tetos é possível pelas estruturas de sustentação auxiliares que garantem a inclinação adequada e maior aproveitamento da radiação solar. A troca de calor com o entorno, para o caso do sistema BAPV, pode ocorrer de forma mais adequada.

Para garantir a qualidade do ambiente interno das edificações, frequentadas, habitadas ou utilizadas para fins trabalhistas algumas normas disponibilizam mecanismos para averiguação do desempenho térmico desses espaços. A NBR 15220-3 (2005), por exemplo, explana sobre o desempenho térmico em edificações por meio do zoneamento bioclimático brasileiro. Essa norma esboça diversas diretrizes para otimização de espaços construtivos utilizados como habitação, para residências ou prédios e construções com interesse social.

A NBR 15220-3 divulga uma série de recomendações quanto ao desempenho térmico de habitações e edificações no geral, onde essas diretrizes se aplicam à fase do projeto. A norma percorre todo o território nacional brasileiro estabelecendo o zoneamento bioclimático de cada região, detalhando métodos e estratégias de condicionamento térmico passivo. A NBR 15220-3 baseia-se em diferentes parâmetros e condições de contorno que são adotados como valores fixos.





A NBR 15220-3 padroniza as recomendações direcionadas às edificações voltadas à ventilação das partes construtivas. Também apresenta as diretrizes construtivas referentes à transmitância térmica (U), atraso térmico (ϕ (h)), capacidade térmica (CT) e fator de calor solar para o envolvente construtivo, fachadas laterais e cobertura (FS_o). Essa norma disponibiliza os valores associados para alguns materiais adotados em edificações para os termos citados. Por exemplo, para a cerâmica, concreto, madeira e lã de vidro os valores para U são 0,90; 1,75; 0,14 e 0,045, respectivamente. Outras especificidades de alguns materiais são demonstradas através da Tabela 6 que aborda, resumidamente, algumas características vinculadas às paredes e às coberturas em edificações.

Outra proposição para análise do desempenho térmico em edificações é detalhada pela NBR 15575-5 (2013). Especificamente, três partes trazidas pela norma contém termos e temáticas que podem incorporar sistemas BAPV e BIPV, tratando da aplicação, ou da integração dos módulos FV ao envólute construtivo. A Parte 2 contempla os requisitos necessários aos sistemas estruturais A Parte 4 aborda os requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas (SVVIE), enquanto a Parte 5 introduz os requisitos para os sistemas de cobertura. Essencialmente, a NBR 15575-5 instrumenta os profissionais do setor da construção civil com técnicas efetivas para garantir construções de qualidade para seus ocupantes.

A NBR15575-2 aborda os requisitos para o desempenho estrutural das construções em geral. A construção deve obedecer aos critérios estruturais de segurança, assegurando que a estrutura seja duradoura e que não apresente deformações ou avarias. Portanto, para as edificações contendo os sistemas BAPV e BIPV se faz necessário avaliar o impacto das estruturas dos sistemas fotovoltaicos à estrutura da edificação. Como esses sistemas possuem dimensões e peso expressivos, análises preliminares e simulações devem garantir que nenhum dano será causado à estrutura da edificação. Especificamente, os sistemas BAPVs aplicam-se à norma NBR 15575, já que eles utilizam estruturas de sustentação e fixação específicas para sua aplicação.

A NBR 15755-4 padroniza os requisitos necessários para as paredes, internas e externas de uma edificação formando assim o sistema de vedação da edificação. A NBR 15755-4 fundamenta-se na NBR 15755-2, onde as partes vedativas da edificação com funcionalidade estrutural devem ser construídas de forma a garantir a segurança e estabilidade dos ocupantes. Entretanto, essa norma também não abrange os sistemas fotovoltaicos enquanto partes constituintes das edificações. Principalmente, o sistema BIPV, que substitui elementos construtivos comuns, não é apontado pela norma em suas diretrizes. Uma vez que o cenário voltado as edificações transforma continuamente, introduzindo novos conceitos e materiais, as padronizações fornecidas pela NBR 15575-4 não são suficientes para guiar projetos de sistemas BAPVs e BIPVs.

Tabela 6 – Valores de referência para transmitância térmica e capacidade térmica para paredes e coberturas em edificações.

	Descrição	U W/(m ² .k)	CT kJ(m ² .k)
PAREDE			
	Parede de concreto maciço. Espessura total da parede: 5,0 cm.	5,04	120
	Parede de concreto maciço. Espessura total da parede: 10,0 cm.	4,40	240
COBERTURA			
	Cobertura de telha de barro, lâmina de alumínio polido e forro de madeira. Espessura da telha: 1,0 cm. Espessura da madeira: 1,0 cm.	1,11	32
	Cobertura de telha de barro, lâmina de alumínio polido e laje de concreto de 25 cm. Espessura da telha: 1,0 cm.	1,03	568

Fonte: adaptado de ABNT NBR 15220-3 (2005).

A NBR 15575-5 (2013) trata das premissas para os sistemas de cobertura (SC) em edificações. Os SCs são as partes mais expostas à radiação solar exercendo assim papel predominante na carga térmica dos ambientes locais. As coberturas interferem diretamente no conforto térmico dos usuários e têm impacto direto no consumo de energia da edificação. As condições ambientais e meteorológicas também atuam nos SCs diretamente. A NBR 15575-5 também não possui os módulos FVs contemplados em suas diretrizes e padronizações. Apesar do crescimento dos sistemas BAPV e BIPV como meio habitacional, essa ampla norma brasileira ainda não aborda o tema das fontes alternativas de energia juntos à construção civil.

O INMETRO disponibiliza através da portaria Nº 50 de 2013 um catálogo amplo contendo as propriedades térmicas para os elementos componentes do envolvente construtivo. Essa portaria complementa as informações direcionadas à avaliação do desempenho térmico em edificações, e ainda concebe a atualização do Programa de

Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações Residenciais (Portaria Nº 122). A

Tabela 7 esboça alguns dos elementos construtivos contemplados pela portaria Nº 50. Destaca-se que o catálogo apresenta as devidas técnicas de aplicação para diferentes componentes utilizados para confecção de paredes e cobertura. Entretanto, os módulos FVs ainda não participam da cartilha fornecida pelo INMETRO.

Tabela 7 – Valores para condutividade térmica (U) e capacitância térmica (CT) para diferentes tipos de materiais associados às fachadas e às coberturas.

	Descrição	U W/(m ² .k)	CT kJ(m ² .k)
PAREDE			
	Argamassa interna (2,5 cm); bloco cerâmico (14x19x29,0 cm); argamassa externa (2,5 cm); pintura externa.	2,46	150
	Parede de concreto maciço. Espessura total da parede: 10,0 cm.	4,40	240
COBERTURA			
	Laje maciça (10,0 cm) com câmara de ar (> 5 cm) e telha cerâmica	2,05	238
	Laje maciça (10,0 cm) sem telhamento.	3,73	220

Fonte: adaptado de Portaria Inmetro Nº 50 (2013).

3. Revisão Bibliográfica

Na literatura, constam trabalhos que avaliam a conjuntura fotovoltaica a partir de diferentes premissas considerando que os módulos FVs têm seu funcionamento influenciado por fatores e parâmetros, por conseguinte, diversas premissas são traçadas para avaliação do desempenho desses equipamentos. Essencialmente, os módulos FVs quando expostos ao ambiente são instigados pela configuração climática local, uma vez que fatores como temperatura do ar, umidade relativa e massas de ar, por exemplo, exercem papel fundamental no processo de conversão fotovoltaica das células. Assim, prosseguindo com a própria evolução do cenário fotovoltaico mundial, ao passo que os módulos FVs são inseridos em edificações, outras questões tornaram-se atuantes no desempenho dos mesmos. A temperatura de operação das células FVs (T_{OP}), além da influência dos parâmetros ambientais e climáticos, também é favorecida pela localização da edificação, bem como pela orientação e inclinação desse espaço. Logo, os sistemas BAPVs e BIPVs possuem diferentes contribuições para o real desempenho dos módulos FVs.

A eficiência elétrica dos módulos FVs são analisados utilizando diferentes técnicas e metodologias. Cada proposta favorece interpretações do funcionamento desses equipamentos em condições reais de trabalho quando inseridos no contexto dos sistemas BAPV e BIPV. Em alguns casos, é possível interpretar a efetiva atividade desses equipamentos observando a carga associada ao sistema FV e contemplando os usuários que serão beneficiados pela geração fotovoltaica (RÜTHER, 2004). Em outras análises, a carga não é alvo de estudo, contudo, a maneira como os módulos respondem a uma série de características específicas são abordadas. Para a determinação do comportamento térmico dos módulos e sua respectiva participação na eficiência apresentada por ele, algumas técnicas podem contribuir com as respectivas análises, abrangendo, inclusive, os sistemas BAPV e BIPV como as aplicações dos módulos FVs (DAVIS, FANNEY, DOUGHERTY, 2001), (TRINURUK, SORAPIPATANA, CHENVIDHYA, 2009), (PARK, KIM, LEIGH, 2014).

Sendo assim, a revisão bibliográfica proposta nesta obra esboça os principais fatores contribuintes para a eficiência dos sistemas BAPV e BIPV. Ao considerar a abordagem sistêmica dessas aplicações, além dos parâmetros climáticos e ambientais levantados, a forma como o módulo FV é aplicado, ou integrado ao elemento construtivo também é considerada como ponto crítico para a efetividade da geração de energia por esses sistemas. Portanto, a forma como o módulo FV é fixado às fachadas e aos telhados das edificações proporciona contribuições aos processos de transferência de calor entre as partes constituintes dos sistemas BAPV e BIPV. Para que as análises acerca do comportamento térmico desses sistemas possam ser efetuadas, neste capítulo são apontadas diferentes métodos que auxiliam na coleta de dados envolvendo tanto a eficiência elétrica dos módulos FVs quanto o desempenho térmico da envoltória construtiva onde os mesmos são aplicados e/ou integrados.

3.1 Fatores e parâmetros contribuintes para o desempenho de módulos FVs

O potencial de produção de energia de módulos FVs está associado a diferentes fatores que englobam as peculiaridades climáticas de cada região estudada, bem como as características técnicas do equipamento. A eficiência das células FVs, analisando os parâmetros elétricos como tensão (V), corrente (A) e potência (W), depende, essencialmente, da T_{OP} das células. Para cada tipo de célula FV há uma resposta de eficiência na análise da $P_{SAÍDA}$ (SINGH, RAVINDRA, 2012). Nesse contexto, é possível observar como fatores meteorológicos são importantes ao avaliar a geração de energia. Entretanto, a T_{OP} alcançada pelos módulos também deve ser considerada nas análises. Essa T_{OP} dos módulos FVs é resultado das propriedades térmicas dos componentes do equipamento, tais como as próprias células FVs, o vidro temperado, os materiais encapsulantes, *back sheets*, e afins (KOEHL, et al., 2011).

A forma como a radiação solar chega ao plano terrestre contribui e influencia diretamente na eficiência dos módulos FVs (NEVES, 2016). A eficiência energética de módulos e painéis fotovoltaicos é disponibilizada pelos fabricantes, considerando as

STC. A potência máxima (P_{MP}), ou potência de pico (W_P), associada a cada equipamento é estimada, sobretudo, ao conceber fatores ambientais e climáticos explícitos em valores fixos, determinados para situações de teste e protocolados pela STC, tais como: irradiância solar igual a 1000 W/m^2 (G_{SOLAR}); 1,5 massa de ar (AM); 25°C para temperatura de operação (T_{OP}) das células fotovoltaicas (BUDAY, 2011).

3.1.1 Influência da Temperatura de Operação das Células

A temperatura de operação das células FVs, T_{OP} , contribui diretamente para o comportamento térmico do módulo FV. Essa temperatura relaciona-se aos aspectos estruturais do equipamento, pois cada parte associada ao painel contribui para o aquecimento do equipamento, no geral (NORDMANN, CLAVADETSCHER, 2003), (TRINURUK, SORAPIPATANA, CHENVIDHYA, 2009). A ilustração apresentada na Figura 15 mostra o fluxo de calor inerente ao contato direto estabelecido pelas camadas de vedação e de proteção em um módulo FV. Desse modo, a forma como cada parte do módulo (vidro, material encapsulante, *teddlar*, revestimento de alumínio, etc.) absorve e transmite calor corrobora para que a T_{OP} também se eleve. Sendo assim, as condições climáticas, as propriedades elétricas e as condições de instalação dos módulos são outros fatores importantes ao avaliar o comportamento da T_{OP} (RAMOS, 2006), (TINA, SCROFANI, 2008), (WILCOX, 2013).

Como mencionado, as condições do ambiente são fundamentais nas análises da T_{OP} de células FVs. Entre alguns parâmetros importantes, é importante destacar a velocidade do vento, a direção do vento, a umidade relativa do ar e a radiação solar (DAVIS, FANNEY, DOUGHERTY, 2001). Em diferentes estudos, são utilizadas as condições de teste padronizadas (STC) para elaboração das verificações pertinentes ao comportamento da T_{OP} em módulos FVs. A T_{OP} , então, pode ser descrita conforme a Equação 10, cujo valor está associado à temperatura ambiente no local de instalação do módulo FV (T_a) e à variação das temperaturas dos elementos que compõem os módulos (ΔT) (WILCOX, 2013).

$$T_{OP} = T_a + \Delta T \quad (10)$$

A T_{OP} das células FVs varia conforme os três fenômenos de transferência térmica: condução, convecção e radiação. A convecção é causada pela temperatura ambiente (T_a), uma vez que um efeito aditivo é a convecção forçada, resultante do fluxo de massa de ar que tem um efeito de resfriamento. Tal efeito é influenciado, principalmente, pelas características de instalação do sistema fotovoltaico (em pé livre, teto plano, teto inclinado, fachada ou teto integrados). Em contrapartida, o fenômeno de condução expressa as transferências de calor entre as diferentes camadas dos módulos FVs (vidro, EVA, cell, *tedlar*). A transferência de calor a partir da radiação causada pela incidência de radiação solar é o fator mais influente na variação da temperatura das células fotovoltaicas. A T_{OP} do módulo FV aumenta 4,4°C quando a irradiação solar aumenta de 800 para 900W/m², elevando-se a 1°C quando a T_a aumenta 1°C, acrescentando, ainda, 0,5°C quando a umidade aumenta de 50% para 60%. De maneira oposta, a temperatura da célula fotovoltaica cai 3,3°C quando a velocidade do vento acelera de 1m/s para 2m/s (RAMOS, 2006), (TINA, ABATE, 2008).

Nesta perspectiva, o aumento da temperatura operacional das células FVs provoca dois efeitos nos parâmetros elétricos do módulo FV. A tensão produzida pelo efeito fotovoltaico (V) diminui e a corrente (I) eleva-se proporcionalmente. Como resultado, o potencial de geração de energia elétrica ($P_{SAÍDA}$) do equipamento é prejudicado, visto que há uma diminuição do ponto de máxima potência dos módulos, onde a conversão elétrica se degrada (BELTRÃO, 2008), (PINHO, GALDINO, 2014), (DUBEY, SARVAIYA, SESHADRI, 2013).

Em termos práticos, os módulos FVs operam em situações diversas e que se diferenciam das condições delineadas pelas condições padronizadas de testes (STC) onde a T_{OP} deve estar em 25°C. Em casos de aplicações reais de trabalho, as células atingem valores expressivos de temperatura, em virtude disso, foi necessário estabelecer novos padrões para o comportamento desses compostos ao serem submetidos às condições ambientais e climáticas características (TRINURUK, SORAPIPATANA, CHENVIDHYA, 2009), (SANTOLIN, 2016).

3.1.1.1 Temperatura nominal de operação das células FVs (NOCT)

Para aproximar e aprimorar a forma como a temperatura se comporta em situações reais de trabalho em módulos FVs, um conceito foi padronizado e denominado como Temperatura Nominal de Operação da Célula (*Nominal Operating Cell Temperature – NOCT*). A NOCT aplica-se aos módulos ou painéis FVs implementados em ambientes externos e abertos. O modelo padronizado NOCT dispõe de técnicas que consideram a diferença entre a T_a e a T_{OP} uma função linear da radiação (DAVIS, FANNEY, DOUGHERTY, 2001). A norma IEC 61215 delimita alguns valores padrões para os ensaios que envolvem a avaliação de módulos FVs em que não há consumidores conectados à saída do sistema, sendo eles: irradiância (G_{SOLAR}) 800 W/m²; massa de ar 1,5 (AM); temperatura ambiente (T_{OP}) 20°C; velocidade do vento (V_{VENTO}) 1 m/s (LUQUE, HEGEDUS, 2003), (RAMOS, 2006), (SANTOLIN, 2016).

Outras padronizações internacionais incluem métodos para cálculo da T_{OP} sobre as condições operacionais NOCT. A EN-61215 aborda as tecnologias FVs constituídas por c-Si. A EN-61646 contempla as tecnologias de filmes finos. A ASTM E1036M abrange ambas as tecnologias citadas. Essas normas baseiam-se na diferença entre a T_{OP} e a T_a ($\Delta T = T_{OP} - T_a$) e não estão atreladas à temperatura do ar, dependendo, essencialmente, da radiação solar (NORDMANN, CLAVADETSCHER, 2003), (AMY, 2006 apud CANTOR, 2017). A Tabela 8 traz os valores apontados pela STC e pela NOCT, a título de comparação.

Tabela 8 – Comparação entre os valores apresentados pelas condições padrões de teste e para temperatura nominal de operação da célula.

Parâmetro	STC	NOCT
Irradiação solar (W/m ²)	1000	800
T_{OP} (°C)	25	20
V_{VENTO} (m/s)	-	1
AM	1,5	1,5

Fonte: autor.

Os módulos FVs são comercializados em países da Europa. Os fabricantes de módulos FVs fornecem as informações de funcionamento do equipamento mediante as condições propostas pelos padrões NOCT e STC. Essas informações incluem P_{MAX} , I_{SH} e V_{OC} (PINHO, GALDINO, 2014), (SANTOLIN, 2016). Ao expressar esses parâmetros em função da irradiância solar (G_{SOLAR}) cada termo obtém uma equação específica, considerando, ainda, a STC e a NOCT (RAMOS, 2006). Para aproximar o valor da T_{OP} das células, algumas técnicas podem ser utilizadas considerando a distribuição do calor no módulo FV de forma homogênea, sem acrescentar as propriedades de cada material inserido no equipamento, bem como as perdas elétricas inerentes às falhas do circuito elétrico que também não são abordadas nas hipóteses (DENOIX, et al. 2014).

A corrente de curto circuito (I_{SH}) é estimada como uma função linear, dependendo, proporcionalmente, da radiação solar. Portanto, ela pode ser expressa por meio da Equação 11. Onde I_{SH} é a corrente de curto circuito para um valor de radiação solar conforme a STC (1000 W/m^2); G a radiação solar incidente (LORENZO, et al., 1994 apud RAMOS, 2006).

$$I_{SC}(G) = \frac{I_{SC}(STC) * G}{1000 \text{ Wm}^{-2}} \quad (11)$$

A tensão de curto circuito (V_{OC}) está relacionada com a temperatura das células solares (T_{OP}) para módulos contendo células de m-Si e pc-Si. A Equação 12 apresenta os termos necessários para o cálculo da V_{OC} em função da T_{OP} , onde β é o coeficiente de variação da V_{OC} em função da temperatura. Trata-se de um coeficiente negativo em que o valor mais recorrente é $-2,3 \text{ mV/célula}^\circ\text{C}$ para células de c-Si (ou $-0,37 \text{ \%/}^\circ\text{C}$); as células de a-Si têm o valor característico em $-2,8 \text{ mV/célula}^\circ\text{C}$ (ou $-0,32\text{\%/}^\circ\text{C}^2$) (PINHO, GALDINO, 2014). Para uma determinada temperatura na célula, o valor de V_{OC} pode ser corrigido acrescentando o padrão STC, conforme a Equação 13.

$$\frac{dV_{OC}}{dT_{OP}} = -2,3 \frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}} = \beta \quad (12)$$

$$V_{OC}(T_{OP}) = V_{OC}(STC) - \beta * (T_{OP} - 25^\circ\text{C}) \quad (13)$$

Ainda, a T_{OP} das células FVs pode ser expressa em função da radiação solar incidente e da temperatura ambiente. A velocidade do vento, neste caso, deve ser maior que 1m/s. Logo, a Equação 14 expressa o comportamento da temperatura nas células.

$$T_{OP} - T_a = \frac{(\text{NOCT } (^{\circ}\text{C}) - 20^{\circ}\text{C})}{800\text{Wm}^{-2}} * G \quad (14)$$

Em sistemas BAPVs a T_{OP} pode alcançar valores significativos, uma vez que ela se refere ao contato estabelecido entre os módulos FVs e a superfície da edificação. Devido à localização e exposição contínua dos módulos FVs aos quesitos ambientais e climáticos, nessas aplicações, a T_{OP} pode alcançar valores muito altos. Essa temperatura será proporcional ao fluxo de radiação solar direta incidente nos módulos à temperatura ambiente no entorno, à umidade relativa do ar, dentre outros fatores (TRINURUK, SORAPIPATANA, CHENVIDHYA, 2009), (PENG, YANG, 2016), (BERARDI, NALDI, 2017), (WEN, et al. 2017).

3.1.1.2 O modelo da Sandia National Laboratories (SNL)

Com o intuito de aprimorar a padronização trazida pelo conceito NOCT, a *Sandia National Laboratory* (SNL), com o auxílio de um grupo de especialistas, criou um modelo para avaliar o desempenho das células FVs a partir da T_{OP} , agregando outros parâmetros aos cálculos (TRINURUK, SORAPIPATANA, CHENVIDHYA, 2009). A SNL é líder no desenvolvimento e aplicação de tecnologia fotovoltaica aplicadas à geração de energia. Dentre as tecnologias pesquisadas pelo laboratório têm-se os módulos de Silício cristalino, tecnologias de filmes finos, concentradores FVs e inversores. A SNL elabora e disponibiliza uma série de ferramentas e modelagens úteis no contexto das tecnologias fotovoltaicas, como partes do projeto do arranjo FV, ou mesmo para monitoramento do desempenho dos módulos (KLISE, STEIN, 2009).

A Equação 15 traz a relação dos parâmetros climáticos e ambientais onde a T_{OP} é o resultado dos cálculos entre eles. Onde: V_{VENTO} é a velocidade do vento em m/s; G_{SOLAR} a radiação solar; a e b são coeficientes determinados de forma empírica. Para valores

de V_{VENTO} constantes, a expressão $(a+b \cdot V_{VENTO})$ é análoga ao cálculo trazido pela Equação 14 dentro dos padrões de NOCT, uma vez que o valor padrão para o argumento da velocidade do vento é catalogado em 1 m/s (TRINURUK, SORAPIPATANA, CHENVIDHYA, 2009).

$$T_{OP} = G * e^{(a+b \cdot V_{VENTO})} + T_a \quad (15)$$

Assim, o modelo SNL é capaz de prever o comportamento da T_{OP} , adotando uma gama maior de fatores do que o modelo NOCT. Entretanto, ainda consiste em um método empírico de cálculo, pois as aplicações que aderem aos módulos FVs são influenciadas por outros fatores. No caso dos sistemas BIPVs e BAPVs as condições da edificação também são ponderadas nas análises pertinentes. O laboratório SNL fornece uma base de dados ampla com valores de coeficientes empíricos para vários tipos de células FVs e também para diversos tipos de instalação desses equipamentos. A diferença entre a temperatura obtida pelas células e a parte traseira dos módulos também é disponibilizada (TRINURUK, SORAPIPATANA, CHENVIDHYA, 2009).

A Tabela 9 resume algumas características dos valores associados aos coeficientes a e b para diferentes tecnologias de células FVs e para diversos pontos de fixação dos módulos em uma edificação. Onde ΔT_m é a variação da temperatura T_{OP} encontrada nas células e a temperatura atrás do módulo FV (TRINURUK, SORAPIPATANA, CHENVIDHYA, 2009).

Tabela 9 – Coeficientes empíricos fornecidos pelo modelo SNL para diferentes tipos de tecnologias FVs e locais de implementação.

Tipo de módulo FV	Ponto de aplicação do módulo FV	a	b	ΔT_m
vidro-célula-vidro	cremalheira aberta	-3,47	-0,0594	3
vidro-célula-vidro	próximo ao telhado	-2,98	-0,0471	1
vidro-célula- folha de polímero	cremalheira aberta	- 3,56	-0,0750	3
vidro-célula- folha de polímero	insolação traseira	-2,81	-0,0455	0
polímero-filmes finos-aço	cremalheira aberta	-3,58	-0,113	3

Fonte: TRINURUK, SORAPIPATANA, CHENVIDHYA, (2009).

3.1.2 Influência da temperatura ambiente

A temperatura ambiente (T_a) também é um fator primordial ao avaliar o desempenho de módulos FVs. Tal parâmetro é amplamente analisado na literatura, haja vista sua contribuição direta no comportamento dos átomos de Si presentes nas células FVs que interferem no fluxo de corrente promovido pelo efeito fotovoltaico (NORDMANN, CLAVADETSCHER, 2003). Não apenas nas células, mas em todo o módulo FV a T_a influencia diretamente nos parâmetros elétricos dos módulos. Logo, a temperatura ambiente afeta principalmente o parâmetro de T_{OP} , que é apontado nos padrões STC (25°C) e NOCT (20°C), em virtude da sua ampla contribuição para o funcionamento dos módulos. A T_a também é decorrente da configuração climática local, bem como da incidência de massa de ar (AM), da umidade relativa do ar (RH), mas, principalmente, da radiação solar (G_{SOLAR}) (DUBEY, SARVAIYA, SESHADRI, 2013), (PINHO, GALDINO, 2014), (CANTOR, 2017).

Se as condições ambientais do entorno onde os módulos FVs são aplicados são conhecidas, a diferença entre a T_{OP} e a T_a é proporcionalmente linear à radiação solar (G_{SOLAR}). Tendo conhecimento da velocidade do vento incidente nos módulos, a transferência de calor por condução e as perdas por convecção sendo constantes traduzem a NOCT como uma correlação entre a T_{OP} , a T_a e G_{SOLAR} (Equação 16). Ainda, se a parte traseira do módulo for fina com baixa resistência térmica, logo a T_{OP} das células FVs é aproximadamente similar à temperatura presente nessa parte do módulo ($T_{OP} \cong$ temperatura da parte traseira). O valor de NOCT geralmente é fornecido pelos fabricantes de painéis FVs (TRINURUK, SORAPIPATANA, CHENVIDHYA, 2009).

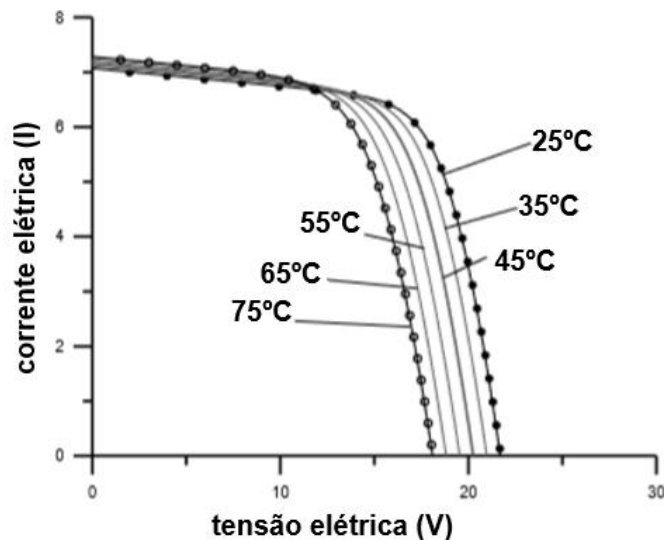
$$T_a = \left(\frac{(\text{NOCT } (^{\circ}\text{C}) - 20^{\circ}\text{C})}{800\text{Wm}^{-2}} * G \right) - T_{OP} \quad (16)$$

A temperatura superficial de uma célula fotovoltaica também está atrelada ao montante de corrente produzida. Para expressar a corrente de saída gerada (I_0) por um módulo FV em função da temperatura, faz-se necessário compreender a forma como os portadores intrínsecos do composto Sise comportam. Essencialmente, os parâmetros de

difusidade dos portadores minoritários e intrínsecos ao silício e à carga do elétron, respondem diretamente ao aumento da temperatura. A concentração dos portadores intrínsecos obedece à proporção de energia da banda proibida, uma vez que valores reduzidos de energia da banda GAP favorecem a concentração dos portadores intrínsecos aliada ao aumento da temperatura ambiente (T_a) (SANTOLIN, 2016), (CANTOR, 2017).

Para as características elétricas principais dos módulos FVs, I_{SH} e V_{OC} , o aumento da temperatura faz com que os elétrons vibrem de forma mais agitada, diminuindo a tensão interna. A I_{SH} eleva-se e a V_{OC} diminui. Para cada grau Celsius acrescido de temperatura, o valor adquirido pela I_{SH} não é proporcional ao valor da V_{OC} atingida. Nesse caso, a $P_{SAÍDA}$ no módulo FV reduz em, aproximadamente, 0,5% (SANTOLIN, 2016). O processo de queda de tensão para valores elevados de temperatura é apresentado no gráfico da Figura 25. Essa diminuição na V_{OC} não é compensada pelo aumento da I_{SH} . Para que a temperatura seja representada como parâmetro influente no desempenho de módulos FVs alguns coeficientes são apontados na literatura e contribuem para interpretar o comportamento elétrico do sistema FV perante variações térmicas (PINHO, GALDINO, 2014).

Figura 25 – Comportamento da tensão e da corrente elétrica para diferentes valores de temperatura ambiente.



Fonte: adaptado de PINHO e GALDINO (2014).

Com o intuito de averiguar a interferência da T_a nos módulos FVs, três coeficientes são abordados como argumentos importantes nessas discussões, considerando o padrão STC. São eles: β , que é o coeficiente de variação da tensão em circuito aberto (V_{OC}), Equação 17, análogo ao termo apresentado na Equação 12 (para o padrão NOCT); α , que é o coeficiente de variação da corrente em curto circuito (I_{SH}) em função da temperatura, Equação 18; γ , que é a variação da potência máxima (P_{MP}) com relação a diferentes valores de temperatura, Equação 19 (PINHO, GALDINO, 2014).

$$\beta = \frac{\Delta V_{OC}}{\Delta T_a} \quad (17)$$

$$\alpha = \frac{\Delta I_{SH}}{\Delta T_a} \quad (18)$$

$$\gamma = \frac{\Delta P_{MP}}{\Delta T_a} \quad (19)$$

A partir do valor de tensão de máxima potência (V_{MP}), a Equação 20 pode ser utilizada para demonstrar a P_{MP} de um módulo FV, considerando os valores dos coeficientes de temperatura da célula fotovoltaica. Para os casos em que o fabricante não apresenta o coeficiente βV_{MP} , a Equação 20 é uma alternativa para o cálculo deste parâmetro, uma vez que α e γ são mais recorrentes nos manuais dos módulos FVs. Desse modo, cada coeficiente varia para os diferentes tipos de tecnologias FVs. A β e γ com valores pequenos ilustram módulos FVs que não têm sua $P_{SAÍDA}$ drasticamente afetada por altas temperaturas (PINHO, GALDINO, 2014).

$$\gamma = \alpha + \beta V_{MP} \quad (20)$$

Gasparin e Krenzinger (2011) propuseram um trabalho avaliando tecnologias FVs compostas por células fotovoltaicas com diferentes composições químicas. Os ensaios realizados foram instrumentados para coleta de dados dos módulos FVs com simulador solar e com iluminação natural. Assim, conhecendo os valores de P_{MP} , V_{OC} e I_{SH} , os autores identificaram os coeficientes γ , β e α ($\%/^{\circ}C$) para as células compostas de: pc-Si; mc-Si; a-Si; tripla junção a-Si; módulo tandem a- μ c Si. Os módulos FVs em filmes finos (silício amorfo, tripla junção a-Si, módulo tandem) apresentarão resultados para os coeficientes (γ , β e α) em torno de -0,089, -0,321, 0,101 (a-Si); -0,193, -0,324, 0,118 (tripla

junção a-Si); -0,162, -,350, 0,078 (tandem a- μ c Si). Para ambos os casos simulados, *indoor* e *outdoor*, os coeficientes térmicos se mostraram equivalentes.

Além da temperatura ambiente como fator contribuinte para o desempenho térmico tanto da edificação, como dos módulos FVs, outros quesitos também participam da somatória de fatores atuantes nos sistemas BAPVs e BIPVs. Em aplicações BAPV, a exposição dos módulos FVs com o ambiente externo e, dependendo da proximidade com o elemento construtivo, têm impactos mais significativos causados pelo fluxo de transferência de calor por convecção e radiação. Nos sistemas BIPVs, o contato direto entre o elemento construtivo e o módulo FV sofre com a transferência de calor por condução, que pode ocorrer nos dois sentidos: o módulo FV aquecendo o material construtivo, ou ainda o fluxo contrário com a edificação transferindo calor para o módulo FV.

Os sistemas BAPV e BIPV ilustram os conceitos estruturais vinculados à forma de aplicação, ou integração do módulo FV. O sistema BAPV costumeiramente está aplicado aos telhados das edificações, sendo que podem ser encontradas outras associações com fachadas também. O sistema BIPV integra as tecnologias fotovoltaicas com os elementos construtivos, podendo estar distribuído por diferentes pontos do envolvente construtivo. Portanto, a partir da exposição desses sistemas com o ambiente externo, outros fatores climáticos e ambientais também interferem na eficiência desses sistemas. Abaixo esses parâmetros são explicados e apontados.

3.1.3 Influência da velocidade do vento e da direção da massa de ar

O deslocamento das massas de ar no globo terrestre está associado ao aquecimento e resfriamento das superfícies (solos, vegetação, oceanos), uma vez que a radiação solar é o fator principal contribuinte para esse processo (PINHO, GALDINO, 2014), (CANTOR, 2017). A contribuição do vento no desempenho de módulos FVs é considerada em ambos os padrões STC e NOCT. Assim, o principal efeito natural proporcionado pelos ventos sobre módulos FVs é o esfriamento das partes posteriores

da estrutura do arranjo (CHANDRA, AGRAWAL, CHAUHAN, 2018). Entretanto, na literatura são encontradas algumas divergências acerca da contribuição da velocidade do vento para o desempenho de módulos FVs (MEKHILEF, SAIDUR, KAMALISARVESTANI, 2012), (XIAO, et al., 2013 apud AL-NIMR, AL-AMMARI, 2016).

Os módulos FVs são encontrados em seus arranjos tradicionais (painéis) ou ainda com sistemas híbridos (para aquecimento ou dessalinização de água) (SCHWINGSHACKL, et al., 2013). A velocidade do vento (V_{VENTO}) influencia, também, a temperatura de operação das células FVs (T_{OP}) e a temperatura ambiental (T_a) local (AL-NIMR, AL-AMMARI, 2016). A incidência de ventos no local de instalação dos equipamentos gera benefícios na produção de energia fornecida pelos módulos FVs, uma vez que a T_{OP} nos módulos FVs tende a resfriar-se (SANTOLIN, 2016).

A atuação dos ventos sobre os módulos FVs é complexa de ser aferida, pois em ambientes ao ar livre esse parâmetro possui comportamento variado e imprevisível, dependendo, ainda, das condições geográficas da instalação (SANTOLIN, 2016). Em arranjos FVs onde existe uma estrutura de fixação para os módulos, o vento contribui para a convecção forçada da temperatura de operação (T_{OP}), sendo que o espaçamento abaixo do módulo tende a favorecer a circulação do ar (AMY, 2006 apud CANTOR, 2017). Outro ponto crítico também favorecido pelos ventos é o acúmulo de poeira nos módulos FVs que atenuam a incidência de radiação solar nas células e, portanto, afetam a geração de energia. Esse bloqueio da radiação solar ocorre devido à falta de manutenção e limpeza nos módulos FVs que sobrepõem partículas ao longo do tempo (GOOSSENS, KERSCHAEVE, 1999), (MEKHILEF, SAIDUR, KAMALISARVESTANI, 2012).

As alterações ocorridas na velocidade e na direção do vento afetam diretamente o arrefecimento dos módulos FVs. Sendo assim, uma das opções mais econômicas para aprimorar o resfriamento dos painéis fotovoltaicos está em aproveitar o vento natural na maior extensão possível da instalação. Tal efeito pode ser adquirido através do desenvolvimento de plantas de usinas de energia solar FV em locais com rajadas de vento frequentes e, preferencialmente, com a orientação voltada para o sul, no caso do hemisfério norte. Principalmente nos casos de países em latitudes mais altas, boa parte dos painéis fotovoltaicos estão virados para o sul, por conseguinte, a transferência de

calor por convecção da superfície dos painéis FVs é maximizada pelos ventos na direção sul. O mesmo pode ser observado para as instalações de plantas fotovoltaicas solares desenvolvidas no hemisfério sul (VASEL, IAKOVIDIS, 2017).

Vasel e Iakovidis (2017) avaliaram o impacto da direção de vento durante seis meses de dados coletados de uma usina solar no Reino Unido (de 1 de janeiro a 1 de julho de 2017). Foi revelado que a produção de energia da usina solar aumentou significativamente sob condições de vento do sul, em suma, o aumento na produção de energia foi de até 24% para um dos casos analisados. Isso sugere que o estabelecimento de uma usina solar em um local com vento forte e frequentado sul pode melhorar de maneira substancial o desempenho geral do sistema FV. Caso a usina solar esteja localizada no hemisfério sul, ao escolher um local com vento forte e freqüente do norte aumentará significativamente o desempenho geral. Além disso, construindo usinas solares fotovoltaicas em áreas orientadas ao longo da direção leste – oeste tem-se o efeito de resfriamento positivo do vento na direção sul, favorecendo, assim, o desempenho geral.

Nos sistemas BAPVs onde os módulos FVs podem ser associados às edificações por meio de estruturas de fixação, o espaço obtido nessa configuração favorece a circulação de massas de ar entre o equipamento FV e a edificação (TRINURUK, SORAPIPATANA, CHENVIDHYA, 2009). Além do resfriamento induzido pelo vento na parte frontal, o módulo FV é resfriado pelo vento também na parte traseira devido ao espaço aberto entre o telhado (ou fachada) e o painel (GOOSSENS, GOVERDEM, CATTLOOR, 2018). Assim, a resistência térmica entre as variações ambientais e o desempenho térmico da edificação pode, então, sofrer interferência direta da técnica de implantação ou fixação dos módulos FVs na envoltória construtiva.

3.1.4 Influência da umidade relativa do ar

Naturalmente, a água está presente no ar em forma de partículas. A umidade relativa do ar (RH) é expressa em porcentagem (%) e é um fator importante na configuração

climática e ambiental do local de implementação de módulos FVs. As gotículas de água que se concentram na atmosfera interferem na incidência de radiação solar promovendo efeitos de reflexão, refração e difração dos feixes de luz. Em proporções não lineares, a umidade do ar atenua a radiação solar que alcança os módulos FVs, uma vez que a tensão de circuito aberto (V_{OC}) altera-se moderadamente, e a corrente de curto circuito (I_{SH}) modifica-se substancialmente (GWANDU, CREASEY, 1995 apud MEKHILEF, SAIDUR, KAMALISARVESTANI, 2012), (CANTOR, 2017).

Como efeitos diretos nos módulos FVs, a umidade presente no ar causa a dispersão dos raios solares e, ao se concentrarem nos equipamentos, as partículas de água podem causar sérios danos às múltiplas camadas do equipamento. Nesse sentido, o segundo evento atrapalha o funcionamento das células FVs, que perdem seu potencial de conversão fotovoltaica, causando, assim, danos à $P_{SAÍDA}$. Regiões tropicais onde a umidade relativa do ar apresenta valores consideráveis podem se tornar cenários não tão adequados para instalação de conversores fotovoltaicos. A radiação solar ao penetrar ambientes com grande quantidade de água no ar tende a sofrer maiores efeitos de difração (MEKHILEF, SAIDUR, KAMALISARVESTANI, 2012).

A circulação de ventos próxima aos módulos FVs favorece a articulação do ar e, conseqüentemente, o deslocamento de massas de ar, como resultado, a umidade relativa do ar diminui. Nesse sentido, a V_{VENTO} tem um efeito contrário ao acúmulo de umidade no ar (RH) (MEKHILEF, SAIDUR, KAMALISARVESTANI, 2012), (CANTOR, 2017). Em um estudo realizado no Paquistão, foi demonstrada a atuação da umidade relativa do ar do desempenho de módulos FVs. O impacto provocado na $P_{SAÍDA}$ do gerador FV chegou a atingir 35,4% de redução quando a RH aumentou de 25% para 55%. A corrente elétrica também diminuiu cerca de 32,37%, enquanto a tensão decaiu 4,56% (PANJWANI, NAREJO, 2014 apud CANTOR, 2017). Tais resultados evidenciaram o impacto desse parâmetro climático na I_{FG} do módulo FV validando que as células FVs são sensíveis à presença de umidade durante o processo de conversão fotovoltaica.

3.1.5 Sistemas BIPVs e BAPVs – impactos proporcionados à edificação e à eficiência elétrica dos módulos FVs

Os módulos FVs apresentam-se, nos sistemas BAPVs, aplicados aos telhados ou ao redor da edificação como partes da fachada (RÜTHER, 2004), (RÜTHER, SALAMONI, 2011). Certas particularidades relacionadas às edificações influenciam o aproveitamento do recurso solar. Destarte, fatores como localização, inclinação, orientação, sombreamento e altura exercem impacto direto na eficiência dos módulos FVs em sistemas BAPVs. Os atuais sistemas fotovoltaicos em edifícios geralmente concentram-se em maximizar a geração de energia e ignoram questões estéticas (TOLEDO, et al., 2016). A geração de energia, então, é concebida como um parâmetro do projeto arquitetônico, pois a perturbação visual oriunda dos módulos FVs dificulta a integração e a harmonização desses sistemas com o ambiente urbano (KAYAL, 2009), (FARKAS, ANDRESEN, HESTNES, 2012), (PARK, KIM, LEIGH, 2014).

Os sistemas BAPVs consideram edificações já elaboradas onde os módulos FVs são associados à envoltória construtiva por meio de estruturas de sustentação próprias para o posicionamento do equipamento. Eles ainda podem estar aplicados diretamente à tipologia construtiva. Como resultado, certas características vinculadas à edificação proporcionam perdas na eficiência dos módulos FVs (OH, TAMIZHMANI, PALOMINO, 2010), (PENG, YANG, 2016). Além da associação aos telhados, mais recentemente, os módulos FVs passaram a ser utilizados como cortinas aplicadas às fachadas das edificações (ZHOU, et al., 2017). Ainda acerca desses aspectos, a configuração climática local também contribui para o efetivo funcionamento desses equipamentos (KAYAL, 2009).

Krauter et al. (1999) apontam que boa parte das fachadas compostas por módulos FVs são construídas com *design* de cortina em frente a edifícios isolados termicamente com dutos de ar no meio. Logo, formam-se espaços entre o módulo e a edificação. Entretanto, a dissipação de calor das células FVs geralmente não é ideal. No escopo elaborado pelos autores, as medições realizadas foram voltadas para ambas as premissas: integração de uma camada de isolamento térmico (madeira) no sistema

BAPV, além de resfriamento adicional por ventilação ativa ou fluxo de água. A ventilação ativa nas fachadas convencionais com módulos FVs permite uma redução das temperaturas operacionais de 18K, resultando em um aumento de 8% na produção de energia, a uma velocidade de, aproximadamente, 2 m/s. As temperaturas da célula aumentam 20,7K nos elementos de fachada FV com isolamento térmico sem resfriamento, causando 9,3% de perda de rendimento elétrico. Todavia, os custos de instalação podem ser reduzidos em 20% (todos relacionados a uma cortina de tecnologia FV convencional associada à fachada em um edifício).

A disseminação dos conceitos dos sistemas BAPVs atrelando os módulos FVs como parte integrante da edificação transformou a forma como o envelope construtivo é proposto. Trata-se de uma arquitetura multidisciplinar cuja geração renovável de energia é combinada com o favorecimento de um ambiente térmico sustentável ao usuário. Ao se considerar os sistemas BAPV enquanto fator contribuinte para a eficiência dos módulos FVs, alguns trabalhos promovem interpretações acerca do comportamento do sistema baseando-se na caracterização de cada aplicação. Alguns trabalhos não consideram as cargas associadas aos módulos FVs, mas sim ao comportamento dos módulos quando postos em condições estruturais das edificações as quais estão submetidos, bem como contemplam o dinamismo ambiental e climático local.

Wang et al. (2006) estudaram algumas integrações de módulos FVs em edificações (sistemas BIPVs) e demonstraram o impacto das tecnologias FVs no desempenho térmico do envelope construtivo. O BIPV considera o módulo FV enquanto parte integrante da edificação, logo, o seu demasiado aquecimento provoca o aquecimento dos elementos próximos a ele. Uma vez que o envelope construtivo está exposto às condições ambientais locais, além desses fatores, o sistema BIPV também exerce impacto nos processos de aquecimento e resfriamento das camadas posteriores da edificação. Dessa maneira, considera-se o verão a estação mais crítica para o desempenho térmico de sistemas BIPVs, nesse cenário, algumas soluções são introduzidas na implementação, ou associação, dos módulos FVs em construções. Assim, suportes de sustentação para favorecer a ventilação, fachadas e telhados corretamente orientados e inclinados podem contribuir para os processos de troca de calor do sistema BIPV com o ambiente ao redor.

Park, Kim e Leigh (2014) propuseram um trabalho de avaliação de sistemas BAPVs contendo materiais de mudança de fase (*phase change material* - PCM) durante o período de um ano. Os autores, nesse caso, já consideram a transferência de calor desse sistema como efeito degradativo, tanto para a eficiência dos módulos FVs quanto para o desempenho térmico da edificação. Em virtude disso, foi possível comprovar que os materiais aos quais os painéis FVs são aplicados exercem influência direta na temperatura alcançada pelas células. Os testes efetuados pelos autores ocorreram na Coréia do Sul e apontaram que os PCMs colaboram na diminuição da T_{OP} das células FVs, favorecendo, assim, a eficiência energética do módulo FV em 3,1%, para os meses de maio e junho. Ao considerar as condições ideais do conjunto PCM mais módulo FV, obteve-se uma melhora de 1 a 1,5% na $P_{SAÍDA}$ do sistema BAPV com essa caracterização, quando comparado com um sistema BAPV sem adição de PCM.

Para realizar a aferição de dados oriundos do sistema BAPV algumas metodologias contribuem para a coleta de dados. Tais dados incluem bases meteorológicas para retirada de dados acerca das condições ambientais. No processo, destacam-se: redes de sensores para aferir o comportamento das temperaturas nas superfícies dos módulos FVs, assim como sensores característicos para verificar os parâmetros elétricos produzidos pelo equipamento; máquinas termográficas para visualizar o comportamento do calor nos módulos FVs e, conseqüentemente, no envelope da edificação; utilização de ferramentas matemáticas para calcular o desempenho dos módulos FVs; entre outros métodos.

Baseados em um estudo experimental, Zhou et al. (2017) preconizaram um trabalho para identificar o impacto do sistema BAPV em edificações contendo fachadas fotovoltaicas. Ademais, o intuito do trabalho foi avaliar a interferência das trocas de calor entre os módulos FVs, o envelope da edificação e o ambiente interno da construção. No referido estudo, por meio da rede de monitoramento, foram coletados dados do ambiente com o auxílio de uma base meteorológica, sensores de umidade e temperatura com captura automática dos valores e também uma câmera termográfica. A partir dos dados coletados, identificou-se que, mesmo com a associação dos módulos FVs à fachada, a temperatura interna do ambiente e da parede mais próxima aos módulos sofreram menos interferência das condições ambientais. Ao avaliar um dia de inverno da edificação

BAPV, destaca-se que: a temperatura das superfícies (frontal e traseira) do módulo FV se comportasimilarmemente, pois a parte traseira tem uma ligeira diferença abaixo da parte frontal; a parede que está em contato próximo aos módulos esquentamais do que a face voltada ao ambiente em contato com os usuários; a temperatura entre o módulo FVs e a edificação segue o mesmo comportamentodurante o período de coleta dos dados.

Com o intuito de avaliar o impacto da circulação de ar entre módulos FVs e o telhado de uma edificação, Schams e Tamizhmani (2011) apresentaram um trabalho cujo sistema BAPV tinha o espaço entre as partes citadas acrescentado em um centímetro (cm), variando de zero até 10,16 cms (0 a 4 polegadas). Para o sistema BAPV, onde o contato era direto e sem circulação de ar, houve perdas de cerca de 6% em um ano se comparadasaos resultados com o sistema que havia 10,16 cms de distanciamento. Outro efeito produzido pelo contato direto é a corrosão da estrutura metálica dos módulos FVs onde essa configuração sistêmica no BAPV resultou em uma reação 28% mais rápida de deterioração da estrutura. Os autores ainda apontam que, em lugares de clima temperado, o efeito dos espaços entre os módulos FVs e o envelope construtivo pode alcançar valores mais significativos, sobretudo de acordo com a alteração da temperatura local.

Nos diferentes trabalhos citados, os autores adotaram métodos característicos para coletar dados inerentes aos parâmetros climáticos no local de instalação dos sistemas BAPVs e BIPVs, bem como para avaliar a geração de energia dos módulos e, eventualmente, o impacto trazido pelo contato entre as superfícies. Essas superfícies podem ser os telhados ou, ainda, as fachadas das edificações que absorvem o calor pela radiação solar incidente ou mesmo pelo calor proveniente dos módulos FVs que é conduzido para a tipologia construtivo. Logo, na literatura, é encontrado um arcabouço tecnológico e que corrobora para a instrumentação de uma bancada de testes característicos e voltados à coleta de dados inerentes ao sistema BAPV.

3.2 Técnicas para aferição de parâmetros ambientais e elétricos em sistemas BAPVs e BIPVs

Para avaliar a influência dos diversos fatores mencionados na eficiência do painel FV, existem diferentes propostas de metodológica, visando instrumentalizar redes de monitoramento. Usualmente, os parâmetros mais avaliados são: a radiação solar (G_{SOLAR}), a temperatura ambiente (T_a) e a temperatura de operação das células FVs (T_{OP}). Outros quesitos importantes referem-se à velocidade do vento (V_{VENTO}), à umidade relativa (RH) do ar e à direção do vento. Esses parâmetros, então, caracterizam o comportamento térmico tanto da edificação quanto do módulo FV.

Ao desmembrar os sistemas BAPV e BIPV, mas ainda analisando a conjuntura sistêmica como atenuante da eficiência elétrica dos módulos FVs para avaliar como se comportam esses equipamentos, são utilizados dispositivos específicos para aferição dos dados de corrente (I) e tensão (V). A carga associada aos módulos FVs torna-se fator de interesse quando almeja-se identificar os impactos provocados pela inserção das fontes de energia renovável no sistema elétrico de potência. Entretanto, é necessário que haja alguma carga ligada aos módulos FVs para que haja circulação de corrente elétrica e variação de tensão. Uma alternativa é ligar algum tipo de resistência que irá gerar o fluxo de corrente elétrica no sistema FV. Assim, a carga sendo de pequeno porte, não exerce interferência considerável nos parâmetros elétricos dos módulos FVs. Por outro lado, a eficiência desses equipamentos é reflexo direto da dinâmica construtiva, do clima e das condições ambientais no local onde são implementados.

Do ponto de vista da edificação, o dado de interesse é a temperatura superficial (T_s) da envoltória construtiva. No caso do sistema BIPV, a integração entre o módulo FV e a fachada, ou telhado, pode ocasionar transferência de calor por condução entre as partes. Conseqüentemente, o calor oriundo dos módulos FVs pode gerar distúrbios no envelope construtivo. Nos sistemas BAPVs o espaçamento entre o elemento construtivo e o módulo FV gera um espaço constituído por ar. Considerando as altas temperaturas de operação atingidas pelas células FVs, em sistemas BAPVs o processo de transferência por convecção pode ocorrer, devido ao deslocamento de ar entre as partes do sistema. Para ambos os casos, diferentes alterações na eficiência dos painéis podem ocorrer, ainda considerando a dinâmica climática e ambiental, bem como o material construtivo associado ao sistema analisado .

Tais alterações na temperatura na envoltória da edificação podem vir a ocasionar desconforto aos usuários no interior das edificações, uma vez que pode haver um aquecimento significativo da superfície voltada ao usuário. Esse efeito seria mais perceptível em situações onde as perspectivas da edificação e a instalação dos módulos FVs não fossem feitas da forma adequada, considerando os devidos fatores ambientais e da própria localização da edificação. Portanto, a avaliação do comportamento térmico da envoltória construtiva também deve ser considerada ao estudar os sistemas BAPV e BIPV, sendo que as eventuais perdas são inerentes a esses sistemas, como perda de eficiência, seja térmica ou elétrica.

Com o intuito de avaliar alguns parâmetros que influenciam eficiência dos sistemas BAPV e BIPV, algumas técnicas introduzem as ferramentas que colaboram na coleta dos dados para posterior análise visando principalmente a compreensão acerca da troca de calor entre os módulos FVs e o entorno das edificações. Averiguando a literatura encontram-se trabalhos com diferentes premissas. Alguns analisam a eficiência dos módulos FVs separadamente. Outros abordam os sistemas BAPVs e BIPVs e seus respectivos desempenhos, analisando tanto o entorno da edificação quanto o desempenho térmico e elétrico dos módulos. As respectivas contribuições de cada trabalho favoreceram a elaboração da metodologia proposta aqui neste trabalho, explicada detalhadamente abaixo.

3.2.1 Métodos para aferição do comportamento térmico de módulos FVs

A distribuição do calor nos módulos FVs não se dá de maneira uniforme. Logo, identificam-se gradientes inerentes à distribuição da temperatura na superfície do módulo. Todos os fatores ambientais citados anteriormente, bem como a tecnologia associada à célula fotovoltaica irão afetar a temperatura de operação do arranjo. Como os painéis são elaborados a partir da sobreposição de camadas de encapsulamento, uma vez prontos, uma das formas de ler a temperatura de operação do equipamento (T_{OP}) é utilizar sensores de contato direto em sua parte traseira. A aplicação comum dos

módulos FVs se dá em ambientes externos, portanto, eles estão sujeitos às várias oscilações ambientais que ocorrem nesses espaços. Além disso, as anomalias elétricas do circuito interno também exercem papel fundamental no funcionamento adequado do módulo (SANTOLIN, 2016).

Essencialmente, os equipamentos adotados para avaliação de sistemas BAPVs consistem em uma instrumentação básica para aquisição de dados. Todo o arsenal especificado na literatura corrobora para a compreensão do comportamento sistêmico das aplicações BAPV em que diferentes fatores contribuem para o funcionamento dos módulos FVs. São citadas algumas ferramentas que auxiliam na coleta de dados (PINHO, GALDINO, 2014), (LABREN, CCST, INPE, 2017):

- a) estação meteorológica de pequeno porte – para coleta de dados vinculados ao estado do ambiente local. Os dados fornecidos pelas estações meteorológicas contemplam os parâmetros de temperatura do ar (T_a), velocidade do vento (V_{VENTO}), direção do vento, umidade relativa do ar (RH), incidência de chuvas;
- b) piranômetro – sensor específico para coleta de dados relativos à irradiação solar incidente (G_{SOLAR});
- c) rede de monitoramento – atreladas às superfícies dos módulos FVs (frente e traseira). Algumas técnicas auxiliam nesse sentido como os sensores termopares e as câmeras termográficas;
- d) sistemas de coleta de dados dos módulos FVs – equipamentos específicos são utilizados para aferir valores de tensão e corrente produzidos pelos módulos FVs e que se alteram de acordo com as variações climáticas e ambientais.

Trinuruk, Sorapipatana e Chenvidhya, (2009) salientam que a introdução de sensores nas faces traseiras dos módulos FVs é a medida mais costumeira para avaliar a T_{OP} desses equipamentos. Os estudos, nesse sentido, assumem que a face traseira possui resistência térmica inferior entre o elemento sensorial e a célula FV. Assim, o valor referente à temperatura naquele ponto pode ser considerado como a temperatura de operação do módulo FV. A face frontal não deve conter obstruções à radiação solar para não degradar a eficiência das células FVs. Em síntese, o trabalho executado pelos autores avaliou o impacto de sistemas BIPV em fachadas situadas em clima tropical.

Eles concluíram que a radiação solar é um forte fator contribuinte ao processo de transferência de calor entre as superfícies (módulo FV e edificação).

3.2.1.1 *Adoção de sensores de contato superficial para aferição da temperatura de operação em módulos FVs*

A utilização de sensores de contato direto à superfície dos módulos FVs é uma técnica abordada em diferentes trabalhos na literatura. Os autores, geralmente, partem da aplicação dos sensores em um ponto específico na parte traseira dos módulos onde termopares são fixados no centro do painel. Para realizar a medida específica do ponto analisado, e sem que o sensor tenha interferência do ambiente externo, o dispositivo é encapsulado com material isolante em que eventuais perdas de calor também podem ocorrer (GARCÍA, BALENZATEGUI, 2004, apud SANTOLIN, 2016).

Muzathik (2014) elaborou um trabalho com simulações e aplicações técnicas de sensoriamento com termopares fixados em um ponto médio na parte traseira do módulo FV. A partir de dados do período de 2008 a 2010, o autor elaborou uma equação característica para as simulações efetuadas por ele. A T_{OP} da célula fotovoltaica é um parâmetro importante quando analisada a $P_{SAÍDA}$ do gerador FV. Nesse estudo, o erro percentual total da temperatura esperada foi inferior a 3%. Portanto, pode-se concluir que a precisão das temperaturas previstas foi adequada para aplicações contendo módulos FVs e pode ser usada nas áreas de interesse, considerando, ainda, as condições climáticas tropicais similares nas quais a temperatura ambiente permanece relativamente constante ao longo do dia.

Zhou et al. (2017) propuseram um trabalho para avaliar o impacto das tecnologias fotovoltaicas associadas às fachadas de um edifício em Dalian, na China. O impacto foi avaliado através de uma estação meteorológica capacitada com sensores de velocidade do vento, direção do vento, temperatura ambiente, radiação solar incidente e, ainda, sensores de contato (umidade e temperatura) fixados nas faces dos módulos FV se mais uma máquina termográfica. No referido experimento, os autores avaliaram o

comportamento da temperatura de diferentes premissas. Os valores de temperatura coletados eram oriundos de sete pontos distintos: do ambiente, das faces dos módulos FVs, do espaço entre os módulos e a edificação, da face externa e também interna da parede do prédio, além do ambiente interno. Todos os dados coletados fomentaram discussões no trabalho acerca do comportamento do envelope construtivo quando o sistema BAPV está em funcionamento.

Jovanovic et al. (2017) elaboraram um trabalho realizando a medição de temperatura de módulos solares fotovoltaicos, usando o sistema composto por um sensor de temperatura infravermelho e um microcontrolador. Os resultados obtidos das medições são processados, exibidos e armazenados em um computador usando um *software* virtual personalizado. O sistema proposto superou alguns dos problemas relacionados ao sensor de contato aplicado nos módulos e, ao mesmo tempo, oferece leituras precisas com melhor flexibilidade. O sistema de monitoramento proposto é especialmente adequado para aplicações onde o custo é um fator limitante. A análise conduzida e os resultados obtidos mostraram uma excelente precisão do sistema elaborado em comparação com uma câmera de imagem térmica de alta qualidade usada como instrumento de medição de referência.

Martínez, Andújar e Enrique (2014) apresentam o projeto, a construção e o teste de um sistema de instrumentação para medição de temperatura em instalações FVs, em uma escala por painel (ou seja, uma ou mais medições de temperatura por painel). As principais características são: precisão, facilidade de conexão, imunidade ao ruído, operação remota e fácil escalonamento, com custo de desenvolvimento reduzido. O artigo discute as vantagens das medições de temperatura em instalações fotovoltaicas, em uma escala por painel, em operação sob condições reais. O sistema de instrumentação é totalmente desenvolvido, desde o sensor de temperatura até sua apresentação em um instrumento virtual. O sistema de instrumentação desenvolvido é capaz de funcionar local e remotamente conectado a redes com e sem fio.

Bohórquez, Gómez e Márquez (2009) desenvolveram um sistema de coleta de dados para sistemas fotovoltaicos. O trabalho trata da construção e do teste de um aparato com custo reduzido voltado à medição de temperatura baseada em sensor digital. As principais particularidades do sistema de monitoramento são: precisão, facilidade de

conexão, imunidade a ruído, operação remota e fácil escalonamento, tudo isso de uma forma com muito baixo custo. O sensor proposto supera os problemas tradicionais dos sensores de medição digital, oferecendo características semelhantes aos sistemas de medição disponibilizados por fabricantes profissionais. Por isso, ele pode ser usado em qualquer instalação em que seja necessária uma medição de temperatura confiável. São apresentadas situações práticas, onde a instrumentação desenvolvida pode ser aplicada ao monitoramento de módulos fotovoltaicos.

Os sensores são dispositivos amplamente utilizados em análises e estudos de diferentes segmentos, foram divididos na comunidade científica por diversas características como precisão de leitura de dados, valor de compra reduzido, dinâmico e aplicável a diversas interfaces (microcontroladores, microprocessadores, afins), versatilidade, entre outras. Nos sistemas BAPVs e BIPVs é possível coletar dados a partir de sensores específicos capazes de ler parâmetros como tensão (V) e corrente (I), oriundos do módulo FV. Ademais, os sensores de temperatura com circuitos integrados (CI) característicos podem ser adotados para coleta de dados de temperatura como a ambiente (T_a), a de operação da célula FV (T_{OP}), ou ainda, a temperatura superficial (T_s) nas faces do módulo FV. Sendo assim, os sensores podem ser uma alternativa vantajosa no estabelecimento de relações entre a eficiência dos módulos FVs com os parâmetros ambientais envolvidos no sistema BAPV.

3.2.1.2 *Utilização de máquinas termográficas para avaliação da temperatura superficial em módulos FVs*

As análises por meio de termografia auxiliam nas compreensões acerca do comportamento da distribuição do calor em módulos FVs. Trata-se de um meio não intrusivo e eficaz que possibilita leituras sobre o alcance térmico que esses módulos possuem em condições de operação. A configuração ambiental e climática no local, assim como as próprias características físicas de cada painel fotovoltaico também interferem nos estudos envolvendo as máquinas termográficas como técnica de

monitoramento da temperatura superficial. Os efeitos inerentes ao processo de radiação solar, reflexão, refração e difração são fatores importantes que vão alterar a emissividade do material (SILVA, 2017).

As câmeras termográficas fornecem informações térmicas dos módulos baseadas na intensidade da radiação infravermelha no módulo FV. Esta é uma análise pontual e temporal, acarreta facilidade e praticidade na coleta dos dados de interesse, onde a parte superior dos módulos são usadas como partes dos estudos. Essas câmeras registram uma quantidade considerável de pontos de calor em que a temperatura superficial pode ser estimada a partir de cada ponto capturado. Como resultado, um gradiente térmico do painel é gerado com muitos detalhes. Assim, ao considerar o clima local como agente integrante nas análises da T_{OP} dos módulos FVs, a cada variação dos fatores ambientais é possível verificar essa atuação nas imagens captadas pelas câmeras termográficas (SANTOLIN, 2016).

Irshad, Jaffrey e Haque (2018) produziram um trabalho avaliando o comportamento térmico de módulos FVs em ambiente aberto com o auxílio de máquinas termográficas. A partir da intrínseca relação existente entre a temperatura de operação dos módulos FVs e sua eficiência, os autores elaboram uma metodologia de aquisição de dados capturados por uma câmera de infravermelho *Flir Infrared*. Assim, com a finalidade de analisar a mudança na produção real de energia pelo módulo e para rastrear o ponto de potência máxima com a temperatura em tempo real, é importante determinar a temperatura exata do módulo fotovoltaico em condições operacionais externas. A abordagem dos autores consistiu em uma técnica não invasiva e mais precisa para medir a temperatura do módulo em condições de operação. A instalação experimental foi estabelecida com imagens ao ar livre e infravermelho do módulo FV. As imagens foram, posteriormente, processadas quantitativamente para calcular a temperatura do módulo. Na avaliação dos resultados, os dados de saída foram comparados com valores calculados com o auxílio de relações bem estabelecidas disponíveis na literatura com diferentes temperaturas calculadas usando técnicas existentes.

As máquinas termográficas oferecem dados importantes nas análises referentes ao comportamento térmico de módulos FVs. Elas podem, ainda, identificar eventuais pontos de falhas ou defeitos no equipamento e que prejudicam a produção de energia da saída

do módulo FV ($P_{SAÍDA}$). Como essas máquinas conseguem retratar todos os pontos da área de um módulo FV é possível, inclusive, identificar como se dá a distribuição do calor pelas células FVs e os demais materiais encapsulantes e elétricos que compõem a estrutura do módulo. Além disso, essas máquinas podem ser adotadas para investigação da temperatura superficial de diversos materiais que possuem características de emissividade térmica considerável. Em sistemas BAPVs, por exemplo, ela pode capturar o cenário térmico da associação do módulo FV com a envoltória da edificação.

3.2.1.3 Simulações computacionais para avaliação do desempenho de módulos FVs

Lu et al. (2016) apresentam um trabalho, analisando a interferência dos fatores climáticos e da temperatura de operação na eficiência de células FVs de silício cristalino. A influência da T_a e da diferença de temperatura entre as superfícies frontal e traseira da célula nos parâmetros elétricos de uma célula solar c-Si comercial típica foram avaliadas pelo método bidimensional de diferenças finitas. Os resultados mostraram que, mesmo para a célula com suas superfícies frontal e traseira na mesma temperatura, a distribuição de temperatura no interior da célula não é homogênea. Em suma, a diferença de temperatura entre as superfícies frontal e traseira gerará um gradiente de temperatura dentro da célula. Os valores de tensão de circuito aberto (V_{OC}), o fator de enchimento e eficiência diminuíram e os de corrente de curto circuito (I_{SH}) aumentaram.

Chaichan e Kazem (2016) detalham um estudo conduzido para avaliar o efeito da radiação solar em módulo fotovoltaico em clima quente e úmido em Sohar, em Oman. Dois módulos fotovoltaicos conectados em série foram utilizados para avaliar o impacto do vento local nesses equipamentos. Os resultados indicaram que o efeito do vento foi insignificante na temperatura dos módulos para o período testado. Como pontos a serem salientados têm-se a queda de tensão com o aumento da temperatura e o alto valor de corrente, além de uma redução significativa da energia devido ao aumento da temperatura do ar. Os resultados revelam que a temperatura do ar (T_a) solar funcionou

como fonte de aquecimento a partir das 8 horas até as 17 horas no inverno e às 7 horas no verão, como fonte de refrigeração após os períodos mencionados. A alta umidade relativa do ar que distingue a cidade delineada como estudo de caso causou uma redução na intensidade da radiação solar resultando em valores de temperatura do ar solar menores.

Ribeiro, Matose Alexandria (2016) apresentam um escopo abordando a influência da temperatura na eficiência de um painel fotovoltaico sob condições de irradiação constante. As metodologias utilizadas na simulação foram criadas no *software* ICEM utilizando as dimensões reais de um painel fotovoltaico que, por sua vez, foram processadas no *software* ANSYS CFX. O objetivo desse estudo foi avaliar o percentual de perda de potência provocado pelo aumento da temperatura na P_{SAIDA} . Nesse contexto, a temperatura foi simulada na interface do painel para dois casos diferentes: com e sem a presença de circulação de ar. Os resultados mostraram uma redução gradual do percentual de perda de potência durante o aumento da temperatura do módulo FV ao resfriar a interface entre os domínios. Quando comparada a porcentagem de perda de potência das simulações que apresentaram a maior e a menor temperatura do painel, obteve-se uma redução de 75% na perda de potência.

Zhou et al. (2018), por meio de simulações, propuseram um modelo térmico tridimensional para módulos FVs de silício policristalino (pc-Si). Com base no modelo, alguns efeitos de *back sheet* na distribuição de energia de módulo fotovoltaico foram investigados por análise fatorial única. Os resultados mostraram que as células solares no módulo atingiram a temperatura mais alta de 325,23 K sob as STC. A diferença de temperatura entre EVA e a célula foi de 1,10 K. A temperatura mais elevada do módulo subiu de modo linear, aproximadamente, com taxa de variação de 0,82 K/mm quando a espessura da folha posterior aumentou de 0,10 mm para 0,70 mm. A camada de encapsulamento de liga de alumínio teve melhor desempenho na dissipação de calor e a mais alta temperatura do módulo praticamente não mudou dentro do escopo de espessura adequado. Assim, foi possível concluir que o desempenho dos módulos FVs pode ser otimizado a partir da utilização de compostos diferentes daqueles adotados comumente nos módulos FVs comerciais.

Soliman et al. (2018) elaboraram um estudo cujo modelo teórico tridimensional de um painel fotovoltaico acoplado a um difusor de calor, em linhas gerais, um modelo térmico, foi construído e analisado matematicamente usando o *software* ANSYS. Esse processo foi decorrento do efeito da intensidade da radiação solar e das condições climáticas (velocidade do vento e temperatura ambiente) no desempenho do sistema fotovoltaico com dissipador de calor. Os resultados mostraram que a espessura ótima e a área da seção transversal do dissipador de calor para dimensões do painel fotovoltaico de 125x125 mm são 10 mm e 0,3 m². A temperatura da célula é reduzida em 15°C quando o difusor de calor é usado com o módulo FV. Além disso, a potência média e a eficiência do módulo fotovoltaico aumentam em 9% quando o dissipador de calor é utilizado.

3.2.2 Estudos por simulações computacionais em edificações com sistemas BIPV e BAPV

Na literatura há uma quantidade significativa de trabalhos analisando as partes do sistema BAPV e BIPV com foco em avaliar o desempenho dos módulos FVs ao serem submetidos às mais diferentes condições e padrões climáticos. Outros, no entanto, trazem as análises acerca da edificação contendo os módulos como parte integrante das edificações (BIPV), ou quando estão associados às fachadas e/ou aos telhados (BAPV). Essas simulações esboçam as premissas de cada autor ao realizar seus recortes, cada qual adotando modelos matemáticos característicos aos módulos FVs, condições climáticas características para cada região, posicionamento das edificações e dos módulos em sua envoltória, entre outras. Esses estudos contribuem nas compreensões e interpretações sobre os sistemas BAPV e BIPV e como as discussões sobre o tema são pertinentes e atuais.

Fitriaty e Shen (2018), a fim de simular locais ótimos de instalação de módulos FVs, simularam junto ao *software* IBM Revit a quantização da radiação solar incidente necessária e também para a reprodução de cores de diferentes níveis experimentados

em diversas áreas do envelope do edifício devido à influência do ambiente local. A quantidade de energia gerada por painéis fotovoltaicos hipotéticos foi comparada com o consumo real de energia do setor residencial, que se tornou uma linha de base para avaliar a implementação prospectiva de módulos FV em uma área tropical. A geração de energia por instalações fotovoltaicas (PV) em envelopes de edifícios residenciais em área tropical foi avaliada usando um novo método prático empregando análise 3D. Os resultados indicaram que a localização ideal para a instalação de painéis fotovoltaicos foi no telhado de um edifício. Além disso, as paredes do edifício orientadas para o oriente e o ocidente têm um grande potencial para gerar energia elétrica, como um local opcional para a instalação de painéis fotovoltaicos.

Custódio e Rüther (2017) simularam, com o auxílio do *software* EnergyPlus, a influência de módulos FVs quando integrados ao telhado de uma residência. O objetivo do trabalho foi identificar se a integração dos painéis e seu eventual impacto na temperatura interna do domicílio e no consumo energético proveniente da rede elétrica pública. Três tipos de telhados foram simulados: cobertura sem módulos FVs; cobertura com módulos FVs a 27° e a 10° de inclinação. Para cada caso, os melhores valores de temperatura interna foram para a cobertura sem módulos, acompanhados pela construção com módulos inclinados em 27° e, finalmente, com 10° de inclinação. Ao longo de todo o ano simulado a produção de energia pelo sistema BIPV foi maior do que a consumo oriundo da edificação. Os autores concluem salientando a importância de avaliar o impacto das tecnologias FVs no contexto dos sistemas BIPVs, mesclando arquitetura, eficiência energética e térmica da edificação.

Ao tratar da aplicabilidade dos aparatos FVs em edificações, Toledo et al. (2016) apresentaram um trabalho simulando a integração e aplicação de tecnologias FVs em um edifício industrial no sul da Espanha. Foram realizadas análises acerca do potencial de geração elétrica do edifício, considerando a radiação solar recorrente, bem como a harmonia arquitetônica dos módulos FVs com o local. Os sistemas BAPV e BIPV têm mais rendimento energético do que o sistema montado em ambiente aberto, com inclinação e azimute ideais, demonstrando que as considerações estéticas não são uma barreira para a implementação desses sistemas, do ponto de vista da geração de eletricidade. O sistema BAPV tem a maior produção de energia e, embora um sistema

BIPV tenha mais superfície para implementar, as tecnologias adotadas nesse segundo sistema não são suficientes para suprir a demanda energética do estudo de caso.

Peng e Yang (2016) executaram um trabalho com simulações de um sistema BIPV utilizando o *software* EnergyPlus. No projeto, foram avaliados quatro cenários: com e sem painéis fotovoltaicos, com e sem exposição à luz solar, telhados com materiais de diferentes condutividades térmicas e para diferentes zonas climáticas. Os resultados demonstraram que a transferência de calor por convecção, radiação e condução nas lacunas de ar entre os painéis fotovoltaicos e o envelope construtivo pode ser simulada no EnergyPlus. No entanto, na maioria dos casos, particularmente, situando no telhado, as lacunas de ar entre os painéis fotovoltaicos e a envolvente do edifício não podem ser definidas como zonas de ar condicionado. Concluí-se, portanto, que todos os padrões do modelo de equilíbrio de calor que incluíram: os efeitos indiretos e difusos da irradiação; a onda de radiação com o ar e o ambiente; a convecção inversa com o ar; e fluxo de condução na superfície (telhado); eles podem ser usados no cálculo do fluxo de calor e temperatura no BIPV.

Silvestre e Pereira (2014) apontam que para um país continental como o Brasil os sistemas fotovoltaicos associados às edificações aproximam as fontes de geração de energia dos consumidores. Nesses espaços, o sombreamento das edificações, uma nas outras, tende a diminuir o potencial energético das tecnologias fotovoltaicas. Sendo assim, os autores promoveram simulações no *software* Rhinoceros que, através de uma ferramenta específica, simulou diferentes cenários. Os resultados apontam a cobertura (plano horizontal) como o plano de melhor aproveitamento da irradiação solar. Contudo, esses espaços concentram áreas insuficientes para atender a demanda das unidades habitacionais. As fachadas (plano vertical) possuem área suficiente para produzir energia para abastecimento local, elas atingiram 50% a menos de produtividade quando comparadas com a cobertura. Observou-se também que as obstruções no centro urbano reduzem o acesso solar, principalmente, nos andares inferiores das edificações.

Zomer et al. (2013) estudaram a integração de módulos FVs em edificações situadas em aeroportos. Eles são tipicamente grandes, horizontais e livres de sombreamento e também são ideais para a integração de sistemas fotovoltaicos para geração local de eletricidade limpa e renovável. Foram analisados os sistemas fotovoltaicos aplicados em

edifícios convencionais e em edifícios BAPV e BIPV. No BAPV, a orientação otimizada do módulo fotovoltaico e os ângulos de inclinação foram propostos para a produção anual máxima, enquanto no BIPV, os módulos foram acomodados respeitando a arquitetura existente dos edifícios aeroportuários. Dois aeroportos brasileiros foram analisados, comparando o desempenho de BAPV e BIPV usando duas tecnologias fotovoltaicas. Em média, tanto a potência de pico instalada quanto a densidade de geração de energia foram maiores no BIPV (100% e 87%, respectivamente), enquanto o rendimento anual final de energia foi 7% maior para a BAPV.

Salienta-se que as simulações computacionais fornecem interpretações hipotéticas acerca do comportamento de diferentes cenários envolvidos no contexto dos sistemas BAPVs e BIPVs. Para cada caso uma premissa é levantada, seja a eficiência energética dos módulos FVs ou mesmo a eficiência térmica do envelope construtivo. Essas análises evidenciam a importância e a relevância dos trabalhos voltados aos contextos urbanos e à inserção das fontes renováveis de energia junto ao panorama das edificações. Portanto, compreender a relação entre a configuração climática local com as especificidades da edificação, agregando as tecnologias fotovoltaicas como parte desses espaços, fornece insumo para diferentes trabalhos e linhas de pesquisa nesse sentido.

3.2.3 Rede de sensores para coleta da temperatura superficial em edificações

O monitoramento da temperatura da superfície e seus aspectos tem não apenas um mérito útil para a análise térmica dos edifícios e sua implementação direta ou indireta em simulações virtuais, mas também é um uso altamente relevante para o campo da física de edifícios, principalmente aqueles de análises mais complexas em fenômenos térmicos específicos. A medição das temperaturas da superfície na envoltória do edifício, por meio de sensores de temperatura comerciais, é tipicamente aplicada onde atributos podem ser empregados com sucesso, especialmente, para o campo de aspectos de desempenho de construção térmica. Além disso, além de seu próprio nível de precisão e implementação final, por exemplo, como parâmetro de entrada no modelo de

simulação, os métodos típicos de sua aplicação final relacionados às superfícies de construção opacas e transparentes e seus modos de contato e sem contato podem ter influência (SLÁVIK, CEKON, 2016).

Uma outra questão preocupante é o aumento da temperatura do ar nos centros urbanos, pois essa alta pode desencadear problemáticas como: o aumento do consumo de energia associado ao ar condicionado, a intensificação da poluição, o desconforto humano e os problemas de saúde. Sistemas de classificação de eficiência energética para edifícios (LEED - *Leadership in Energy and Environmental Design*, AQUA-Alta Qualidade Ambiental, PROCEL Edifica, etc.) estimulam ações de eficiência energética no ambiente construído, considerando, por exemplo, as iniciativas de envelope e eficiência energética em edifícios. Pesquisas mostraram que o monitoramento de edifícios pode fornecer informações importantes acerca do desempenho das construções apoiando estratégias de controle dos mesmos e possibilitando ações que visam melhorar a eficiência energética e o conforto térmico dos usuários. Mais especificamente, redes de sensores podem ser usadas para monitoramento térmico em edifícios (MOTA, et al., 2018).

Slávik e Cekon (2016) apresentam um confronto representativo do monitoramento da temperatura da superfície de vários sensores de temperatura em superfícies de construções verticais padrão. Três formas típicas de instalação são demonstradas em componentes de construção opacos e transparentes sob condições climáticas reais, aplicando termopares comerciais, sensores digitais de temperatura e infravermelhos. Medições representativas foram realizadas e a comparabilidade final dos sensores com base em métodos típicos de sua instalação final resultaram em considerações pertinentes. Como resultado obtido, tanto em tipos existentes quanto em comparação, foram demonstradas as relações de aplicação dos sensores com as edificações. Em um dos casos estudados, baseado em um regime de não contato, em comparação com os de contato, revelou-se uma opção viável relacionada à medição da temperatura da superfície do edifício.

Mota et al. (2018) apontam que a envolvente do edifício desempenha um papel importante no equilíbrio térmico urbano. Os autores apresentam o desenvolvimento de um sensor de temperatura de superfície capaz de suportar ações para melhorar a

eficiência energética no ambiente construído. Em síntese, o sensor foi elaborado para atender aos requisitos propostos pelos sistemas de classificação de eficiência energética dos edifícios. Esse dispositivo tem como características o baixo custo, a capacidade de armazenamento de grande quantidade de dados e a possibilidade de monitoramento remoto das temperaturas coletadas. No processo, simulações computacionais e testes de validação foram realizados mostrando que o sensor proposto permite o monitoramento remoto (utilizando um sistema de transmissão sem fio) da temperatura da superfície em edifícios, respeitando os requisitos de alta capacidade de armazenamento.

Oliveira (2015) elaborou um trabalho contendo rede de sensores para monitoramento de temperatura do ar e temperatura de superfície no contexto das edificações urbanas. Na rede foi adotado o modo de transmissão de dados sem fio no padrão IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4. O autor elaborou sistemas de coletas de dados não intrusivos onde os sensores adotados possuem valor reduzido. Cada padrão, IEEE 802.11 e 802.15.4, demonstrou-se adequado para a transmissão de dados em redes sem fio e monitoramento da temperatura em edificações.

Goossens, Goverde e Catthoor (2018) estudaram a influência das estruturas de montagem de sistemas BAPV e BIPV, aderindo análises acerca de parâmetros ambientais como o fluxo de vento, temperatura ambiente, paralelo ao desempenho elétrico de módulos fotovoltaicos integrados em construção (BIPV) e aplicados em edifícios (BAPV). Ademais, ambos sistemas foram investigados usando experimentos com túnel de vento. Os padrões de vento e de temperatura, bem como o desempenho elétrico dos módulos foram consideravelmente afetados pela forma de implementação dos módulos FVs. Os sistemas BAPVs foram resfriados mais favoravelmente pelo vento do que a configuração do BIPV. Isso se evidencia devido ao resfriamento adicional proporcionado pelo espaço de ar entre a edificação e o módulo, no caso do BAPV. Embora um bom resfriamento não garanta, automaticamente, um desempenho elétrico mais alto, as configurações dos BAPVs mostraram os melhores desempenhos nos testes efetuados. Nos testes relatados, o módulo BAPV com o *gap* de ar mais espesso (5,5 cm neste estudo) foi a configuração de melhor desempenho.

Os sistemas BAPV e BIPV ilustram as modalidades construtivas com tecnologias fotovoltaicas em seu entorno. Naturalmente, a envoltória construtiva tem seu desempenho afetado pela exposição constante as condições climáticas e ambientais do local. Em termos adicionais, os módulos FVs participando do envolvente construtivo podem desequilibrar o comportamento térmico desses tipos de edificações. Além do calor natural proveniente da radiação solar e da temperatura ambiente, a configuração sistêmica dos sistemas BIPVs e BAPVs também são fatores consideráveis que afetam o comportamento térmico da envoltória construtiva, podendo gerar aumento da temperatura no entorno da edificação.

Este evento é o oposto do almejado para as edificações inteligentes com patamares de eficiência energética. Pois, se a temperatura das fachadas e do telhado atingem valores específicos, o resultado é o desconforto térmico dos ocupantes. Assim, aparelhos de refrigeração e de ar condicionado podem ser adicionados aos edifícios contribuindo para o aumento da demanda energética. Ao serem analisadas as premissas de instalação dos módulos FVs, a energia produzida pelos mesmos pode não suprir a demanda adicional oriunda das perturbações da integração e/ou aplicação dos módulos aos edifícios. Neste cenário, todos esses processos servem de substrato para os debates envolvendo a sustentabilidade no meio urbano, sobretudo as iniciativas para expandir as fontes alternativas de energia e também para promover a eficiência energética do ambiente construtivo urbano.

Portanto, esse trabalho se propõe a elaborar uma bancada instrumentada com os devidos equipamentos e dispositivos capazes de analisar o desempenho de sistemas BIPVs e BAPVs, considerando a bibliografia consultada. No Capítulo Materiais e Métodos, são expostos todos os passos tomados para elaboração da bancada de ensaios, bem como os métodos associados à cada parte efetuada durante o desenvolvimento deste trabalho.

4. Materiais e Métodos

O sistema BAPV considera os módulos FVs aplicados à envoltória construtiva com o auxílio de estruturas de fixação. Entretanto, eles não consideram os aspectos arquitetônicos das edificações, como forma, orientação e tipo de material utilizado. Mesmo assim, esses sistemas são os mais encontrados em edificações no geral. Outro conceito voltado à inserção das fontes renováveis de energia no meio urbano é o sistema BIPV. Esse tipo de sistema integra os módulos FVs à edificação, uma vez que esses equipamentos se tornam parte da envoltória da edificação. Conforme citado anteriormente, para ambos os sistemas, é importante a realização de estudos direcionados tanto à eficiência dos módulos FVs ou para a otimização do desempenho térmico da envoltória das edificações. Para esse segundo caso, entende-se que as altas temperaturas de operação (T_{OP}) dos módulos possam interferir nos processos de troca de calor entre a edificação e o ambiente no entorno, esquentando o ambiente construído.

Abordando os módulos FVs e seu funcionamento efetivo, eles são altamente impactados pela configuração climática do local onde são implementados. Fatores como velocidade do vento (V_{VENTO}), umidade relativa do ar (RH), direção do vento (D_{VENTO}), temperatura do ar (T_a) e radiação solar (G_{SOLAR}) atuam no processo de conversão fotovoltaica dos módulos FVs, influenciando o montante de energia/potência produzida ($P_{SAÍDA}$). Os parâmetros T_a , G_{SOLAR} e V_{VENTO} são importantes nas análises contendo os módulos FVs e sua eficiência. Alguns fatores ambientais são relevantes e inclusive são inseridos em normas e padrões adotados internacionalmente voltados para as análises que incluem aplicações com módulos FVs, como por exemplo:

- a) Norma IEC 1215: as condições padrões para realização de testes (STC) com módulos fotovoltaicos devem obedecer aos valores de 1000 W/m^2 para irradiância solar, 25°C de temperatura de operação nas células FVs e 1,5 AM;
- b) Normas NBR11876/EB2176 NBR12137/MB378A;
- c) Norma IEC 60904 determina que em painéis de c-Si a intensidade de radiação deve obedecer ser de 1000 W/m^2 (G_{SOLAR}), 1,5 AM e temperatura de ambiente de 25° (T_a);

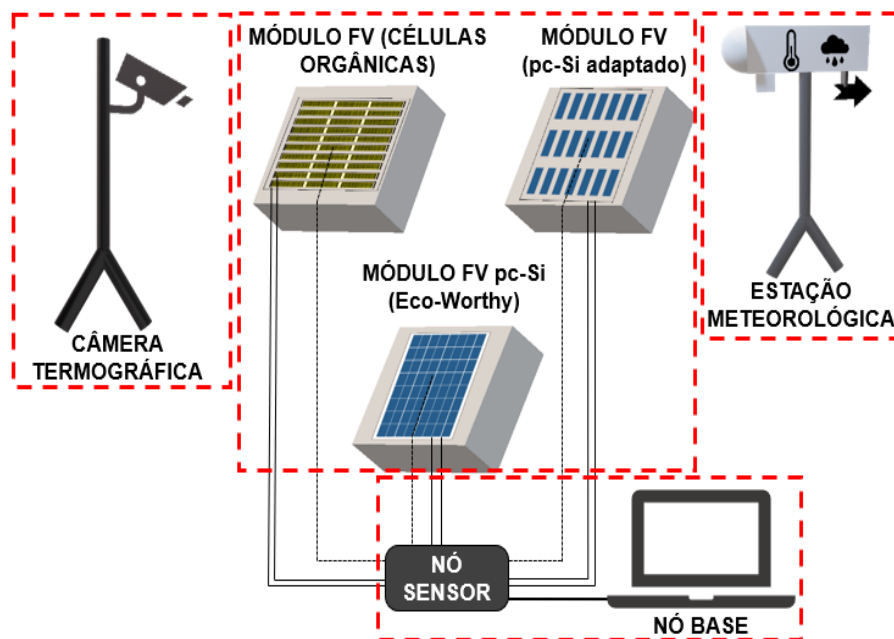
- d) Padrão NOCT: adota a norma IEC 61215 que delimita G_{SOLAR} em 800 W/m^2 ; 1,5 AM; T_a em 20°C ; V_{VENTO} em 1 m/s ;
- e) O padrão SNL adota T_a , V_{VENTO} , G_{SOLAR} como parâmetros para cálculo da T_{OP} das células FVs em módulos FVs. Esse padrão também utiliza os valores da norma IEC 61215.

Para compor a rede de monitoramento dos sistemas BAPVs e BIPVs idealizados neste trabalho, a metodologia utilizada foi dividida em algumas etapas que serão divididas em subitens deste Capítulo. A ilustração presente na Figura 26 esboça a bancada montada para a realização dos ensaios. A primeira etapa do trabalho foi a elaboração de uma rede para coleta dos dados. Foram inseridos sensores de temperatura para duas análises: no sistema BIPV, foi elaborado um sensor de T_s que foi colocado na superfície de contato entre o módulo FV e o elemento construtivo; nos ensaios contendo os sistemas BAPVs, dois sensores de temperatura foram acoplados na parte traseira do módulo FV para aferição da T_{OP} do equipamento, e outro sensor de T_s colocado na superfície frontal do bloco de concreto voltada para o módulo FV.

Paralelamente, foram utilizados sensores característicos para coleta de dados relativos à tensão elétrica (V) e corrente elétrica (I), gerados pelos módulos FVs. Através do arsenal bibliográfico levantado, esses dados possibilitam análises referentes às condições dos sistemas BAPV e BIPV para diferentes valores de temperatura de operação (T_{OP}) dos módulos FVs, bem como para as condições climáticas e ambientais do local de aplicação desses sistemas.

Ainda, para extração dos dados climáticos e ambientais do local onde foram alocados os sistemas BAPV e BIPV estudados, também foi utilizada uma estação meteorológica na bancada de testes. Outro dispositivo importante nas análises térmicas de temperatura superficial nos módulos FVs, foi uma máquina termográfica. Esse equipamento possui ferramentas capazes de averiguar a distribuição do calor ao longo dos módulos FVs, e também capturar o comportamento térmico dos corpos de prova em concreto, configurando, assim, os sistemas BAPV e BIPV. A distribuição física da bancada de testes está descrita pela ilustração da Figura 26, onde cada parte assinalada na imagem será explanada nos subitens a seguir.

Figura 26 – Esquemático da bancada de testes composta para o monitoramento dos sistemas BAPV e BIPV propostos.



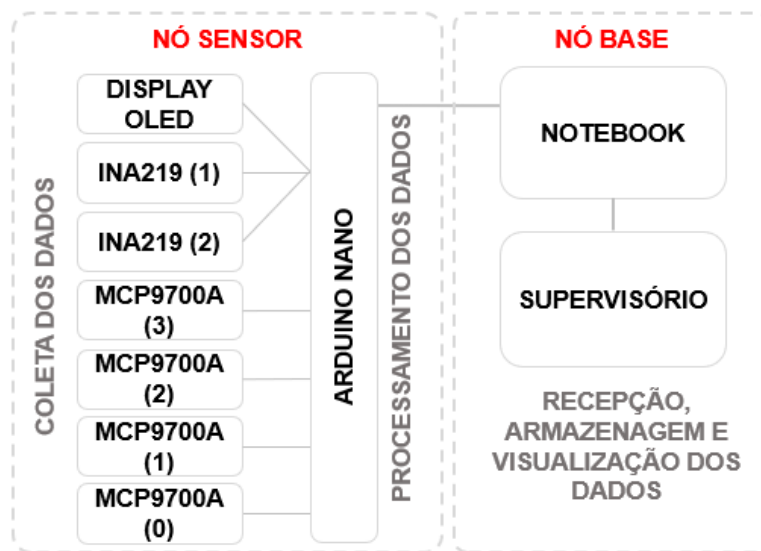
Fonte: Autor.

4.1 Rede de sensores para monitoramento dos sistemas BAPVs e BIPVs

Com o auxílio de elementos eletrônicos foi desenvolvido um método de aquisição de dados extraídos dos sistemas BAPVs e BIPVs montados em bancada. O diagrama apresentado pela Figura 27 ilustra o diagrama de blocos associado ao desenvolvimento da rede de sensores para monitoramento da bancada. Os sensores de temperatura (T_{OP} e T_s) juntamente com os sensores de tensão e corrente foram conectados ao microcontrolador Arduino Nano. Adicionalmente, foi conectado ao nó sensor um *display* OLED para visualização dos dados em tempo real. Os dados eram gerados pelos sistemas BAPVs e BIPVs analisados, sendo que eles eram processados pelo microprocessador Arduino Nano. Posteriormente, os dados eram transmitidos ao nó base composto por um *notebook*, onde um sistema supervisor foi programado para recepção dos dados.

Pelo diagrama da Figura 27, tem-se as etapas vinculadas ao processo de coleta, processamento e disponibilização dos dados de interesse. Os elementos sensoriais responsáveis pela coleta da T_{OP} e da T_S foram os transdutores MCP9700A. Para a coleta dos dados de tensão (V) e corrente (A), o sensor adotado foi o INA219. Os sinais provenientes desses sensores eram processados por meio do microcontrolador Arduino Nano. Esse microcontrolador recebe os sinais de tensão, oriundos dos sensores conectados em suas portas analógicas e digitais, sendo que por meio de um conversor AD característico, traduz os níveis de tensão em valores numéricos. Após, os dados eram transmitidos do nó sensor ao nó base por meio de conexão serial, onde o nó base estava conectado a um sistema supervisorio para recepção e disponibilização dos dados.

Figura 27 – Diagrama complementar e ilustrativo das partes necessárias para desenvolvimento da rede de sensores.



Fonte: autor.

A coleta dos dados de temperatura superficial e de operação das células FVs, foi realizada pelo CI (Circuito Integrado) MCP9700A do padrão TO-92. Trata-se de um termoresistor linear ativo, onde a tensão de saída é diretamente proporcional à temperatura capturada. O MCP9700A pode medir com precisão a temperatura de -40°C a $+150^{\circ}\text{C}$. A saída do CI é calibrada para $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ e possui um deslocamento DC de 500 mV . O MCP9700A é embalado em pacotes SC-70 de 5 pinos que economizam espaço, tornando-o ideal para aplicações de baixo custo e espaço reduzido. Os dados

fornecidos pelo CI estão em escala analógica, compatível com as entradas do microcontrolador Arduino Nano. A Figura 28 (a) ilustra a configuração física do MCP9700A.

Ao idealizar o monitoramento dos dados oriundos dos sistemas BAPV e BIPV, para cada dado de interesse foi utilizado um sensor característico. A aferição dos valores de tensão elétrica (V) e corrente elétrica (I) dos módulos FVs foi efetuada pelos módulos sensores INA219 da fabricante *Texas Instruments*. Esse dispositivo possui um resistor *shunt* (0,1 mΩ) interno que possibilita a medição de valores de corrente elétrica. Utilizando a Lei de Ohm ($V = R \cdot I$) os valores de tensão obedecem a essa definição, sendo que eles são proporcionais à corrente elétrica circulante. O INA219 permite a elaboração de redes de sensores onde a corrente proveniente do equipamento monitorado não supere 3,2 A. Na ilustração da Figura 28 (b), tem-se o INA219.

Com o intuito de visualizar os dados em tempo real no nó sensor, um *display* OLED (*Organic Light-Emitting Diode*) foi conectado ao Arduino Nano. A ilustração da Figura 28 (c) apresenta esse dispositivo. O *display* possui 0,96 polegadas onde as informações coletadas pelos sensores são escritas em sua tela. A cada intervalo de tempo programado junto ao algoritmo, os dados são atualizados no *display*. Ele possui nitidez considerável ao exibir os dados com 128X64 *pixels* controlados, individualmente, pelo protocolo I2C. Ele possui entradas *Serial Data* (SDA) e *Serial Clock* (SLC) que, incrementadas com o protocolo I2C, podem ser conectados de forma serial. Em seu interior, tem-se o controlador SSD1306. Para ser utilizado nesse trabalho, foi necessário escrever no programa elaborado em linguagem C++, compatível com a plataforma Arduino, a biblioteca específica que concebe a adoção do *display* OLED.

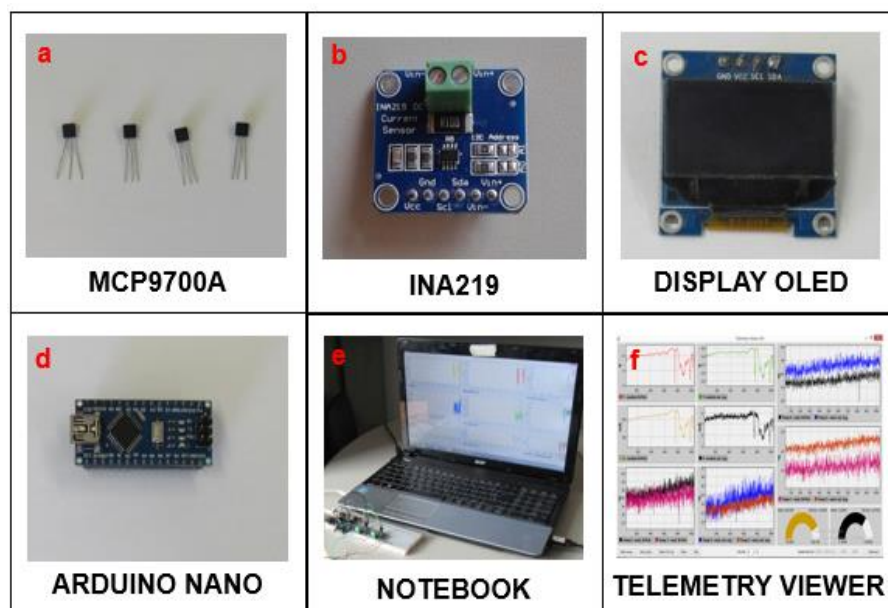
O elemento central do nó sensor, que recebe os sinais dos sensores os processando em informações legíveis para o usuário da rede é o Arduino Nano. Entre suas diversas versões, o Arduino pode ser adotado em projetos envolvendo redes de sensores, já que possui entradas e portas específicas para alocação de sensores. O Arduino Nano é uma placa pequena, completa e com manipulação acessível baseada no microcontrolador ATmega328. Ele possui entradas analógicas e digitais, operando a partir de uma fonte de tensão de 5 V. Esse dispositivo detém uma plataforma própria de acesso livre, onde desenvolvedores de redes de sensoriamento disponibilizam seus projetos, incrementando a plataforma com bibliotecas e funcionalidades vastas. A versão utilizada

no trabalho foi a 3.0 com conexão serial via USB. Sua configuração física é ilustrada pela Figura 28 (d).

O nó base foi composto por um *notebook* da marca Acer com processador Intel® Core™ i5-4210U, modelo Aspire E5-571-56R0, com sistema operacional Windows 8.1 e memória de 6 GB (RAM). O nó sensor foi conectado ao nó base por meio da entrada USB, que possibilita conexão serial direta. A plataforma Arduino possui um monitor serial que esboça os dados conforme uma função específica escrita no algoritmo. Além dessa funcionalidade, supervisórios podem ser associados à rede de sensores para visualização dos dados coletados. O *notebook* utilizado junto à bancada de testes está assinalado na imagem da Figura 28 (e).

Ainda, à rede de sensores foi introduzido o supervisório *Telemetry Viewer*, ilustrado na Figura 28 (f). Esse *software* conecta-se diretamente à porta serial do Arduino, recebendo os dados oriundos da rede de sensores usada para o monitoramento dos sistemas BAPVs e BIPVs. Essencialmente, esse supervisório capta os dados oriundos do nó sensor por meio de uma adequação realizada junto ao algoritmo elaborado. No programa, foi criada uma variável para elencar os dados coletados pelos sensores, acrescentando os dados a um pacote de informações que, ao ser enfileirado, transmite os dados para a porta serial do Arduino Nano e, posteriormente, ao *Telemetry Viewer*. A partir da padronização fornecida pelo supervisório, os dados foram separados, elencando-os de forma que, ao finalizar os ensaios, um arquivo em extensão “.txt” era gerado.

Figura 28 – Elementos associados à rede de monitoramento dos sistemas BAPVs e BIPVs em bancada.

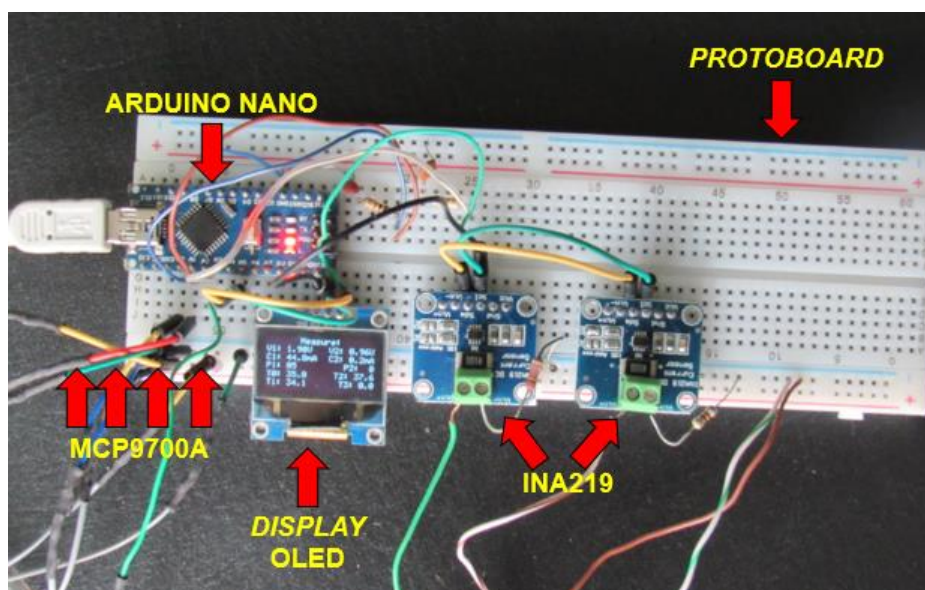


Fonte: autor.

4.1.1 Desenvolvimento da rede de sensores para monitoramento dos sistemas BAPV e BIPV

A composição do nó sensor está representada pela ilustração da Figura 29. A partir das entradas do Arduino Nano, os sensores MCP9700A e INA219, juntamente com o *display* OLED, foram conectados às entradas analógicas do microcontrolador Atmega328. Para cada ensaio realizado, as adaptações necessárias foram feitas no nó sensor, alternando a quantidade de sensores necessários para a coleta de dados em cada ensaio. O nó sensor foi desenvolvido em placa *protoboard* onde os sensores, *display* e Arduino Nano foram posicionados conforme a Figura 29. A elaboração dos sensores utilizados, bem como os processos de calibrações adotados são explicados a seguir.

Figura 29 – Composição do nó sensor associado à rede de monitoramento.



Fonte: Autor.

O microcontrolador Arduino Nano possui entradas analógicas e digitais para conexão de dispositivos com valores nas duas escalas. As portas A0, A1, A2, A4 e A5 possibilitam a inserção de dispositivos com leituras analógicas de sinais elétricos. Para este trabalho, todos os módulos sensoriais adotados foram conectados nas portas analógicas do Arduino Nano. Os sensores de temperatura MCP9700A, responsáveis pela captura dos dados de temperatura de superfície (T_s) e temperatura de operação das células FVs (T_{OP}) foram inseridos nas portas A0, A1, A2 e A3. Cada valor proveniente dos sistemas BAPVs e BIPVs foi separado dentro do algoritmo desenvolvido.

Os sensores MCP9700A capturaram os valores de temperatura do corpo de prova em concreto com o módulo FV, no caso das simulações com o sistema BIPV. Já no sistema BAPV, os sensores foram posicionados na parte traseira do módulo FV e na face superior do concreto (voltada para o módulo). Os pulsos dos sinais de tensão gerados pelo MCP9700A foram enviados as portas analógicas do Arduino Nano, sendo que a partir do algoritmo desenvolvido em linguagem C++, os dados foram convertidos em valores numéricos pelo Atmega328.

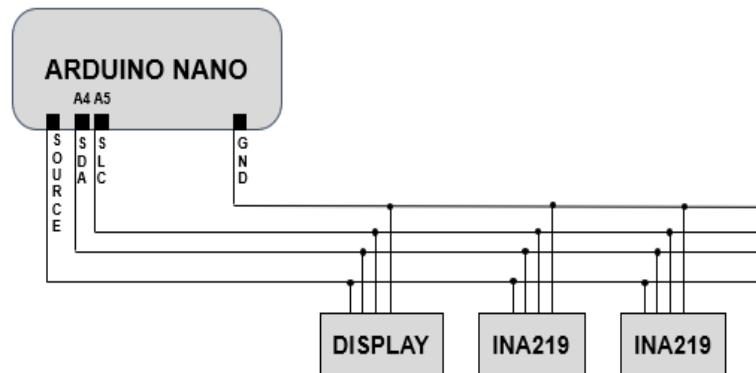
As portas A4 e A5 do Arduino Nano possuem uma finalidade específica para conexão de diversos dispositivos com a utilização do protocolo de comunicação I2C (*Inter-Integrated Circuit*). Tais entradas podem ser utilizadas como barramento de comunicação

serial, onde é necessária a utilização da biblioteca adequada no algoritmo elaborado na plataforma Arduino. Esse protocolo concebe a realização de projetos onde periféricos, ou dispositivos, são associados ao microcontrolador central a partir de uma relação hierárquica de mestre e escravo (*master – slave*). O *master* proporciona a comunicação entre os agentes atrelados ao barramento, enviando solicitações e comandos aos “escravos”. No microcontrolador Atmega328, pelas portas A4 e A5, é possível associar até 127 “escravos”, atrelados ao barramento serial dado pelo protocolo I2C. Entre outros elementos que utilizam esse protocolo têm-se o Raspberry, memórias externas, sensores diversos (temperatura, umidade, etc.) entre outros equipamentos.

Tratando das entradas, a entrada A4 do Arduino caracteriza-se por ser um pino SDA (*Serial Data*) e a entrada A5 um SCL (*Serial Clock*). A entrada SDA transmite os dados efetivamente para o *master* e o SCL serve para temporizar (*clock*) o dado proveniente de cada *slave* conectado ao barramento. O pino SDA tem como característica a bidirecionalidade para comunicação entre os elementos integrantes do nó sensor. A Figura 30 apresenta de forma ilustrada como se dá o barramento serial onde os sensores INA219 e o *display* OLED foram conectados. Como pode ser visualizado, as portas do Arduino Nano adequam-se aos terminais de cada dispositivo adotado na composição do nó sensor.

Dos módulos FVs, os sensores INA219 extraíram os dados de tensão (V) e corrente elétrica (I). O INA219 possui duas entradas características para inserção dos cabos de condução de energia dos módulos. O aterramento utilizado na placa de desenvolvimento do nó sensor foi oriundo do Arduino Nano. Esse método foi utilizado como o terra referencial para alocação junto ao terminal negativo do módulo FV. Duas cargas resistivas foram somadas ao trabalho para excitar a circulação de corrente elétrica, para que os módulos FVs não se comportassem como circuitos abertos (V_{OC} e I_{SH}).

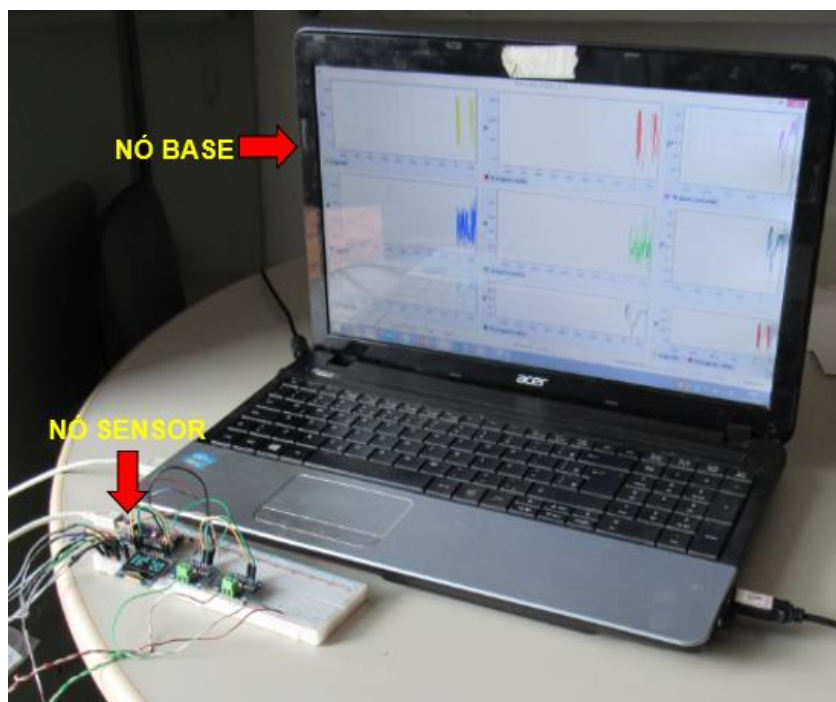
Figura 30 – Esquemático ilustrativo da distribuição das conexões dos dispositivos do nó sensor ao barramento SDA e SCL disponibilizado pelas entradas A4 e A5 do Arduino Nano.



Fonte: autor.

Através da conexão serial do Arduino Nano, o nó base foi conectado diretamente ao nó sensor. Os dados de tensão (V) e corrente (I) eram coletados pelos sensores INA219 e os dados de temperatura pelos MCP9700A. Os dados, uma vez coletados pelos sensores e processados pelo Arduino Nano, eram enviados ao nó base para exposição e ilustração dos mesmos. Para tal, o *software* de aquisição e disponibilização dos dados foi inserido no nó base. O *Telemetry Viewer* possui ferramentas de uso livre fornecidas pelo desenvolvedor da aplicação. A vantagem na utilização desse supervisório é o arquivo gerado ao final de cada ensaio em formato compatível com outros aplicativos e programas, como o *Microsoft Office Excel* por exemplo. A Figura 31 apresenta a rede de sensores construída para monitoramento dos sistemas BAPVs e BIPVs.

Figura 31 – Rede de sensores desenvolvida para monitoramento e aferição dos dados de temperatura superficial, de tensão e corrente elétrica.



Fonte: Autor.

4.1.2 Elaboração dos sensores de temperatura operacional (T_{OP}) e temperatura superficial (T_s)

Para os ensaios efetuados com os sistemas BIPVs, foi desenvolvido um sensor de T_s que realizou a coleta dos dados de temperatura oriunda da integração entre o módulo FV e concreto. Já as simulações em bancada contendo os sistemas BAPVs, esse mesmo sensor foi fixado à superfície do corpo de prova em concreto voltada para o módulo FV enquanto outro sensor foi acoplado à face traseira do módulo FV, coletando assim os valores referentes à T_{OP} do módulo. São nomenclaturas distintas pois, em cada caso a perspectiva de observação também é diferente. Porém, como a composição física do MCP9700A é reduzida, o mesmo foi implementado nessa zona de contato entre os

elementos componentes do sistema BIPV, ao passo que nos ensaios com o BAPV eles foram distribuídos em dois pontos característicos, conforme apontado.

Para os ensaios simulando os sistemas BAPVs, do espaçamento obtido entre o módulo FV e a peça em concreto, dois pontos de monitoramento foram contemplados. Um sensor de temperatura foi conectado à parte traseira do módulo FV, representando assim a T_{OP} do módulo. Já o outro sensor foi colocado na face superficial do corpo de prova voltada para o módulo FV, coletando, assim, os valores referentes à T_s do concreto. Assim, o processo de transferência de calor por convecção vinculado ao sistema BAPV foi caracterizado pela alocação dos sensores MCP9700A nas partes citadas.

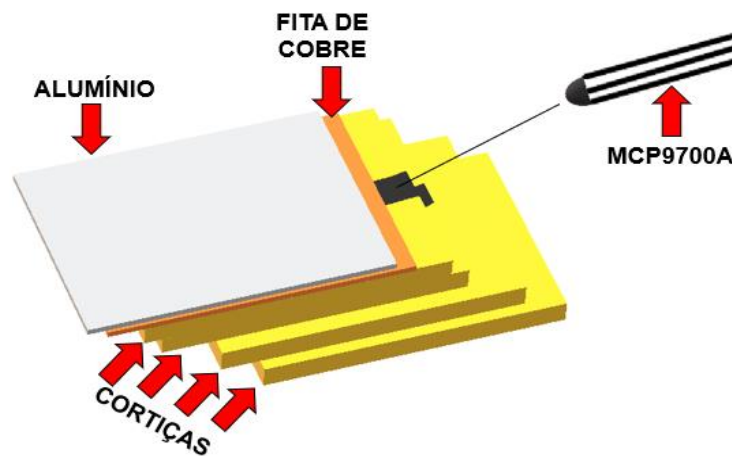
Com o intuito de assegurar as leituras realizadas pelos MCP9700A, foi necessário realizar um método de calibração nesses dispositivos. A partir de uma sonda profissional de temperatura superficial de objetos da fabricante Testo, os sensores responsáveis pela coleta dos dados de T_s foram calibrados para fornecer os dados de temperatura o mais próximo das leituras obtidas com a sonda. Sendo assim, preliminarmente foram feitos testes com o MCP9700A acerca dos dados produzidos pelos sensores comparando-os com os dados da sonda. Posteriormente ao algoritmo foram adicionados valores calculados a partir da comparação dos dados para que os dados coletados pelo MCP9700A fossem similares aos dados coletados pela sonda. A sonda Testo utilizada foi fornecida pelo Laboratório de Conforto Térmico da PUC-Campinas. Com o auxílio de trabalhos consultados na literatura, o sensor MCP9700A foi calibrado para incorporar-se à bancada de testes.

Conforme proposto por OLIVEIRA (2015) e MOTA et al. (2018), a utilização de circuitos integrados para elaboração de sensores de temperatura superficial deve passar por alguns procedimentos adaptativos. Esse passo torna-se importante, uma vez que os dados de T_s referem-se ao ponto de fixação específico do sensor, e não às condições do ambiente onde esse sensor será utilizado. Logo, através de um processo de encapsulamento com material isolante, é possível construir um sensor de temperatura de superfície com o CI MCP9700A. Esse transdutor é padronizado no modelo TO-92 e possui três terminais para conexão, sendo fonte (V_{CC}), terra (GND) e sinal. Em cada terminal foi colocado material isolante para que não houvesse contato entre eles. Ainda,

em todo transdutor foi incorporado material isolante para não haver contato com umidade e impurezas do ar (OLIVEIRA, et al., 2015).

A Figura 32 ilustra as camadas de material isolante e do condutor térmico recortados para construção do sensor de T_s . Foram utilizadas quatro camadas de cortiça em formato retangular, sendo que em duas delas foram feitas aberturas para inserção do transdutor MCP9700A de forma centralizada. A cortiça possui propriedades de isolamento térmico e comportou-se de forma adequada nos testes de calibração do sensor de temperatura superficial. Duas camadas adicionais de material com propriedades térmicas de condução de calor foram implementadas no protótipo, sendo uma delas composta por uma placa de alumínio e a outra por cobre. A partir do orifício feito para colocação do MCP9700A, juntamente com as camadas de isolamento, o sensor estava apto a capturar os dados de T_s inerentes ao ponto exato de alocação do mesmo.

Figura 32 – Camadas de vedação para isolamento do MCP9700A para confecção dos sensores de T_s .



Fonte: Autor.

As etapas adicionais para elaboração do sensor de T_s e de T_{OP} com o MCP9700A estão assinaladas na Figura 33 (a), (b), (c) e (d). A Figura 33 (a) introduz a configuração física do transdutor com seus terminais de comunicação e alimentação. O encapsulamento implementado nos terminais do transdutor foi constituído por uma fibra termoretrátil que realizou a vedação de cada terminal e também do circuito integrado do MCP9700A, conforme a Figura 33 (b). Essa configuração elaborada conforme a Figura 33 (b) foi a adotada para coleta dos dados de T_{OP} dos módulos FVs. Esse material foi

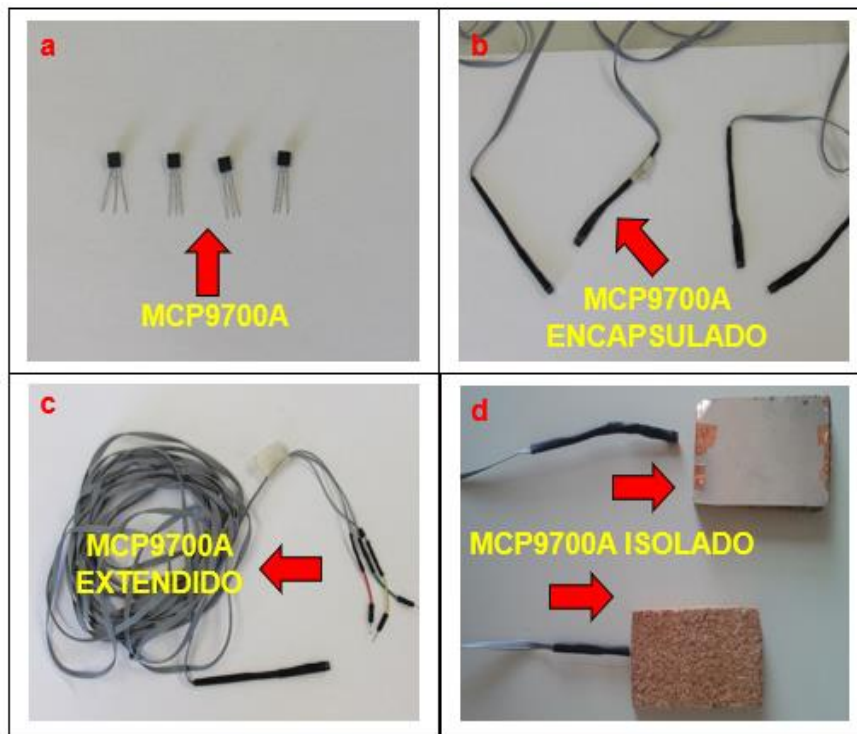
fornecido pelo Laboratório de Meios de Transmissão e Redes de Comunicação de Dados da PUC-Campinas. Essa configuração do MCP9700A encapsulado foi colocada na zona de contato entre o elemento fotovoltaico e o bloco de concreto nos sistemas BIPVs analisados.

Os terminais do MCP9700A foram soldados em cabos tipo *flat* estendidos a fim de conectá-los ao nó sensor (Arduino Nano). Essa etapa está assinalada na Figura 33 (c), onde o sensor confeccionado estava pronto para calibração com os equipamentos profissionais fornecidos pela PUC-Campinas. Ainda, a Figura 33 (d) ilustra o protótipo finalmente elaborado com suas devidas adaptações e isolamento com as camadas de cortiça para coleta dos dados de T_s nos sistemas BAPVs ensaiados.

O processo de calibração do transdutor MCP9700A ocorreu em duas etapas, considerando as duas aplicações vislumbradas para esse CI. Para validação do protótipo contendo o sensor de T_s , vinculado aos sistemas BIPVs, a sonda de temperatura superficial Testo modelo 445 foi utilizada, posicionando-a paralelamente ao CI encapsulado com material termoretrátil. Já no processo inerente à calibração do MCP9700A para coleta dos dados de T_{OP} , foi utilizada uma máquina termográfica, detalhada a seguir. Com as imagens fornecidas por esse equipamento, o MCP9700A foi ajustado para corresponder aos valores retratados pela máquina termográfica. A sonda Testo 445 é apresentada pela imagem da Figura 34.

O método de calibração dos MCP9700A é possível uma vez que os dados coletados por esse transdutor se dão em níveis de tensão. Logo, dentro do algoritmo desenvolvido em linguagem C++, esses mesmos dados foram convertidos em valores numéricos próximos aos fornecidos pela sonda Testo 445 e pela máquina termográfica. Salienta-se que as resoluções desses equipamentos são diferentes, sendo que a sonda Testo possui maior precisão que o CI MCP9700A, por se tratar de um equipamento profissional. Entretanto, além de possuir preço acessível, o MCP9700A acrescenta ainda essa funcionalidade, propiciando a manipulação do dado coletado para aproximar-se de sensores de porte profissional. Sendo assim, o protótipo desenvolvido para o monitoramento da T_s e T_{OP} comportou-se satisfatoriamente dentro do contexto imaginado para os sistemas BIPVs e BAPVs.

Figura 33 – Passo a passo da confecção do sensor de temperatura superficial e de temperatura de operação adotando o MCP9700A.



Fonte: Autor.

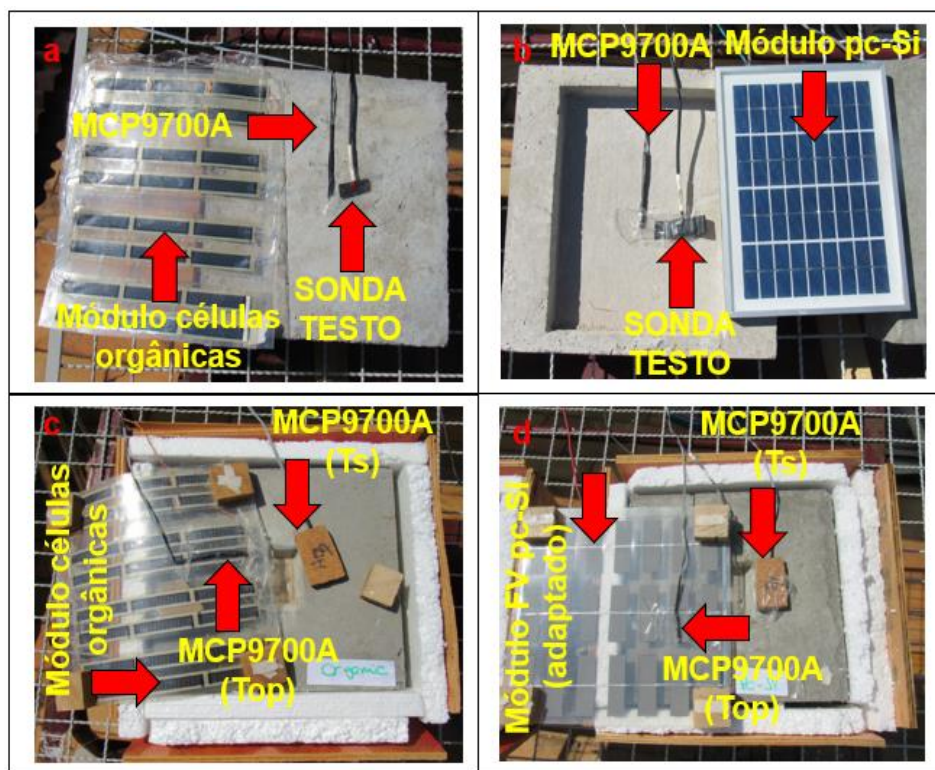
Figura 34 – Sonda de temperatura superficial Testo 445 usada para calibração dos sensores elaborados com o MCP9700A.



Fonte: Autor.

O posicionamento dos sensores de T_s com o MCP9700A e a sonda Testo 445 é destacado nas ilustrações da Figura 35 (a), (b), (c) e (d). Para os dois sistemas estudados, BIPV e BAPV, os sensores foram alocados conforme é demonstrado nessa figura. Nos ensaios contendo os sistemas BIPV, foram utilizados dois sensores MCP9700A posicionados na superfície de contato entre o módulo FV e o bloco de concreto, bem como duas sondas Testo 445 alocadas estrategicamente conforme é ilustrado pela Figura 35 (a) e (b). As tecnologias fotovoltaicas adotadas foram alternadas para compor os ensaios, sendo que os módulos utilizados foram constituídos por silício policristalino (pc-Si) e células orgânicas, conforme os objetivos traçados para este trabalho.

Figura 35 – Posicionamento das sondas e dos sensores de temperatura de superfície e de operação dos módulos FVs para as simulações contendo os sistemas BIPVs (a) e (b); e BAPVs (c) e (d), respectivamente.



Fonte: autor.

Por meio do posicionamento dos sensores MCP9700A, a T_s atingida nos sistemas BIPVs era capturada pelo nó sensor, sendo enviada, posteriormente, ao nó base. Um outro sensor MCP9700A foi adicionado a um bloco de concreto, sem nenhuma

integração com células FVs. Portanto, para os ensaios envolvendo os sistemas BIPVs três blocos de concreto foram colocados em bancada e são explicados e esboçados a seguir.

Conforme a revisão bibliográfica consultada (TRINURUK, SORAPIPATANA, CHENVIDHYA, 2009), (SANTOLIN, 2014), (MUZATHIK, 2014), (MARTÍNEZ, ANDÚJAR, ENRIQUE, 2014), (ZHOU, et al., 2017), a temperatura de operação (T_{OP}) das células FVs pode ser medida a partir de um ponto estratégico na face traseira dos módulos FVs. Nos sistemas BAPVs os MCP9700A foram fixados em dois pontos característicos. Os MCP9700A responsáveis pela captura dos dados de T_{OP} foram fixados na traseira dos módulos FVs. Os sensores utilizados nessa etapa foram apenas encapsulados. Os MCP9700A posicionados nas faces superficiais dos blocos de concreto foram isolados com a cápsula de cortiça. As Figura 35 (c) e (d) ilustram o posicionamento dos sensores de temperatura superficial (T_S) e de temperatura de operação das células FVs (T_{OP}) para os casos ensaiados com os sistemas BAPVs.

4.1.3 Algoritmo para aferição dos dados de temperatura superficial e de temperatura de operação das células FVs, tensão e corrente elétrica e o *software* supervisor *Telemetry Viewer*

Através da plataforma de uso livre e gratuito Arduino, foi desenvolvido um algoritmo em linguagem C++. Assim, os nós sensor e base foram concebidos para aferição dos dados junto à bancada de testes. Para coletar os dados de T_S e T_{OP} das células FVs, tensão e corrente elétrica, o código foi escrito com a adoção dos comandos necessários para a comunicação entre os elementos da rede. As leituras provenientes de cada sensor MCP9700A e INA219 foram processadas pelo microcontrolador Atmega328, no Arduino Nano, sendo que eram transmitidas por meio cabeado até o nó base. Ainda no algoritmo, foi necessária a criação de uma função específica para enviar os dados por meio da porta serial do Arduino Nano ao supervisor *Telemetry Viewer*.

A estrutura do código baseou-se na linguagem C++. Foram utilizadas duas bibliotecas específicas para a fixação de do *display* e do INA219 ao nó sensor. A biblioteca “OLED_I2C.h” padroniza o protocolo de comunicação I2C, que foi o adotado para comunicação entre “*master*” e “*slave*” no barramento serial. Além dessa biblioteca, a “Adafruit_INA219.h” também foi inserida no algoritmo para que o INA219 pudesse ser utilizado junto ao nó sensor. Posteriormente, para identificar os dispositivos fixados ao barramento serial (portas A4 e A5 no Arduino Nano), cada dispositivo foi demoninado conforme as linhas de programação: “OLED *display* (SDA, SCL)”; “Adafruit_INA219 S1”; “Adafruit_INA219 S2”. A partir do endereçamento de cada “*slave*” associado ao nó sensor, cada um executaria as ações de transmissão de dados e recepção dos comandos vindos do “*master*”. Assim, foi possível estabelecer a comunicação entre os três módulos: *display* OLED e INA219 (módulo FV pc-Si e módulo FV células orgânicas) com o Arduino Nano.

Diferente de outros módulos Arduino, o Nano opera com 1,1 V de tensão em seu circuito interno. Logo, foi necessário declarar uma função no código que padroniza a referência interna de tensão para o valor de 1,1 V. Foi utilizada a função `analogReference(INTERNAL)` que fixa a referência interna da conversão AD para a tensão de 1,1 V. A coleta dos dados pelos INA219 foi feita com o uso das leituras provenientes dos canais desse sensor. As funções adotadas correspondem aos comandos “`v1 = S1.getBusVoltage_V`”, “`c1 = S1.getCurrent_mA()`”, “`v2 = S2.getBusVoltage_V()`”; `c2 = S2.getCurrent_mA()`. Com essas funções, os dados de tensão (V) e corrente elétrica (I) eram extraídos dos módulos FVs.

Paralelamente, os dados de temperatura eram coletados pelos MCP9700A. O valor de referência para programação do MCP9700A foi baseado na relação: 0°C é igual 500 mV. A cada grau acrescido de temperatura, 10 mV de tensão foi somado ao valor dado como referência. Exemplificando, 725 mV seria igual a 22,5°C $(725 - 500)/10 = 22,5$). Após essa conversão, os dados eram enviados ao “*slave*” *display* OLED e ao nó base. Os dados de tensão elétrica (v1 e v2); corrente elétrica (i1 e i2); temperatura (t0, t1, t2, t3) foram coletados a cada minuto. Posteriormente, desses dados foram retiradas as médias aritméticas a cada 10 minutos. Esse fato deve-se à estação meteorológica

adotada na bancada de testes, bem como os dados de radiação solar que são fornecidos também nessa mesma periodicidade.

Ao nó base foi inserido o supervisor *Telemetry Viewer*, sendo ele conectado à porta serial do Arduino Nano para receber o pacote contendo os dados. Para que os dados fossem transmitidos ao supervisor, foi necessário criar no código uma variável específica. Essa variável do tipo *String* mantinha os dados coletados pelo nó sensor. Foram ao todo quatro valores de temperatura (t1, t2, t3 e t4); dois valores de corrente (c1 e c2) e dois tensão (v1 e v2).

O pacote dos dados continha, portanto, os valores das leituras coletadas pelos sensores. Já no supervisor, os dados eram salvos de forma que, ao final de cada ensaio, um arquivo em extensão “.txt” era gerado com todas as informações. Com esse arquivo, os dados foram transferidos para o *Microsoft Office Excel* para manipulações e análises.

4.2 Elaboração dos corpos de prova em concreto

Foram confeccionados quatro corpos de prova em concreto. Os sistemas BIPVs caracterizam-se por apresentar os módulos FVs integrados diretamente ao elemento construtivo. Os sistemas BAPVs possuem estruturas de suporte adicionais para sustentação dos módulos FVs. Em ambos os sistemas, encontram-se os módulos associados ou integrados às fachadas ou aos telhados das edificações. Assim, para realizar as análises referentes ao elemento construtivo, esses foram os corpos de prova desenvolvidos. As dimensões desses corpos de prova foram 30x30x9,5 cm. O traço dos objetos foi composto por 1x2,5x3x0,5 (cimento, areia, brita, água).

Conforme citado anteriormente, os sistemas BIPVs contemplam as edificações onde os módulos FVs são integrados aos elementos construtivos. Portanto, duas adaptações foram realizadas para emular o comportamento sistêmico do BIPV. A Figura 36 (a) ilustra o corpo de prova que foi posto em bancada sem a integração com os módulos FVs

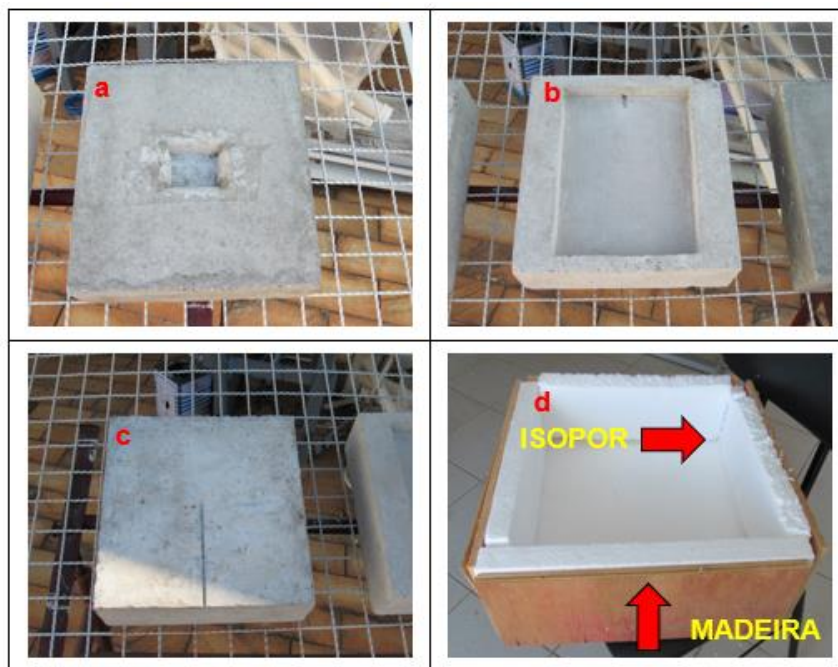
durante os ensaios contendo os sistemas BIPVs. Nesse objeto, foi feito um orifício no meio, onde foi colocado o sensor MCP9700A, isolado com as camadas de cortiça.

A Figura 36 (b) ilustra o corpo de prova adaptado com um recorte centralizado para integração do módulo FV com células de pc-Si. Baseando-se nas dimensões do módulo FV comercial com células de silício policristalino, no corpo de prova apresentado na Figura 36 (b), foi feita uma abertura com as dimensões do equipamento para alocação do mesmo nesse espaço (25,5x19,4x2 cm). A ilustração da Figura 36 (c) mostra o bloco de concreto onde foi feita uma pequena entrada para fixação do sensor de temperatura com o MCP9700 encapsulado com o material termoretrátil.

Através da imagem na Figura 36 (d), tem-se a montagem da caixa adaptada para isolar as laterais dos corpos de prova utilizados nos ensaios contendo o sistema BIPV. Foram utilizadas caixas compostas por madeira revestidas internamente com isopor na parte inferior e nas laterais. As dimensões das caixas foram de: 36,5x5 cm para as laterais e 37x37 cm para a base. Já o isopor foi recortado com as seguintes medidas: para as laterais, o revestimento foi de 31x10,5 cm, sendo que a base inferior também foi de 37x37 cm e a espessura do material de 2,35 cm. Essa adaptação foi concebida para as análises visando compreender a relação de transferência de calor entre os módulos FVs e a face superior do concreto em contato com a estrutura do módulo. Portanto, para isolar o concreto das variações climáticas e ambientais, as caixas adaptadas foram feitas com o auxílio da Maquetaria da PUC-Campinas. As camadas de isolamento elaboradas nas caixas são apresentadas na Figura 37.

A Figura 38 ilustra os corpos de prova utilizados nas simulações contendo os sistemas BAPVs. O orifício centralizado no concreto foi feito para alocação do sensor de temperatura superficial MCP9700A isolado com as camadas de cortiça.

Figura 36 – Corpos de prova em concreto para emulação do sistema BIPV com caixa de isolamento para as laterais.



Fonte: Autor.

Figura37 – Caixas de isolamento elaboradas para os ensaios dos sistemas BIPVs.



Fonte: Autor.

Figura 38 – Corpos de prova elaborados para emulação dos sistemas BAPVs.



Fonte: Autor.

4.3 Módulos fotovoltaicos adotados nas simulações dos sistemas BAPV e BIPV

Os módulos fotovoltaicos utilizados nos sistemas BAPVs e BIPVs analisados em bancada são apresentados na Figura 39 (a), (b) e (c). A ideia deste trabalho foi propor também a associação de tecnologias de células FVs diferentes das células de silício policristalino (pc-Si) tradicionais, contemplando a dinâmica dos sistemas BAPV e BIPV. Mesmo assim, sendo este o tipo de célula FV mais comum dentro no contexto dos painéis fotovoltaicos, dois módulos FVs utilizados neste trabalho tinham o pc-Si como elemento fundamental das células.

A Figura 39 (a) apresenta o módulo FV comercial em pc-Si da fabricante Eco-Worthy em sua parte frontal e traseira. Ele possui o total de 64 células com tamanho de 2x2,6 cm cada. A espessura total desse módulo FV com a estrutura de alumínio nas laterais tem 2 cm, sendo que as dimensões do equipamento são 25,5x19,4 cm. A eficiência do módulo FV Eco-Worthy é informada pelo fabricante como sendo em torno de 17%.

O módulo FV da Figura 39 (a) da fabricante Eco-Worthy custa U\$ 14,43 e foi importado de uma distribuidora americana. Esse equipamento possui estrutura rígida,

onde as células de pc-Si estão encapsuladas por camadas de Etil Vinil Acetato (EVA) e uma base traseria constituída de Fluoreto de Polivinil (PVF) garantindo proteção e suporte ao módulo FV. Todo o laminado é enquadrado em uma estrutura de alumínio para proporcionar resistência estrutural e facilidade de instalação. Isso acarreta maior potência por metro quadrado e menor custo de estrutura de montagem. Entre outras características, o módulo FV da Eco-Worthy possui armação de alumínio anodizado leve e reforçado com vidro temperado, revestido com segurança e anti-reflexo de 3,2 mm de espessura (ECO-WORTHY, 2018).

Com o intuito de acrescentar ao trabalho as novas gerações de células fotovoltaicas, também foi utilizado nos testes realizados, um módulo FV composto por células orgânicas. Na imagem da Figura 39 (b), tem-se a adaptação feita a partir da fita adesiva fotovoltaica comercializada pela fabricante OPV *Infinity*. Trata-se de uma fita de células FVs orgânicas, com estrutura flexível, fixada com adesivo semitransparente na parte dianteira e traseira. Esse equipamento funciona como um “adesivo fotovoltaico” de implementação versátil. Ele pode ser aplicado a hastes, persianas, caixilhos de janelas, vidros, asas de aviões, gabinetes, etc. Essa fita solar é ideal para integradores de energia solar, dispositivos sensores, Internet das coisas (IoT – *Internet of Things*), projetos eletrônicos, fabricantes entre outros.

Para este trabalho, a fita de células orgânicas foi adaptada recortando as ilhas de células FVs em grupos de 6 unidades, compondo 4 ilhas no total (24 células). Apesar do contato com os fornecedores, não foi disponibilizada a composição química das células FVs desse módulo. A representação ilustrativa da Figura 40 apresenta as camadas de materiais envolvidas na elaboração do módulo FV com células FVs orgânicas. As 24 células FVs foram conectadas em série, assim como a fita original era conectada.

Entretanto, durante a etapa de manipulação da fita fotovoltaica, por se tratar de um equipamento altamente sensível, uma das ilhas foi danificada. Isso resultou em três ilhas em funcionamento, conectadas em série. Mesmo assim, as 4 ilhas foram mantidas durante a realização dos ensaios justamente para aproximar os métodos vinculados a cada teste efetuado aproximando o módulo FV da Figura 40 (c). No total, foram 4 ilhas compostas por 6 células cada, totalizando 24 células. Como as células FVs orgânicas não fornecem valores expressivos de tensão e corrente elétrica, as células FVs não

foram retiradas do módulo FV adaptado. Durante as etapas de validação desse módulo FV cada ilha não ultrapassou 1 V de tensão elétrica. Já os valores para a corrente elétrica permaneceram na escala de mili Ampere e os números alcançados pelas células FVs orgânicas serão apresentados abaixo.

Outro ponto a ser salientado é a falta de arcabouço bibliográfico tratando de módulos fotovoltaicos com células orgânicas. Especificamente para o módulo desenvolvido na metodologia deste trabalho, utilizou-se as fundamentações empregadas aos módulos FVs com células de pc-Si, na tentativa de aproximar a estrutura dos módulos em sua composição física. Todavia, os testes contendo os sistemas BAPV e BIPV ocorreram de forma satisfatória, mediante as adaptações realizadas no módulo FV com células orgânicas.

O terceiro módulo FV também foi composto por células FVs de pc-Si. Ele foi confeccionado com o auxílio do Laboratório de Energia Fotovoltaica (LEF) do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI) da cidade de Campinas e é apresentado na imagem da Figura 39 (c). Por meio de uma parceria firmada entre a PUC-Campinas e o CTI, os técnicos do LEF elaboraram esse módulo FV constituído por 21 células FVs de pc-Si com dimensões de 2,1x8 cm. Ambos os módulos FVs das Figura 39 (b) e (c) foram confeccionados distribuindo as células FVs similarmente.

As células FVs do módulo adaptado foram acopladas dentro de duas camadas de material composto por EVA. Posteriormente, foram adicionadas, ao módulo, mais duas camadas de poliestireno expandido para vedação do módulo. Todas as camadas de materiais componentes do módulo FV foram pressurizadas por uma máquina específica disponibilizada pelo CTI. O processo de elaboração desse módulo FV é destacado pela imagem da 41.

As características elétricas e físicas dos módulos FVs utilizados em bancada são apresentadas na Tabela 10. As informações dos equipamentos comerciais foram obtidos dos manuais disponibilizados pelas fabricantes (Eco-Worthy e Infinity OPV), enquanto que o módulo FV adaptado os dados foram passados pelo CTI.

Tabela 10 – Características referentes aos módulos FVs utilizados na bancada de testes emulando os sistemas BAPV e BIPV.

Características elétricas e físicas	Módulo FV pc-Si Eco-Worthy	Módulo FV pc-Si adaptado	Módulo FV com células orgânicas
V_{OC}	22,41 V	4 V	20 V
I_{SH}	0,3 A	0,22 mA	50 mA
$V_{SAÍDA}$	17,9 V	3,64 V	1 V
$I_{SAÍDA}$	0,28 A	89,5 mA	0,5 mA
Número de células	64	21	24
Dimensão do equipamento	25,5x19,4 cm	30x30 cm	30x30 cm

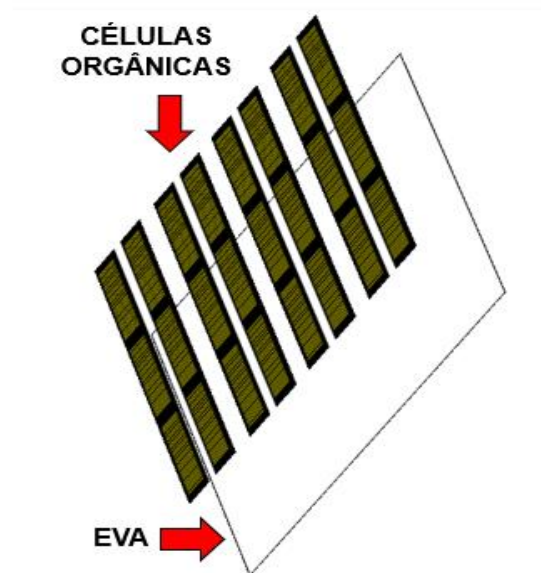
Fonte: Autor.

Figura 39 – Tecnologias de módulos FVs utilizadas nas análises dos sistemas BAPV e BIPV.



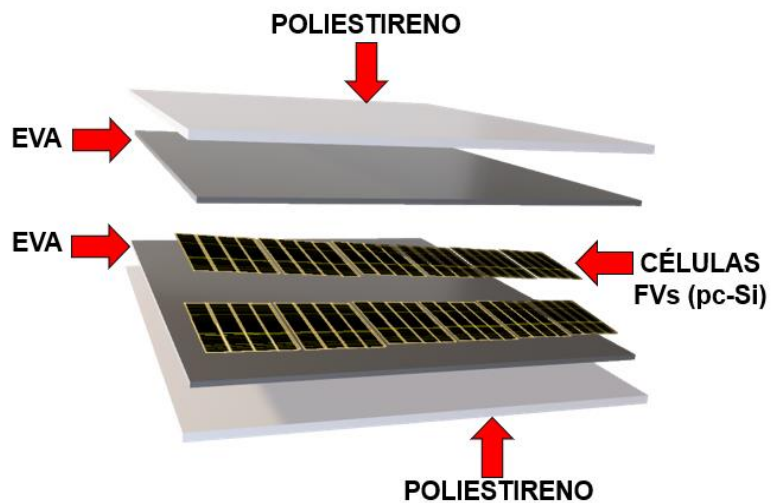
Fonte: Autor.

Figura 40 – Camadas de materiais envolvidos no processo de confecção do módulo FV com células orgânicas



Fonte: Autor.

Figura 41 – Camadas de materiais utilizados para confecção do módulo FV com células de pc-Si.



Fonte: Autor.

4.4 Câmera termográfica para aferição da temperatura de operação dos módulos FVs e da temperatura superficial dos sistemas BAPV e BIPV

Foi incorporada ao trabalho uma máquina termográfica para captura do comportamento térmico dos sistemas BAPVs e BIPVs. Com esse equipamento profissional, identificou-se a distribuição do calor tanto no módulo FV quanto nos corpos de prova em concreto.

A Figura 42 apresenta o equipamento da fabricante FLUKE modelo Ti100 que foi fornecido pelo Laboratório de Conforto Térmico da PUC-Campinas. Esse equipamento caracteriza-se por sua resistência e peso reduzido, fácil manipulação e ajuste, com recursos de foco e disparo eficazes. O sistema para foco da máquina é automático. Esse termovisor auxilia na amostragem de pontos de temperatura distribuídos em qualquer superfície.

Para garantir a efetiva coleta dos dados com a máquina Ti100, as distâncias entre o equipamento e a bancada foram mantidas as mesmas para captura de dados de cada corpo de prova. Na descrição de cada ensaio realizado está contida essa informação.

Todas as imagens capturadas pela máquina Ti100 podem ser salvas em extensões de arquivos compatíveis com aplicativos de leitura de imagens. Sendo assim, ao final de cada ensaio realizado, as imagens eram descarregadas no nó base da rede de monitoramento para verificações e análises. A máquina termográfica da FLUKE possui bateria recarregável e memória expansível graças à entrada para cartão de memória.

Figura 42– Máquina termográfica modelo Ti100 da fabricante FLUKE utilizada na bancada de testes vinculada aos ensaios.



Fonte: Autor.

4.4 Estação meteorológica para coleta de dados ambientais e climáticos próximos à bancada de realização dos testes

A bancada instrumental montada para realização dos ensaios conteve uma estação meteorológica. Esse equipamento foi adicionado ao trabalho para aferição dos dados de temperatura ambiente (T_a), umidade relativa do ar (RH) e velocidade do vento (V_{VENTO}). Com esses dados, é possível estabelecer a relação entre eles e a eficiência elétrica dos módulos FVs. Já os parâmetros elétricos dos módulos FVs, representados pelos valores de tensão e corrente elétrica, foram coletados pelos sensores INA219 associados ao nó sensor da rede de monitoramento montada. Assim, a rede de sensores montada efetuou a coleta dos dados dos módulos, ao passo que a estação meteorológica coletava os dados do ambiente ao redor dos sistemas BAPVs e BIPVs em bancada.

Essencialmente, os dados de temperatura ambiente (T_a), temperatura de operação das células FVs (T_{OP}) e radiação solar (G_{SOLAR}) são os mais debatidos na literatura, onde são estudadas as relações entre esses parâmetros e a eficiência de painéis fotovoltaicos. Ainda, nos sistemas BAPV e BIPV as particularidades da edificação também exercem influência sobre a eficiência dos módulos FVs. Logo, o sensoriamento dos valores relativos à temperatura superficial do concreto se enquadra na abordagem sistêmica do BAPV e BIPV e fomenta estudos e análises, como é o caso deste trabalho.

Além dos dados oriundos da estação meteorológica, os dados de radiação solar (G_{SOLAR}) foram fornecidos pelo Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura da Universidade Estadual de Campinas (CEPAGRI/UNICAMP). Visto que na literatura esses dados são amplamente adotados nas análises envolvendo os módulos FVs, a bancada foi montada para que fosse possível extrair esses dados do local de implementação dos sistemas BAPV e BIPV. Através de solicitações realizadas ao CEPAGRI, os dados foram disponibilizados para que eles fossem acrescentados ao trabalho. A coleta dos dados feita pelo CEPAGRI possui a periodicidade compatível com

a pré-programação da estação meteorológica, onde ambos fornecem os dados a cada 10 minutos.

A estação meteorológica associada à bancada é exemplificada na imagem trazida pela Figura 43. A estação meteorológica *Vantage Vue* da fabricante Davis, modelo K6250, possui uma tela LCD para visualização, bem como mecanismos registradores dos dados coletados pelos sensores presentes em sua estrutura. Esse equipamento é distribuído pelo fornecedor *Agrosystem*. Os dados são coletados por meio dos sensores integrados, acoplados em contato com o ambiente externo. A estação *Vantage Vue* K6250 é composta pela estrutura de monitoramento com os sensores e um console acompanhado de um teclado numérico e tela interativa para visualização dos dados em tempo real.

A transmissão dos dados da estação para o console é feita via rádio em baixa potência (*wireless*). No console tem-se a exibição de todos os dados coletados pela rede de sensores da estação K6250. Dentre os sensores existentes nessa estação, tem-se: sensor de temperatura e umidade interna e externa (-40°C À 65°C e 0 à 100%); sensor de direção e velocidade do vento (0° a 360° e 0 a 67m/s/3 a 241 Km/h); sensor de chuva (0 a 6553 mm); sensor de pressão atmosférica (880 a 1080 mb). A distância máxima de comunicação entre a estação meteorológica e o console é de 300 metros.

Esse equipamento foi disponibilizado pelo Laboratório de Conforto Térmico da PUC-Campinas. Para realizar a leitura dos dados da estação *Vantage Vue* K6250 os dados foram descarregados em um computador específico onde o o *software* para leitura dos dados foi instalado. O *software* *Weatherlink* foi necessário para o registro dos dados da estação meteorológica, bem como para realizar a interação com o computador. O console foi conectado à porta USB do computador e uma vez no *Weatherlink* foi criada uma pasta característica para os ensaios deste trabalho. Ao indentificar a estação conectada ao computador, a comunicação serial estabelecida transmitia os dados do console para o *Weatherlink*. Uma vez que a comunicação era efetivada os dados foram extraídos em formato “.xls” compatível com o *Microsoft Office Excel*.

Figura 43 – Estação meteorológica adotada na bancada de testes vinculada aos ensaios.



Fonte: Autor.

4.5 Caracterização dos ensaios realizados em bancada com os sistemas BIPVs

Nos sistemas BIPVs o sensor de temperatura MCP97000A foi utilizado apenas com o encapsulamento. O contato estabelecido entre o módulo FV e o concreto produz um fluxo de transferência de calor por condução durante o período de operação das células FVs, que funcionam conforme a incidência da radiação solar. A partir de testes realizados com a sonda de temperatura superficial 445 da fabricante Testo, o algoritmo criado foi incrementado com os valores paramétricos para que os dados coletados pelo MCP9700A se aproximassem dos valores capturados pela sonda. Posteriormente, os

módulos FVs foram alternados conforme tecnologias de células FVs distintas, bem como a adoção da caixa de isolamento das laterais do bloco de concreto.

A rede de monitoramento coletou os dados de tensão e corrente dos módulos FVs (v_1 , v_2 , i_1 e i_2). Os dados de temperatura superficial (T_s) também foram coletados pelos MCP9700A (t_1 e t_2). Os dados de temperatura do ar (T_a), umidade relativa do ar, velocidade do vento (V_{VENTO}) foram aferidos pela estação meteorológica posicinada junto à bancada. Os dados de radiação solar (G_{SOLAR}) foram coletados pelo CEPAGRI da UNICAMP, e disponibilizados conforme contato estabelecido com os responsáveis. A distância entre a máquina termográfica e a bancada foi de 75 cm. Todos os ensaios ocorreram no Laboratório de Meios de Transmissão da PUC-Campinas.

A bancada conteve durante a realização dos ensaios três multímetros conectados à saída de cada ilha composta pelas células orgânicas. Com esse método coletou-se os valores de tensão para cada ilha. Já os sensores INA219 foram posicionados ao final da última ilha, onde a conexão em série das células terminava. A partir de prolongamentos nos contatos dos módulos, a rede de sensores coletou os valores de tensão e corrente dos dois módulos FVs. A sonda de temperatura superficial Testo 445 foi adotada nos testes preliminares de instrumentação da bancada para inserção nos BIPVs e BAPVs, justamente para garantir a efetividade dos dados coletados pelos MCP9700A.

A Tabela 11 abaixo descreve cada ensaio contendo os sistemas BIPVs e BAPVs em bancada acompanhada de toda a instrumentação apresentada acima. A alternância entre os módulos FVs correspondeu ao objetivo de identificar as relações existentes entre as diferentes células FVs com a troca de calor com o sistema simulado. Para cada tipo de célula FV o comportamento da T_{OP} é diferente e pode atingir valores distintos, corroborando para o aquecimento do concreto e prejudicando o comportamento térmico desse elemento. A estação meteorológica anexada à bancada coletou os parâmetros climáticos e ambientais para que eles fossem analisados, também, como agentes contribuintes para a eficiência dos módulos FVs.

Os Ensaio I, II, III foram realizados com os sistemas BIPVs no mês de dezembro/2018 durante a primavera e o verão de Campinas, sendo que o Ensaio IV foi efetuado no dia 07/01/2019. O início da coleta dos dados foi às 9 horas e 40 minutos com término às 16 horas e 50 minutos. O isolamento das laterais foi restrito aos ensaios

II e III. Os dados coletados pela rede de sensores foram de temperatura superficial (T_s), tensão (V) e corrente (I), para cada corpo de prova simulado. À bancada vinculada aos ensaios dos sistemas BIPVs um bloco de concreto sem nenhuma tecnologia FV foi posto em monitoramento para coleta dos dados de T_s . A rede de sensores foi programada para coletar os dados a cada minuto. Ao final de cada ensaio, os dados foram compilados retirando a média aritmética (a cada 10 minutos) para que os dados gerados fossem alinhados com a estação meteorológica e também com os dados fornecidos pelo CEPAGRI (G_{SOLAR}).

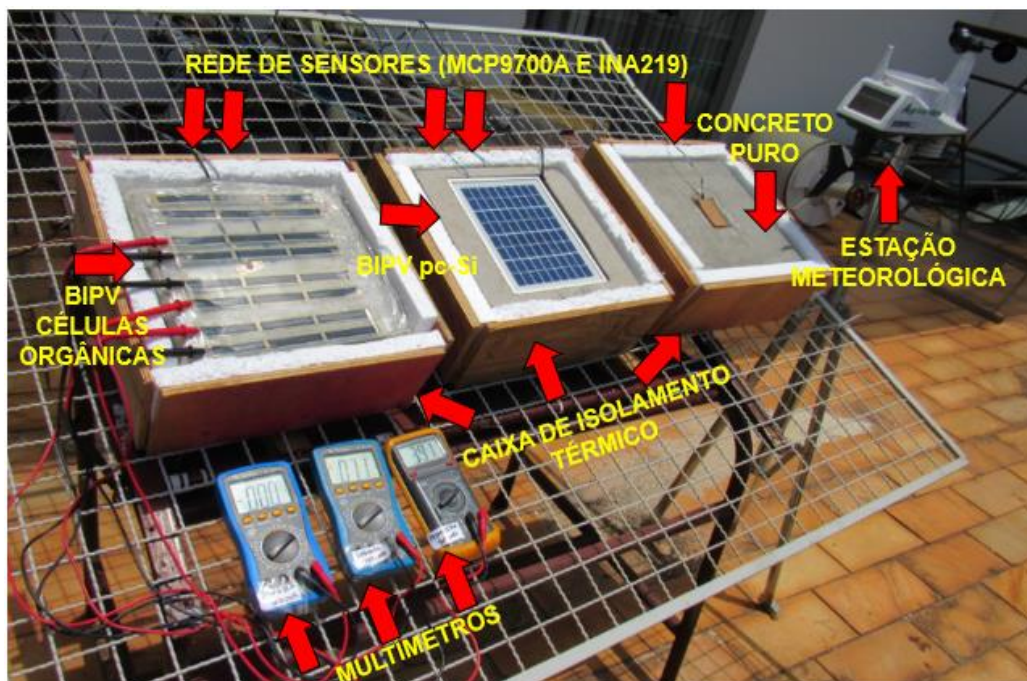
O Ensaio I ocorreu no dia 13/12/2018 em um dia ensolarado e é representado pela Figura 44. O Ensaio II é ilustrado na Figura 45, onde os dados foram coletados no dia 14/12/2018 onde a caixa de isolamento das laterais e da base do bloco de concreto foi associada ao experimento. A ilustração da Figura 46 representa a bancada vinculada ao Ensaio III efetuado no dia 17/12/2018. O Ensaio IV foi realizado no dia 07/01/2019 também contendo a caixa de isolamento protegendo as laterais dos corpos de prova em concreto. A caracterização do Ensaio IV é esboçada pela ilustração da Figura 47.

Tabela 11 – Resumo da caracterização dos ensaios realizados em bancada.

ENSAIO	SISTEMA	DATA DA COLETA	ISOLAMENTO DAS LATERAIS	TECNOLOGIAS FVs
I	BIPV	13/12/18	SIM	pc-Si (Eco-Worthy) células orgânicas
II		14/12/18	NÃO	
III		17/12/18		pc-Si (adaptado) células orgânicas
IV		07/01/19	SIM	
V	BAPV (2,1 cm)	10/01/2019	NÃO	pc-Si (adaptado) células orgânicas
VI	BAPV (3,5 cm)	14/01/2019		
VII	BAPV (5,5 cm)	15/01/2019		
VIII	BAPV (2,1 cm)	16/01/2019		pc-Si (Eco-Worthy) células orgânicas
IX	BAPV (3,5 cm)	18/01/2019		
X	BAPV (5,5 cm)	21/01/2019		

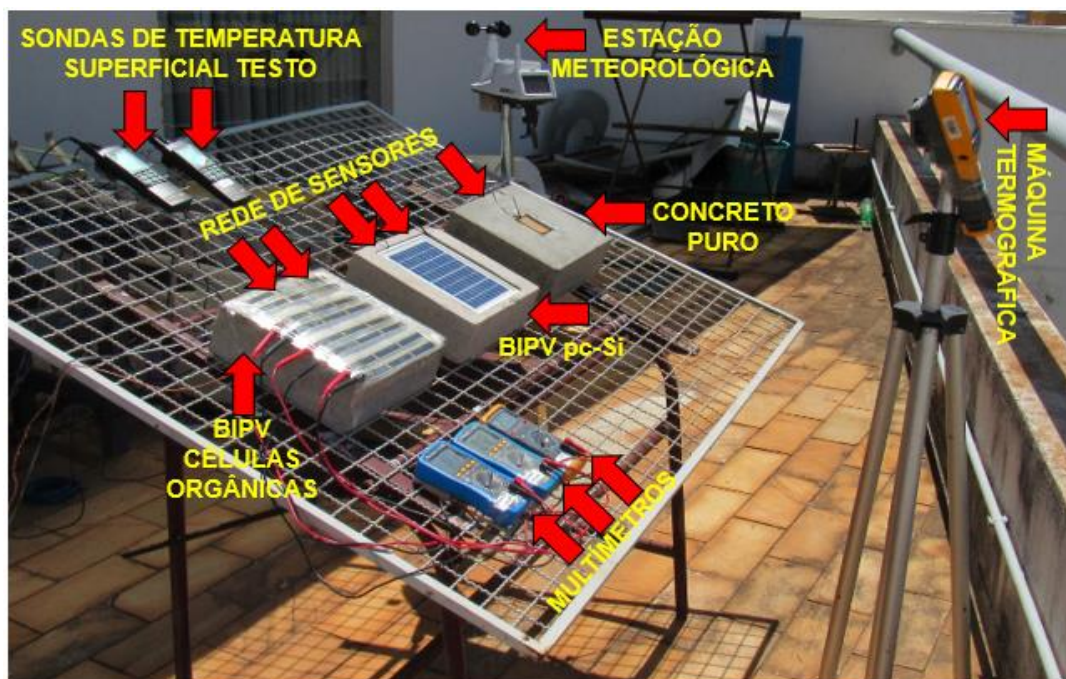
Fonte: Autor.

Figura 44 – Bancada de testes simulando os sistemas BIPVs com a caixa de isolamento térmico no Ensaio I realizado no dia 13/12/18.



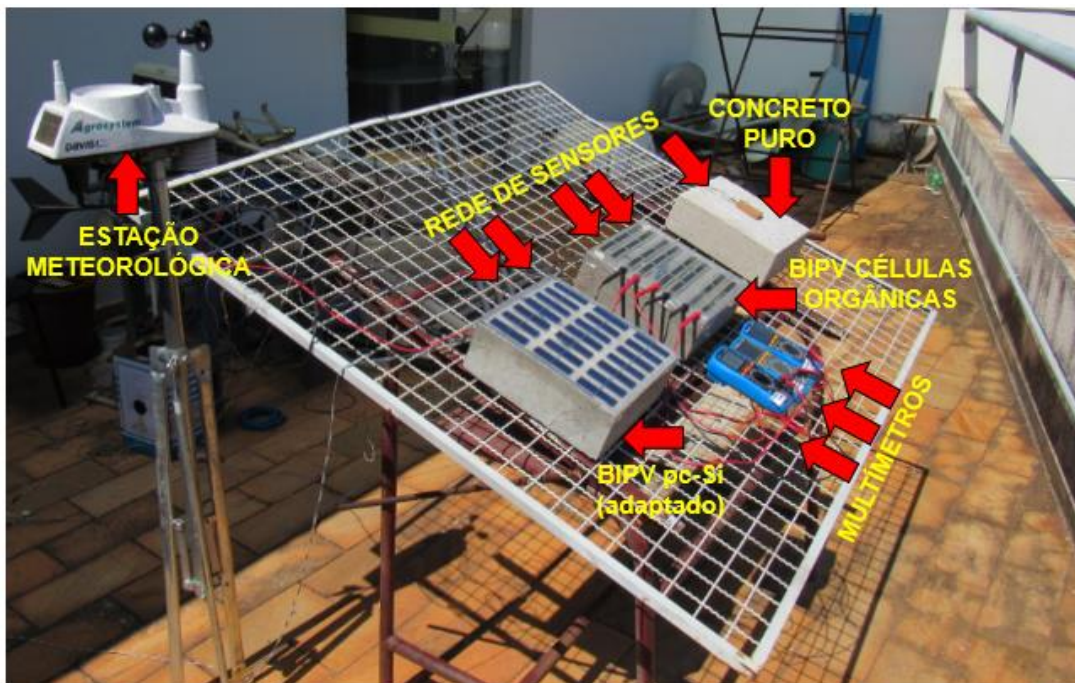
Fonte: Autor.

Figura 45 – Bancada de testes simulando os sistemas BIPVs com a caixa de isolamento térmico no Ensaio II efetuado no dia 14/12/2018.



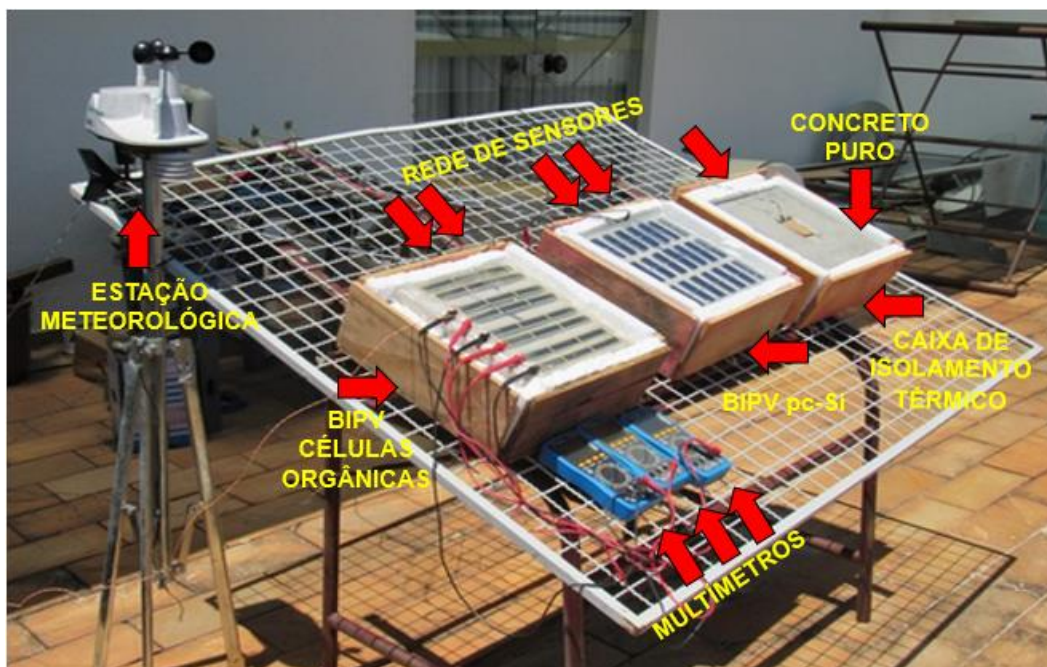
Fonte: Autor.

Figura 46 – Instrumentação da bancada composta para realização do Ensaio III ocorrido no dia 17/12/18.



Fonte: Autor.

Figura 47 – Caracterização da bancada para simulações do sistemas BIPVs para o Ensaio IV com o isolamento das laterais efetuado no dia 07/01/2018.

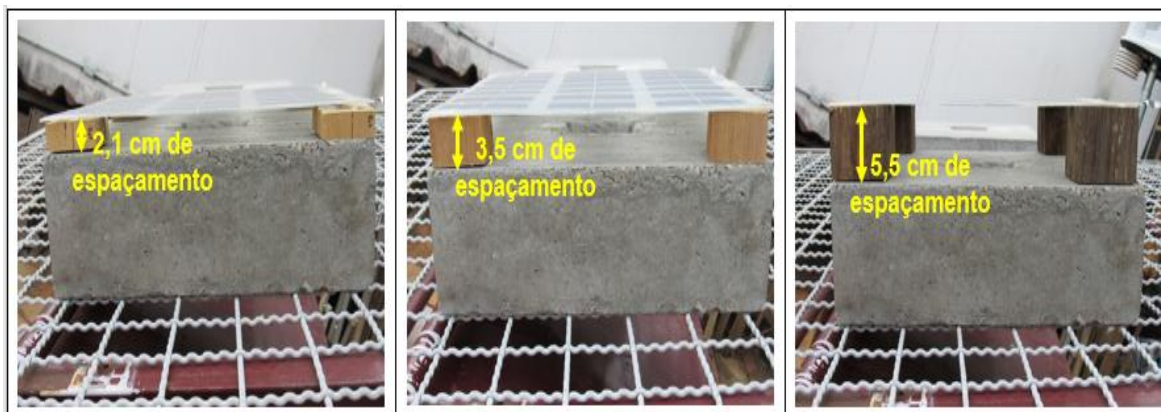


Fonte: Autor.

4.6 Detalhamento dos ensaios envolvendo os sistemas BAPVs

Os sistemas BAPVs foram simulados nos Ensaio V, VI, VII, VIII, IX e X (descritos na Tabela 11). Conforme o trabalho proposto por GOOSSENS, GOVERDE, CATHOOR, (2018) as distâncias adotadas para separar os módulos FVs do concreto foram de 2,1 cm; 3,5 cm; 5,5 cm. A ilustração presente Figura 48 apresenta o espaçamento oriundo da adaptação feita para as simulações contendo os sistemas BAPVs. No escopo proposto pelos autores, o intuito foi averiguar a influência do deslocamento dos ventos entre as partes constituintes dos sistemas BAPVs. Sendo assim, para os ensaios realizados no presente trabalho, as distâncias delimitadas pelos autores foram utilizadas como método para fixação dos módulos FVs de pc-Si (Eco-Worthy), pc-Si (adaptado) e composto por células orgânicas.

Figura 48 – Espaçamento colocado entre o bloco de concreto e o módulo FV para os ensaios envolvendo os sistemas BAPVs.



Fonte: Autor.

Para os ensaios envolvendo os sistemas BAPVs foram usados dois sensores de temperatura contendo o MCP9700A. Um dos sensores foi posicionado na superfície do corpo de prova em concreto para coleta dos dados de temperatura superficial (T_s) com o isolamento das camadas de cortiça. O outro transdutor foi fixado na face traseira do módulo FV para aferição dos dados de temperatura de operação (T_{OP}), sendo que este

sensor estava apenas encapsulado. Para efetuar a calibração do sensor de T_{OP} fixado na parte traseira dos módulos FVs, as imagens extraídas da câmera termográfica foram adotadas como referência para incrementar o algoritmo. Assim, o algoritmo desenvolvido para o nó sensor foi adequado para que os valores coletados pelo MCP9700A se aproximassem dos valores apontados pelas imagens termográficas. Paralelamente, o MCP9700A posicionado na superfície corpo de prova em concreto foi calibrado com o auxílio da sonda Testo 445.

Os sistemas BAPVs simulados foram monitorados pelo nó sensor que coletou os dados de tensão e corrente elétrica para os dois módulos FVs associados a cada ensaio. Outros valores coletados pelo nó sensor contemplaram a aplicação BAPV de acordo com a T_s do elemento construtivo em concreto e também da T_{OP} . Ao todo a rede de sensores coletou 8 dados nos ensaios envolvendo as simulações dos sistemas BAPVs, sendo eles: v_1 e i_1 (tensão e corrente do módulo FV1); v_2 e i_2 (tensão e corrente do módulo FV2); t_0 e t_2 (temperatura superficial dos blocos de concreto); t_1 e t_3 (temperatura de operação dos módulos FVs). Além desses dados, os dados de temperatura ambiente, velocidade do vento e umidade relativa do ar foram coletados pela estação meteorológica. Os dados de radiação solar vieram do CEPAGRI.

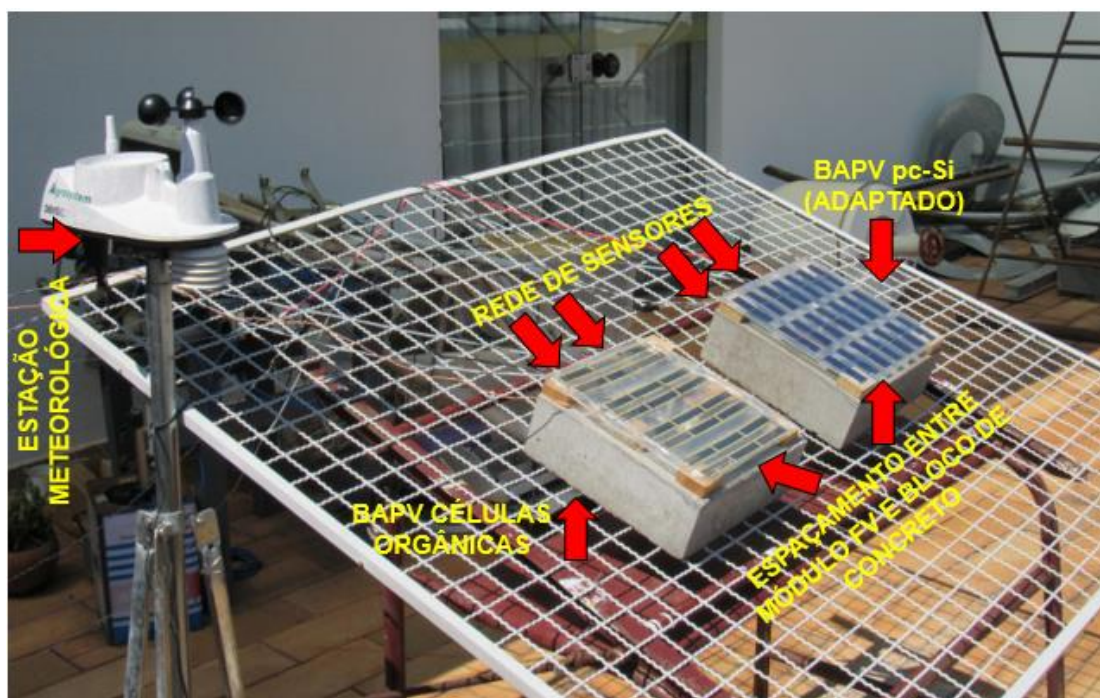
Os suportes de sustentação para aplicação dos módulos FVs ao elemento construtivo foram confeccionados com o auxílio da Maquetaria da PUC-Campinas, sendo que a altura deles foram elaboradas conforme proposto por GOOSSENS, GOVERDE, CATHOOR, (2018). As dimensões desses suportes foram de: 4,5x4,5x2,1 cm; 4,5x4,5x3,5 cm; 5x5x5,5 cm. Esses suportes foram aplicados ao concreto com o auxílio de uma fita adesiva dupla face, para que o manuseio dos equipamentos fosse feito de forma mais ágil.

Os ensaios V, VI e VII foram efetuados com as mesmas tecnologias de células FVs, alternando a distância entre o módulo FV e o bloco de concreto nos respectivos testes. Os ensaios foram realizados nos dias 10/01/2019, 14/01/2019 e 15/01/2019, respectivamente. A Figura 49 apresenta a bancada composta para a realização dos ensaios contendo os sistemas BAPVs. A Tabela 11 apresentada acima contempla o resumo das informações associadas a realização de todos os ensaios.

Na realização dos ensaios V, VI, e VII as tecnologias de módulos FVs utilizadas foram de pc-Si adaptado e também o módulo FV composto por células orgânicas. O espaçamento entre as partes do sistema BAPV (concreto e módulo FV) adotado para cada ensaio foi de 2,1 cm; 3,5 cm; 5,5 cm, respectivamente. A partir de cada instrumentação efetuada, o nó sensor coletou os dados de interesse, transmitindo-os para o nó base. Esses dados foram temperatura superficial do bloco de concreto (T_s), temperatura de operação das células FVs (T_{OP}), tensão elétrica ($V_{SAÍDA}$) e corrente elétrica (I) dos módulos FVs.

Nos Ensaios VIII, IX e X os módulos FVs inseridos nas simulações foram o módulo FV comercial da Eco-Worthy e o módulo FV composto por células orgânicas. O Ensaio VIII foi realizado no dia 16/01/19 com a distância entre módulo e corpo de prova em 2,1 cm. O Ensaio IX foi efetuado no dia 18/01/19 com o distanciamento entre os módulos FVs e o concreto em 3,5 cm. Finalmente, o Ensaio X ocorreu no dia 21/01/19 com a separação dos elementos do sistema BAPV em 5,5 cm.

Figura 49 – Caracterização dos ensaios realizados com os sistemas BAPVs alternando o espaçamento entre o bloco de concreto e o módulo FV (células orgânicas e pc-Si – adaptado).



Fonte: Autor.

4.7 Simulação no *software* ANSYS

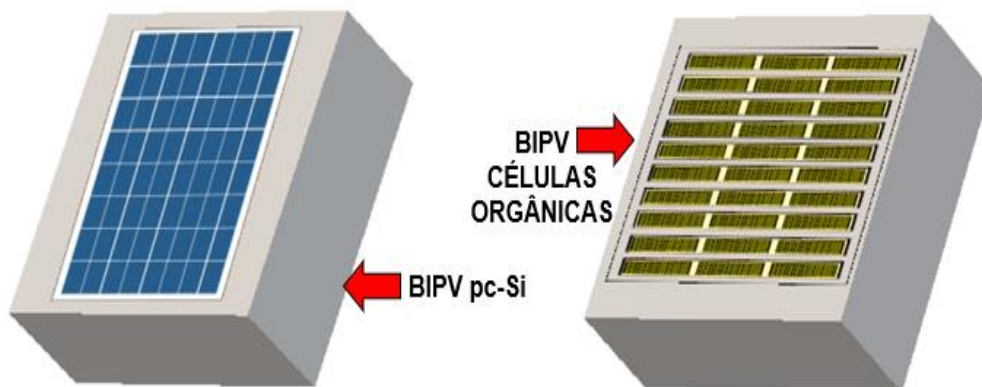
Com o auxílio do Laboratório de Tecnologias Tridimensionais do CTI de Campinas foram realizadas simulações dentro do *software* ANSYS versão 18.2. Trata-se de um *software* funcional que possibilita simulações tridimensionais através de métodos como geometria por malhas. O ANSYS trabalha com representações gráficas aproximadas acerca do comportamento de corpos, materiais e afins ao serem submetidos a certos parâmetros como temperatura, radiação solar, deslocamento de massas de ar, entre outros. Com ele é possível obter o comportamento dos materiais estudados através de um modelo gráfico e interativo. O ANSYS auxilia em projetos envolvendo mecânica de fluidos e estruturas comumente utilizados em áreas como a Engenharia Civil e Mecânica.

O ANSYS possui diversas funcionalidades, sendo que efetua simulações de termodinâmica simples por meio de interpolação de resultados com relação dinâmica. Portanto, através do ANSYS foram realizadas simulações contendo alguns casos observados pelos ensaios efetuados com os sistemas BIPVs. Considerando a integração oriundo do módulo FV e do elemento construtivo, foram propostos algumas situações decorrentes dos testes feito em bancada. A partir dos valores obtidos da T_{OP} das células FVs (módulo FV de pc-Si e contendo células orgânicas), dentro do *software* foram efetuadas as simulações de alguns casos. A Figura 50 ilustra os sistemas BIPVs simulados com o auxílio do ANSYS.

O bloco de concreto simulado dentro do ANSYS conteve as mesmas dimensões do bloco posto em bancada (30x30x10 cm). O valor para o coeficiente de condutividade térmica (K) para adotado para o bloco de concreto foi de $1,77 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$. Nas superfícies onde os módulos FVs foram integrados, o ANSYS assume que o módulo FV comporta-se como uma fonte de calor em uma das faces. Com as simulações, portanto, foi possível verificar como se deu o comportamento térmico do concreto ao ser submetido a diferentes valores de temperatura na superfície integrada ao módulo FV. Ainda, a partir das simulações visualizou-se também se ocorreria o efeito reverso, onde pelo processo

de transferência de calor por condução, o bloco de concreto aqueceria o equipamento fotovoltaico.

Figura 50 – Exemplos dos sistemas BIPVs simulados no *software* ANSYS.



Fonte: Autor.

5. Resultados

A partir da metodologia descrita anteriormente, algumas constatações podem ser realizadas. A rede de sensores para monitoramento montada realizou a coleta dos dados conforme o esperado. A estação meteorológica também comportou-se conforme o esperado, aferindo os valores de temperatura ambiente, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Os dados de radiação solar foram fornecidos pelo Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI/UNICAMP) e contribuíram para incrementar as análises planejadas para este trabalho. Os dados foram coletados nos meses de dezembro/2018 e janeiro/2019. Os gráficos apresentados a seguir foram confeccionados, relacionando a $V_{SAÍDA}$ do painel fotovoltaico com os parâmetros ambientais coletados pelos equipamentos utilizados em bancada. Tal fato deve-se às referências bibliográficas consultadas onde este é o principal quesito ($V_{SAÍDA}$) acrescentado às análises dos autores.

Salienta-se que o módulo FV contendo as células orgânicas não alcançou valores significativos de $V_{SAÍDA}$ (V) e $I_{SAÍDA}$ (A). Esse evento dev-se ao fato da adaptação realizada

para confecção do módulo FV de células orgânicas. Uma vez que esse método foi de caráter experimental, não foram localizadas referências na literatura, ou mesmo informações precisas dos fornecedores para realizar as adaptações necessárias para a alocação do módulo FV junto aos sistemas BAPVs e BIPVs. Também, os dados de G_{SOLAR} coletados pelo CEPAGRI não foram efetivos para realizar análises mais aprofundadas acerca dos sistemas BAPVs e BIPVs simulados em bancada. Um ponto a ser salientado é que a base de monitoramento desse centro não estava localizado próximo à bancada. Ainda, o método de medição adotado pelo CEPAGRI também não é disponibilizado.

Outro ponto a ser salientado é que na semana de coleta dos dados dos sistemas BIPVs, no mês de dezembro (Ensaio I, II e III), a cidade de Campinas atingiu o recorde de temperatura mais alta do ano de 2018 (dia 15/12 chegando à 35,5°C). Segundo dados do CEPAGRI, na semana do dia 10/12 ao dia 14/12 a temperatura média foi superior à temperatura média prevista, com valores com cerca de 5°C a mais do que era esperado para esse período. Logo, tais eventos, decorrentes da onda de calor que atingiu a cidade de Campinas pode ter influenciado os resultados alcançados. Os dados de G_{SOLAR} fornecidos pelo CEPAGRI não estão contemplados pelo horário brasileiro de verão em vigência no período da coleta dos dados. Sendo assim, toda a metodologia montada foi programada (rede de sensores), considerando o horário do CEPAGRI. Os resultados expressos através dos gráficos também não estão na faixa do horário de verão. O fuso horário utilizado foi o horário de Brasília. Aponta-se, ainda, que os valores de G_{SOLAR} coletados do CEPAGRI foram convertidos para W/m^2 com o intuito de melhorar a apresentação dos gráficos desta seção. A partir dos dados oriundos da rede de sensores, nos gráficos apresentados a seguir, as siglas apontadas referem-se aos seguintes parâmetros:

- V1 – tensão de saída ($V_{\text{SAÍDA}}$) dos módulos FVs de pc-Si (todos os ensaios) (V);
- I1 – corrente de saída ($I_{\text{SAÍDA}}$) dos módulos FVs de pc-Si (todos os ensaios), sendo que os valores de corrente produzidos pelo módulo FV da Eco-Worthy foram convertidos para (μA) e para o módulo FV de pc-Si adaptado, esse parâmetro está na escala de (mA);
- V2 – tensão de saída do módulo FV de células orgânicas (todos os ensaios) (V);

- I₂ – corrente de saída do módulo FV de células orgânicas (todos os ensaios) (mA);
- Temp (pc-Si) – temperatura superficial nos sistemas BIPVs com os módulos FVs de silício policristalino (°C) (Ensaio I, II, III e IV);
- Temp (OC) – temperatura superficial nos sistemas BIPVs com os módulos FVs de células orgânicas (OC) (°C) (Ensaio I, II, III e IV);
- Top – temperatura de operação dos módulos FVs nos sistemas BAPVs (°C) (Ensaio V, VI, VII, VIII, IX e X);
- T_s – temperatura superficial dos blocos de concreto nos sistemas BAPVs (Ensaio V, VI, VII, VIII, IX e X);
- Temp (a) – temperatura ambiente (°C) (todos os ensaios);
- RH – umidade relativa do ar (%) (todos os ensaios);
- V_{VENTO} – velocidade do vento (m/s) (todos os ensaios);
- G_{SOLAR} – radiação solar (W/m²) (todos os ensaios);

5.1 Análises a partir dos sistemas BIPVs emulados – Ensaio I – Laterais dos blocos de concreto isoladas

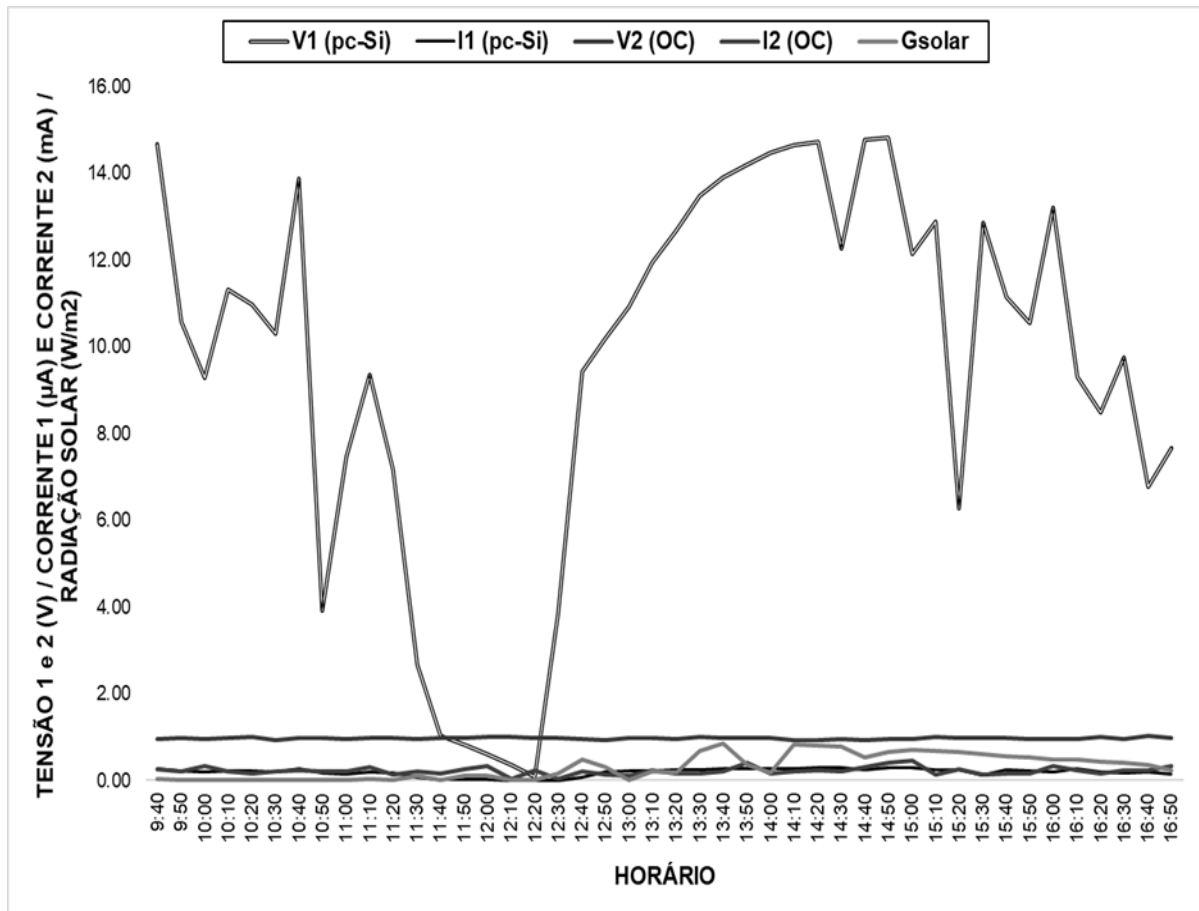
Os dados foram coletados pelo nó sensor ($V_{SAÍDA}$ e $I_{SAÍDA}$) através do sensor de tensão e corrente INA219, sendo que o gráfico da Figura 51 traz o comportamento desses parâmetros elétricos ao longo do tempo para o Ensaio I. Os valores de corrente são fornecidos na escala de mA, enquanto os dados de tensão elétrica são expressos em Volts. O Ensaio I conteve os módulos FVs de pc-Si da fabricante Eco-Worthy e o módulo FV composto por células orgânicas. Os dados de corrente do módulo FV de pc-Si foram convertidos para μA para que as representações gráficas fossem concebidas em um formato visual mais identado. Os valores de corrente do módulo FV com células orgânicas são expressos em mA.

Como pode ser constatado pelo gráfico da Figura 51, os valores de $V_{SAÍDA}$ do módulo FV com células de pc-Si foram mais expressivos do que o módulo com células orgânicas. Esse evento está associado ao porte do equipamento que possui 64 células FVs

compostas por pc-Si. Os picos de geração de energia desse módulo ocorreram durante o período de 13 horas e 30 minutos às 15 horas, sendo que a média dos valores de $V_{SAÍDA}$, nesse período, foi de 14,35 V. A média final dos valores de tensão de saída para o módulo FV pc-Si foi de 10,57 V e a corrente elétrica foi de 0,22 μ A. O valores de $V_{SAÍDA}$ do módulo FV com células orgânicas não passaram de 1 V, sendo que a média final dos valores alcançados por esse módulo foi de 0,97 V para $V_{SAÍDA}$ e 0,20 mA para $I_{SAÍDA}$. Destaca-se que para o painel de células orgânicas não houve um pico expressivo na geração de energia, sendo que para o módulo FV de células de silício policristalino esse evento ocorre em alguns momentos da coleta de dados.

Ainda, na Figura 51, está ilustrado o comportamento dos parâmetro de G_{SOLAR} . Como apontado, os valores de radiação solar não foram expressivos para que fosse possível realizar análises mais aprofundadas acerca do comportamento dos sistemas BIPVs e BAPVs simulados relacionando-os com esse parâmetro. Entretanto, para o período citado (de 13 horas e 30 minutos às 15 horas) a radiação solar média foi de 0,69 W/m². Nota-se a influência desse parâmetro principalmente no módulo FV de pc-Si no período de maior incidência da radiação solar, sendo que pelos dados de $V_{SAÍDA}$ coletados nesse período, como apontado foi de 14,35 V. No dia 13/12/2018 (data em que foram realizadas essa coletas), a radiação média do dia foi de 0,23 W/m².

Figura 51 – Gráfico do comportamento da tensão elétrica de saída ($V_{SAÍDA}$), corrente de saída ($I_{SAÍDA}$) e G_{SOLAR} ao longo do tempo para o Ensaio I.



Fonte: Autor.

Através da bancada ilustrada na Fonte: Autor.

Figura 44, onde os blocos de concreto foram isolados nas laterais, o nó sensor capturou os dados de T_s de cada bloco oriundos do contato estabelecido entre o equipamento fotovoltaico e o elemento construtivo. O gráfico contido na Figura 52 ilustra o comportamento da T_s ao longo do dia, durante o Ensaio I. Nota-se que o comportamento dessas temperaturas é similar, sendo que a T_s atingida pelo BIPV com o módulo FV de células orgânicas foi mais expressiva. A média de valores para a temperatura superficial no BIPV com células orgânicas foi de $39,26^\circ\text{C}$. A média dos valores de T_s para o concreto puro foi de $36,18^\circ\text{C}$ e, finalmente, para o BIPV com o módulo FV de pc-Si foi de $35,96^\circ\text{C}$. A média da temperatura ambiente (T_a) para o dia 13/12/2018 foi de $33,10^\circ\text{C}$, sendo que esses dados foram coletados pela estação meteorológica.

Ao analisar os gráficos das Figura 51 e 52, nota-se que no período das 11 horas e 20 minutos às 12 horas e 30 minutos, a $V_{SAÍDA}$ teve um decaimento, assim como as T_s vinculadas a cada BIPV emulado. Nesse período, os valores de T_s alcançados pelos sistemas BIPVs (pc-Si e com células orgânicas), bem como para o bloco de concreto puro foram de 29,10°C, 32,62°C e 27,78°C respectivamente. Esses valores de temperatura são inferiores ao valor da média final obtida ao encerrar o experimento. Já a média de valores para a G_{SOLAR} foi de 0,05 W/m². O maior valor de G_{SOLAR} alcançado no dia 13/12 foi às 13 horas e 40 minutos, segundo dados fornecidos pelo CEPAGRI.

A Figura 53 traz o gráfico das grandezas coletadas durante a realização dos ensaios. Por meio da estação meteorológica, foram extraídos os dados de RH (umidade relativa do ar) e V_{VENTO} (velocidade do vento). A média dos valores obtidos pelo equipamento durante o Ensaio I foi de 46,50% e 0,40 m/s respectivamente. Analisando os dados de RH, constata-se que os maiores valores coletados pela estação meteorológica ocorreram durante o período da manhã (9 horas e 40 minutos às 11 horas e 10 minutos) e também no final da tarde (16 horas às 16 horas e 50 minutos), sendo que, nesse período, a média dos valores de umidade relativa do ar foi de 56%. A V_{VENTO} também foi mais expressiva no final da tarde, onde a média alcançada foi de 1,30 m/s.

Figura 52 – Comportamento da T_s nos blocos de concreto com o sistema BIPV no Ensaio I e o comportamento da T_a ao longo do dia do Ensaio I.



Fonte: Autor.

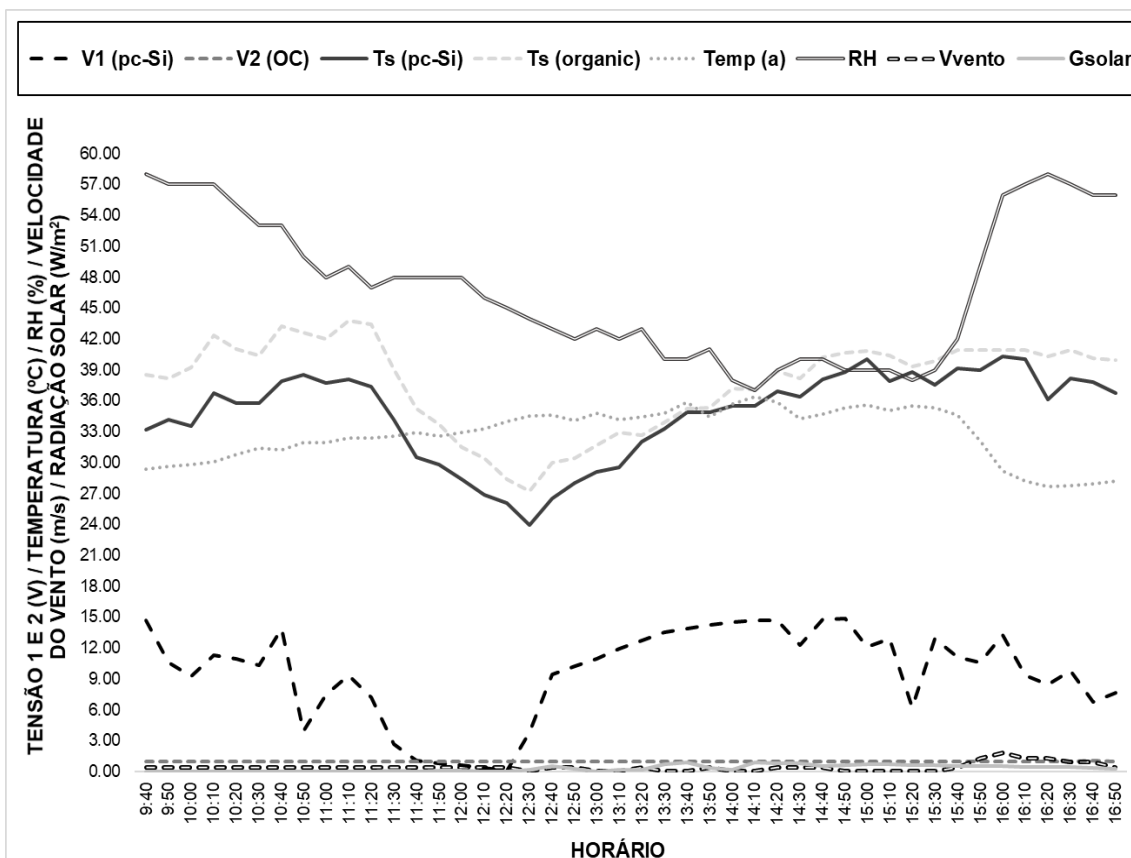
Através da máquina termográfica, foram capturadas imagens no início e ao final das simulações contendo os sistemas BIPVs. As imagens trazidas pela Figura 54 mostram o comportamento térmico do bloco de concreto (a) e dos sistemas BIPVs com o módulo FV de pc-Si (b) e os sistemas BIPVs com as células orgânicas (c) no início da coleta de dados e também ao final do experimento (Figuras 54 d, e, f). O horário ajustado nesse equipamento estava no horário brasileiro de verão. Nessa etapa, os blocos de concreto foram isolados. A Figura 54 (a) ilustra a distribuição do calor no bloco de concreto puro, sem integração com tecnologias fotovoltaicas. Destaca-se que o bloco de concreto atingiu temperaturas por volta de 47,1°C logo no início da realização do ensaio. Já no final da coleta, o bloco apresentou temperaturas em torno de 41,6°C, conforme pode ser identificado pela Figura 54 (d).

As Figura 54 (b) e (e) ilustram a distribuição do calor no sistemas BIPV contendo o módulo FV de pc-Si integrado ao bloco de concreto. Como as células FVs nesse módulo

estavam interligadas de forma aproximada, o calor distribuiu-se uniformemente, principalmente, na área onde as células FVs estava fixadas. A T_{OP} constatada pela máquina termográfica chegou a atingir $49,5^{\circ}\text{C}$ às 9 horas e 55 minutos. No final do experimento, constata-se que o sistema BIPV composto pelo módulo FV de pc-Si esfriou-se chegando a obter temperaturas em torno de $34,5^{\circ}\text{C}$.

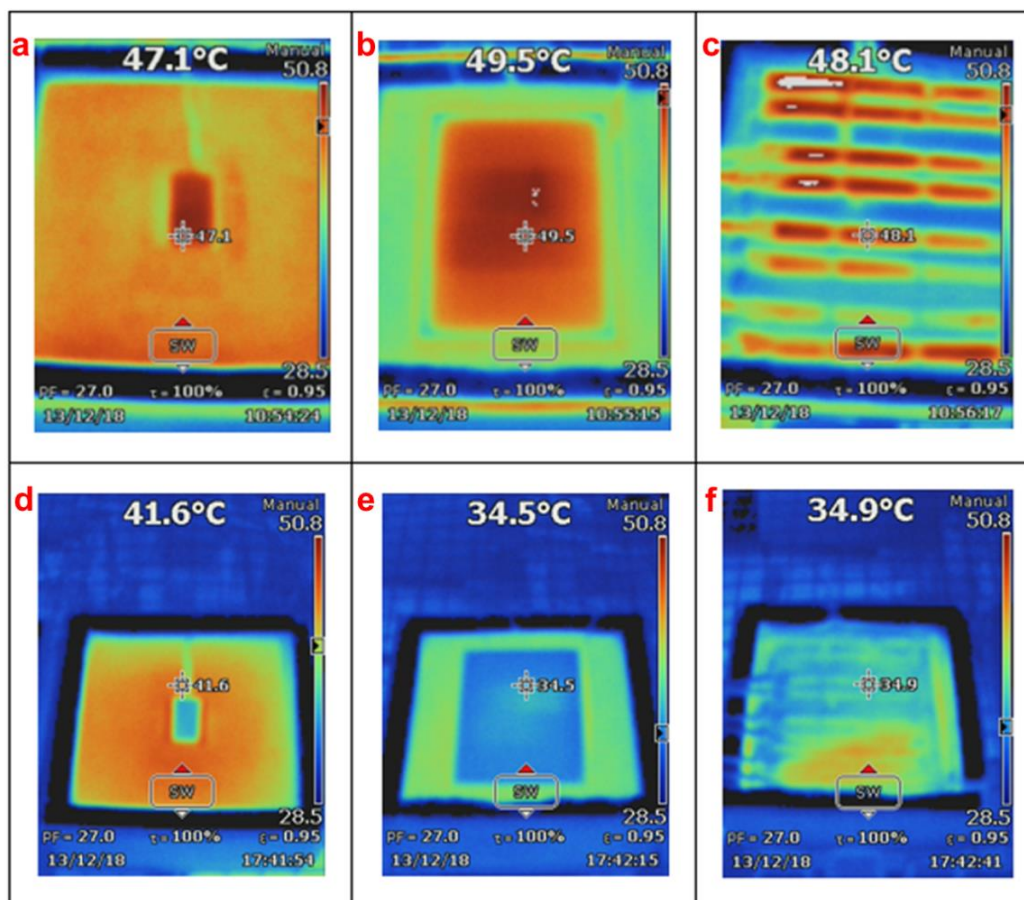
As Figura 54 (c) e (f) ilustram as temperaturas alcançadas pelo sistema BIPV constituído pela integração com as células fotovoltaicas orgânicas. Nesse caso, a T_{OP} das células alcançou em média a temperatura de $48,1^{\circ}\text{C}$ na hora da coleta (9 horas e 56 minutos) ao iniciar a coleta dos dados. Ao efetuar a captura da imagem termográfica desse sistema às 16 horas e 42 minutos, no final do experimento, verifica-se que o sistema BIPV com células orgânicas ainda possuía a temperatura média de $34,9^{\circ}\text{C}$. Nesse caso, a temperatura expressa pela máquina termográfica demonstrou que esse sistema absorveu $0,4^{\circ}\text{C}$ a mais de temperatura do que o caso sistemas BIPV com pc-Si.

Figura 53 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio I.



Fonte: Autor.

Figura 54 – Imagens termográficas dos sistemas BIPVs no início das simulações (a, b, c) e ao final do experimento (d, e, f).



Fonte: Autor.

5.2 Análises a partir dos sistemas BIPVs emulados no Ensaio II com as laterais dos blocos de concreto não isoladas

O Ensaio II foi realizado no dia 14/12/2018, contendo os sistemas BIPVs em bancada sem o isolamento das laterais. Os módulos FVs utilizados foram os constituídos de pc-Si da fabricante Eco-Worthy e o composto por células orgânicas. O gráfico contido na Figura 55 apresenta o comportamento dos parâmetros elétricos dos módulos FVs ao longo da coleta dos experimentos. O módulo FV de pc-Si teve os maiores valores de $V_{SAÍDA}$ durante o período de 10 horas e 20 minutos às 13 horas e vinte minutos. A média dos valores de $V_{SAÍDA}$ para esse intervalo foi de 14,64 V. Já a média geral para a tensão

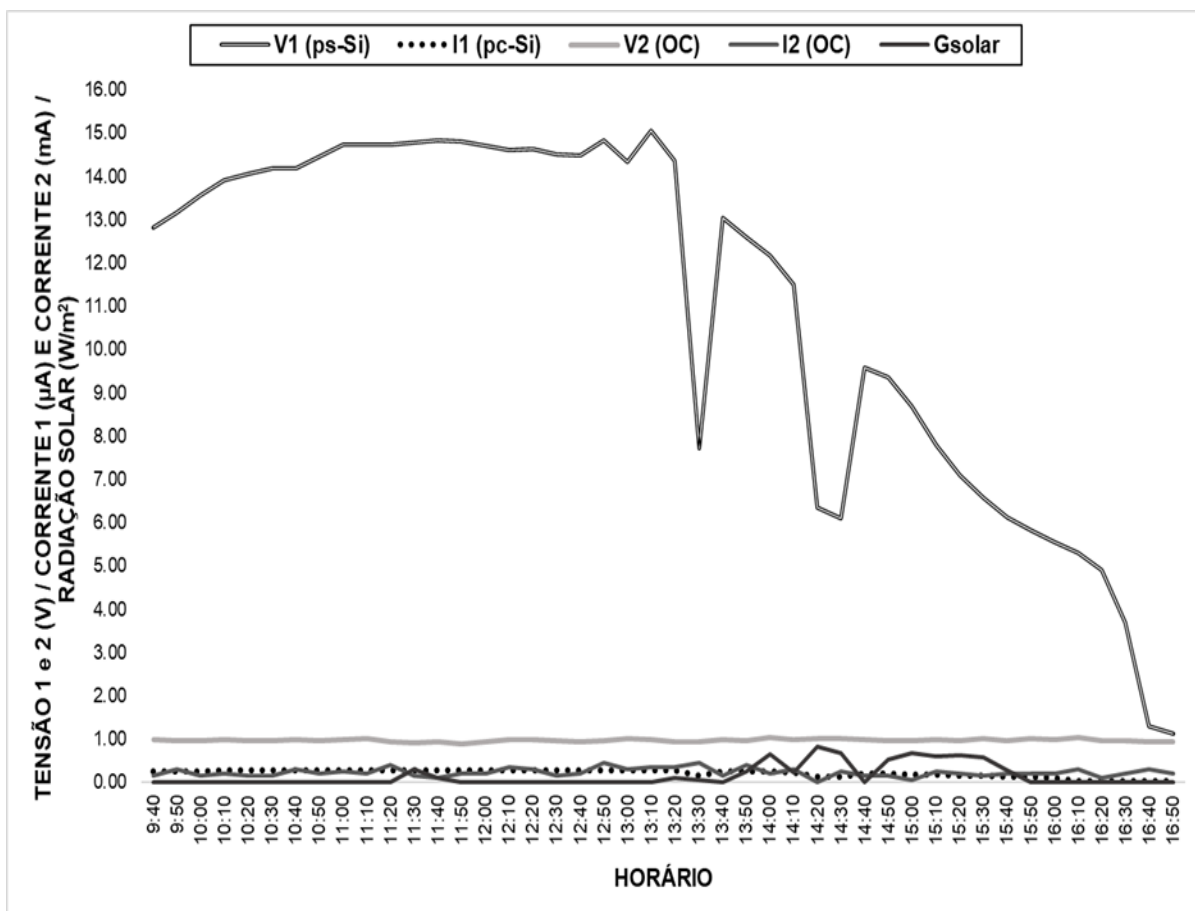
elétrica desse equipamento foi de 13,11 V e a média da corrente elétrica foi de 0,26 μ A. O módulo FV com células orgânicas obteve média de $V_{SAÍDA}$ em 0,98 V e $I_{SAÍDA}$ em 0,20 mA. O ápice de G_{SOLAR} observado ocorreu às 14 horas e 20 minutos atingindo 0,82 W/m².

A Figura 56 traz o gráfico das temperaturas superficiais com os dados coletados pelo nó sensor da rede de monitoramento. Os valores de T_s oriundos de cada bloco de concreto são expressos ao longo do dia de realização do Ensaio II. Destaca-se que a T_s do concreto puro atingiu valores mais expressivos nesse ensaio. Por outro lado, o sistema BIPV contendo as células orgânicas absorveu mais calor do que o sistema BIPV contendo o módulo FV com células de pc-Si. Entretanto, a média final de valores das temperaturas superficiais coletadas foi de 41,27°C para o concreto puro; 43,62°C para o sistema BIPV com as células orgânicas; e 38,63°C para o sistema BIPV com o módulo FV pc-Si.

Avaliando os dados retirados do Ensaio II, referentes às T_s dos blocos de concreto emulados em bancada, aponta-se que durante o intervalo das 11 horas e 50 minutos às 14 horas e 20 minutos, os valores coletados de temperatura elevaram-se, ao observar o período total de coleta dos dados. No período citado, a média dos valores de T_s coletados foi de 41,99°C para o sistema BIPV com o módulo FV de pc-Si, 43,74°C para o sistema BIPV com as células orgânicas e 44,98°C para o bloco de concreto puro. Ao analisar o comportamento da T_a nesse mesmo intervalo, esse parâmetro atingiu a média de 36,80°C, sendo que a média total para o dia da coleta dos dados foi de 34,85°C.

Salienta-se que nas imagens termográficas onde existem tons brancos, esse evento foi causado por um ajuste na escala do equipamento. Tal cor indica que a temperatura coletada pela máquina termográfica ultrapassou a escala colocada na máquina, demonstrando que nesses espaços a temperatura foi superior ao valor máximo configurado no equipamento. Por problemas técnicos no equipamento não foi possível modificar o ajuste a tempo da coleta das imagens.

Figura 55 – Gráfico do comportamento da tensão elétrica de saída ($V_{SAÍDA}$), corrente de saída ($I_{SAÍDA}$) e G_{SOLAR} ao longo do tempo para o Ensaio II.



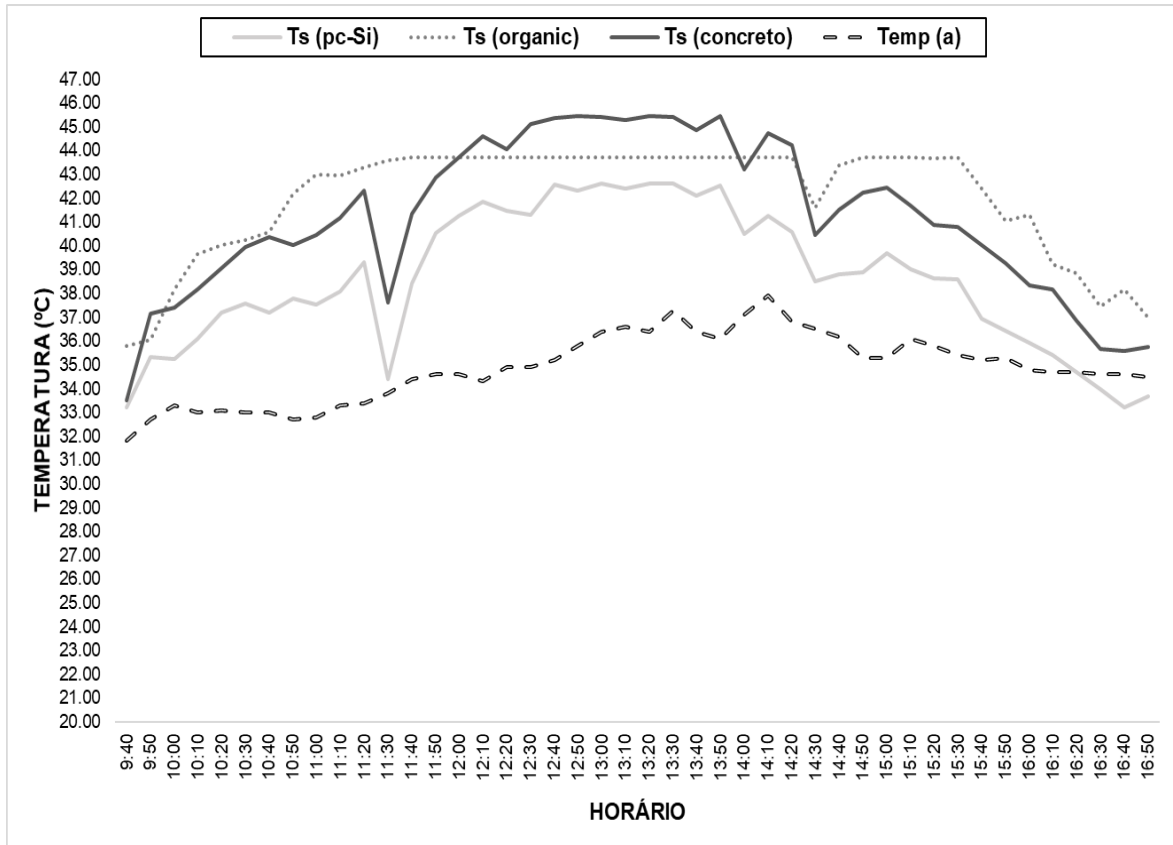
Fonte: Autor.

O gráfico apresentado na Figura 57 ilustra o comportamento das grandezas coletadas ao longo do Ensaio II. A média de valores para o parâmetro de V_{VENTO} foi de 0 m/s. Já a G_{SOLAR} alcançou a média de 0,0015 W/m^2 durante o dia 14/12/2018, segundo os dados do CEPAGRI. Boa parte da radiação solar incidente coletada concentrou-se no período das 13 horas e 50 minutos às 15 horas e 40 minutos, onde a média alcançada pela G_{SOLAR} foi de 0,53 W/m^2 .

A média de valores referentes à RH foi de 35% no período de coleta dos dados. A concentração da RH se deu no intervalo da manhã, entre às 9 horas e 40 minutos e às 11 horas e 40 minutos, onde a média desse parâmetro foi de 42%. A média da T_a nesse intervalo foi de 33°C, sendo que esse valor é inferior à média total do dia da coleta (34,85°C). Nesse mesmo intervalo de tempo, as temperaturas T_s inerentes aos sistemas BIPVs foram inferiores ao período mencionado anteriormente (11 horas e 50 minutos às

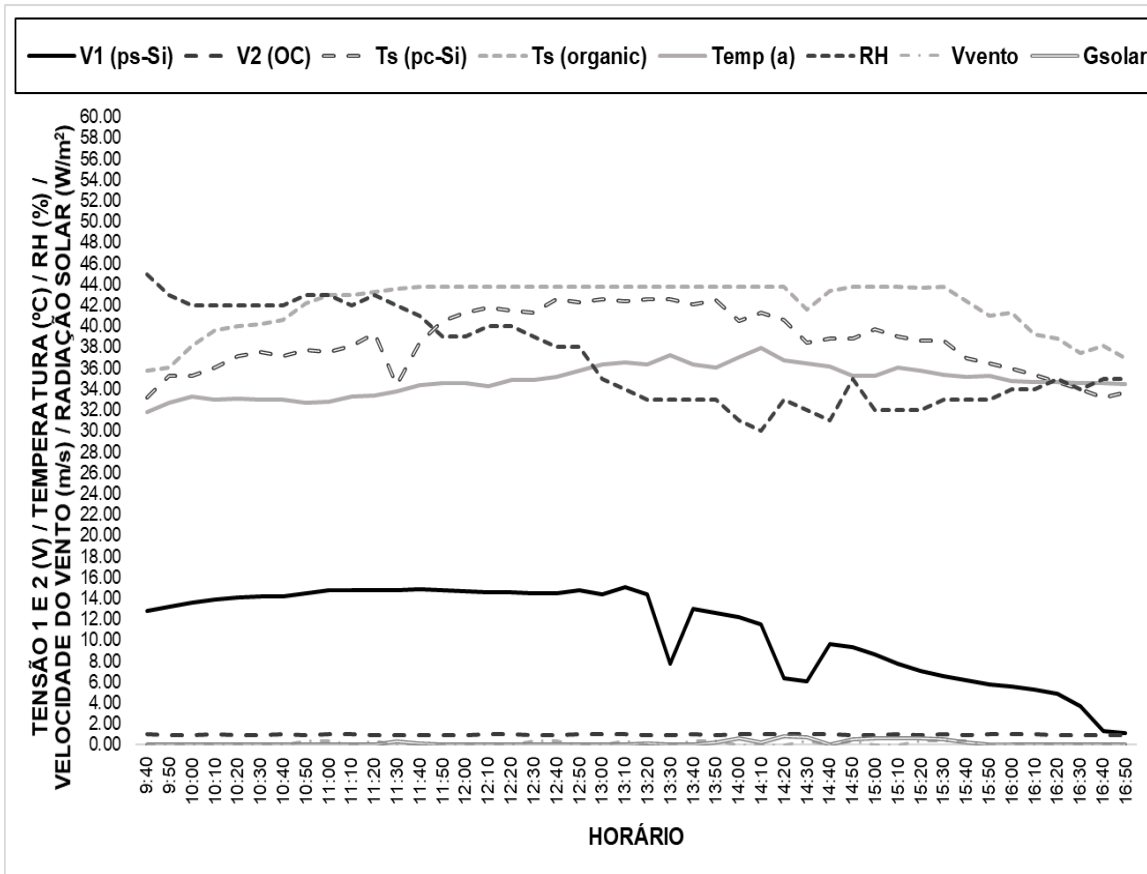
14 horas e 20 minutos). Onde a média da T_s do sistema BIPV com o módulo de pc-Si foi de $37,20^{\circ}\text{C}$ e para o sistema BIPV contendo as células orgânicas foi de $40,60^{\circ}\text{C}$, demonstrando, assim, a atuação desse parâmetro no desempenho da integração entre o módulo FV e o elemento construtivo.

Figura 56 – Comportamento da T_s nos blocos de concreto inseridos nas simulações com o sistema BIPV no Ensaio II e o comportamento da T_a ao longo do dia do Ensaio II.



Fonte: Autor.

Figura 57 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio II.

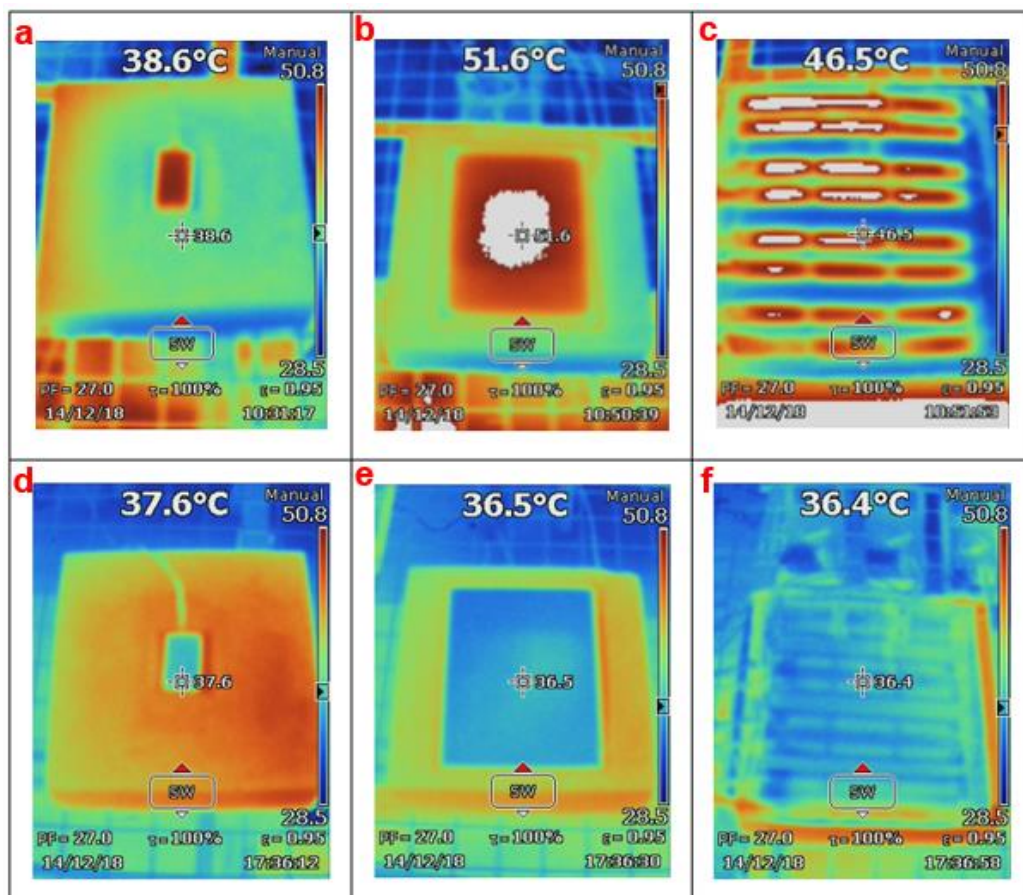


Fonte: Autor.

As Figura 58 (a), (b) e (c) ilustram o comportamento dos sistemas BIPVs em bancada logo no início da coleta dos dados. A Figura 58 (a) ilustra o comportamento térmico do concreto puro, sem integração com tecnologias fotovoltaicas. No momento da captura da imagem (às 10 horas e 31 minutos, horário brasileiro de verão), esse corpo de prova atingiu a temperatura média de 38,6°C. A Figura 58 (b) apresenta a imagem do sistema BIPV com o módulo FV de pc-Si. Nota-se que a temperatura de operação das células FVs para esse caso chegou à 51,6°C no centro do painel. Já o bloco de concreto caracterizou-se pela distribuição do calor com mais intensidade na parte superior, sendo que é possível verificar que a lateral esquentou-se menos que a face de contato com o módulo FV. A Figura 58 (c) ilustra o sistema BIPV com as células orgânicas onde a temperatura de operação das células FVs chegou a 50,8°C. Destaca-se que nos espaçamentos entre a ilhas das células a T_s do corpo de prova foi inferior ao sistema BIPV com as células de pc-Si.

As Figura 58 (d), (e) e (f) foram capturadas ao final do Ensaio II. A Figura 58 (d) ilustra a distribuição do calor no bloco de concreto puro, onde às 17 horas e 36 minutos o material ainda possuía a T_s média de $36,6^\circ\text{C}$. A Figura 58 (d) mostra o sistema BIPV, da integração do bloco de concreto com o módulo FV de pc-Si, sendo que ao final do experimento especificamente esse corpo de prova ainda atingiu $36,5^\circ\text{C}$ de T_s média. Salienta-se que, nesse momento, o módulo FV já estava frio, conforme pode ser observado no centro da imagem. A Figura 58 (f) apresenta o sistema BIPV com as células orgânicas ao final do Ensaio II. Nota-se que o equipamento FV também resfriou-se, sendo que, ao observar as arestas laterais do bloco de concreto, o mesmo ainda estava aquecido (lateral com cor laranja). O resfriamento do sistema BIPV com as células orgânicas foi $0,1^\circ\text{C}$ maior do que o sistema BIPV com o módulo de pc-Si.

Figura 58 – Imagens termográficas dos sistemas BIPVs no início das simulações (a, b, c) e ao final do experimento (d, e, f).



Fonte: Autor.

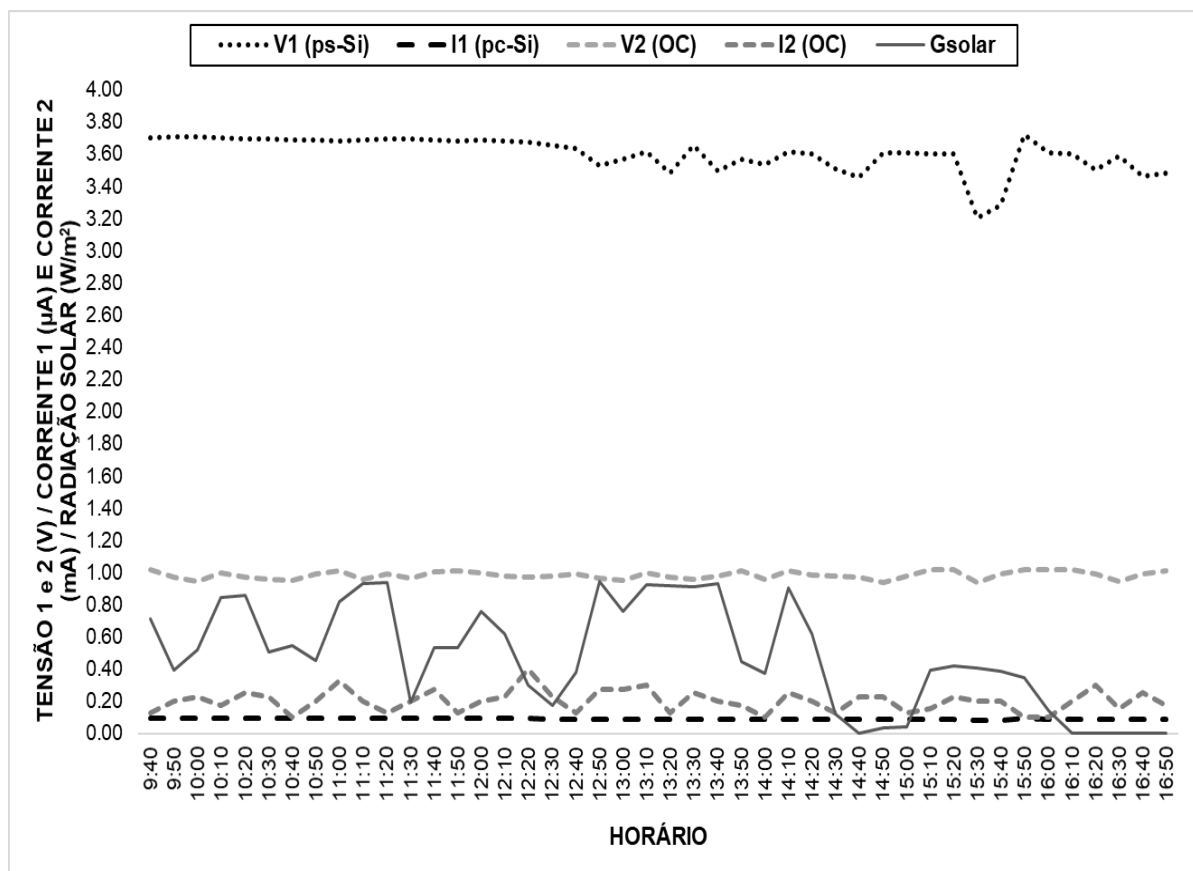
5.3 Análises a partir dos sistemas BIPVs emulados no Ensaio III sem isolamento das laterais do elemento construtivo e utilizando os módulos FVs de pc-Si adaptado e contendo células orgânicas

Conforme a bancada proposta pela Figura 46, o Ensaio III foi realizado no dia 17/02/2018. Os sistemas BIPVs emulados foram constituídos pela integração dos blocos de concreto com o módulo FV de células orgânicas e o módulo de pc-Si adaptado concebido pelo CTI. A partir da rede de monitoramento, e também de todos os equipamentos associados à bancada, os dados foram extraídos do experimento.

A Figura 59 traz o gráfico do comportamento dos parâmetros elétricos dos módulos FVs utilizados no Ensaio III. A média dos valores de $V_{SAÍDA}$ atingida pelo módulo FV de pc-Si foi de 3,62 V, e a $I_{SAÍDA}$ foi de 88,96 mA (ou aproximadamente 0,09 μ A). O módulo FV composto pelas células orgânicas obteve média de $V_{SAÍDA}$ de 0,98 V e $I_{SAÍDA}$ de 0,30 mA. Destaca-se que no período de 9 horas e 40 minutos às 11 horas e 40 minutos, a $V_{SAÍDA}$ do módulo de pc-Si teve melhor desempenho, com 3,70 V de média para o intervalo apontado. Já a $V_{SAÍDA}$ do módulo orgânica não apresentou oscilações significativas, conforme pode ser visto pelo gráfico da Figura 59.

O gráfico contido na Figura 59 também apresenta o comportamento dos parâmetros elétricos dos módulos FVs utilizados no Ensaio III, considerando a incidência da radiação solar (G_{SOLAR}). A média de valores para G_{SOLAR} , no dia 17/12/2018, conforme dados fornecidos pelo CEPAGRI foi de 0,45 W/m². O maior valor de G_{SOLAR} no período de execução do Ensaio III foi às 12 horas e 50 minutos, onde o valor atingido foi de 0,95 W/m². O intervalo de maior concentração da radiação solar foi das 12 horas e 50 minutos às 14 horas e 20 minutos, onde a média dos valores desse parâmetro foi de 0,91 W/m².

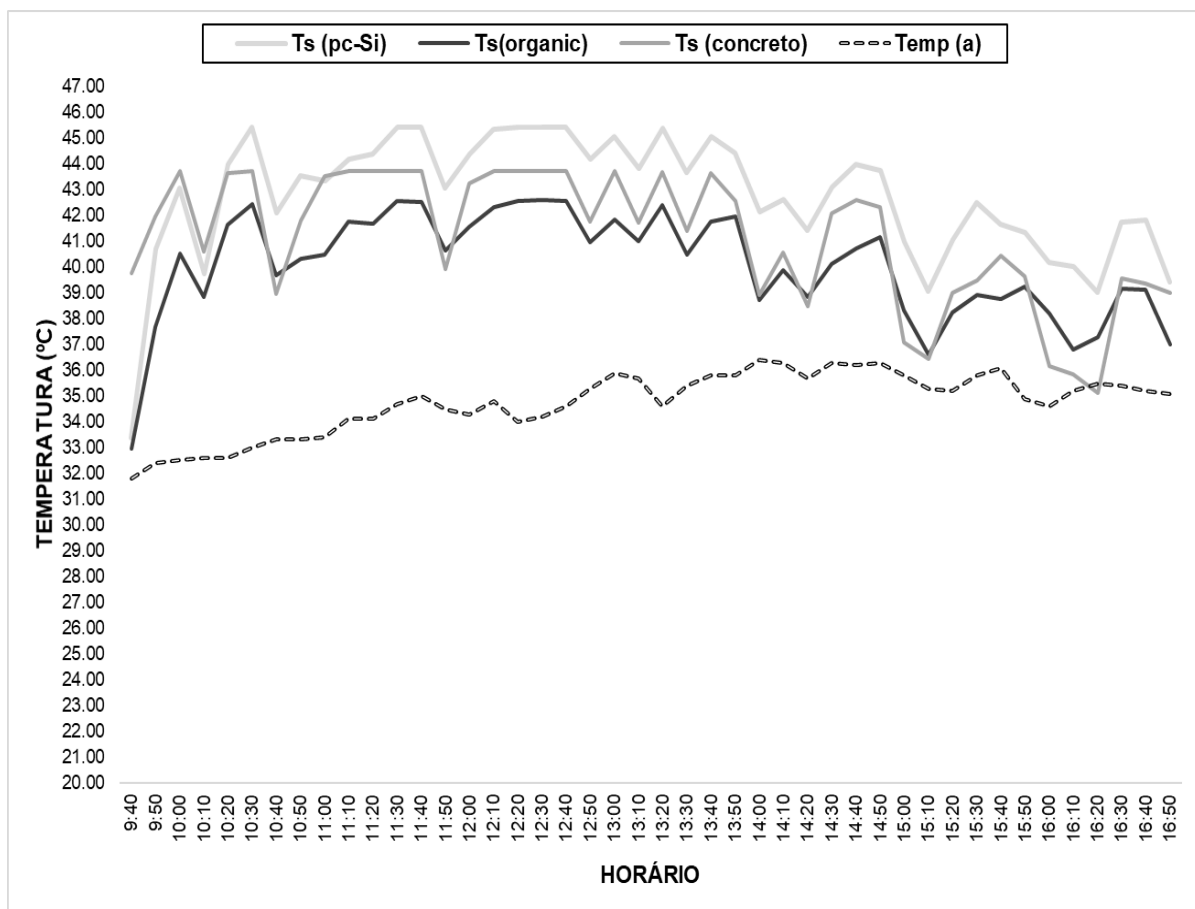
Figura 59 – Gráfico dos valores de tensão e corrente para os módulos FVs pc-Si (V1 e I1) e células orgânicas (V2 e I2) e G_{SOLAR} retirados do Ensaio III.



Fonte: Autor.

O gráfico ilustrado na Figura 60 apresenta o comportamento do parâmetro de T_s ao longo do Ensaio III. Como pode ser identificado pelo gráfico, o comportamento desse parâmetro para os três blocos monitorados foi semelhante. A T_s média do sistema BIPV contendo o módulo FV de pc-Si foi superior ao sistema BIPV contendo as células orgânicas, sendo que os valores associados a cada sistema foi de $43,23^\circ C$ e $40,49^\circ C$, respectivamente. A T_s média atingida pelo bloco de concreto puro foi de $41,78^\circ C$. Salienta-se que no período das 12 horas às 13 horas e 50 minutos a média da T_s para os sistemas BIPVs e para o concreto foi superior a média total dos valores coletados pela rede de monitoramento. O sistema BIPV com o módulo FV de pc-Si atingiu a T_s média de $45,08^\circ C$, o sistema BIPV com células orgânicas obteve a média de T_s em $41,92^\circ C$, e o concreto puro T_s igual a $43,68^\circ C$ no período destacado.

Figura 60 – Comportamento da T_s nos blocos de concreto com o sistema BIPV no Ensaio III e o comportamento da T_a ao longo do dia do Ensaio III.

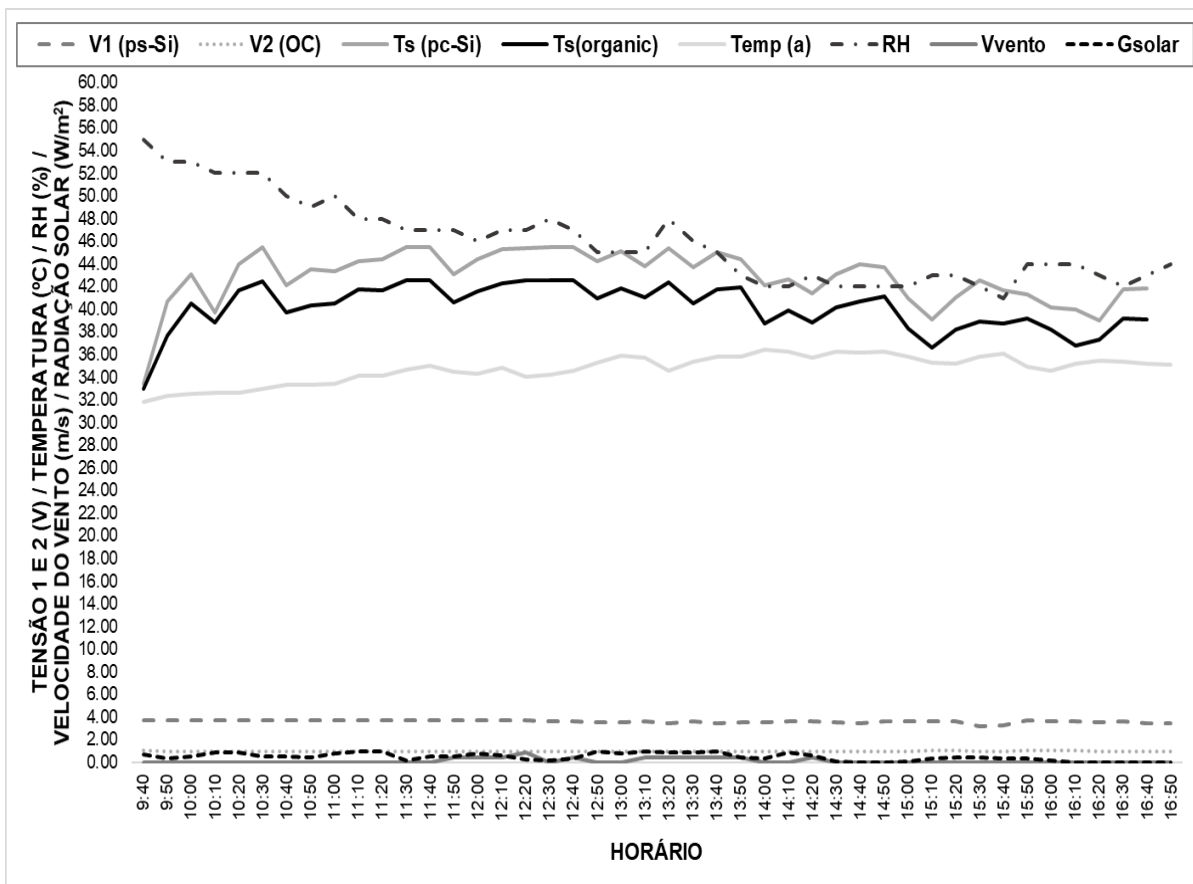


Fonte: Autor.

A Figura 61 ilustra o comportamento dos parâmetros ambientais (T_s , T_a , V_{VENTO} , RH , G_{SOLAR}) e elétricos ($V_{SÁIDA}$ – V_1 e V_2) retirados do Ensaio III. A média de valores coletados pela estação meteorológica foi de $35,05^\circ\text{C}$ para T_a . No intervalo das 14 horas às 15 horas e 40 minutos, esse parâmetro obteve os maiores valores, sendo que a média de valores no período foi de $36,10^\circ\text{C}$. A umidade relativa do ar (RH) atingiu os maiores valores no período da manhã (9 horas e 40 minutos às 11 horas e 50 minutos), onde a média para RH foi de 50%. Já a média total para esse parâmetro durante o período de tempo de coleta dos dados foi de 45%. Nota-se que com o decair da RH a T_a elevou-se, conforme apresentado pelo gráfico da Figura 61. Nesse intervalo de tempo, a T_a média

foi de 33,30°C. O parâmetro de V_{VENTO} não alcançou valores significativos, onde o pico de velocidade foi às 12 horas e 20 minutos com 0,9 m/s.

Figura 61 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio III.



Fonte: Autor.

As imagens contidas nas Figura 62 (a) e (d) apresentam o comportamento térmico do bloco de concreto no início e ao final do Ensaio III. A Figura 62 (a) ilustra a distribuição do calor no bloco de concreto puro às 10 horas e 40 minutos do dia 17/12/2018, onde a T_s média capturada pela câmera termográfica foi de 46,8°C. Destaca-se por essa imagem que o material de isolamento do sensor MCP9700A, a cortiça, absorveu mais calor do que o próprio concreto, como pode ser identificado por essa figura. Ao final do experimento, às 17 horas e 35 minutos o bloco de concreto ainda possuía a T_s média em 40,4°C.

As Figura 62 (b) e (e) ilustram o comportamento térmico do sistema BIPV com células de pc-Si. No início do experimento, destaca-se o alcance da T_{OP} do módulo FV onde as

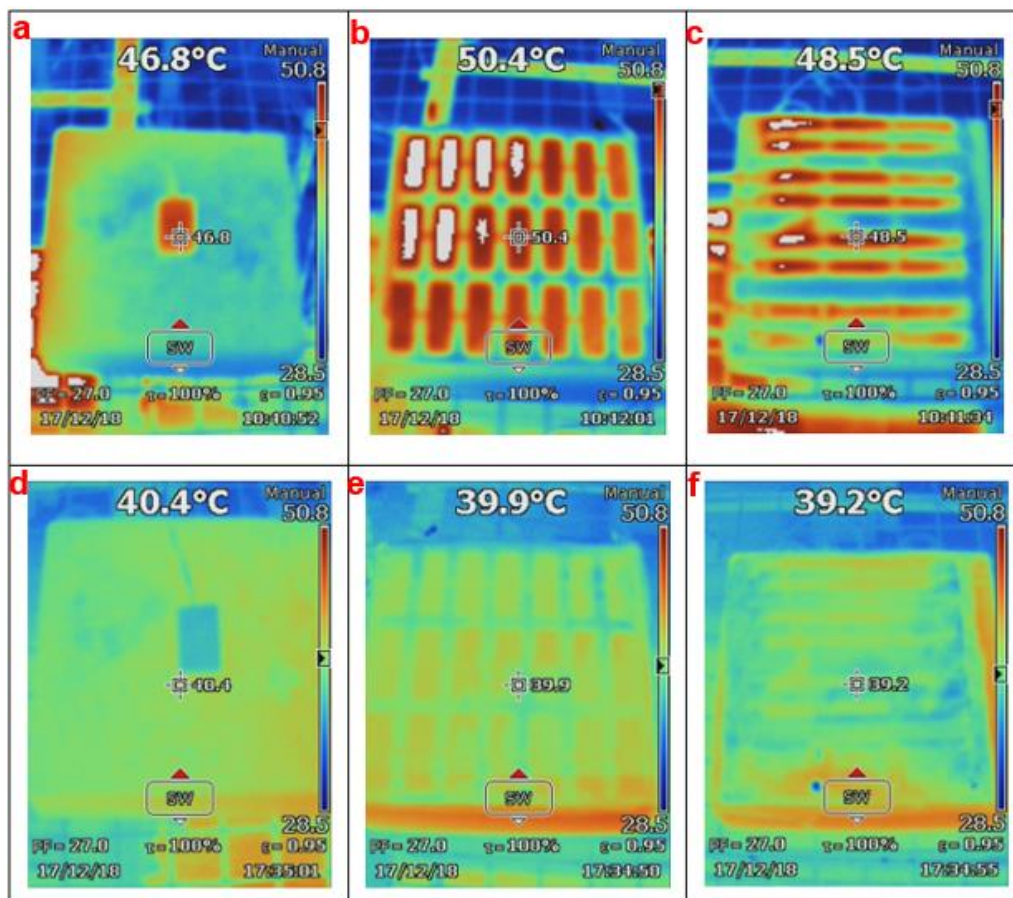
células operavam com temperaturas próximas à 50,4°C. A Figura 62 (e) esboça a temperatura na área do painel integrado ao concreto, onde a média de valor indentificada pela máquina termográfica foi de 39,9°C. A Figura 62 (c) apresenta a distribuição do calor no módulo FV com células orgânicas onde a média de valores para a T_{OP} dessas células foi de 48,5°C. Já ao final do Ensaio III, o sistema BIPV ilustrado na Figura 62 (f) mostra que o módulo FV com as células orgânicas esfriou-se cerca de 9,3°C, sendo que a média da T_{OP} das células foi de 39,2°C.

As Figura 63 (a), (b) e (c) trazem algumas imagens termográficas adicionais retiradas após a finalização do Ensaio III. Como pode ser identificado pela Figura 63 (a) após o encerramento da coleta dos dados, a média da T_s para o bloco de concreto puro foi de 39,5°C, demonstrando assim o resfriamento do bloco de concreto em 0,9°C para o período.

As Figura 63 (b) e (c) foram retiradas dos sistemas BIPVs onde estavam integrados os módulos FVs de pc-Si e de células orgânicas. Os equipamentos foram retirados da superfície de integração com o bloco de concreto com o intuito de verificar como se deu a absorção de calor dos blocos após um dia de exposição ao ambiente externo, bem como se a temperatura de operação das células FVs exerceram alguma influência no processo de transferência de calor por condução. A Figura 63 (b) ilustra, portanto, que a T_s média do sistema BIPV com o módulo de pc-Si adaptado ainda atingia 43°C e o bloco de concreto adotado no sistema BIPV com células orgânicas 43,1°C.

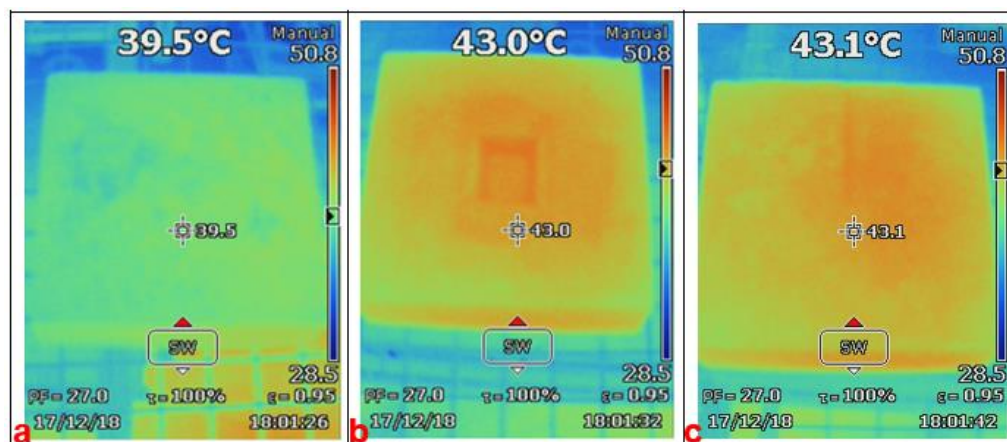
Sendo assim, é possível identificar que os sistemas BIPVs com as tecnologias fotovoltaicas utilizadas em bancada exerceram influência na absorção de calor pelo bloco de concreto integrado a cada tipo de célula FV. Comparando os valores expressos pela máquina termográfica, e assinalados pelas Figura 63 (a), (b) e (c), os sistemas BIPVs contribuíram para o acréscimo da T_s dos blocos de concreto. No caso do sistema BIPV com as células de pc-Si a T_s desse bloco foi 3,5°C maior do que o bloco de concreto sem integração com os módulos, vide Figura 63 (b). Ainda, o sistema BIPV com as células orgânicas após 30 minutos de encerramento do Ensaio III apresentou T_s em torno de 3,6°C a mais do que o bloco de concreto sem integração com os módulos FVs, obtendo a T_s média em torno de 43,1°C.

Figura 62 – Figuras termográficas dos sistemas BIPVs no início das simulações (a, b, c) e ao final do experimento (d, e, f).



Fonte: Autor.

Figura 63 – Imagens capturadas às 18 horas e 01 minuto no dia 17/12/2018 ao final do Ensaio III para visualização do comportamento térmico dos blocos de concreto utilizados na simulação dos sistemas BIPVs e do o concreto puro.



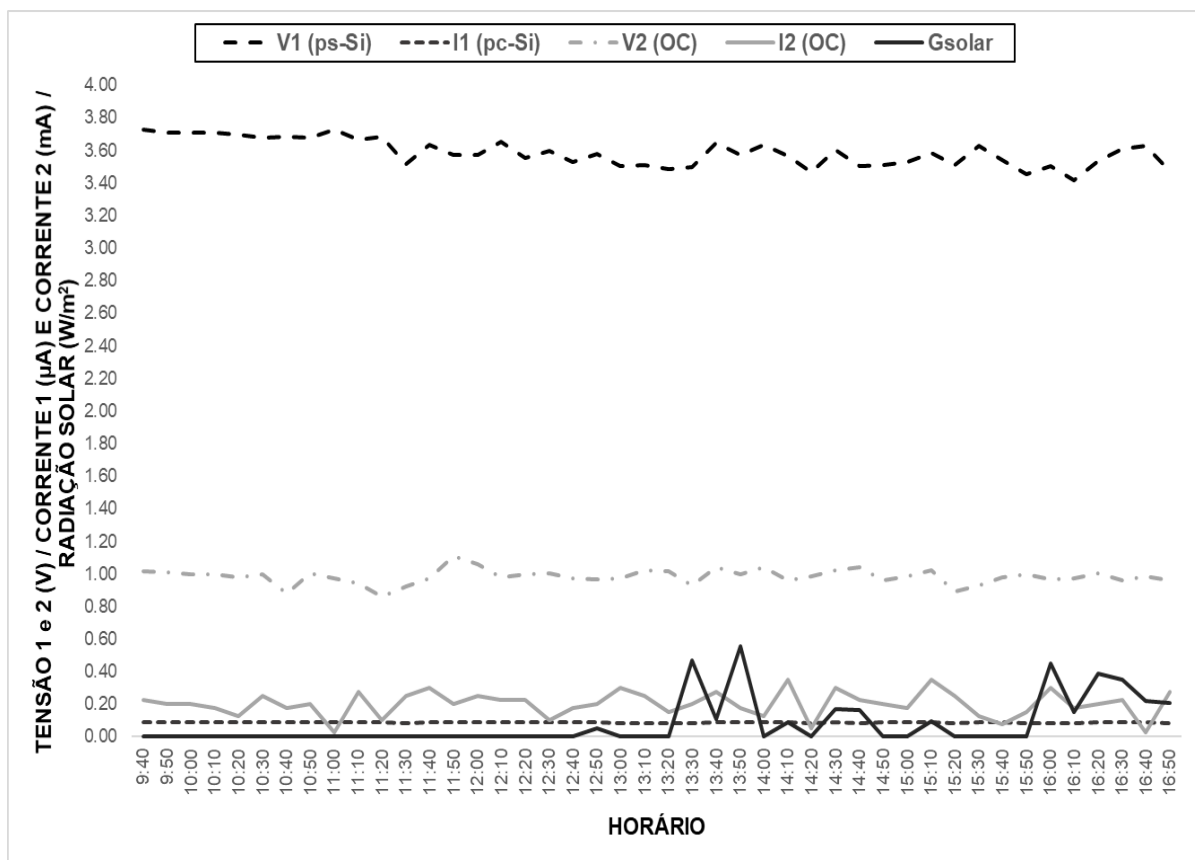
Fonte: Autor.

5.4 Resultados retirados a partir das simulações vinculadas ao Ensaio IV com os sistemas BIPVs sem o isolamento das laterais do bloco de concreto

O Ensaio IV foi realizado no dia 07/01/2019 em que a bancada instrumentada foi colocada em ambiente externo para emulação dos sistemas BIPVs. A rede de monitoramento realizou a coleta dos dados de interesse. Posteriormente, esses dados foram compilados e foram expressos nos gráficos apresentados a seguir. Através do gráfico da Figura 64 é possível observar o comportamento dos parâmetros elétricos dos módulos FVs usados para a emulação dos sistemas BIPVs, bem como os dados de G_{SOLAR} capturados ao longo do dia. O módulo FV contendo células de pc-Si obteve média de valores para $V_{SAÍDA}$ de 3,58 V e $I_{SAÍDA}$ de 0,09 μA . Paralelamente, o módulo FV com as células orgânicas alcançou a média de 0,99 V para $V_{SAÍDA}$ e 0,20 mA para $I_{SAÍDA}$.

A G_{SOLAR} para este dia resultou na média de 0,482 W/m^2 . O maior valor atingido por esse parâmetro foi às 13 horas e 30 minutos com 0,466 W/m^2 coletado pelo CEPAGRI. Esse parâmetro obteve os melhores valores no período das 16 horas até o final do experimento às 16 horas e 50 minutos. A média da G_{SOLAR} nesse período foi de 0,287 W/m^2 . Os valores de $V_{SAÍDA}$ do módulo FV com pc-Si no período da manhã (9 horas e 40 minutos às 11 horas e 20 minutos) foram razoavelmente superiores aos demais dados coletados ao longo do dia do ensaio. Conforme a Figura 64 ilustra, no período apontado a $V_{SAÍDA}$ média para o módulo FV de pc-Si foi de 3,70 V. Nesse mesmo período, a $V_{SAÍDA}$ do módulo FV com células orgânicas obteve média em torno de 1 V.

Figura 64 – Gráfico do comportamento da tensão elétrica ($V_{SAÍDA}$), corrente ($I_{SAÍDA}$) e G_{SOLAR} ao longo do tempo para o Ensaio IV.



Fonte: Autor.

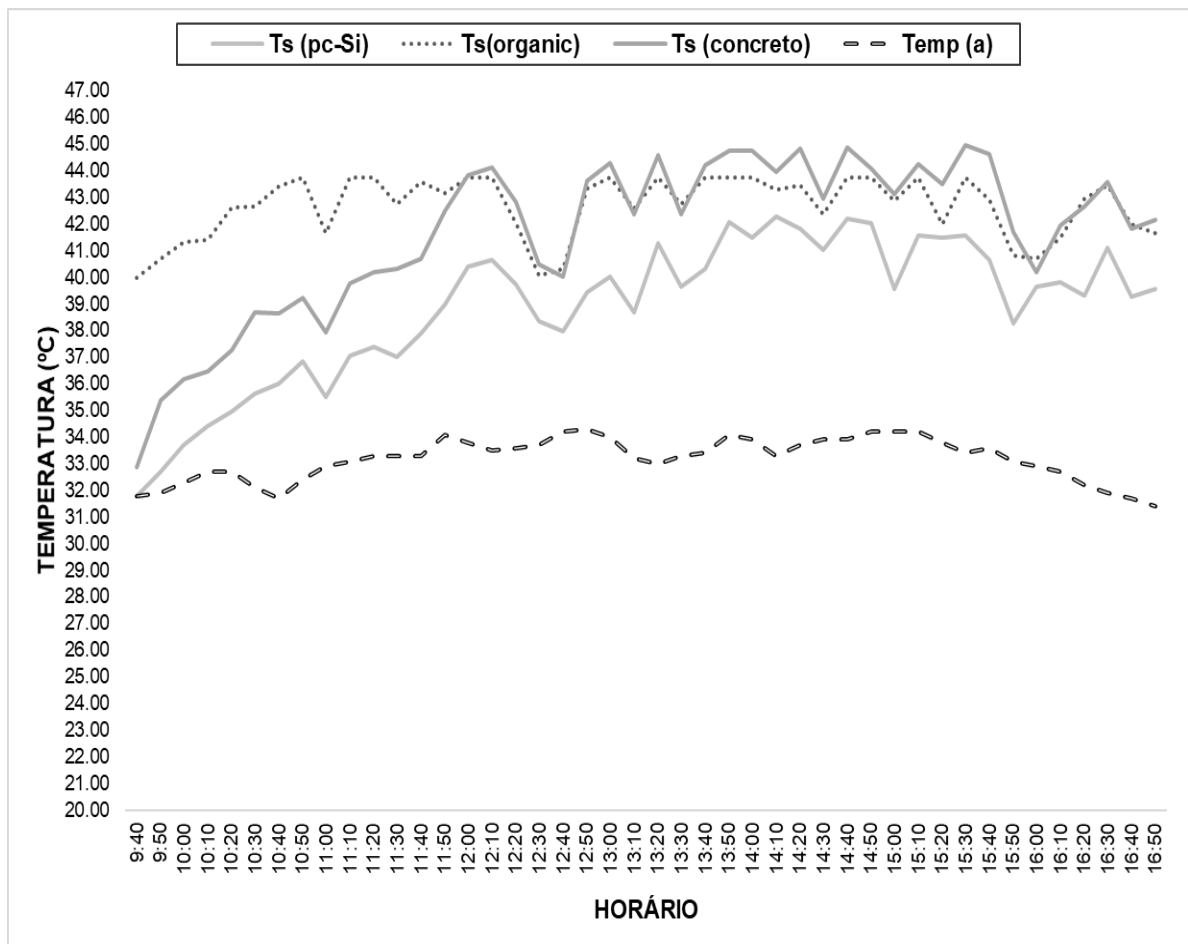
No intervalo das 9 horas e 40 minutos às 11 horas e 20 minutos, outras análises podem ser realizadas com o auxílio dos gráficos da Figura 64. Nesse período, onde a $V_{SAÍDA}$ de ambos os módulos FVs apresentou valores um pouco maiores do que os demais dados coletados ao longo do dia, a T_s dos sistemas BIPVs foi inferior à que foi coletada ao longo do resto do dia do Ensaio IV. A Figura 65 apresenta o comportamento das temperaturas nos sistemas BIPVs, no bloco de concreto puro e também a temperatura ambiente. Por exemplo, o sistema BIPV com as células de pc-Si atingiu a média de 35,5°C no período citado, sendo que a T_s média total do ensaio foi de 39,56°C. O sistema BIPV com as células orgânicas alcançou a T_s média de 42,61°C no intervalo apontado, sendo que a T_s média total foi de 42,94°C ao final do experimento.

A Figura 66 apresenta o comportamento das grandezas coletadas pela instrumentação colocada em bancada. Ao analisar o período da manhã (das 9 horas e 40 minutos às 11 horas e 20 minutos), os dados coletados mostram que o

comportamento das grandezas ambientais T_a e RH foi diferente do restante dos dados aferidos ao longo do dia. A T_a média nesse intervalo foi de $32,40^\circ\text{C}$, sendo que a T_a média total foi de $33,30^\circ\text{C}$.

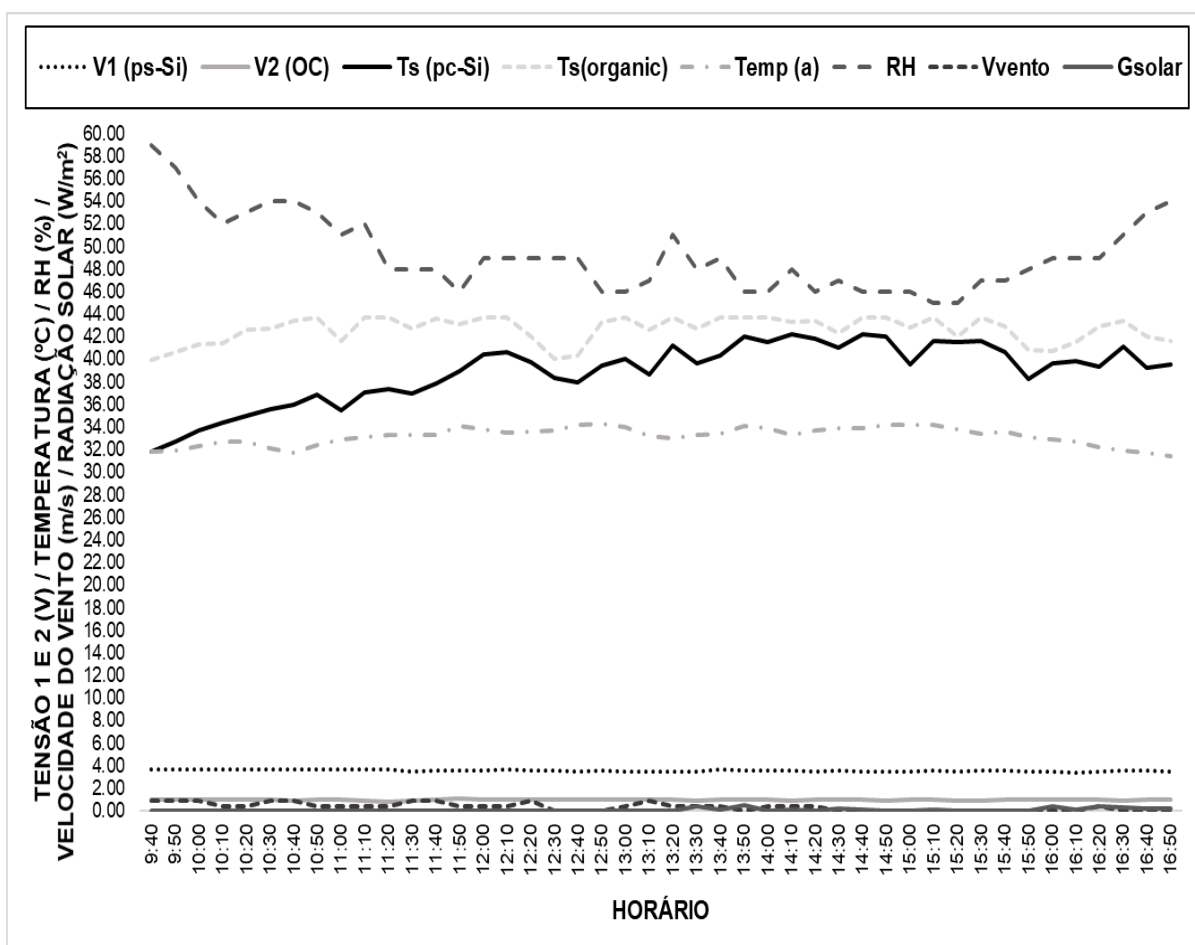
A RH alcançou 53% no período apontado, entretanto, ao final do Ensaio IV esse parâmetro teve valor médio de 49%. Nesse interim, quando a RH aumentou, foi possível identificar que a T_s dos sistemas BIPVs diminuiu, assim como a T_a , demonstrando assim uma relação inversamente proporcional entre temperatura e umidade relativa do ar. A média final de valores para a V_{VENTO} foi de $0,40$ m/s durante a execução do Ensaio IV. No período de 9 horas e 40 minutos às 12 horas e 20 minutos, esse parâmetro atingiu o melhor desempenho, quando avaliado todo o dia de coleta dos dados.

Figura 65 – Comportamento da T_s nos blocos de concreto com o sistema BIPV e o comportamento da T_a ao longo do dia do Ensaio IV.



Fonte: Autor.

Figura 66 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio IV.



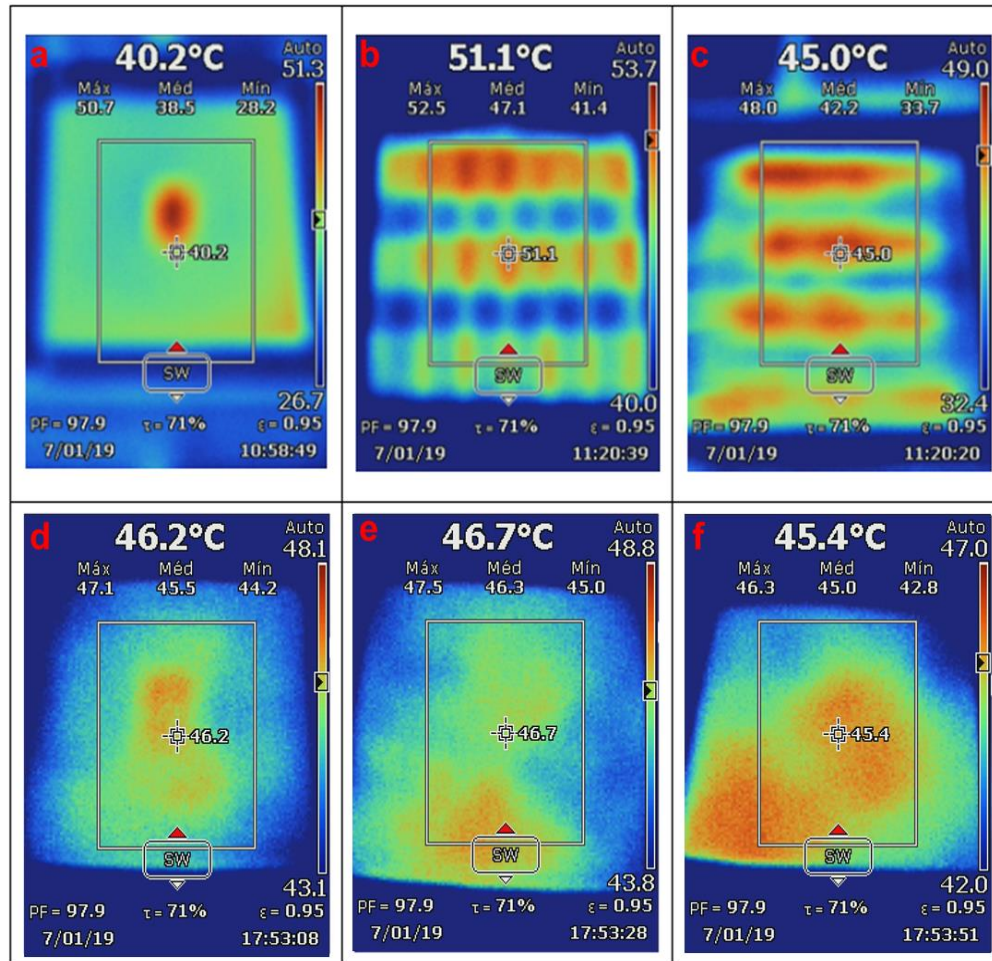
Fonte: Autor.

As imagens apresentadas pelas Figura 67 (a), (b) e (c) foram capturadas no início da coleta dos dados. A Figura 67 (a) ilustra a distribuição térmica do calor na superfície do bloco de concreto puro sem integração com módulos FVs. No Ensaio IV as caixas de isolamento das laterais foram utilizadas durante o período de coleta dos dados. Por essa figura verifica-se que a T_s média foi de $40,2^\circ\text{C}$. A Figura 67 (b) ilustra a distribuição do calor no sistema BIPV com o módulo pc-Si adaptado. A T_{OP} das células nesse caso chegou à $53,7^\circ\text{C}$, sendo que a T_{OP} média do módulo foi de $51,1^\circ\text{C}$. O terceiro bloco de concreto foi integrado com o módulo contendo as células orgânicas e a T_{OP} média atingida pelas células foi de 45°C .

Ao finalizar o experimento, os módulos FVs foram retirados da face frontal dos blocos de concreto simulando os sistemas BIPVs. A Figura 67 (d) demonstra que o bloco de concreto sem integração ao final do experimento ainda possuía a concentração de calor

em torno de $46,2^{\circ}\text{C}$. Os blocos de concreto outrora integrados com as tecnologias fotovoltaicas ainda possuíam calor retido, atingindo $46,7^{\circ}\text{C}$ para o bloco de concreto do sistema BIPV com o módulo de pc-Si e $45,4^{\circ}\text{C}$ para o sistema BIPV com as células orgânicas, conforme pode ser visto pelas Figura 67 (e) e (f) respectivamente.

Figura 67 – Figuras termográficas dos sistemas BIPVs no início das simulações (a, b, c) e ao final do experimento IV (d, e, f).



Fonte: Autor.

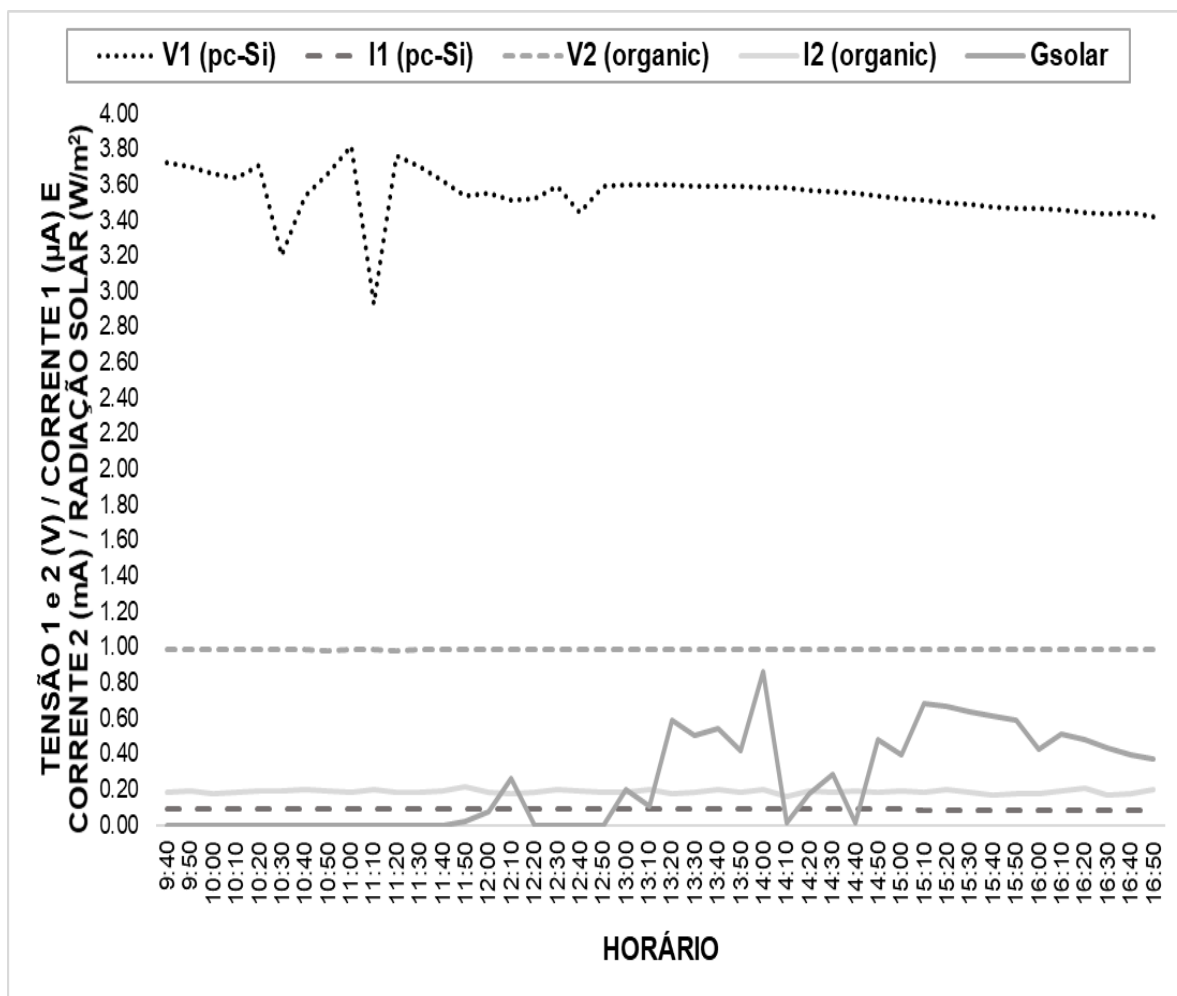
5.5 Análises a partir dos sistemas BAPVs emulados – Ensaio V com o espaçamento de 2,1 cm entre os blocos de concreto e os módulos FVs

Os Ensaio V, VI, VII, VIII, IX e X foram realizados emulando sistemas BAPV em bancada. O Ensaio V foi realizado no dia 10/01/2019. A rede de sensores, juntamente com a estação meteorológica, coletou os dados de $V_{SAÍDA}$ ($V1$ e $V2$), $I_{SAÍDA}$ ($I1$ e $I2$), T_{OP} e T_s . A coleta dos dados de temperatura foi separada, conforme descrito anteriormente, para captura dos dados de temperatura de operação das células FVs e também a temperatura superficial atingida pelo bloco de concreto. O sistema BAPV considera uma estrutura adicional de fixação dos módulos FVs, portanto o processo de aquecimento das partes constituintes do sistema pode ocorrer pelo processo de transferência de calor por convecção. Com o intuito de identificar essa relação de troca de calor, os sensores MCP900A (isolado e encapsulado) foram posicionados conforme a ilustrado na Figura 35.

O gráfico da Figura 68 apresenta o comportamento dos parâmetros elétricos dos módulos FVs de pc-Si adaptados e o módulo composto pelas células orgânicas. Pelo gráfico, identifica-se que os maiores valores de $V_{SAÍDA}$ alcançados pelo módulo de pc-Si ocorreram no período da manhã (9 horas e 40 minutos às 11 horas e 40 minutos). A média da $V_{SAÍDA}$ nesse intervalo foi de 3,66 V, sendo que a média total ao final do experimento foi de 3,56 V.

Já a tensão de saída do módulo FV com as células orgânicas obteve média geral de 0,99 V. A média de radiação solar no dia 10/01/2019, durante o espaço de tempo onde ocorreu a coleta dos dados, foi de 0,14 W/m². O maior valor de G_{SOLAR} nesse dia foi às 15 horas e 10 minutos, como pode ser constatado pelo gráfico da Figura 68, onde esse parâmetro atingiu 0,68 W/m².

Figura 68 – Gráfico do comportamento da tensão elétrica de saída ($V_{SAÍDA}$), corrente de saída ($I_{SAÍDA}$) e G_{SOLAR} ao longo do tempo para o Ensaio V.



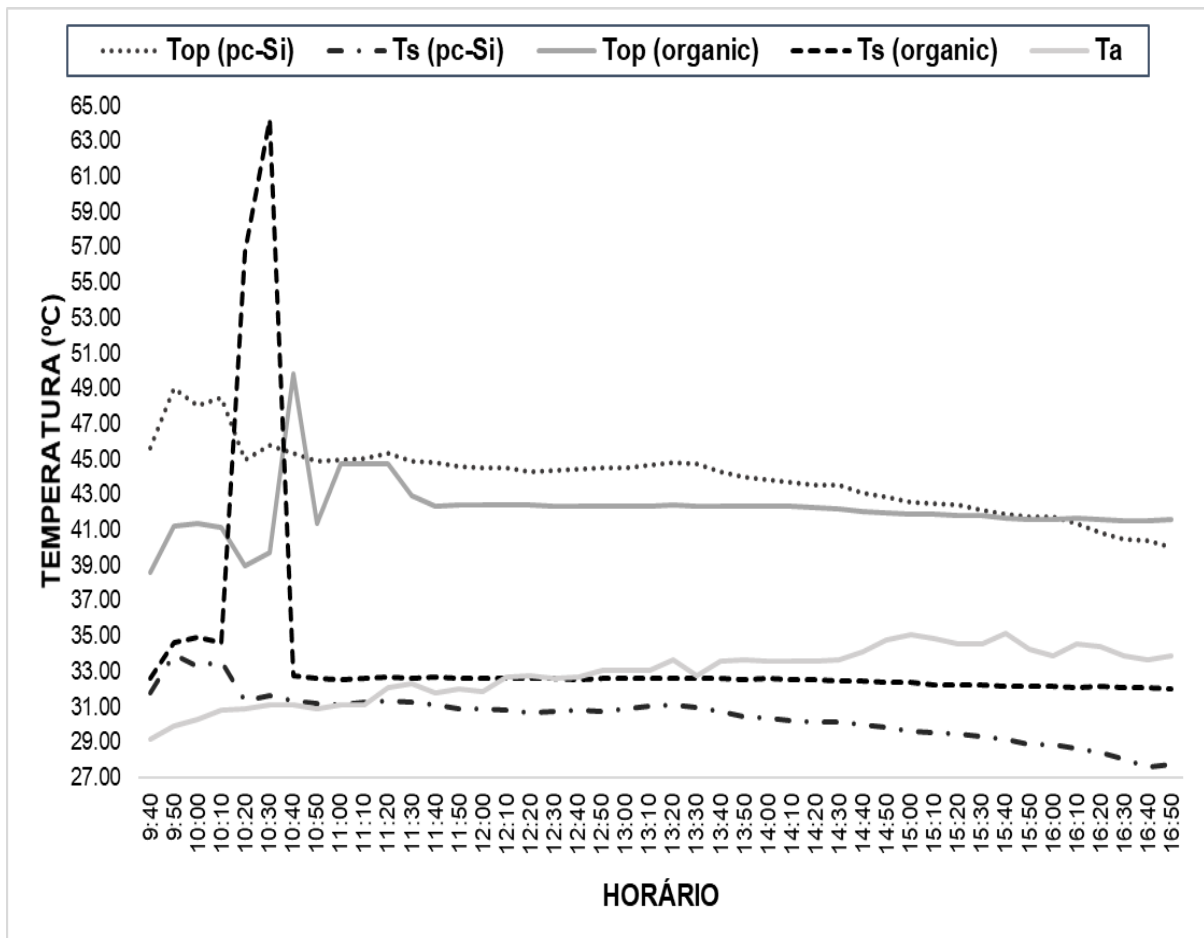
Fonte: Autor.

O Ensaio V foi caracterizado pelo distanciamento entre os elementos componentes do sistema BAPV em 2,1 cm. O comportamento das temperaturas de operação e superficial dos sistemas BAPVs emulados está ilustrado pelo gráfico da Figura 69. A T_{OP} do sistema BAPV com o módulo FV de pc-Si (adaptado) atingiu a média de 44,41°C durante o período de coleta dos dados. A média de valores para T_s do bloco de concreto associado e esse módulo FV foi de 30,76°C, sendo que para o bloco de concreto vinculado ao módulo FV células orgânicas esse valor foi de 32,60°C. O módulo FV com as células orgânicas teve sua T_{OP} média no dia 10/01/2019 em torno de 42,23°C.

Ao analisar os dados do Ensaio V, especificamente o período da manhã das 9 horas e 40 minutos (início da coleta dos dados) às 11 horas e 20 minutos. Nota-se algumas

peculiaridades. Pelo gráfico da Figura 69, pode ser constatado que, nesse intervalo de tempo, as T_{OP} de ambos os módulos FVs adotados no ensaio atingiram valores superiores ao restante daqueles apresentados ao longo do dia do ensaio. A T_{OP} média do módulo FV com pc-Si foi de 45,32°C e para o módulo FV com as células orgânicas foi de 41,35°C. A T_s dos blocos de concreto aplicados juntos aos módulos FVs também foram maiores do que a média geral ao final do experimento. Para o bloco de concreto configurando o sistema BAPV com o módulo FV de pc-Si, no intervalo citado, a T_s média foi de 31,38°C. Já no sistema BAPV com o módulo FV de células orgânicas a T_s média no período (9 horas e 40 minutos às 11 horas e 20 minutos) foi de 32,73°C.

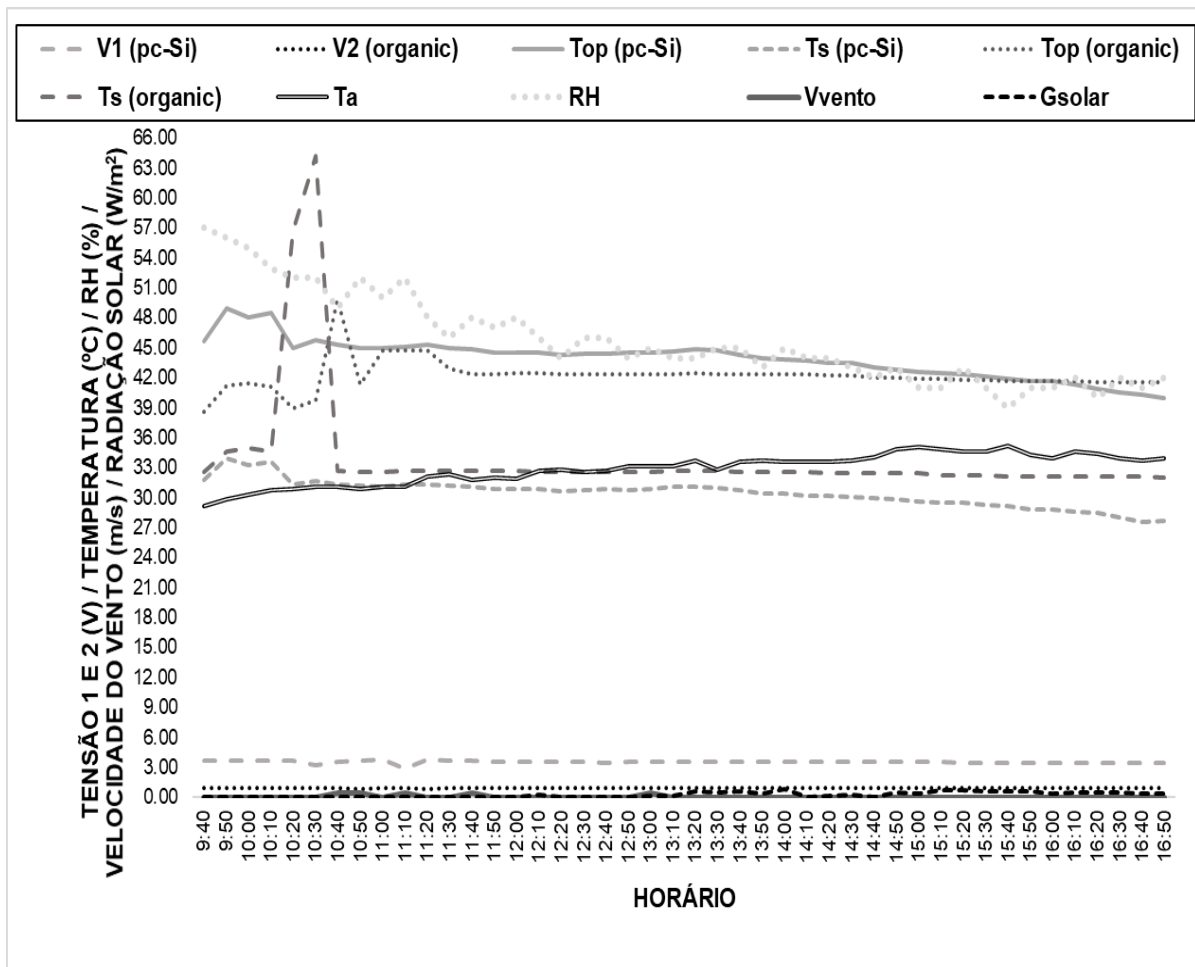
Figura 69 – Comportamento das temperaturas T_s , T_{OP} nos blocos de concreto com o sistema BAPV e o comportamento da T_a ao longo do dia.



Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 70 ilustra a distribuição dos dados coletados durante o Ensaio V. A T_a média nesse dia foi de 33,10°C. A umidade relativa do ar (RH) ao longo da coleta dos dados obteve média de 44,5%. A V_{VENTO} não apresentou valores significativos nesse dia, onde a média geral para esse parâmetro foi o m/s^2 . Analisando esse gráfico, destaca-se que, no período da manhã (9 horas e 40 minutos as 12 horas), a RH foi superior à média geral atingida no dia, sendo que a média nesse intervalo foi 52%. Nesse mesmo intervalo de tempo, a T_a apresentou valores inferiores aos coletados no resto do dia 10/01/2019, onde a média para T_a foi 31,1°C. A partir das 12 horas e 40 minutos, a T_a elevou-se gradativamente até o final da coleta dos dados, sendo que o maior valor atingido por esse parâmetro foi às 15 horas e 40 minutos.

Figura 70 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio V.

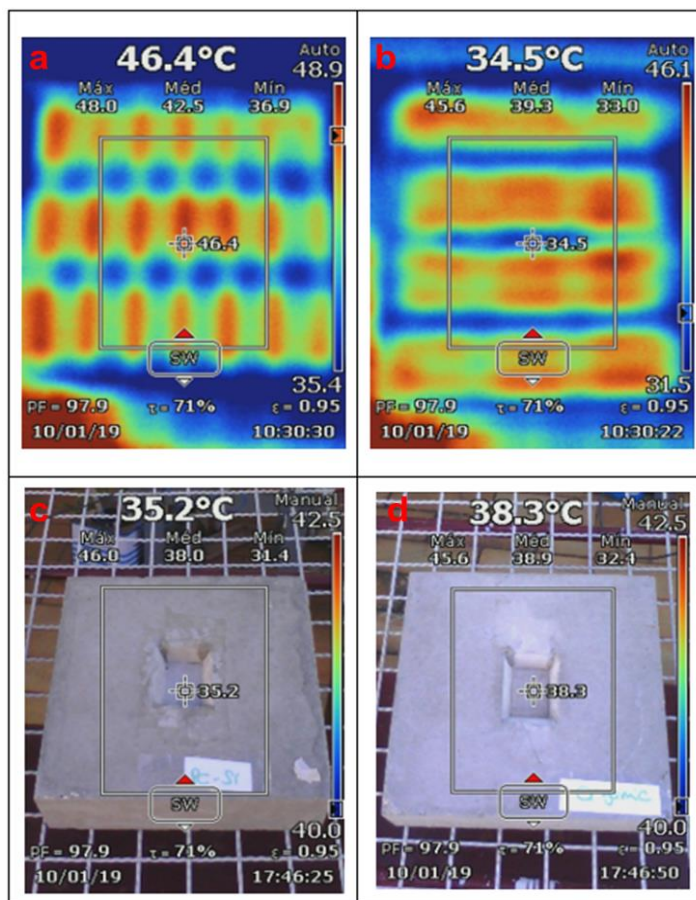


Fonte: Autor.

As imagens trazidas pelas Figura 71 (a), (b), (c) e (d) retratam o comportamento térmico dos sistemas BAPVs simulados. A Figura 71 (a) foi capturada no início da coleta dos dados onde a média da T_{OP} das células foi de 42,5°C. A Figura 71 (b) mostra a distribuição do calor no módulo FV com as células orgânicas onde a T_{OP} média foi de 39,3°C. Após a finalização dos ensaios, os módulos FVs foram retirados dos sistemas BAPVs para captura das imagens termográficas dos blocos de concreto ilustrando assim a T_s dos blocos de concreto.

A Figura 71 (c) ilustra o comportamento térmico do bloco de concreto onde havia o módulo FV com as células de pc-Si. Nesse elemento, a T_s média era 38°C. A Figura 71 (d) apresenta o bloco de concreto onde outrora havia a aplicação do módulo FV com as células orgânicas. Nesse bloco, a T_s média as 17 horas e 46 minutos era de 38,9°C.

Figura 71 – Imagens termográficas retiradas do Ensaio V contendo os sistemas BAPVs com o módulo de pc-Si (a) e com as células orgânicas (b) – início do experimento; e imagens da superfície do bloco de concreto voltada ao módulo FV (c e d).



Fonte: Autor.

5.6 Resultados do Ensaio VI emulando os sistemas BAPVs com o espaçamento de 3,5 cm entre os elementos construtivos e os módulos FVs

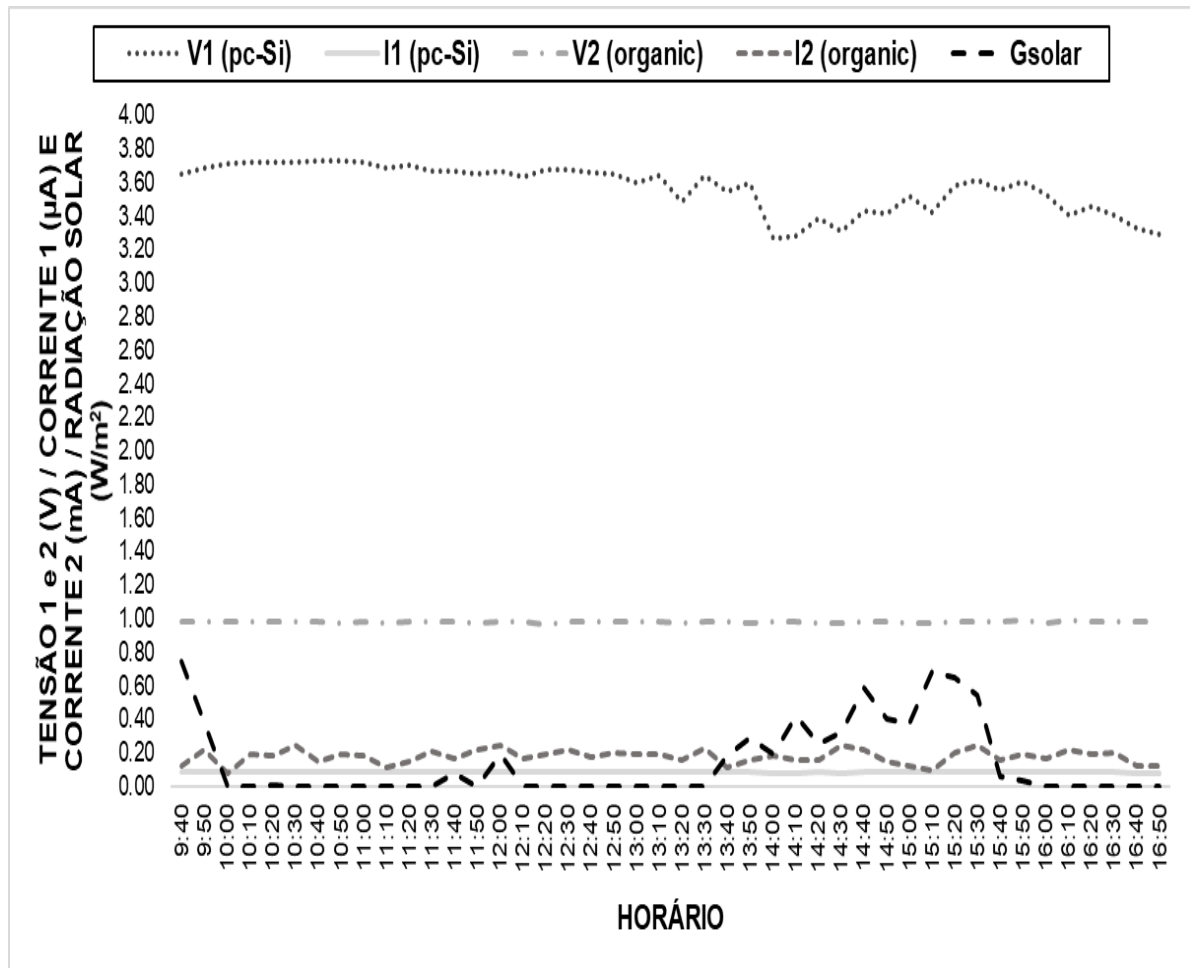
O Ensaio VI foi efetuado no dia 14/01/2019, emulando os sistemas BAPVs com a aplicação dos módulos FVs de pc-Si (adaptado) e contendo as células orgânicas. O espaçamento entre o equipamento fotovoltaico e o bloco de concreto foi de 3,5 cm. Os parâmetros elétricos dos módulos são apresentados pelo gráfico da Figura 72, bem como o comportamento da G_{SOLAR} ao longo do dia da coleta dos dados. A $V_{SAÍDA}$ média para o módulo FV de pc-Si foi de 3,63 V, assim como o módulo FV de células orgânicas (OC) obteve a $V_{SAÍDA}$ média de 0,98 V. Especificamente no intervalo das 10 horas da manhã às 12 horas e 30 minutos a $V_{SAÍDA}$ média do módulo FV com as células de pc-Si foi de 3,69 V, sendo então a tensão de saída do módulo maior nesse período. A G_{SOLAR} média do dia foi de 0 W/m^2 , segundo os dados do CEPAGRI. Entretanto, às 15 horas e 10 minutos esse parâmetro teve seu ápice atingindo $0,69 \text{ W/m}^2$.

O gráfico contido na Figura 73 traz os dados referentes às temperaturas de operação dos módulos FVs, as temperaturas superficiais dos blocos de concreto voltadas para os módulos e ainda o comportamento da temperatura ambiente ao longo do dia de realização do Ensaio VI. As T_{OP} médias para o módulo de pc-Si e para o módulo de OC foram de $43,5^{\circ}\text{C}$ e $41,31^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Já a T_S dos blocos de concreto foram de $37,02^{\circ}\text{C}$ (módulo pc-Si adaptado) e $37,72^{\circ}\text{C}$ (módulo de OC). A T_a média do período de coleta dos dados do dia 14/01/2019 foi de $33,60^{\circ}\text{C}$. O maior valor de T_a coletado pela estação meteorológica foi às 15 horas e 20 minutos com alcance de $35,9^{\circ}\text{C}$.

Ao analisar o gráfico da Figura 73, no intervalo da manhã (a partir das 9 horas e 40 minutos às 12 horas e 40 minutos identifica-se o aumento das temperaturas T_{OP} e T_S . Ainda, durante o intervalo das 9 horas e 40 minutos às 11 horas da manhã a média dos valores de temperatura coletadas pela rede de sensores demonstram que nesse período essas temperaturas foram inferiores à média geral obtida ao final da realização do ensaio. A T_{OP} do módulo FV de pc-Si, por exemplo, nesse período foi de $35,49^{\circ}\text{C}$, assim

como a T_{OP} do módulo FV de OC foi de $32,36^{\circ}\text{C}$. Nesse período, a T_s média do bloco de concreto aplicado junto ao módulo FV de OC foi menor do que a T_s do sistema BAPV com o módulo FV de pc-Si. A T_s no módulo de pc-Si foi de $29,99^{\circ}\text{C}$ e do módulo FV de OC foi $29,41^{\circ}\text{C}$.

Figura 72 – Gráfico do comportamento da tensão elétrica ($V_{SAÍDA}$), corrente ($I_{SAÍDA}$) e G_{SOLAR} ao longo do tempo para o Ensaio VI.

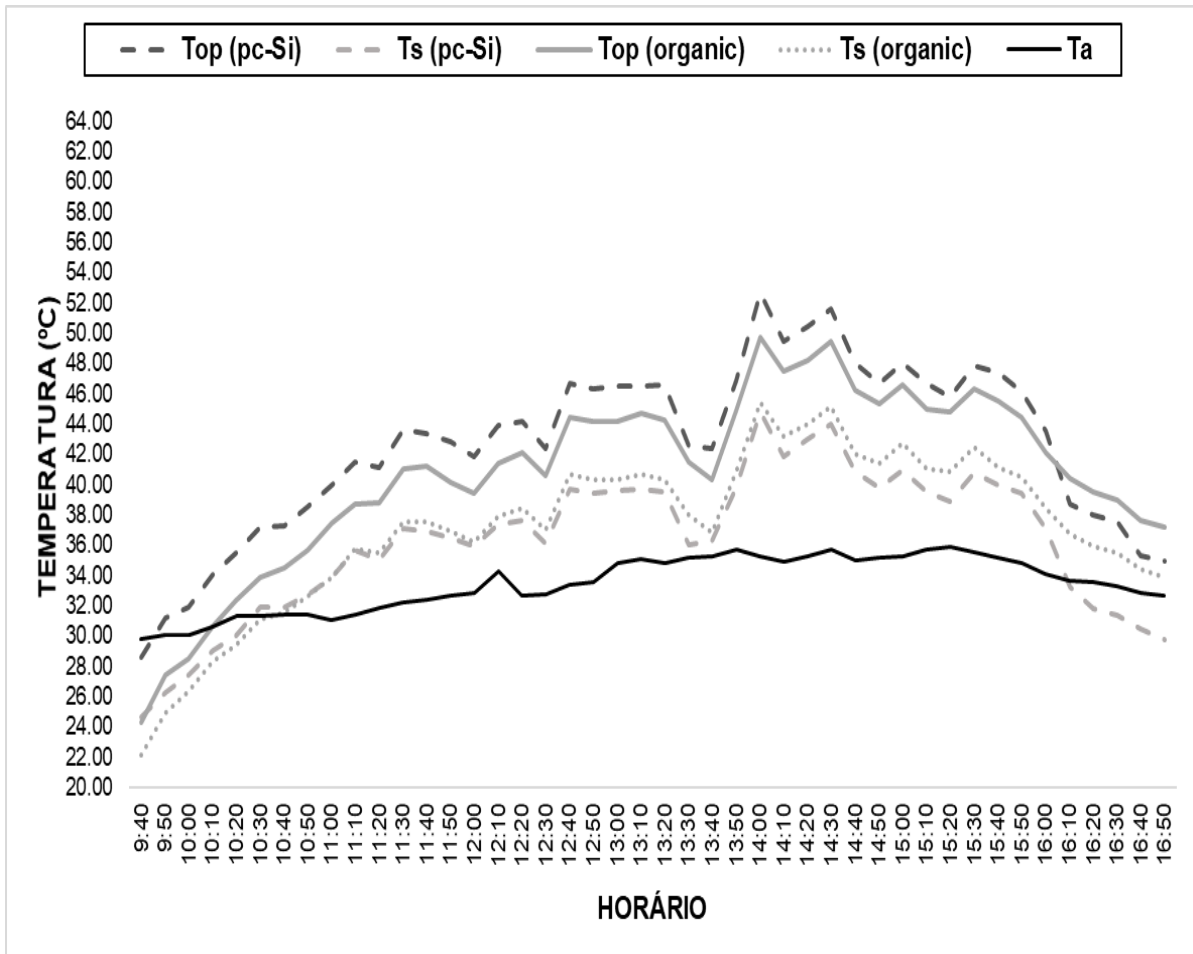


Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 74 ilustra o comportamento das grandezas coletadas pela rede de monitoramento, assim como os dados coletados pela estação meteorológica. A T_a média do período de coleta dos dados foi de $33,6^{\circ}\text{C}$. A média associada ao parâmetro de RH foi de 46%. A V_{VENTO} coletada pela estação meteorológica não atingiu valores significativos, sendo que a média no período foi de 0 m/s^2 . Destaca-se o intervalo da manhã, que vai das 9 horas e 40 minutos às 12 horas e 40 minutos, onde observa-se o

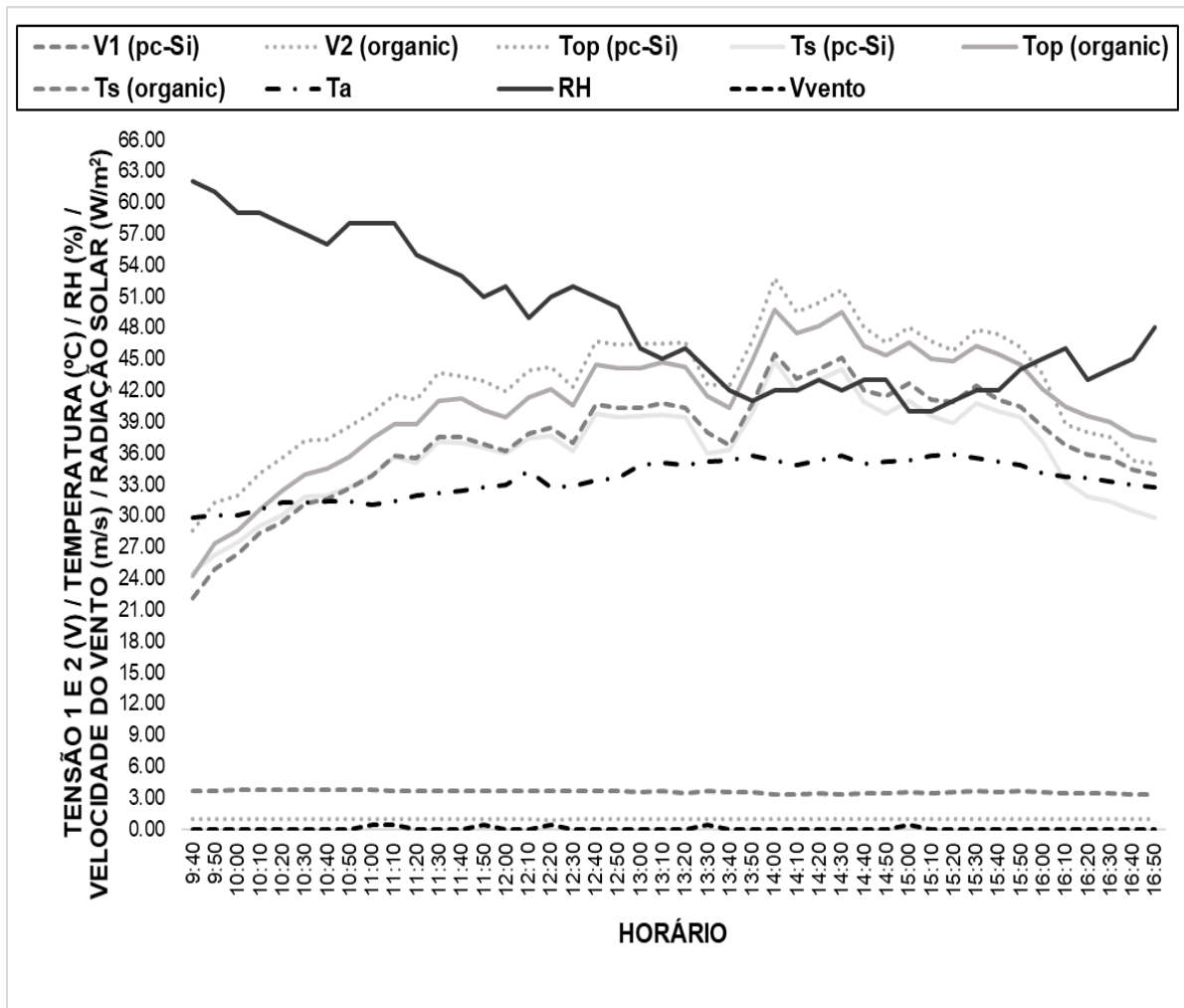
aumento da T_a e a diminuição da RH. Nesse espaço de tempo, a média de valores associadas à RH foi de 56% (maior do que a média geral), e da T_a de 31,4°C (menor do que a média geral). Ao passo que a umidade relativa do ar foi diminuindo, as demais temperaturas (T_{OP} , T_S e T_a) foram aumentando gradativamente.

Figura 73 – Comportamento da T_S , T_{OP} e T_a nos sistemas BAPVs coletadas durante o Ensaio VI.



Fonte: Autor.

Figura 74 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio VI.

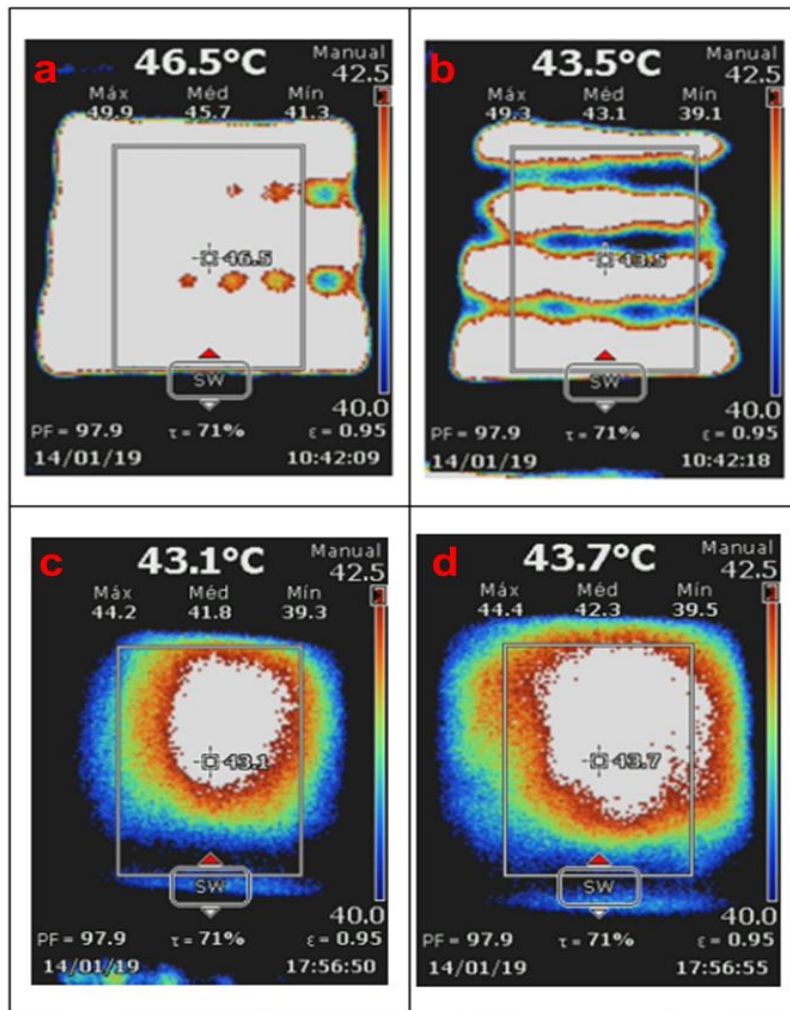


Fonte: Autor.

A partir das imagens térmicas capturadas pela máquina termográfica, a Figura 75 ilustra a distribuição térmica do calor nos sistemas BAPVs no início da coleta dos dados (às 9 horas e 40 minutos) e ao final da realização do Ensaio VI (às 16 horas e 50 minutos). A Figura 75 (a) ilustra a distribuição do calor do módulo FV de pc-Si aplicado ao concreto com suporte de distanciamento de 3,5 cm. A T_{OP} média capturada pela máquina nesse equipamento foi de 45,7°C. A temperatura máxima desse módulo foi de 49,9°C e a mínima de 41,3°C. A Figura 75 (b) foi retirada da superfície do bloco de concreto voltada ao módulo FV no final do experimento. A T_s média nesse elemento foi de 41,8°C. A temperatura mínima nessa superfície foi de 39,3°C e a máxima de 44,2°C.

Ao avaliar o sistema BAPV contendo o módulo FV com as células OC identifica-se que a T_{OP} média no início da coleta dos dados, Figura 75 (b), foi de $43,1^{\circ}\text{C}$, sendo que a temperatura máxima coletada pela máquina térmica foi de $49,3^{\circ}\text{C}$ na área do módulo. Já a temperatura mínima foi de $39,1^{\circ}\text{C}$. Ao encerrar o Ensaio VI, a Figura 75 (d) contribui para verificar o comportamento da distribuição do calor no bloco de concreto associado ao módulo FV de OC. A T_s média nesse caso foi de $42,3^{\circ}\text{C}$, sendo que a temperatura mínima na área superficial do bloco foi de $39,5^{\circ}\text{C}$ e a máxima de $44,4^{\circ}\text{C}$. Destaca-se que a T_s desse sistema BAPV foi maior do que a T_s do sistema BAPV com o módulo FV de pc-Si.

Figura 75 – Imagens termográficas retiradas do Ensaio VI contendo os sistemas BAPVs com o módulo de pc-Si (a) e com as células orgânicas (b) e da superfície do bloco de concreto ao final do experimento (c e d).



Fonte: Autor.

5.7 Análises a partir dos sistemas BAPVs simulados – Ensaio VII com o espaçamento os módulos FVs de pc-Si adaptado e células orgânicas e espaçamento entre de 5,5 cm entre os blocos de concreto e os módulos FVs

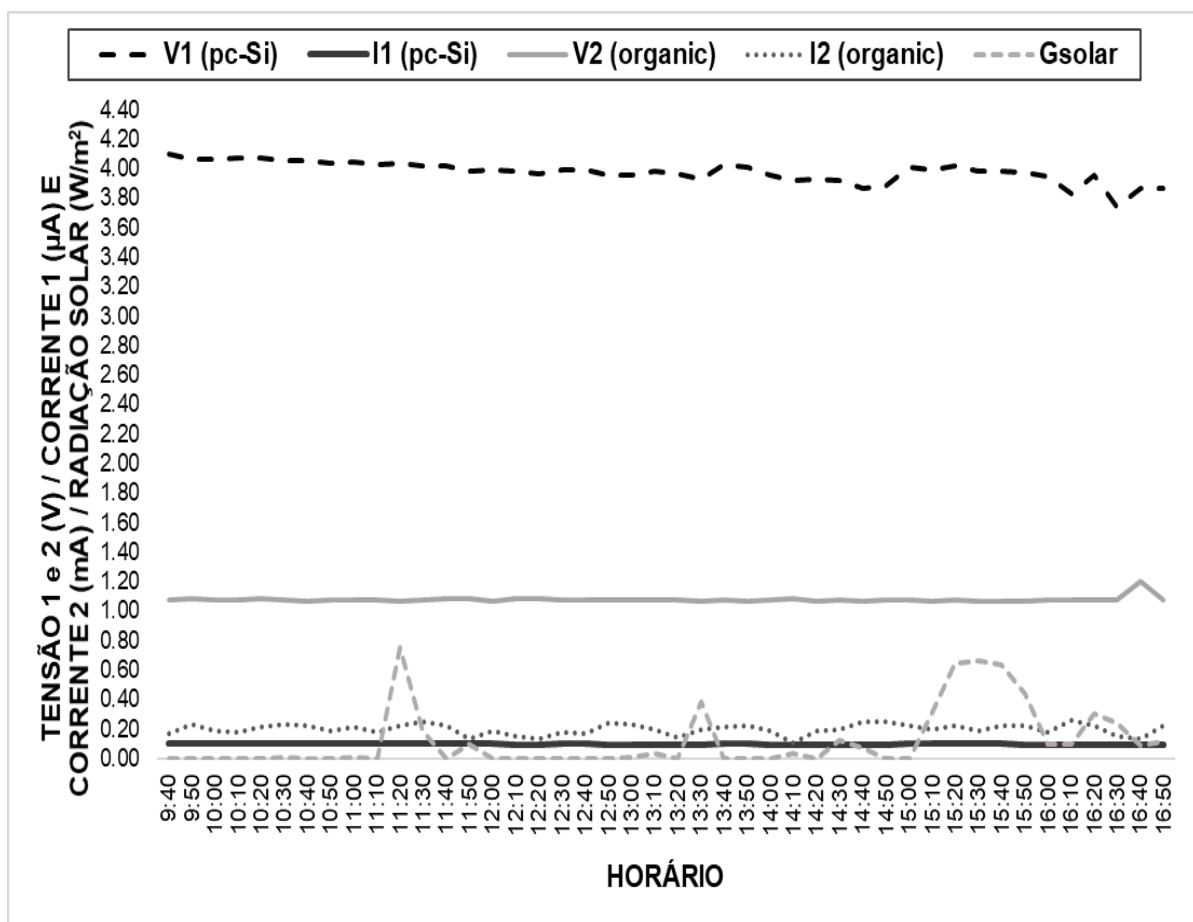
O Ensaio VII realizado no dia 15/01/2019 foi efetuado com os sistemas BAPVs com distanciamento entre o módulo FV e a superfície do bloco de concreto de 5,5 cm. O gráfico da Figura 76 ilustra o comportamento dos parâmetros de $V_{SAÍDA}$ e $I_{SAÍDA}$ dos módulos FVs utilizados no ensaio (módulo FV de pc-Si adaptado e composto por células orgânicas). Ainda, os dados de G_{SOLAR} foram adicionados ao gráfico visto a relação direta entre a geração de energia pelos equipamentos fotovoltaicos e a incidência de radiação nas células FVs. A tensão de saída média do módulo FV de pc-Si foi de 3,99 V durante o período de coleta dos dados pela rede de sensores. A $V_{SAÍDA}$ média do módulo FV com OC foi de 1,08 V. Entretanto, os dados de G_{SOLAR} não foram expressivos, atingindo a média para o período de 0 W/m^2 com a máxima incidência às 15 horas e 30 minutos, segundo os dados fornecidos pelo CEPAGRI, com marcação de $0,66 \text{ W/m}^2$.

O gráfico da Figura 76 demonstra que a $V_{SAÍDA}$ do módulo FV de pc-Si foi razoavelmente maior no período da manhã. No intervalo das 9 horas e 40 minutos às 11 horas e 40 minutos, a $V_{SAÍDA}$ média foi de 4,05 V, sendo esse valor maior do que a $V_{SAÍDA}$ média do dia todo. O módulo FV de OC por outro lado, no intervalo citado, não apresentou mudanças significativas acerca da tensão de saída do equipamento. A corrente de saída dos módulos FVs também não apresentaram oscilações consideráveis. A $I_{SAÍDA}$ do módulo FV de pc-Si adaptado no período foi de $0,10 \mu\text{A}$. A $I_{SAÍDA}$ do módulo FV do módulo FV de células orgânicas foi de $0,21 \text{ mA}$.

Os valores das temperatura coletadas pela bancada são apresentadas na Figura 77. A T_{OP} média dos módulos FVs foram de $49,52^\circ\text{C}$ no módulo FV de pc-Si e $48,02^\circ\text{C}$ no módulo de OC. A T_s média conferida na superfície dos módulos FVs foi de $42,19^\circ\text{C}$ e $43,94^\circ\text{C}$ em ambos módulos FVs respectivamente. A temperatura ambiente média no período de coleta dos dados, fornecida pela estação meteorológica, foi de $34,6^\circ\text{C}$.

Analisando as T_a dos Ensaio V, VII e VII, no dia 15/01/2019 (Ensaio VII) a T_a média foi a maior delas.

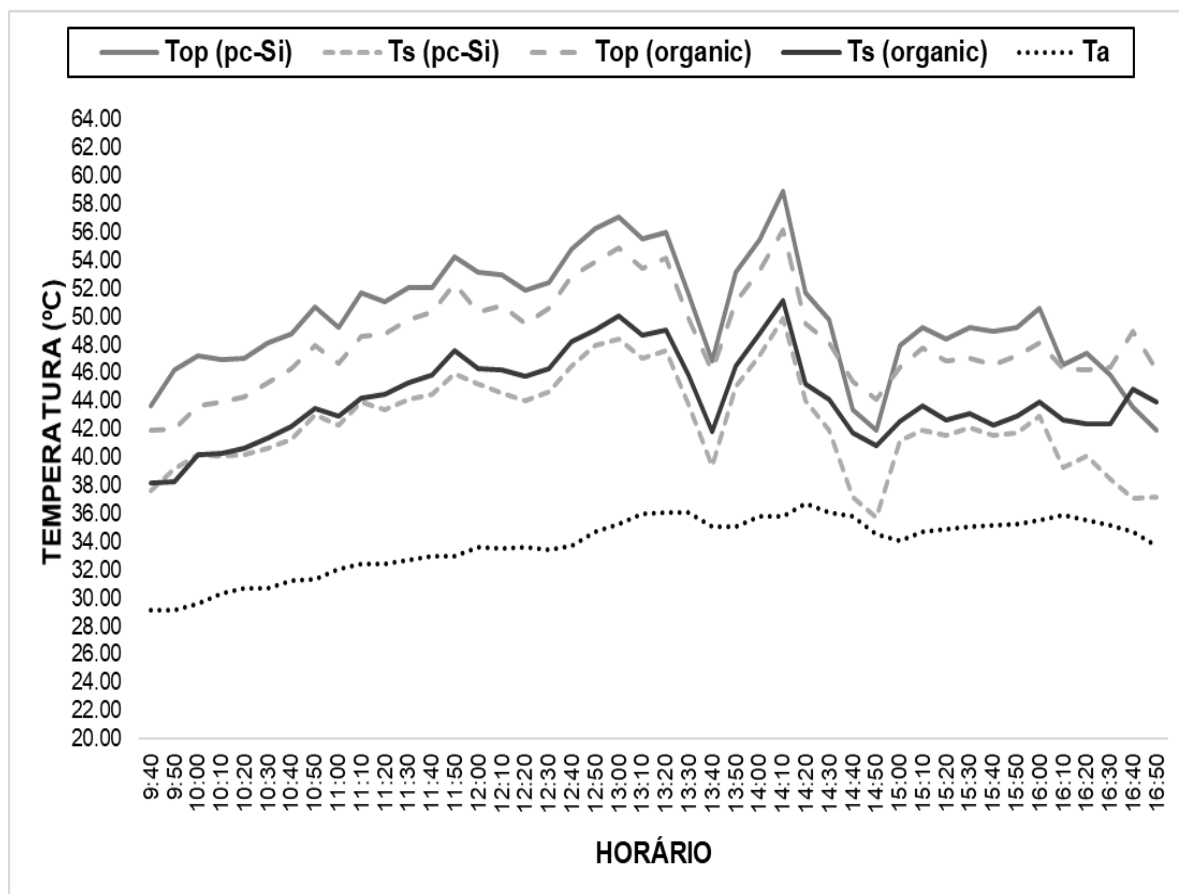
Figura 76 – Gráfico do comportamento da tensão elétrica ($V_{SAÍDA}$), corrente ($I_{SAÍDA}$) e G_{SOLAR} ao longo do tempo para o Ensaio VII.



Fonte: Autor.

Avaliando o intervalo da manhã (a partir do início da coleta dos dados – 9 horas e 40 minutos até às 11 horas e 40 minutos), nota-se o aumento gradativo das temperaturas coletadas pela rede de monitoramento e pela estação meteorológica. Especificamente neste intervalo de tempo, do sistema BAPV contendo o módulo FV de pc-Si adaptado, a T_{OP} média do módulo foi de $48,83^{\circ}\text{C}$ e a T_s no bloco de concreto $41,32^{\circ}\text{C}$. Já o sistema BAPV com o painel de células orgânicas atingiu a T_{OP} média de $46,3^{\circ}\text{C}$ e a T_s no bloco de concreto de $43,24^{\circ}\text{C}$, no intervalo de tempo citado. Outro ponto a ser salientado é a T_a no período identificado, onde a média associada ao período foi de $31,20^{\circ}\text{C}$, inferior a média geral.

Figura 77 – Comportamento da T_s , T_{OP} e T_a nos sistemas BAPVs coletadas durante o Ensaio VII.



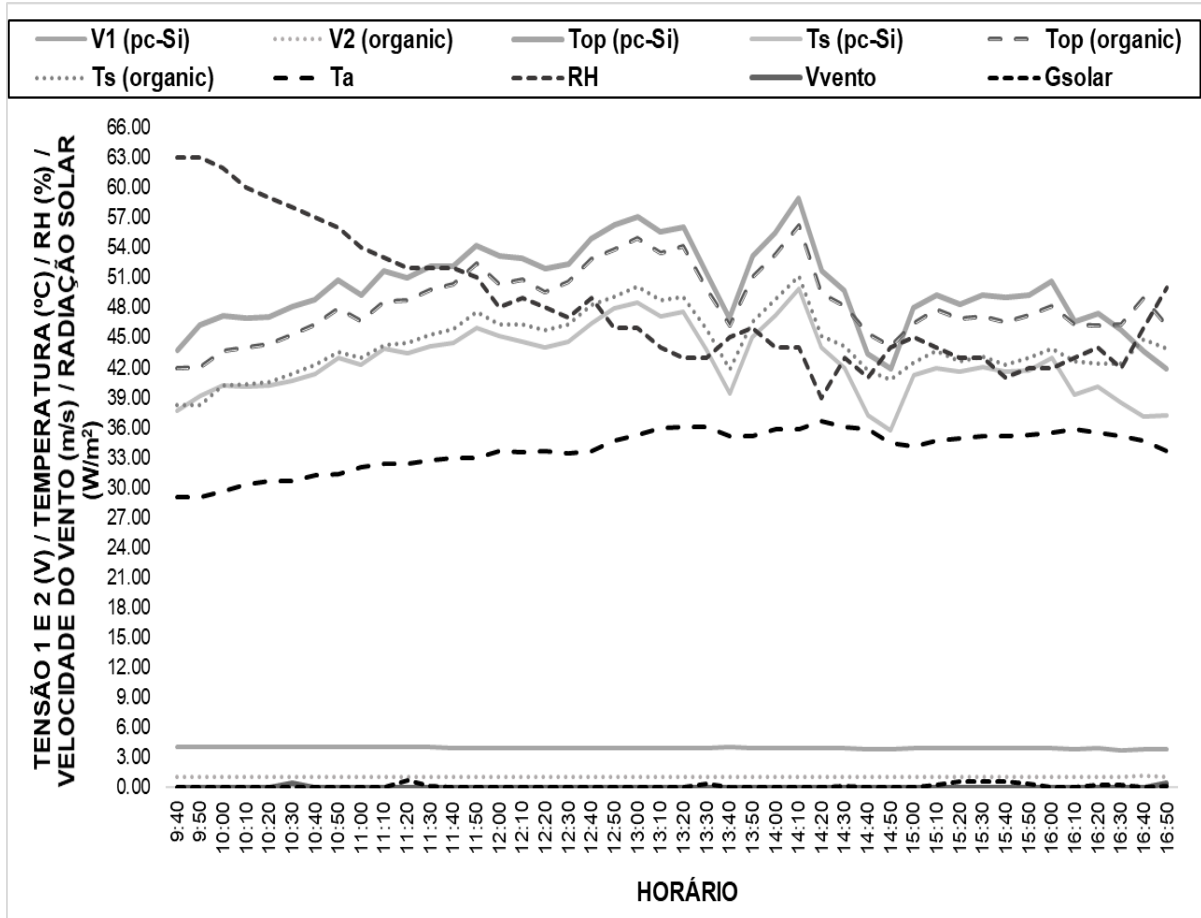
Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 78 o comportamento das grandezas ambientais associadas ao dia de realização do Ensaio VII, assim como os parâmetros elétricos de $V_{SAÍDA}$ dos módulos FVs, e ainda as temperaturas de operação e superficial dos sistemas BAPVs colocados em bancada. No período de coleta dos dados (das 9 horas e 40 minutos às 16 horas e 50 minutos) a média dos dados de G_{SOLAR} e V_{VENTO} foram de 0 W/m^2 e 0 m/s^2 , respectivamente. A umidade relativa do ar média (RH) foi de 46%. Já a temperatura ambiente no período foi de $34,6^\circ\text{C}$.

Destaca-se o período da manhã (9 horas e 40 minutos às 11 horas e 40 minutos) onde o comportamento da umidade relativa do ar e da temperatura ambiente demonstrou-se diferente do restante do dia, conforme o gráfico da Figura 78. Nota-se que com a diminuição dos valores de RH a T_a elevou-se. Verificando o gráfico da Figura 78 observa-se que com a redução dos valores associadas à umidade relativa do ar, as

T_{OP} e T_s dos sistemas BAPVs elevaram-se, considerando o intervalo citado. A RH média do período frisado foi de 57%, enquanto a T_a atingiu a média de 31,20°C.

Figura 78 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio VII.

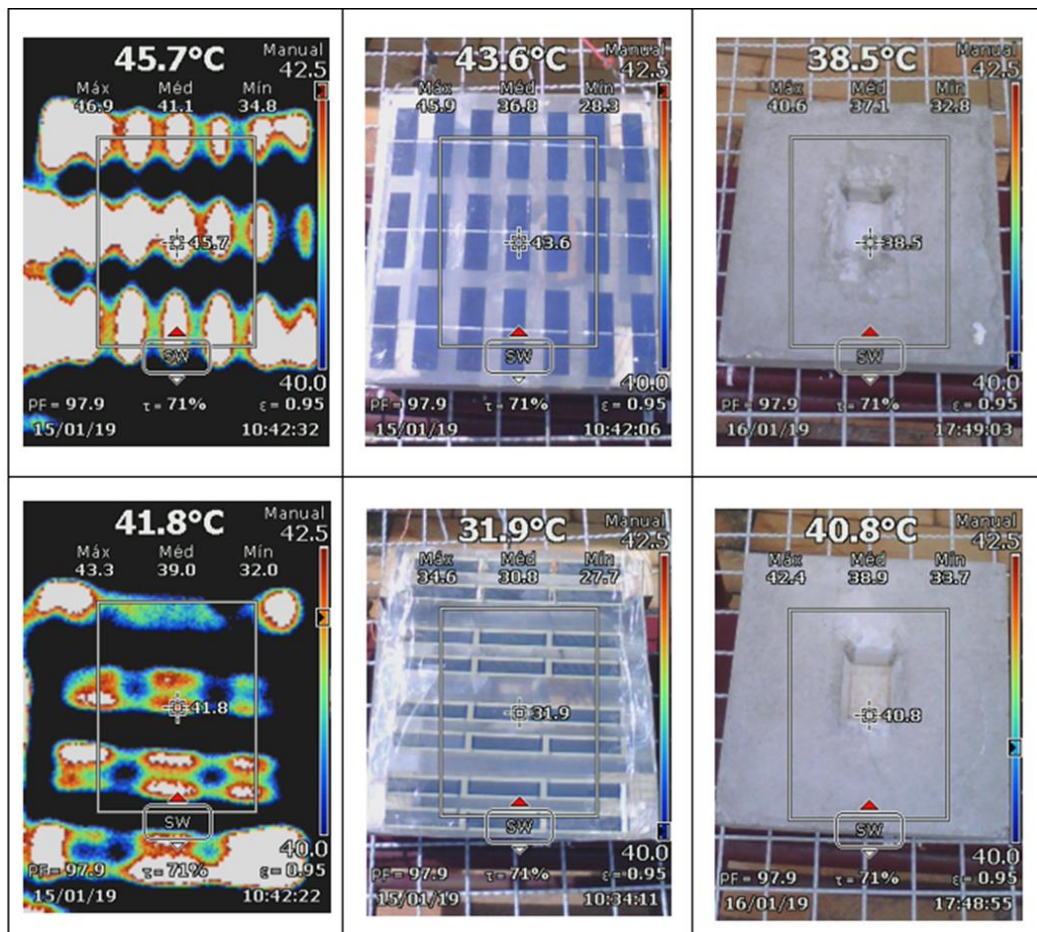


Fonte: Autor.

A Figura 79 apresenta o conjunto de imagens retiradas das simulações contendo os sistemas BAPVs colocados em bancada. Após o início da coleta dos dados as Figura 79 (a) e (b) retratam o comportamento da T_{OP} na superfície do módulo FV contendo as células de pc-Si. A T_{OP} média no equipamento foi de 41,1°C, sendo que a T_{OP} mínima identificada pela máquina foi de 34,8°C e a máxima 46,9°C. As Figura 79 (b) e (e) foram capturadas para ilustrar a composição dos sistemas BAPVs, bem como o comportamento térmico dos módulos FVs aplicados aos blocos de concreto com os suportes com altura de 5,5 cm.

Foram fotografadas as imagens referentes à superfície do bloco voltada ao módulo FV, para cada sistema BAPV simulado. Como pode ser identificado pela Figura 79 (c) a T_s média do bloco de concreto onde outrora havia o módulo FV de pc-Si foi de $37,1^\circ\text{C}$. A T_s mínima na área do bloco foi de $32,8^\circ\text{C}$, e a T_s máxima identificada foi $40,6^\circ\text{C}$. A Figura 78 (f) ilustra a T_s no bloco de concreto onde havia o módulo FV de células orgânicas. A T_s média nessa face foi de $38,9^\circ\text{C}$, sendo que a T_s mínima foi $33,7^\circ\text{C}$ e a máxima $42,4^\circ\text{C}$.

Figura 79 – Imagens termográficas retiradas do Ensaio VII contendo os sistemas BAPVs com o módulo de pc-Si (a e b) e com as células orgânicas (d e e) – início da coleta; e ao final do experimento dos blocos de concreto (c e f).



Fonte: Autor.

5.8 Resultados retirados a partir das simulações vinculadas ao Ensaio VIII com os módulos FVs de pc-Si (Eco-Worthy) e composto por células orgânicas e distanciamento entre de 2,1 cm entre os blocos de concreto e os módulos FVs

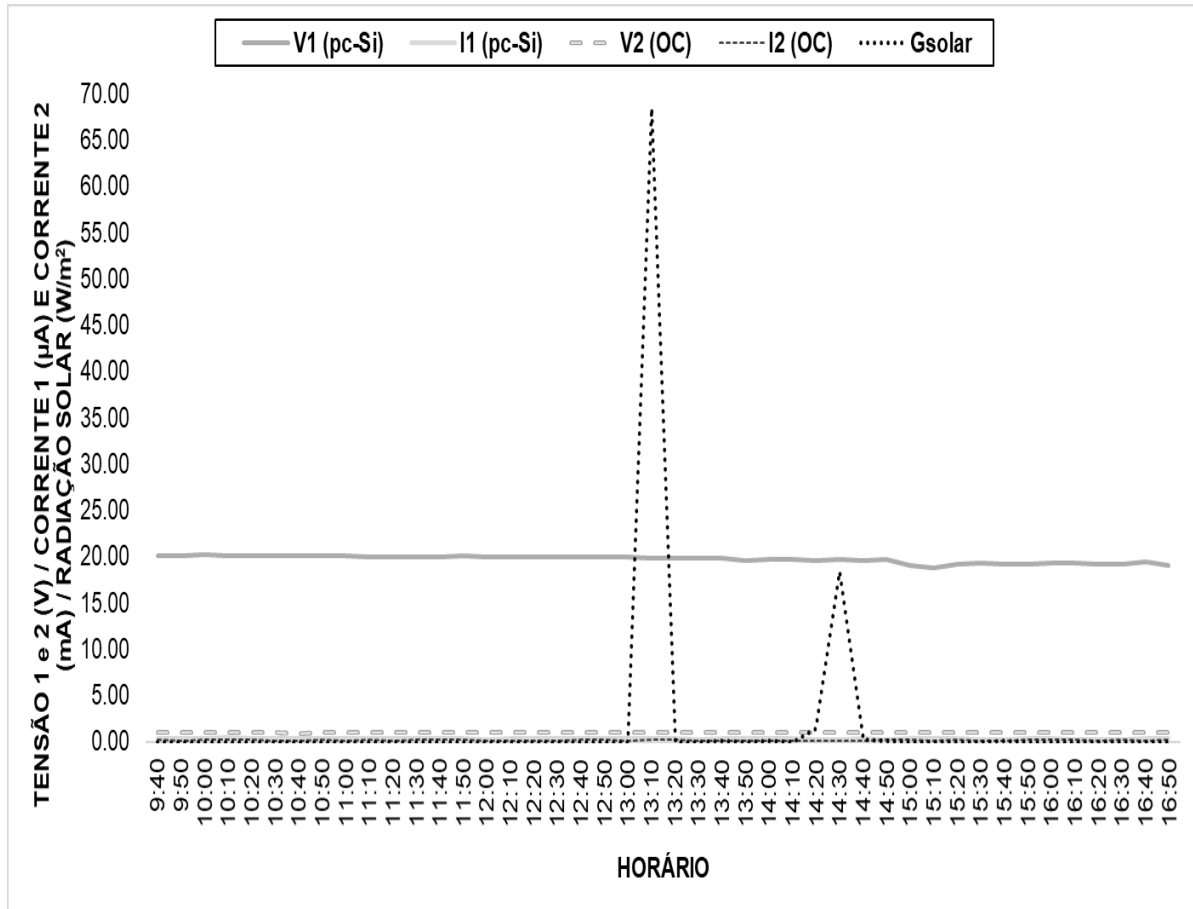
A realização do Ensaio VIII foi feita no dia 16/01/2019 onde os módulos FVs associadas à bancada foram o módulo FV de pc-Si da fabricante Eco-Worthy e o módulo FV com as células orgânicas. O espaçamento colocado entre os elementos componentes dos sistemas BAPVs foi de 2,1 cm. O gráfico contido na Figura 80 apresenta os valores coletados para a $V_{SAÍDA}$ e $I_{SAÍDA}$ dos módulos FV, assim como os dados de radiação solar vinculados ao período de coleta dos dados. As médias finais dos valores de $V_{SAÍDA}$ e $I_{SAÍDA}$ para o módulo FV de pc-Si foram de 19,09 V e 0,34 mA. As médias dos valores alcançados pelo módulo FV de células orgânicas (OC) foram 1 V e 0,18 mA. A G_{SOLAR} para esse dia não atingiu valores expressivos, sendo que a média final para esse parâmetro foi 0 W/m², conforme dados fornecidos pelo CEPAGRI. O maior valor de G_{SOLAR} ocorreu às 13 horas e 10 minutos correspondendo à 0,07 W/m².

Ainda pelo gráfico da Figura 80 pode ser constatado que no período que foi das 9 horas e 40 minutos às 11 horas e 20 minutos a $V_{SAÍDA}$ levemente superior do que no restante do dia de realização do ensaio. Nesse intervalo $V_{SAÍDA}$ média foi 20,10V. Analisando esse gráfico com o gráfico das temperaturas estudadas, Figura 81, nota-se que nesse mesmo intervalo as T_{OP} dos módulos FVs, bem como a T_s dos blocos de concreto e, também, a T_a obtiveram valores menores do que o período da tarde até a finalização do Ensaio VIII. Paralelo a esses parâmetros a umidade relativa do ar (RH), conforme a Figura 82 aponta, apresentou um valores superiores dos demais coletados ao longo do dia de realização do ensaio em bancada.

A Figura 81 representa o comportamento das temperaturas coletadas pela rede de monitoramento, T_{OP} e T_s , bem como o parâmetro de T_a coletado pela estação meteorológica. A T_{OP} média extraída a partir das partes traseiras dos módulos FVs foram de 49,81°C para o módulo FV de pc-Si e 43,38°C para o módulo FV com células orgânicas. Por outro lado, a temperatura superficial das faces dos blocos de concreto voltadas para os módulos (simulando o ambiente do sistema BAPV) alcançaram a T_s

média de 34,96°C e 39,73°C. Já a T_a média no período de coleta dos dados foi de 32,70°C.

Figura 80 – Gráfico do comportamento da tensão elétrica ($V_{SAÍDA}$), corrente ($I_{SAÍDA}$) e G_{SOLAR} ao longo do tempo para o Ensaio VIII.



Fonte: Autor.

Ao analisar o intervalo que foi das 9 horas e 40 minutos às 11 horas e 20 minutos os valores associados às temperaturas coletadas foram inferiores às médias gerais apontadas acima. A T_{OP} do sistema BAPV com o módulo de pc-Si, no intervalo de tempo citado, foi de 45,56°C, enquanto a T_s nesse sistema foi de 31,97°C. O sistema BAPV com as células orgânicas apresentaram valores de T_{OP} em média de 42,33°C e a T_s do bloco de concreto 38,73°C. Avaliando a temperatura ambiente nesse intervalo a mesma obteve a T_a média de 31,10°C, sendo que RH foi 60% no período mencionado.

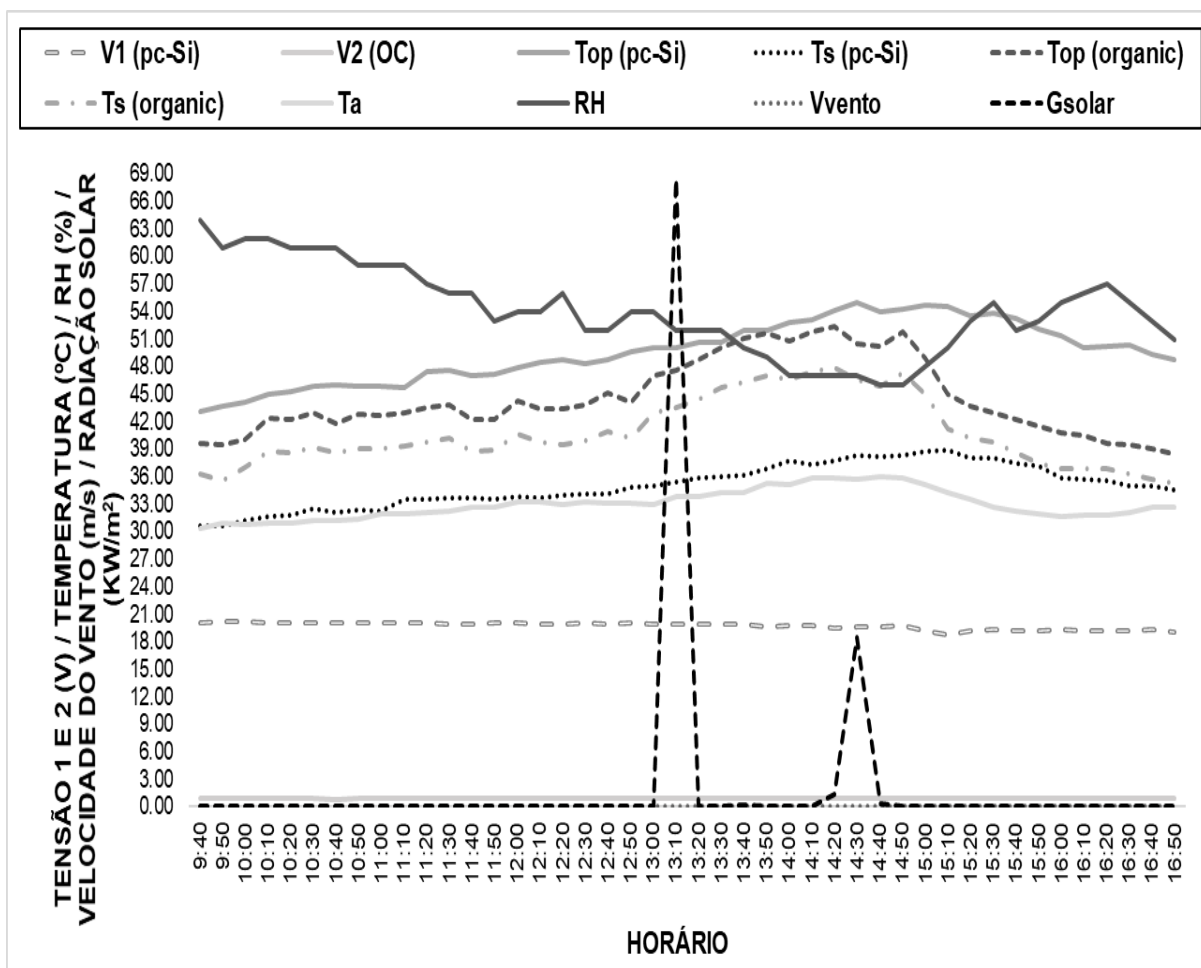
Figura 81 – Comportamento da T_s , T_{OP} e T_a nos sistemas BAPVs coletadas durante o Ensaio VIII.



Fonte: Autor.

A Figura 82 apresenta a distribuição dos valores dos coletados pela bancada ao longo do período de coleta dos dados vinculados ao Ensaio VIII. O parâmetro de velocidade do vento não demonstrou ocorrência durante a realização do ensaio. A G_{SOLAR} média no período foi de 0 W/m^2 , sendo que o valor mais expressivo para esse parâmetro ocorreu às 13 horas e 10 minutos atingindo $0,07 \text{ W/m}^2$ (ou $68,42 \text{ KW/m}^2$, conforme os dados fornecidos pelo CEPAGRI e expostos pelo gráfico da Figura 82 situa). A média de valores coletados referentes à umidade relativa do ar foi de 54% sendo que seu comportamento ao longo do ensaio pode ser visualizado pelo gráfico da Figura 82.

Figura 82 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio VIII.



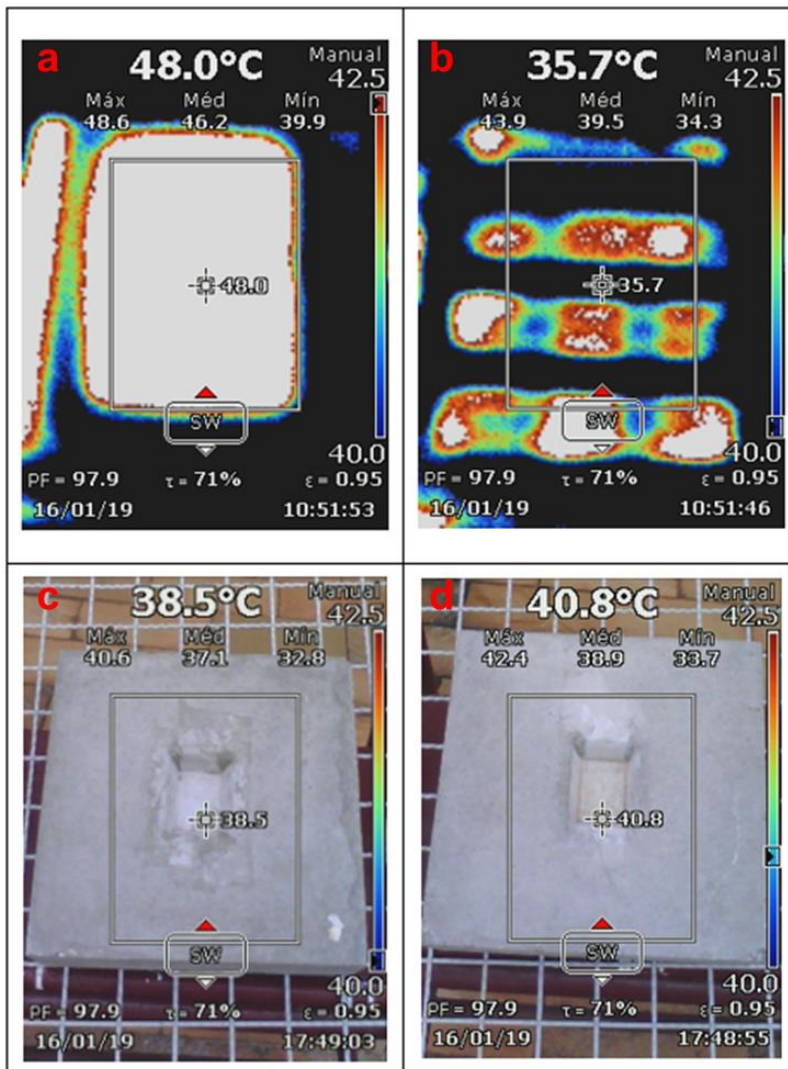
Fonte: Autor.

As imagens trazidas pelas Figura 83 (a), (b), (c) e (d) foram retiradas a partir da máquina termográfica logo no início da coleta dos dados e também ao final do experimento. A Figura 83 ilustra a distribuição de calor no módulo FV de pc-Si, a temperatura média de operação do módulo era de 46,2°C na hora de captura da imagem. A Figura 83 (b) mostra o comportamento térmico do módulo FV com as células orgânicas, sendo que nesse equipamento a T_{OP} média do módulo era de 39,5°C. Destaca-se que a T_{OP} das células FV de pc-Si trabalham em uma T_{OP} superior à temperatura que é identificada nas células orgânicas.

Ao finalizar a realização do Ensaio VIII as Figura 83 (c) e (d) foram capturadas das faces dos blocos de concreto que estavam voltadas aos módulos FVs, simulando os sistemas BAPVs. A partir da distância de 2,1 cm, utilizada como método, identifica-se

que a T_s média dos blocos de concreto eram de $37,1^\circ\text{C}$ para o sistema BAPV com o módulo FV de pc-Si, conforme a Figura 83 (c) demonstra. No sistema BAPV onde a aplicação era de células orgânicas, a T_s média capturada pela câmera termográfica era de $38,9^\circ\text{C}$ sendo que o bloco de concreto possuía regiões onde a T_s era de $40,8^\circ\text{C}$.

Figura 83 – Imagens termográficas retiradas do Ensaio VIII contendo os sistemas BAPVs com o módulo de pc-Si (a) e com as células orgânicas (b) – início da coleta; e ao final do experimento dos blocos de concreto (c e d).



Fonte: Autor.

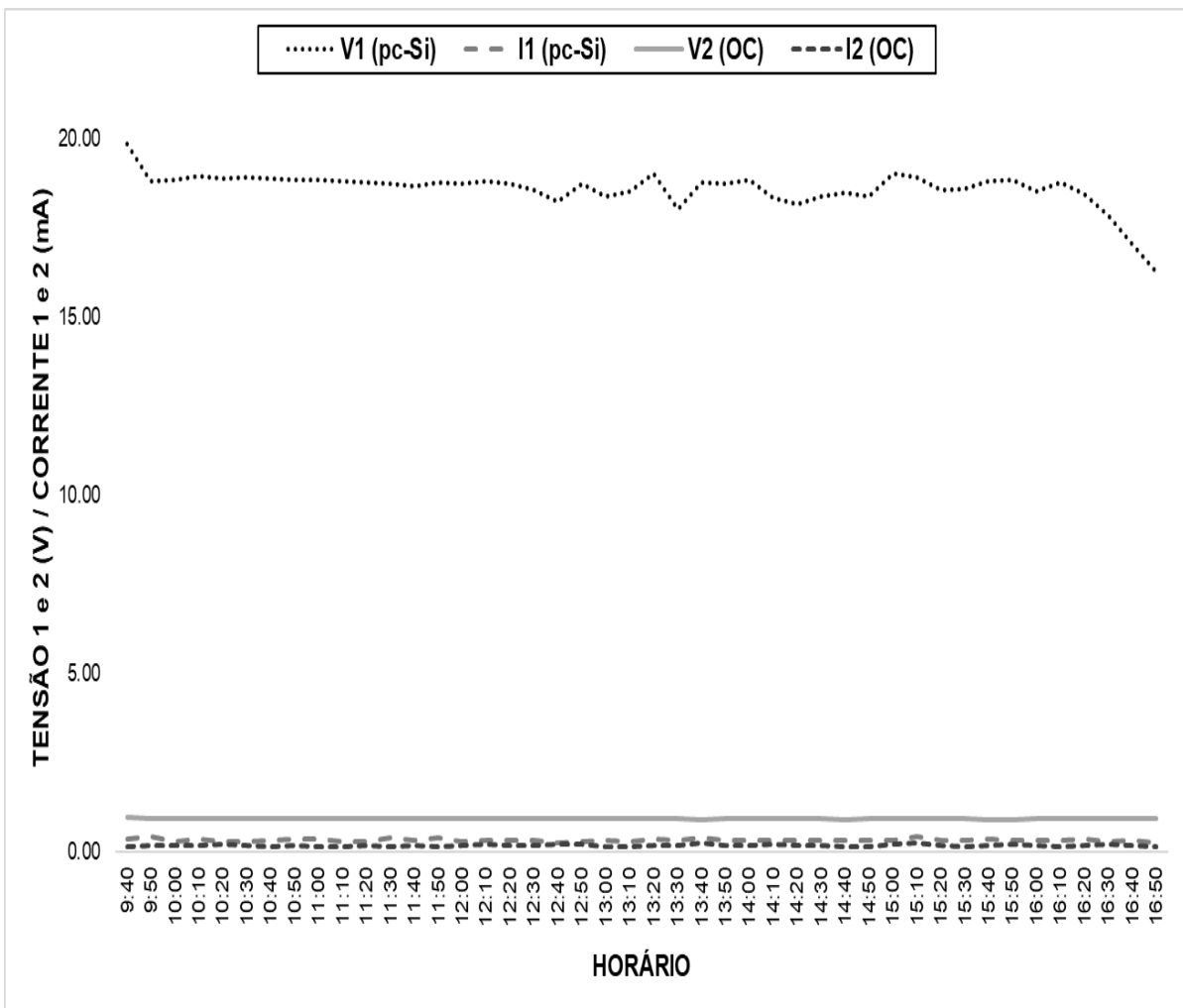
5.9 Análises a partir dos sistemas BAPVs simulados – Ensaio IX com o espaçamento entre os blocos de concreto e os módulos FVs de 3,5 cm

O Ensaio IX foi realizado no dia 18/01/2019 simulando os sistemas BAPVs em bancada. As tecnologias FVs utilizadas foram as mesmas adotadas no Ensaio VIII, sendo que o espaçamento utilizado entre o módulo FV e o elemento construtivo foi de 3,5 cm. O gráfico da Figura 84 demonstra a distribuição dos dados de $V_{SAÍDA}$ e $I_{SAÍDA}$ para os módulos FVs de pc-Si e composto por células orgânicas. O módulo FV de pc-Si obteve $V_{SAÍDA}$ média de 18,75 V e $I_{SAÍDA}$ de 0,32 mA. O módulo FV com as células orgânicas resultou em $V_{SAÍDA}$ média de 0,92 V e $I_{SAÍDA}$ de 0,17 mA. A G_{SOLAR} incidente nesse dia não apresentou valores expressivos, segundo dados fornecidos pelo CEPAGRI. A média geral para esse parâmetro foi 0 W/m², sendo que o maior valor obtido no dia foi às 15 horas e 30 minutos com alcance em 112,4 KW/m².

Assim como no Ensaio VIII, a $V_{SAÍDA}$ associada ao módulo FV de pc-Si foi sutilmente menor do que os outros valores de $V_{SAÍDA}$ coletados pelo nó sensor durante o intervalo das 9 horas e 40 minutos às 11 horas e 20 minutos. A $V_{SAÍDA}$ média nesse período foi de 18,87 V. Introduzindo os resultados apontados pelos gráficos das Figura 85 e Figura 86, aponta-se que neste mesmo período os parâmetros de T_{OP} , T_S , T_a e RH também foram relativamente superiores ao restante dos dados coletados até o fim da realização do Ensaio IX. Esses dados coletados no referido intervalo não adquiriram valores significativos, contudo esse padrão de expressividade nos valores, foi constatado novamente na simulação do sistema BAPV proposto.

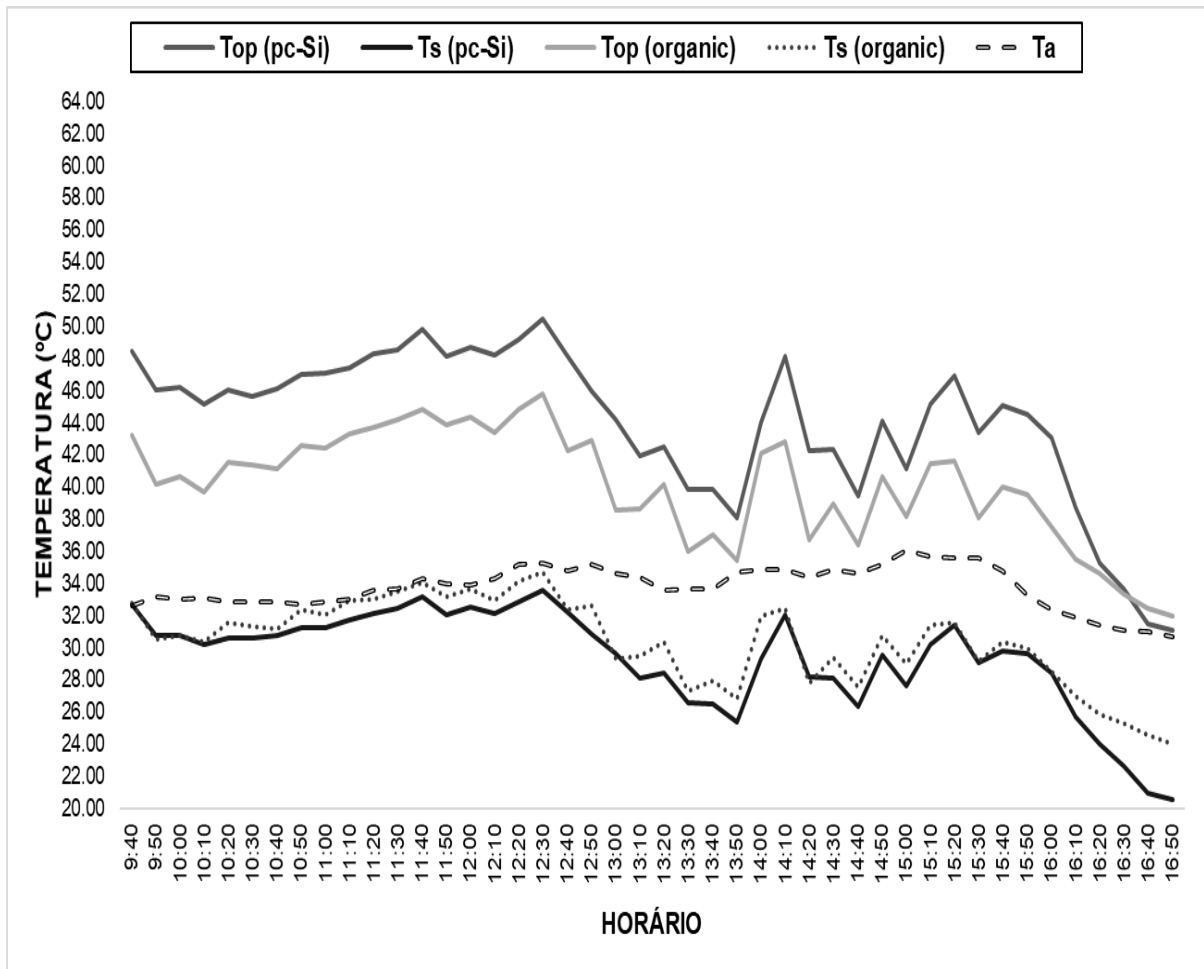
Logo, o gráfico da Figura 85 traz o comportamento das temperaturas extraídas do sistema BAPV durante todo o período de coleta de dados. O módulo FV de pc-Si vinculado a esse sistema, obteve T_{OP} média de 45,14°C, enquanto a T_S do bloco de concreto foi em média de 30,19°C. Já o módulo FV contendo as células orgânicas apresentou T_{OP} média de 40,66°C, sendo que a T_S do bloco de concreto foi de 30,80°C. A T_a média no dia 18/01/2018 coletada pela estação meteorológica foi de 33,8°C. O valor mais expressivo para esse parâmetro foi às 15 horas onde a T_a coletada pela estação registrou 36,1°C.

Figura 84 – Gráfico do comportamento da tensão elétrica de saída ($V_{SAÍDA}$) e da corrente de saída ($I_{SAÍDA}$) ao longo do tempo para o Ensaio IX.



Fonte: Autor.

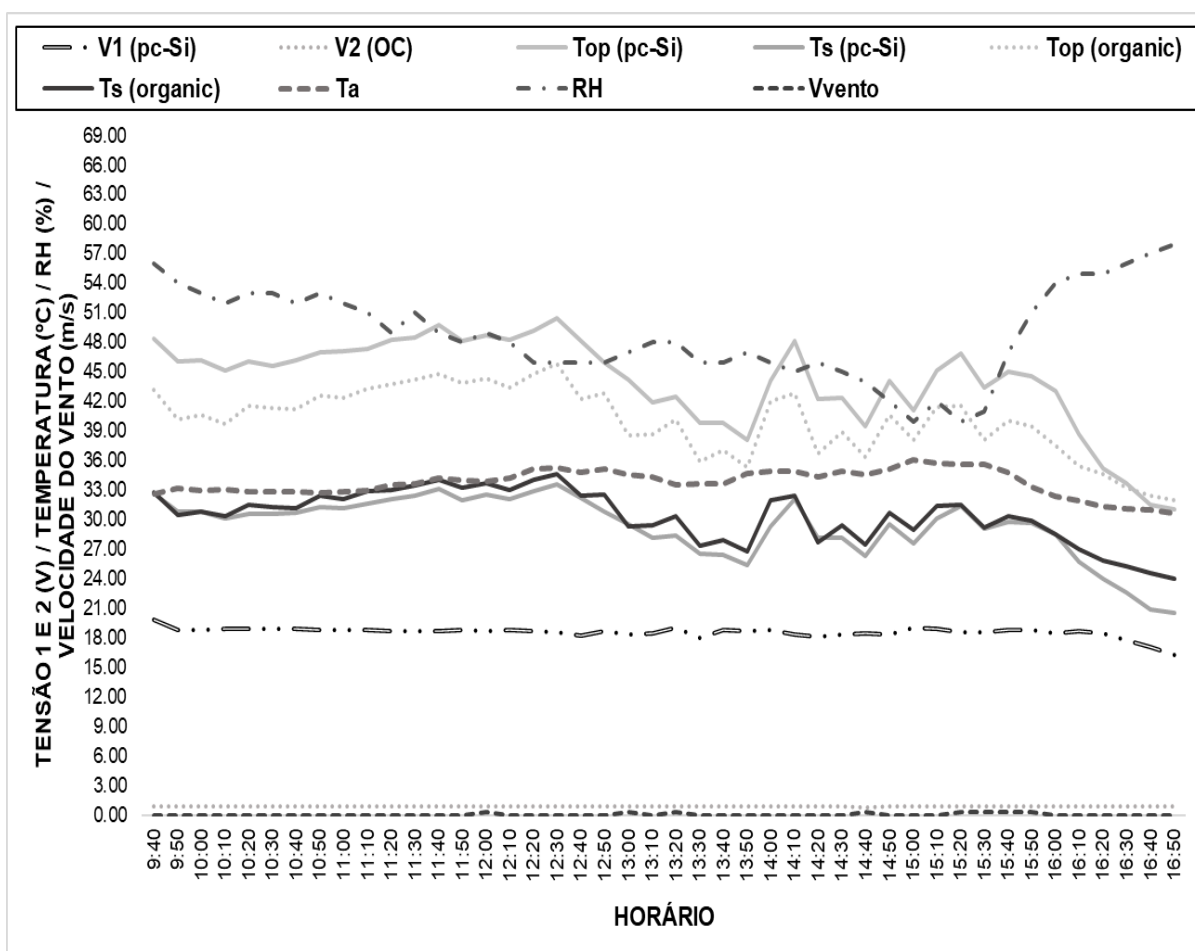
Figura 85 - Comportamento das temperaturas T_s , T_{OP} nos blocos de concreto inseridos nas simulações com o sistema BAPV no Ensaio IX e o comportamento da T_a ao longo do dia.



Fonte: Autor.

A Figura 86 ilustra a distribuição dos dados coletados ao longo do Ensaio IX. A V_{VENTO} mais uma vez não demonstrou-se expressiva durante a realização do ensaio, sendo que média coletada pelo anemômetro da estação meteorológica foi de 0 m/s². A temperatura ambiente média no dia foi de 33,8°C. Já a umidade relativa do ar, RH, obteve a média de 48% no período de realização dos ensaios. O gráfico da Figura 86 é uma sobreposição dos gráficos anteriores (Figura 84 e Figura 85), somando os dados coletados pela estação como V_{VENTO} e RH.

Figura 86 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio IX.



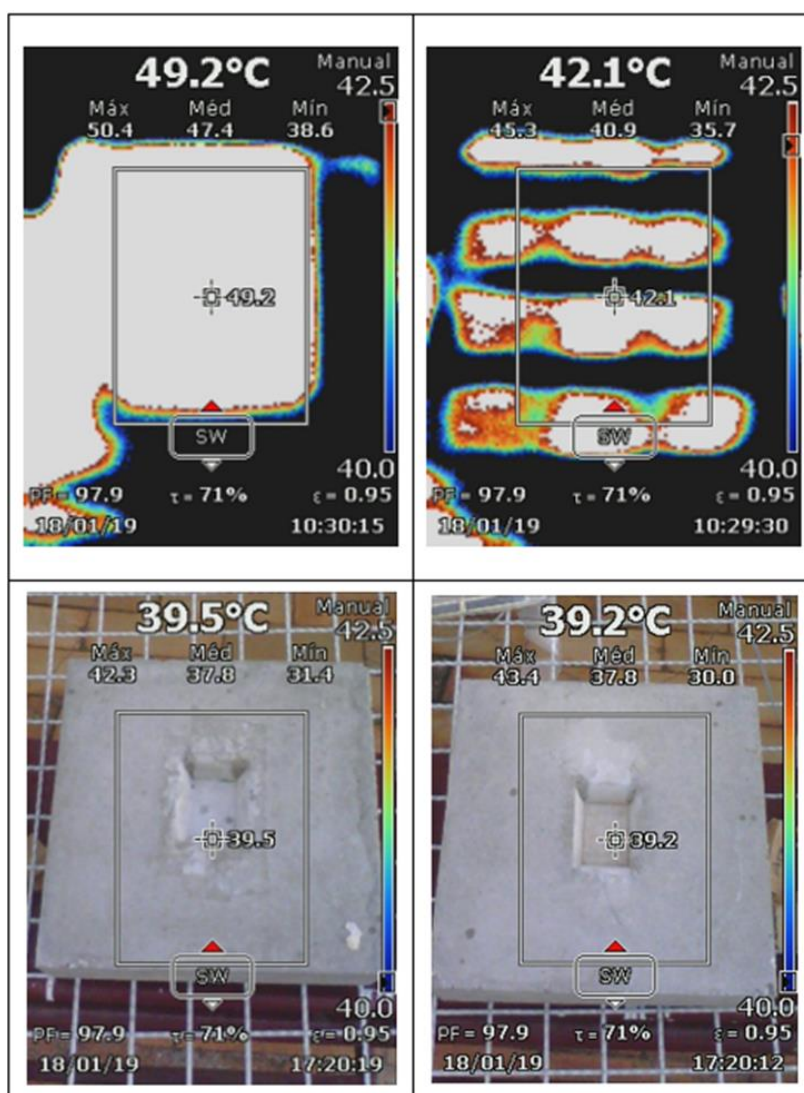
Fonte: Autor.

A partir das capturas de imagens fornecidas pela máquina termográfica, as Figura 87 (a), (b), (c) e (d) foram fotografadas no início e no término da execução do Ensaio IX. A T_{OP} média do módulo FV às 10 horas e 30 minutos (horário brasileiro de verão) era de 47,4°C, como é identificado pela Figura 87 (a). Entretanto, o valor máximo de T_{OP} coletado pela máquina atingiu 50,4°C, conforme é mostrado pela mesma imagem. A T_{OP} média do módulo FV de células orgânicas era de 40,9°C no mesmo momento de captura das imagens (Figura 87 (b)). Já a T_{OP} máxima observada nesse instante no módulo FV de OC foi de 45,3°C, como pode ser visto na Figura 87 (b).

Os módulos FVs foram retirados dos sistemas BAPVs simulados para verificações acerca da T_s oriundo dos blocos de concreto que simularam a parte do elemento construtivo nas simulações. A partir da Figura 87 (c) tem-se o comportamento térmico da face do concreto voltada ao módulo FV durante o Ensaio IX. A T_s média nesse bloco era

de 37,8°C, sendo que em algumas regiões dessa área a T_s atingiu 43,3°C. A Figura 87 (d) ilustra a distribuição do calor no bloco de concreto outrora aplicado junto ao módulo FV de células orgânicas. Nesse bloco de concreto a T_s média era de 37,8°C, sendo que a T_s máxima era de 43,4°C e mínima 30,0°C. Com essas duas imagens verifica-se que ambos os corpos de prova em concreto avaliados, no momento de captura das fotografias térmicas (17 horas e 20 minutos), possuíam valores de temperatura superficial próximos.

Figura 87 – Imagens termográficas retiradas do Ensaio IX contendo os sistemas BAPVs com o módulo de pc-Si (a) e com as células orgânicas (b) – início da coleta; e ao final do experimento dos blocos de concreto (c e d).

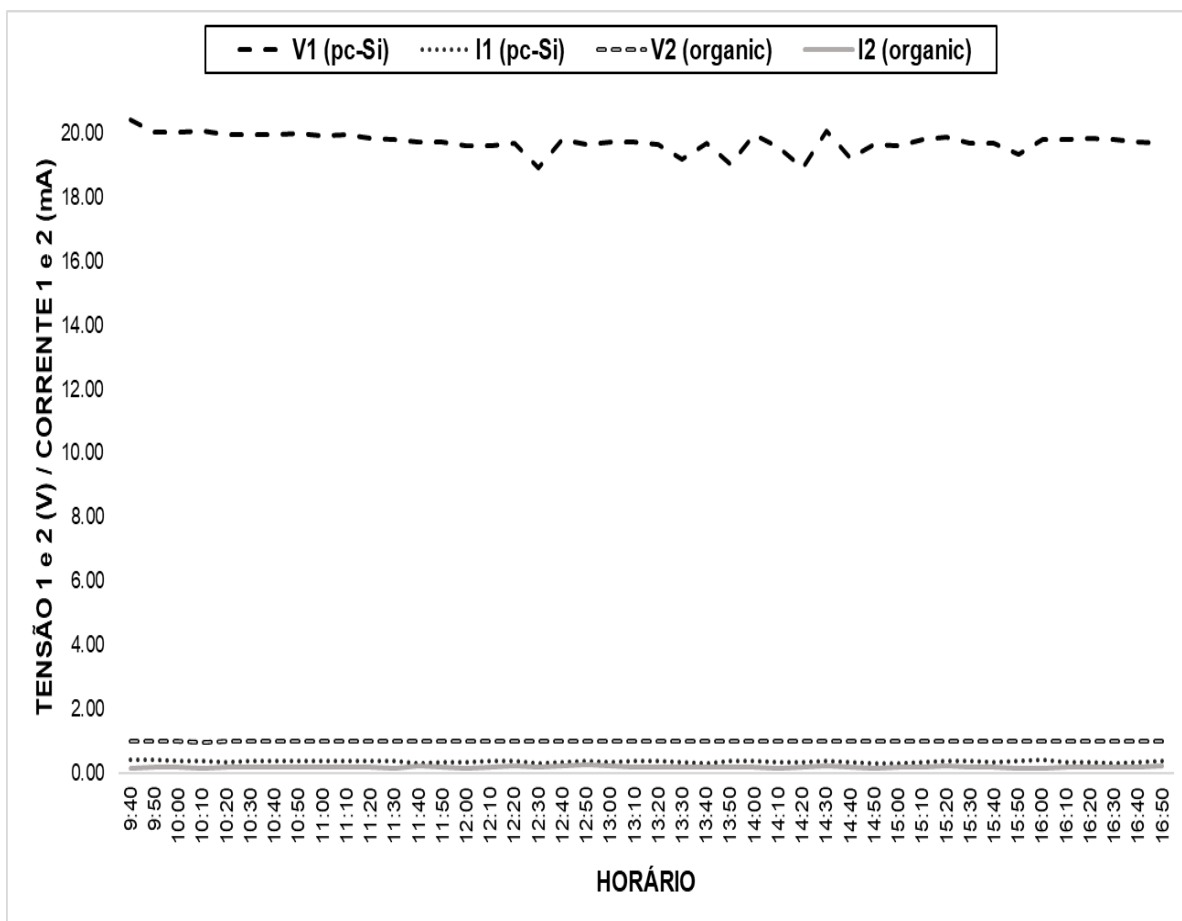


Fonte: Autor.

5.10 Resultados retirados a partir das simulações vinculadas ao Ensaio X com os módulos FVs de pc-Si (Eco-Worthy) e de células orgânicas com distanciamento de 5,5 cm entre os blocos de concreto e os módulos FVs

O último ensaio foi realizado no dia 21/01/2019 simulando os sistemas compostos pelos módulos FVs de pc-Si da fabricante Eco-Worthy e o módulo FV com as células orgânicas. O espaçamento entre o bloco de concreto e os módulos FVs foi de 5,5 cm. Os parâmetros elétricos coletados pela rede de monitoramento são apresentados pela Figura 88. Por esse gráfico verifica-se o comportamento da $V_{SAÍDA}$ e $I_{SAÍDA}$ para ambos os módulos FVs aplicados aos sistemas BAPVs. As médias de valores associados a cada tecnologia foram: $V_{SAÍDA}$ 19,97 V e $I_{SAÍDA}$ 0,36 mA (módulo Eco-Worthy); 0,98 V e 0,17 mA (módulo células orgânicas). Os sensores INA219 colocados juntos ao nó sensor foram as responsáveis pela captura desses dados.

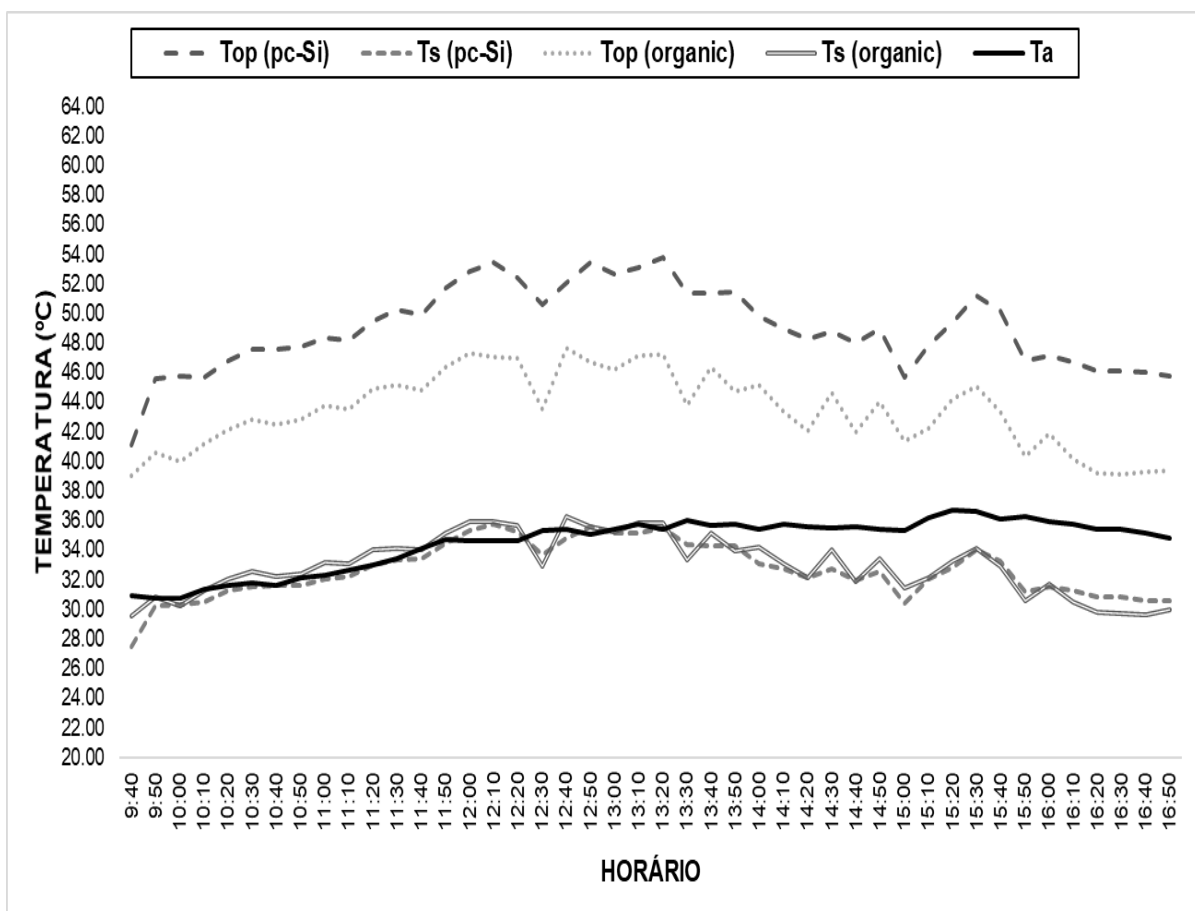
Figura 88 – Gráfico do comportamento da tensão elétrica de saída ($V_{SAÍDA}$) e da corrente de saída ($I_{SAÍDA}$) ao longo do tempo para o Ensaio X.



Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 89 apresenta os resultados das coletas dos dados inerentes às temperaturas associadas aos sistemas BAPVs. As T_{OP} médias dos módulos FVs de pc-Si e contendo as células orgânicas foram de $48,86^{\circ}\text{C}$ e $43,50^{\circ}\text{C}$ respectivamente. Nos blocos de concretos aplicados a cada sistema BAPV simulado, a T_s média do sistema BAPV com as células de pc-Si foi de $32,65^{\circ}\text{C}$ e $33,11^{\circ}\text{C}$ no bloco do sistema BAPV com as células orgânicas. Já o parâmetro de T_a atingiu a média de $35,85^{\circ}\text{C}$ no dia 21/01/2019. A distribuição dos dados coletadas pela rede de sensores e pela estação meteorológica está ilustrada no gráfico da Figura 89 onde nota-se que o comportamento das temperaturas obteve um comportamento similar de aquecimento na parte da manhã e também ao longo do resto do dia de coleta dos dados.

Figura 89 – Comportamento das temperaturas T_s , T_{OP} nos blocos de concreto inseridos nas simulações com o sistema BAPV no Ensaio X e o comportamento da T_a ao longo do dia.

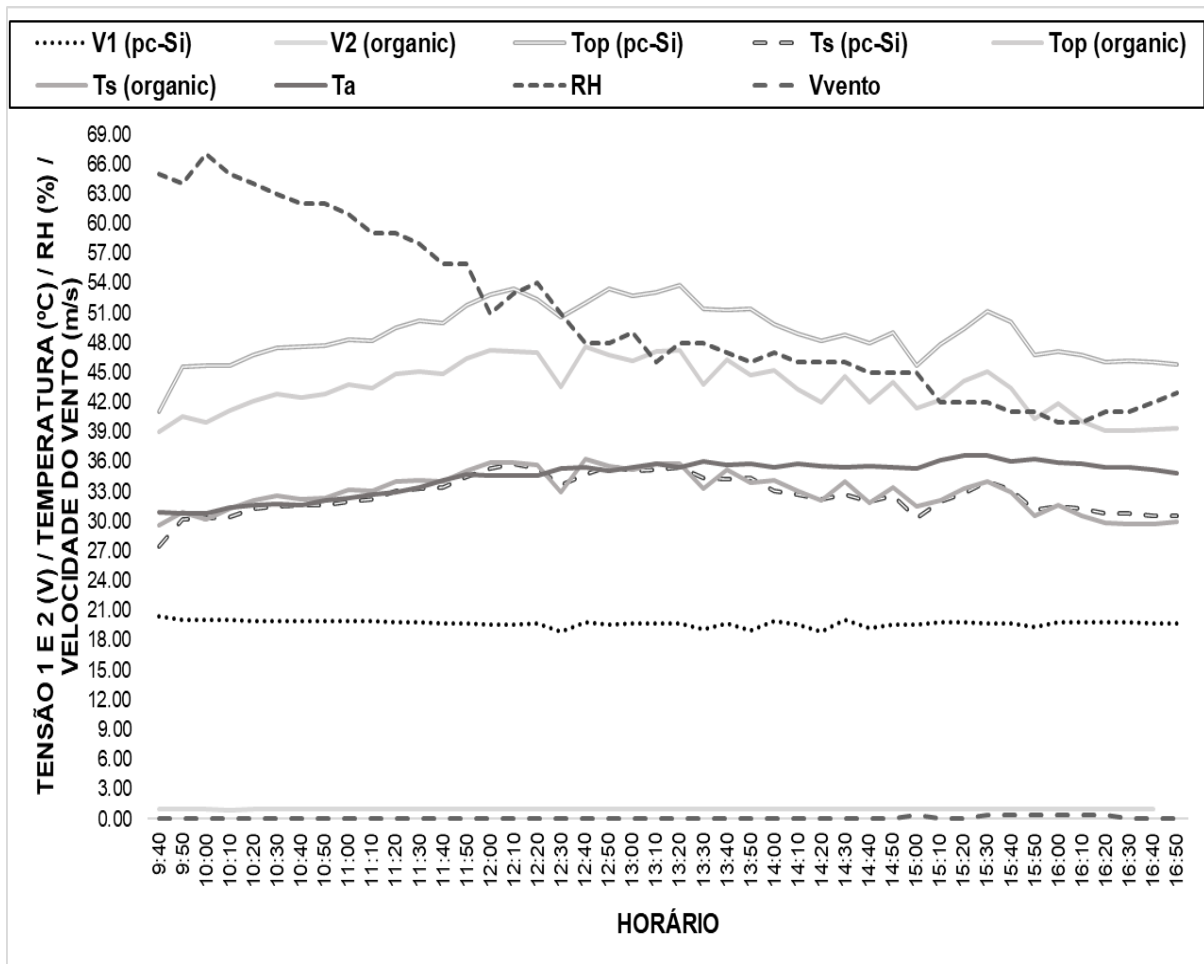


Fonte: Autor.

Ao verificar o período que vai das 9 horas da manhã às 11 horas e 20 minutos notam-se alterações discretas no conjunto de dados vinculados a este período. Entretanto, ao analisar os resultados apontados acima para alguns ensaios, no período da manhã aponta-se que as T_{OP} , T_s e T_a apresentam média de valores menores do que o restante do dia, sendo os respectivos valores médios de 47,54°C (módulo pc-Si) e 42,41°C (módulo células orgânicas); 31,50°C (sistema BAPV com o módulo de células pc-Si) e 32,23°C (sistema BAPV com células de OC). Ao verificar o comportamento do parâmetro de umidade relativa do ar no mesmo período conclui-se que essa grandeza apresentou a média de 63%. O gráfico da Figura 90 apresenta os dados retirados da bancada de testes instrumentada.

O parâmetro de V_{VENTO} mais uma vez não resultou em dados expressivos a ponto de ingressarem em alguma análise mais específica relacionando a resposta de $V_{SAÍDA}$ com a incidência das massas de ar nas placas fotovoltaicas. A radiação solar média referente ao Ensaio X foi $1,79 \text{ W/m}^2$. O pico desse parâmetro foi às 15 horas e 30 minutos com valor $0,69 \text{ W/m}^2$. Contudo, a média final associada a G_{SOLAR} não alcançou valores expressivos, sendo que a média foi 0 W/m^2 .

Figura 90 – Gráfico das grandezas coletadas durante a realização do Ensaio X.



Fonte: Autor.

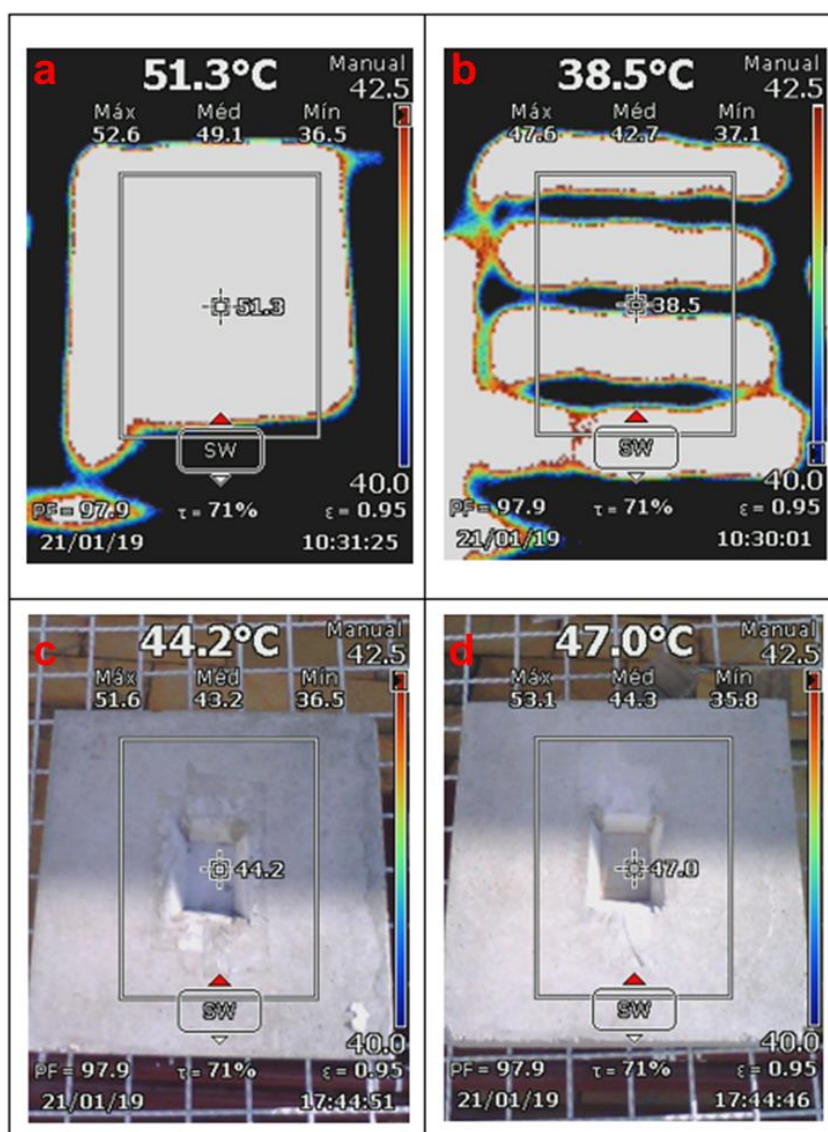
As imagens termográficas fotografadas dos sistemas BAPVs simulados no Ensaio X são ilustradas pelas Figura 91 (a), (b), (c) e (d). As Figura 91 (a) e (b) representam a distribuição do calor na superfície dos módulos FVs, correspondendo assim às temperaturas de operação desses equipamentos. A Figura 91 (a) aponta que a T_{OP} máxima atingida no módulo FV de pc-Si foi de $53,5^{\circ}\text{C}$ no momento de captura da

imagem, sendo que a T_{OP} média obtida pela câmera foi de $39,1^{\circ}\text{C}$. Paralelamente, a Figura 91 (b) demonstra que a T_{OP} média para o módulo FV de células orgânicas foi de $42,7^{\circ}\text{C}$, ainda atingindo a temperatura máxima de $47,6^{\circ}\text{C}$. Esses resultados ajudaram na calibração dos sensores MCP9700A fixados na parte traseira dos módulos FVs e que coletaram os dados relativos ao mesmo parâmetro (T_{OP}) pela rede de sensores montada em bancada.

Próximo ao encerramento dos testes, os módulos FVs foram extraídos momentaneamente para captura das duas imagens termográficas apresentadas pelas Figura 91 (c) e (d). Os sistema BAPVs contiveram os suportes de fixação com 5,5 cm de altura. A distribuição do calor no bloco de concreto aplicado ao módulo FV de pc-Si é apresentada pela Figura 91 (c) onde destaca-se a T_s média de $43,2^{\circ}\text{C}$, sendo que em algumas partes do bloco a T_s máxima era de $51,6^{\circ}\text{C}$. O sistema BAPV que foi aplicado o módulo FV com as células orgânicas tem o bloco de concreto ilustrado pela Figura 91 (d), onde a T_s média do elemento ao final do Ensaio X era de $44,3^{\circ}\text{C}$ e a temperatura máxima coletada nessa superfície era de $53,1^{\circ}\text{C}$.

Após a finalização dos ensaios algumas discussões surgiram acerca dos resultados adquiridos. Essas discussões são apresentadas no próximo subcapítulo.

Figura 91 – Imagens termográficas retiradas do Ensaio IX contendo os sistemas BAPVs com o módulo de pc-Si (a) e com as células orgânicas (b) – início da coleta; e ao final do experimento dos blocos de concreto (c e d).



Fonte: Autor.

5.11 Simulações computacionais no software ANSYS

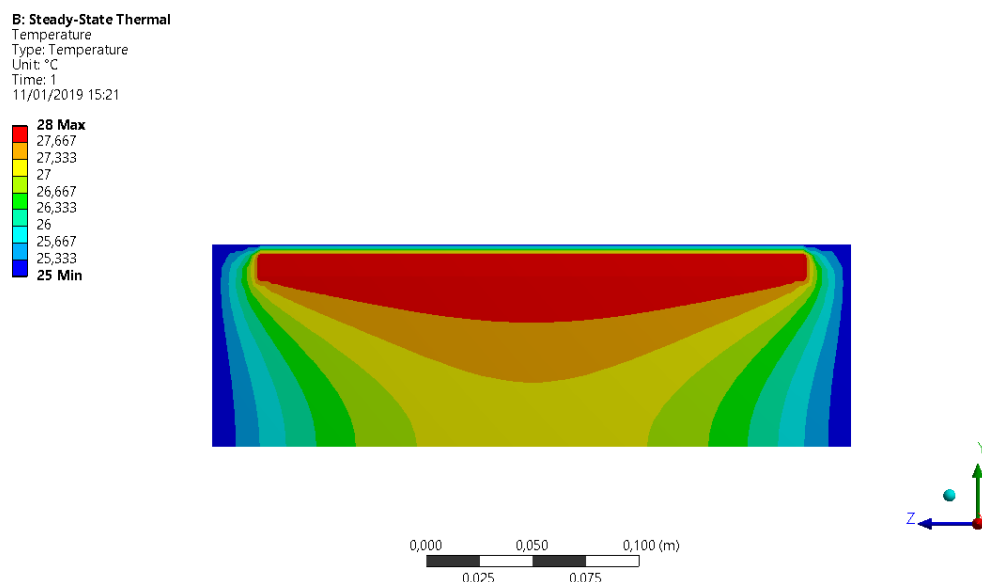
Com o auxílio do Laboratório de Divisão de Tecnologias Tridimensionais do CTI algumas simulações, envolvendo os sistemas BIPVs, foram efetuadas no *software*

ANSYS. Através das ferramentas de interpolação do *software*, o bloco de concreto idealizado para a composição dos sistemas BIPVs em bancada foi simulado dentro do ANSYS. A premissa vislumbrada supõe que a superfície de integração do elemento construtivo com os módulos FVs pode sofrer com a transferência de calor por condução, visto o contato estabelecido entre as partes componentes do sistema BIPV (módulo FV com o bloco de concreto na superfície frontal). As temperaturas utilizadas nas simulações foram alternadas conforme os testes realizados em bancada logo, os valores de temperatura utilizados nas simulações foram baseados nos dados de T_s coletados nos ensaios contendo os sistemas BIPVs. Sendo assim, o bloco de concreto com as dimensões de 30x30x10 cm foi simulado com as características do sistema BIPV, alternando a temperatura de operação do módulo FV e, conseqüentemente, a temperatura superficial vinculada à integração da placa fotovoltaica com a superfície do elemento construtivo.

Dentro do ANSYS, foi ajustado o índice de transmitância térmica para $1,77 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$. Nas simulações contendo os sistemas BIPVs com a integração do módulo FV de pc-Si (com as mesmas dimensões do painel FV da Eco-Worthy utilizado nos ensaios), o bloco de concreto foi adaptado para acoplar o módulo FV dentro do *software*. Conforme ilustrado pelo corte transversal do elemento disponibilizado pela Figura 92, a T_{OP} do módulo FV de pc-Si simulado foi imposta em 28°C . Nesse tipo de integração, a distribuição da temperatura mais elevada se deu no centro do bloco de concreto, como pode ser visto por essa figura. Avaliando a face inferior do bloco de concreto, sem a integração com nenhum equipamento, na região central de integração do módulo FV, a temperatura atingida nessa face chegou à 27°C .

A Figura 93 ilustra a simulação do sistema BIPV com a integração do módulo FV de células orgânicas. Assim como na bancada de ensaios efetuados em bancada, o módulo FV foi fixado na superfície frontal do bloco de concreto. Nessa simulação, a T_{OP} aplicadas às células também foi 28°C . A distribuição das temperaturas pode ser identificada por essa imagem onde destaca-se que a partir dessa integração a temperatura detectada na face inferior do bloco, na região central desse elemento, ainda permanecia na escala de $26,33^\circ\text{C}$.

Figura 92 – Resultado da simulação do *software* ANSYS para o sistema BIPV com integração com o módulo FV de pc-Si onde a T_{OP} do módulo é igual a 28°C.

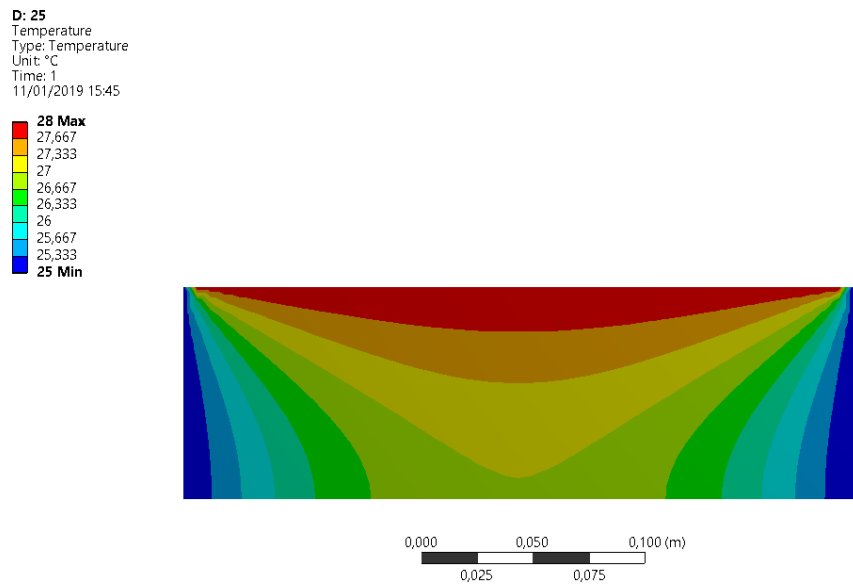


Fonte: Autor.

A imagem trazida pela Figura 94 ilustra o fluxo de calor oriundo da integração do módulo FV de pc-Si com o elemento construtivo (concreto). Por essa figura, identifica-se que o maior fluxo de calor concentra-se nas laterais do orifício central feito para integração do módulo FV com o bloco de concreto. O fluxo máximo de calor concentrou-se nas arestas laterais de contato entre o concreto e o revestimento de alumínio (que protege o módulo FV de pc-Si da Eco-Worthy). Nessa região, o fluxo máximo de calor atingiu 36324 W/m². Ainda é possível verificar que, em uma das faces laterais do bloco de concreto, mais próximo do orifício onde foi integrado o módulo FV, o fluxo de calor era de aproximadamente 4036 W/m².

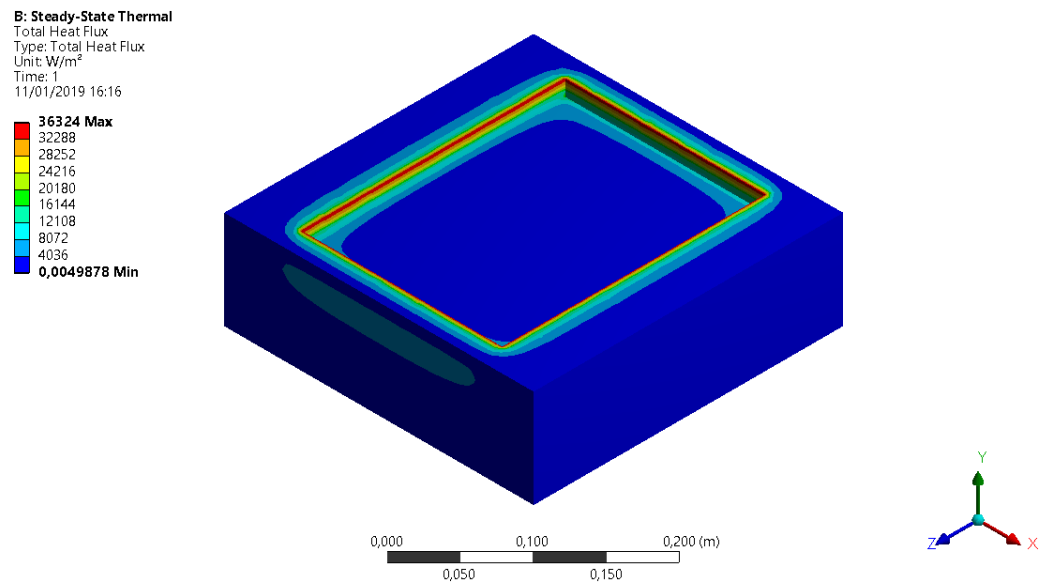
A Figura 95 ilustra o resultado da simulação no ANSYS a partir do sistema BIPV com as células orgânicas. Identifica-se que o fluxo do calor concentra-se nas regiões externas no bloco, especificamente nas partes superiores externas. O fluxo máximo de calor nessas regiões chegou a atingir 560,86 W/m² como valor máximo. Conforme é apresentado por essa imagem, a região da superfície central do bloco não chegou a adquirir valores expressivos acerca do fluxo de calor.

Figura 93 – Resultado da simulação do *software* ANSYS para o sistema BIPV com integração com o módulo FV de células orgânicas onde a T_{OP} do módulo é igual a 28°C .



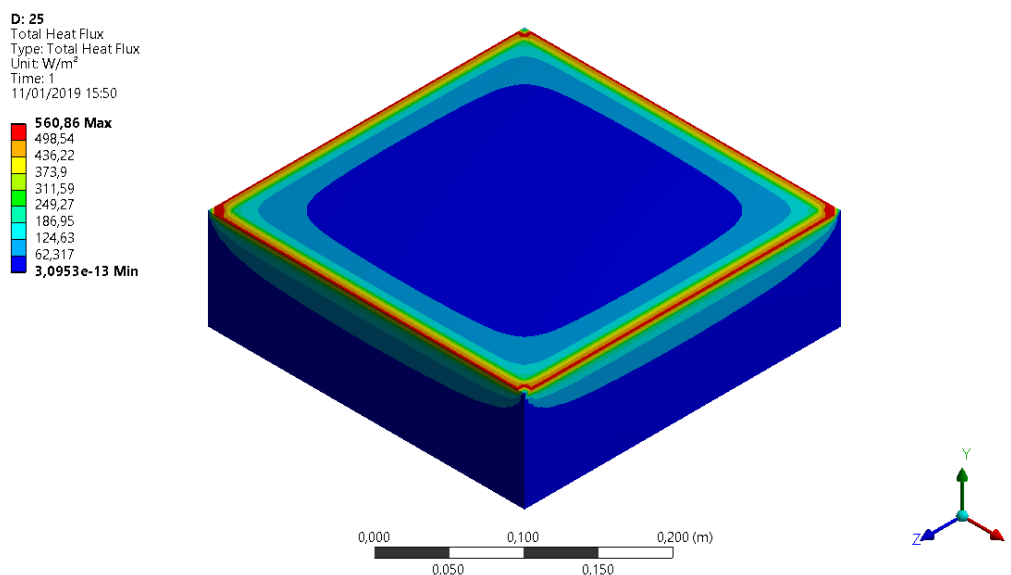
Fonte: Autor.

Figura 94 – Resultado da distribuição do fluxo de calor no sistema BIPV com o módulo FV de pc-Si onde a T_{OP} considerada no módulo é igual à 28°C .



Fonte: Autor.

Figura 95 – Resultado da distribuição do fluxo de calor no sistema BIPV com o módulo FV de células orgânicas onde a T_{OP} considerada no módulo é igual à 28°C .



Fonte: Autor.

A partir dos resultados coletados em bancada com os ensaios envolvendo os sistemas BIPVs, foi constatado que a T_{OP} das células FVs, tanto para o módulo de pc-Si quanto para o módulo com as células orgânicas, ultrapassam os valores previstos pelas normas recorrentes. Sendo assim, dentro do ANSYS, foram simuladas algumas situações com base nos ensaios realizados. Por exemplo, durante a realização dos ensaios foi identificado que as células operam em temperaturas acima dos 40°C . No Ensaio V a temperatura chega a atingir 64°C . Logo, esses valores foram adotados nas simulações no ANSYS.

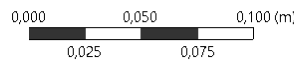
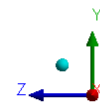
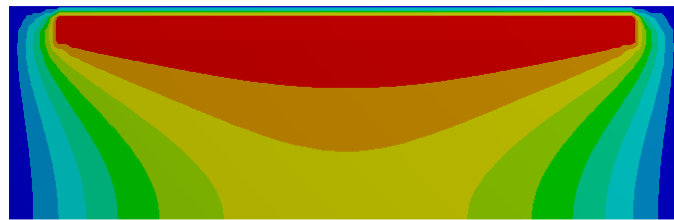
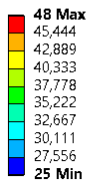
A Figura 96 ilustra a simulação do sistema BIPV contendo o módulo FV de pc-Si integrado ao bloco de concreto. A T_{OP} do módulo nessa etapa foi colocada em 48°C , conforme os dados extraídos pela rede de monitoramento da bancada de realização dos testes. A partir do orifício central efetuado no bloco de concreto, verifica-se o comportamento da distribuição do calor no bloco de concreto. Como pode ser observado, a temperatura que atingi a outra face do bloco de concreto concentrou-se na faixa de 40°C .

A Figura 97 é o resultado da simulação contendo o sistema BIPV com as células orgânicas. A T_{OP} foi mantida em 48°C e a distribuição do calor pode ser verificado pelo

gradiente de cores no interior do bloco de concreto. Nota-se que essa dispersão de temperatura foi menos acentuada, sendo que a temperatura na face inferior do bloco de concreto, na região central, chegou a alcançar 35°C.

Figura 96 – Resultado da simulação do *software* ANSYS para o sistema BIPV com integração com o módulo FV pc-Si onde a T_{OP} do módulo é igual a 48°C.

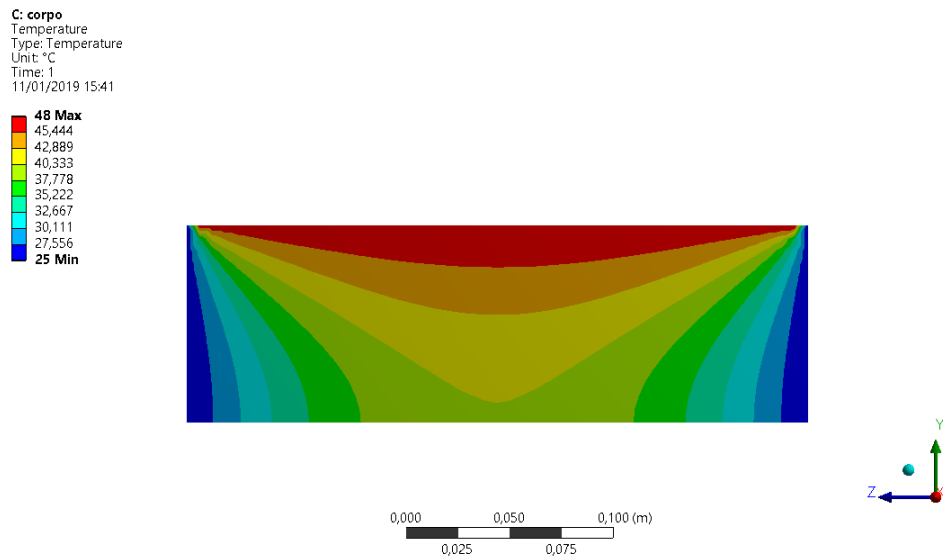
C: 48
Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1
11/01/2019 15:23



Fonte: Autor.

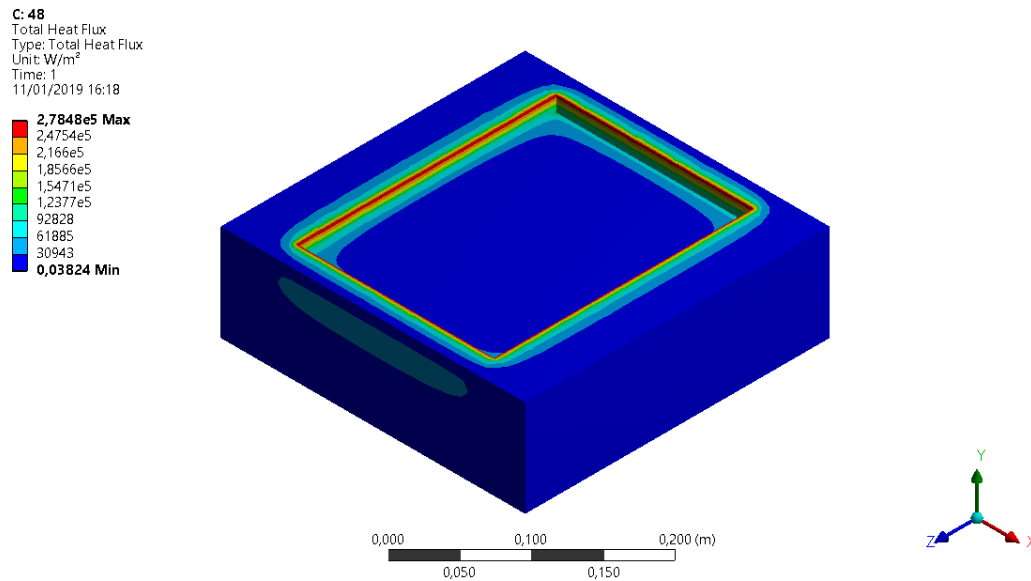
A distribuição do fluxo de calor para as simulações onde a T_{OP} dos módulos foi imposta em 48°C resultou nas imagens das Figura 98 e 99. No sistema BIPV contendo o módulo FV de pc-Si o fluxo de calor concentrou-se, mais uma vez, nas laterais da abertura realizada para a integração do módulo FV. Nas arestas laterais desse orifício identifica-se o fluxo de calor atingindo $2,78 \times 10^5 \text{ W/m}^2$. Verificando o sistema BIPV contendo a integração com o módulo FV de células orgânicas identifica-se que o fluxo de calor se concentrou nas extremidades superiores do bloco. A distribuição do fluxo de calor é mostrada pela Figura 99 onde o fluxo máximo de calor fornecido pelo ANSYS foi de aproximadamente $4,3 \times 10^3 \text{ W/m}^2$. Nota-se ainda pela Figura 99 que o fluxo de calor acentou-se em direção ao centro do bloco de concreto, mais do que na simulação anterior (onde a T_{OP} considerada foi de 35°C).

Figura 97 – Resultado da simulação do *software* ANSYS para o sistema BIPV com integração com o módulo FV de células orgânicas onde a T_{OP} do módulo é igual a 48°C .



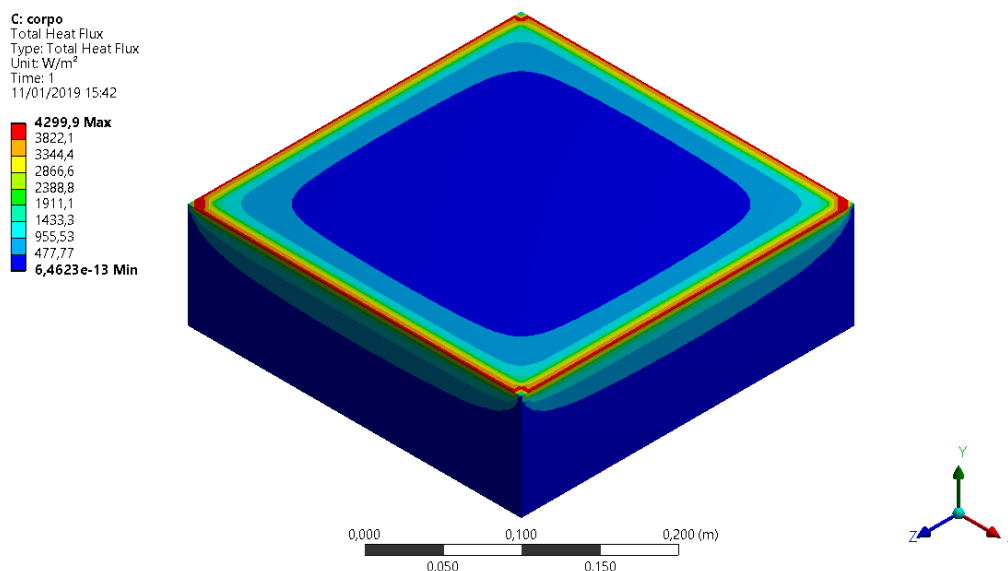
Fonte: Autor.

Figura 98 – Resultado da distribuição do fluxo de calor no sistema BIPV com o módulo FV de pc-Si onde a T_{OP} considerada no módulo é igual à 48°C .



Fonte: Autor.

Figura 99 – Resultado da distribuição do fluxo de calor no sistema BIPV com o módulo FV de células orgânicas onde a T_{OP} considerada no módulo é igual à 48°C .

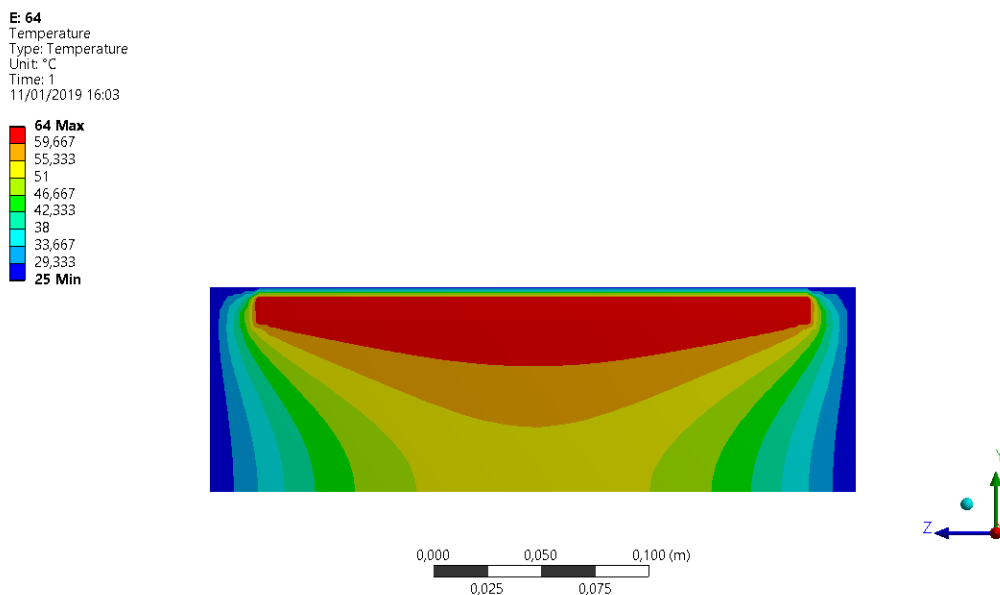


Fonte: Autor.

A partir dos ensaios realizados em bancada foram identificadas algumas peculiaridades acerca do alcance das temperaturas operacionais dos módulos FVs. Por exemplo, pela coleta de dados realizada pelos transdutores MCP9700A e pela máquina termográfica, em alguns momentos ao longo da execução dos ensaios as T_{OP} das células atingiram valores altos (passando dos 55°C). Sendo assim, dentro do *software* ANSYS foram realizadas simulações agregando as temperaturas extremas coletadas em bancada para verificações acerca do comportamento térmico do bloco de concreto, principalmente em suas regiões interiores e na superfície posterior à face integrada com o módulo FV.

Neste sentido, a Figura 100 ilustra a distribuição do calor no bloco de concreto simulando o sistema BIPV com o módulo FV de pc-Si. A T_{OP} padrão utilizada foi de 64°C (sendo esse o maior valor coletado em bancada para essa tecnologia). Pela imagem verifica-se que o calor concentra-se no interior do bloco de concreto com valores de temperatura bastante expressivos. Nessa região aponta-se o alcance da temperatura do bloco chegando aos 55°C . Como resultado da simulação verifica-se que a dispersão do calor no bloco de concreto não influencia as regiões laterais do bloco. Todavia, a face inferior do bloco recebe o fluxo de calor apresentando valores em cerca de 51°C .

Figura 100 – Resultado da simulação do *software* ANSYS para o sistema BIPV com integração com o módulo FV pc-Si onde a T_{OP} do módulo é igual a 64°C.



Fonte: Autor.

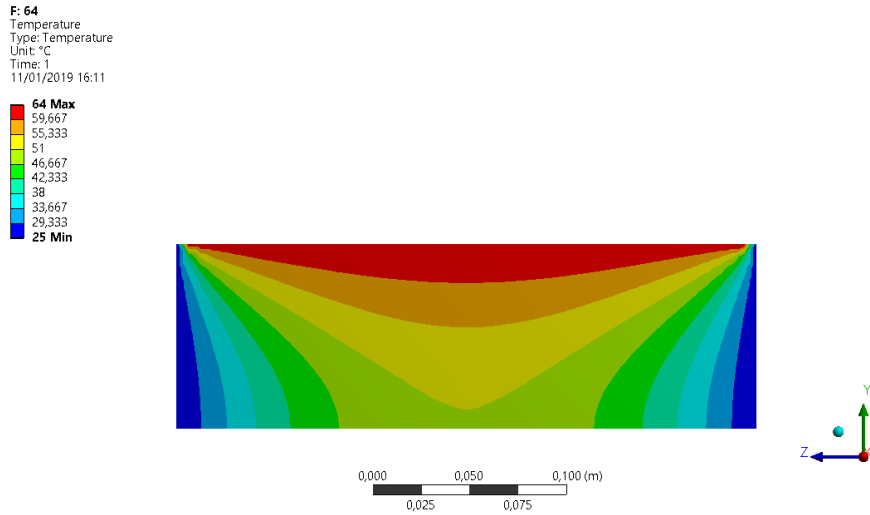
Analisando a distribuição do calor no bloco de concreto simulado no ANSYS, a Figura 101 demonstra esse comportamento para o sistema BIPV contendo o módulo FV de células orgânicas. Através da ilustração trazida por essa imagem verifica-se a concentração do calor na região central do bloco. A dispersão do calor ocorre de forma similar às simulações realizadas anteriormente, sendo que é possível identificar que na face posterior à face de integração com o módulo FV, na parte central, a temperatura superficial no bloco atingiu 46,66°C.

Analisando o fluxo de calor promovido pela integração do módulo FV de pc-Si com o bloco de concreto, a Figura 102 ilustra o comportamento desse fluxo. Ao incrementar a simulação com a T_{OP} das células em 64°C, o fluxo de calor máximo obtido atingiu $4,72 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ nas arestas laterais de contato entre a estrutura do módulo e o concreto. Esse comportamento se assemelha com os casos simulados anteriormente, onde na abertura efetuada para inserção do módulo, as arestas laterais do concreto em contato com o módulo recebem o fluxo de calor com mais intensidade.

A Figura 103 apresenta o comportamento do fluxo do calor no sistema BIPV com as células orgânicas. Nessa simulação, o comportamento do fluxo de calor demonstrou-se similar às simulações realizadas anteriores, sendo que sua maior concentração se deu

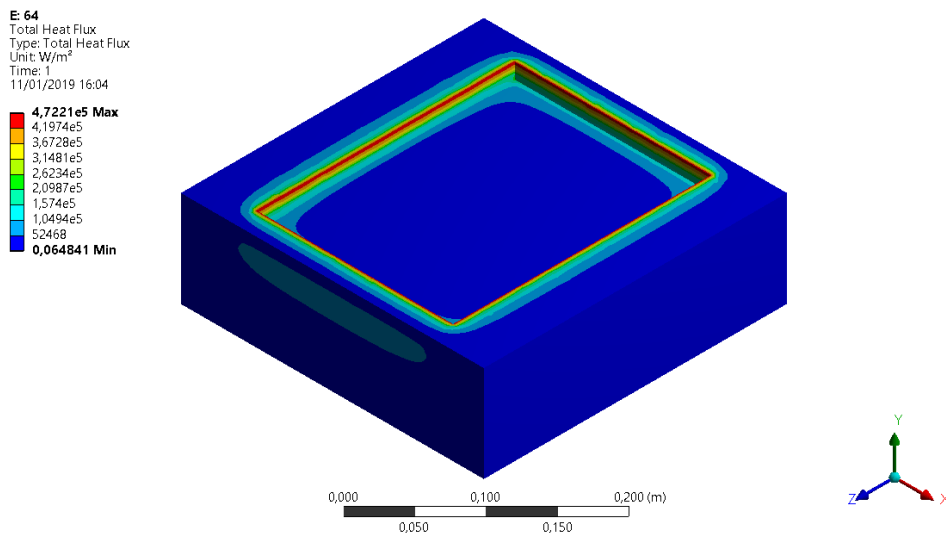
nas partes extremas da face de contato entre o módulo FV e o concreto. Ainda, por essa imagem verifica-se que as faces laterais obtiveram resultado similar, quando comparada as simulações anteriores (T_{OP} igual a 35°C e 48°C) onde as faces laterais também apresentaram uma acentuação maior do fluxo de temperatura.

Figura 101 – Resultado da simulação do *software* ANSYS para o sistema BIPV com integração com o módulo FV de células orgânicas onde a T_{OP} do módulo é igual a 64°C .



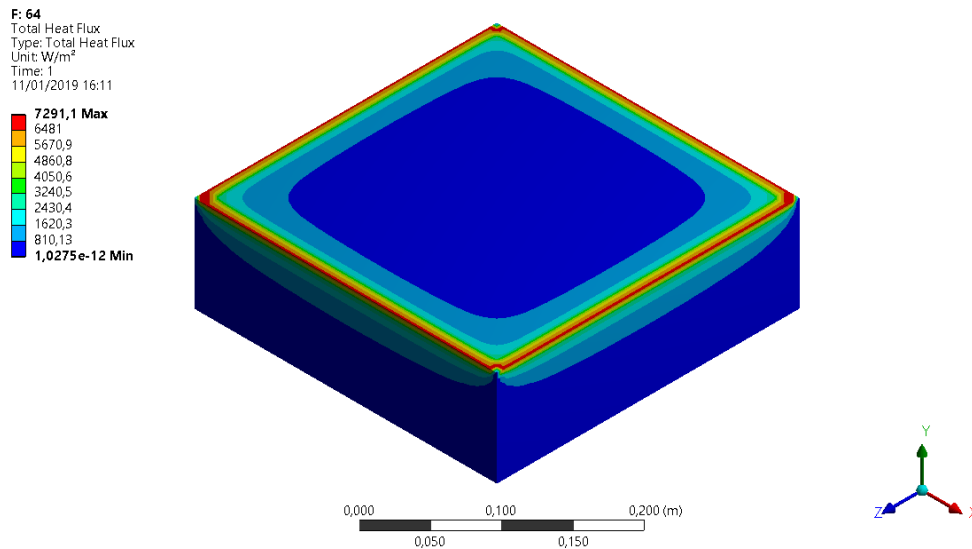
Fonte: Autor.

Figura 102 – Resultado da distribuição do fluxo de calor no sistema BIPV com o módulo FV de pc-Si onde a T_{OP} considerada no módulo é igual à 64°C .



Fonte: Autor.

Figura 103 – Resultado da distribuição do fluxo de calor no sistema BIPV com o módulo FV de células orgânicas onde a T_{OP} considerada no módulo é igual à 64°C .



Fonte: Autor.

5.12 Discussões

Foram emulados, em bancada, os sistemas *BAPV* e *BIPV*, sendo que algumas particularidades podem ser discutidas. A Tabela 12 apresenta o resumo das médias dos valores vinculados a cada parâmetro coletado pela rede de monitoramento, pela estação meteorológica e também o dado de G_{SOLAR} fornecido pelo CEPAGRI para os ensaios contendo os sistemas BIPVs. Já a Tabela 13 aborda os valores das grandezas coletadas nos ensaios com os BAPVs em bancada.

Como pode ser visto pelo resumo dos resultados apresentados pelas Tabela 12 e 13, os módulos FVs alcançaram os maiores valores de $V_{SAÍDA}$ em todos os ensaios onde os ensaios foram voltados aos sistemas BIPVs. Esse parâmetro foi o que mais se alterou ao longo da realização da coleta dos dados, uma vez que os valores associados à $I_{SAÍDA}$ não obtiveram alterações significativas. Avaliando as temperaturas de contato obtidas com a integração entre o elemento construtivo e os módulos FVs, o sistema BIPV

integrado com o módulo FV de células orgânicas obteve as maiores temperaturas, conforme a coleta dos dados pelos sensores MCP9700A.

Ainda, nos ensaios contendo os sistemas BIPVs, os valores relativos à média de temperatura ambiente foram 33,10°C no primeiro ensaio (13/12/2018), no segundo ensaio 34,85°C (14/12/2018), 35,05°C no terceiro ensaio (17/12/2018) e 33,30°C no último ensaio desses sistemas (07/01/2018). Nesses ensaios, a média associada aos parâmetros de umidade relativa do ar (RH), velocidade do vento e radiação solar foram de 46,50%, 0,4 m/s, 0,23 W/m² (Ensaio I); 35%, 0 m/s, 1,50 W/m² (Ensaio II); 45%, 0 m/s e 0,45 W/m² (Ensaio III); 49%, 0,4 m/s e 0,48 W/m² (Ensaio VI).

Ressalta-se que o dia mais quente envolvendo a coleta dos dados foi o dia 17/12/2018, sendo que no sábado dia 15/12/2018 ocorreu em Campinas/SP o dia mais quente do ano de 2018. O gráfico contido na Figura 104 apresenta os resultados vinculados aos testes com os sistemas BAPVs de forma ilustrativa agrupando cada parâmetro coletado separando-os por cada ensaio.

Ressalta-se que o dia mais quente envolvendo a coleta dos dados foi o dia 17/12/2018, sendo que no sábado dia 15/12/2018 ocorreu em Campinas/SP o dia mais quente do ano de 2018. O gráfico contido na Figura 104 apresenta os resultados vinculados aos testes com os sistemas BAPVs de forma ilustrativa agrupando cada parâmetro coletado separando-os por cada ensaio.

Tabela 12 – Resumo das médias dos valores obtidos considerando os sistemas BIPVs emulados em bancada.

BIPV	Ensaio	Módulo FV	V (V)	I (mA)	T _s (°C)	T _a (°C)	RH (%)	V _{VENTO}	G _{SOLAR} (W/m ²)
	I	pc-Si (Eco)	10,57	215,83	35,96	33,10	46,50	0,4	0,23
		OC	0,97	0,20	39,26				
	II	pc-Si (Eco)	13,11	264,13	38,63	34,85	35,00	0	1,50
		OC	0,98	0,20	43,62				
	III	pc-Si (adaptado)	3,62	88,96	43,23	35,05	45,00	0	0,45
		OC	0,98	0,20	40,49				
	IV	pc-Si (adaptado)	3,58	88,11	39,56	33,30	49,00	0,4	0,48
		OC	0,99	0,20	42,94				

Fonte: Autor.

Os ensaios envolvendo os sistemas BAPVs ocorreram no mês de janeiro de 2019, onde dois corpos de prova foram, simultaneamente, ensaiados, contendo tecnologias fotovoltaicas distintas (células de pc-Si (Eco-Worthy), células de pc-Si (módulo FV adaptado) e células orgânicas), sendo elas alternadas a cada experimento. A Tabela 13 traz os valores referentes às grandezas coletadas através da bancada de ensaios instrumentada. A Figura 105 ilustra o gráfico da média das grandezas coletadas em bancada. Devido à separação existente entre o módulo FV e o elemento construtivo, própria dos sistemas BAPVs, foram coletados dois dados de temperatura (T_{OP} e T_S). Salienta-se que os dados de G_{SOLAR} e V_{VENTO} não foram expressivos.

Nos ensaios onde foram utilizados os módulos FVs de pc-Si adaptado a média de valores associadas à $V_{SAÍDA}$ foi de 3,56 V (Ensaio V); 3,63 V (Ensaio VI); e 3,99 V (Ensaio VII). Esse mesmo parâmetro no módulo FV de células FVs de pc-Si da fabricante Eco-Worthy foi 19,9 V (Ensaio VIII); 18,75 V (Ensaio IX); 19,8 V (Ensaio X). As médias de valores associadas à $V_{SAÍDA}$ no módulo FV de OC foram 0,99 V; 0,98 V; 1,08 V; 1 V; 0,92 V; 0,98 V, respectivamente nos ensaios com os sistemas BAPVs. As distâncias entre o módulo FV e o bloco de concreto foram alternadas em cada ensaio. Não foi possível identificar alguma relação entre a distância e o parâmetro de $V_{SAÍDA}$, sendo que ao comparar os valores associados ao módulo FV de pc-Si adaptado, a tensão de saída foi sutilmente acrescida com o aumento de espaçamento.

Pelos valores trazidos na Tabela 13 identifica-se que o módulo FV de pc-Si (Eco-Worthy e adaptado) tiveram T_{OP} de operação das células superiores superiores aos módulos FVs de pc-Si (adaptado) e contendo as células orgânicas aplicadas ao EVA Apesar das alta temperaturas vinculadas às células FVs, as T_S coletadas nas superfícies dos blocos de concreto de cada sistema BAPV mostraram-se menores nos sistemas contendo os módulos FVs de pc-Si. Os sistemas BAPVs com as células orgânicas obtiveram as maiores médias associadas às T_S . Avaliando a temperatura ambiente coletada pela estação meteorológica, a maior média de valores associadas a esse parâmetro foi no dia 15/01/2019 onde o termômetro coletou a T_a média de 34,6°C.

Os demais parâmetros coletados pela bancada são ilustrados pela Figura 105 onde nota-se o alcance da média de valores de cada grandeza. A umidade relativa mais expressiva foi identificada no Ensaio VIII no dia 16/01 onde esse parâmetro atingiu a

média de 54%. A V_{VENTO} não atingiu alcances significativos que possibilitassem análises mais aprofundadas acerca da influência dessa grandeza na $V_{SAÍDA}$, ou mesmo na T_{OP} e T_s nos ensaios envolvendo os sistemas BAPVs. A radiação solar incidente na região de Campinas, e disponibilizada pelo CEPAGRI também não foi expressiva, conforme apresentado pela Tabela 13.

Tabela 13 – Resumo dos valores médios coletados nos ensaios envolvendo os sistemas BAPVs.

BAPV	Ensaio	Módulo FV	V (V)	I (mA)	T_{OP} (°C)	T_s (°C)	T_a (°C)	RH (%)	V_{VENTO}	G_{SOLAR} (W/m ²)
	V	pc-Si (adaptado)	3,56	87,59	44,41	30,76	33,10	45	0	0,14
		OC	0,99	0,19	42,23	32,60				
	VI	pc-Si (adaptado)	3,63	88,82	43,50	37,02	33,60	46	0	0
		OC	0,98	0,18	41,31	37,72				
	VII	pc-Si (adaptado)	3,99	97,81	49,52	42,19	34,60	46	0	0
		OC	1,08	0,20	48,02	43,94				
	VIII	pc-Si (Eco)	19,9	0,34	49,81	34,96	32,70	54	0	0
		OC	1	0,18	43,38	39,73				
	IX	pc-Si (Eco)	18,75	0,32	45,14	30,19	33,80	48	0	0
OC		0,92	0,17	40,66	30,80					
X	pc-Si (Eco)	19,8	0,35	48,86	32,65	35,35	48	0	0	
	OC	0,98	0,17	43,50	33,11					

Fonte: Autor.

A partir das imagens termográficas, a Tabela 14 foi montada para resumir as informações coletadas pelo equipamento. A partir do foco inteligente da máquina termográfica, os valores de T_{OP} e T_s colocados na tabela são os que estão inscritos nas imagens das figuras termográficas colocadas no Capítulo “Resultados”. A T_{OP} de operação foi coletada no início de cada ensaio. A T_s refere à temperatura superficial no bloco de concreto ao final de cada experimento. As imagens termográficas dos módulos FVs foram importantes na calibração dos sensores de T_{OP} fixados na traseira dos módulos. Já os valores de T_s coletados serviram para identificar o comportamento térmico do elemento construtivo ao final da realização de cada ensaio.

Analisando os Ensaios V, VI e VII, nota-se que com o aumento da distância entre os elementos componentes do sistema BAPV a T_{OP} diminuiu nos módulos FVs utilizados (pc-Si adaptado e OC). A T_s por outro lado, nos ensaios mencionados com o aumento do espaçamento da estrutura de fixação dos módulos esse parâmetro aumentou sua média relativa, como por exemplo nos sistema BAPVs com 2,1 cm de espaçamento a T_s média no bloco de concreto da aplicação do módulo FV de pc-Si da Eco-Worthy foi de 38,5°C, sendo que no espaçamento de 5,5 cm a T_s média foi de 44,2°C. Os sistemas BAPVs contendo os módulos FVs de células orgânicas também possuíram o mesmo perfil de aquecimento ao passo que o distanciamento entre as partes do sistema BAPV eram elevadas.

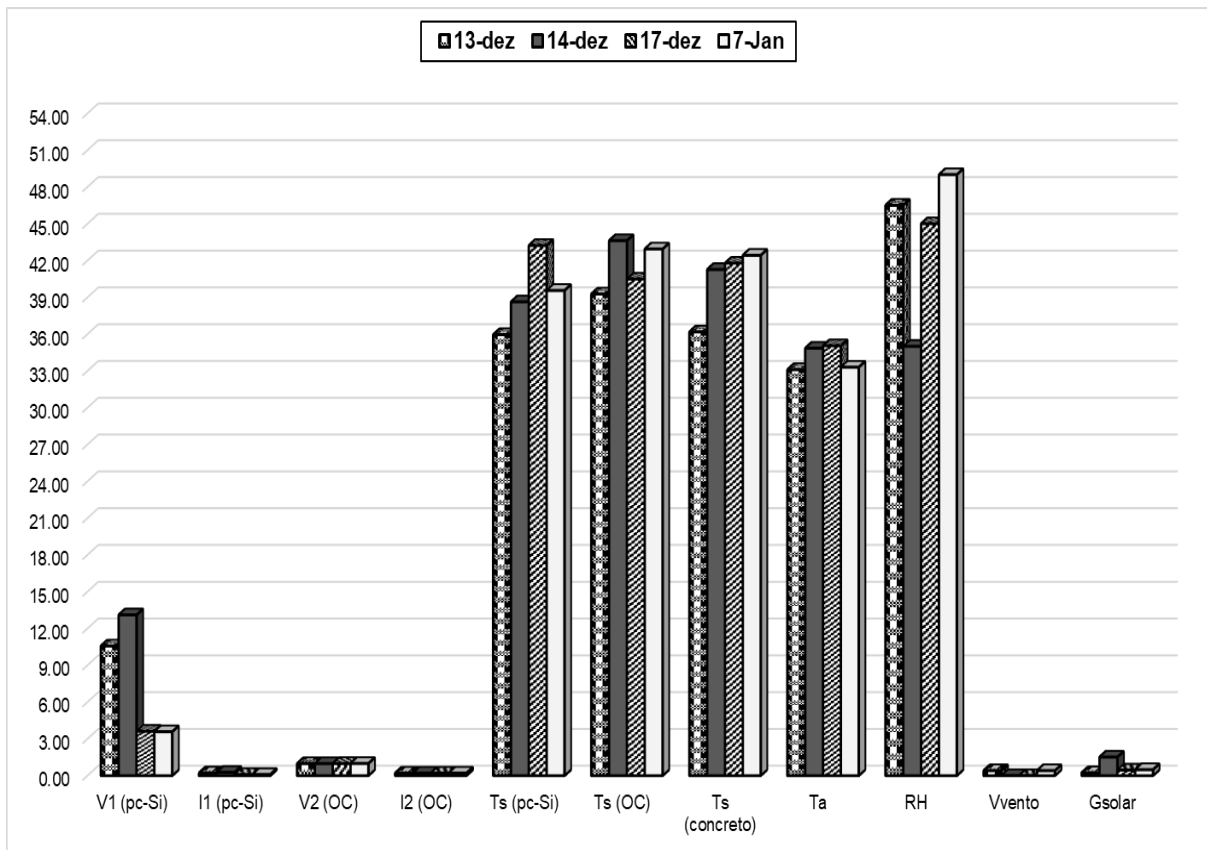
Tabela 14 – Valores retirados da máquina termográfica identificando a T_{OP} média dos módulos FVs no início dos ensaios e a T_s dos blocos de concreto ao final de cada ensaio.

Sistema	Ensaio	Módulo FV	T_{OP} (°C)	T_s (°C)
BIPV	I	pc-Si (Eco-Worthy)	49,5	34,5
		OC	48,1	34,9
	II	pc-Si (Eco-Worthy)	51,6	36,5
		OC	46,5	36,4
	III	pc-Si (adaptado)	50,4	48,5
		OC	48,5	39,2
	IV	pc-Si (adaptado)	51,1	45,0
		OC	46,7	45,4
BAPV	V (2,1 cm)	pc-Si (adaptado)	46,4	35,2
		OC	45,6	38,3
	VI (3,5 cm)	pc-Si (adaptado)	45,6	43,1
		OC	43,5	43,7
	VII (5,5 cm)	pc-Si (adaptado)	45,7	41,8
		OC	38,5	40,8
	VIII (2,1 cm)	pc-Si (Eco-Worthy)	48,0	38,5
		OC	43,9	40,8
	IX (3,5 cm)	pc-Si (Eco-Worthy)	49,2	39,5
		OC	42,1	39,2
X (5,5 cm)	pc-Si (Eco-Worthy)	51,3	44,2	
	OC	47,6	47,0	

Fonte: Autor.

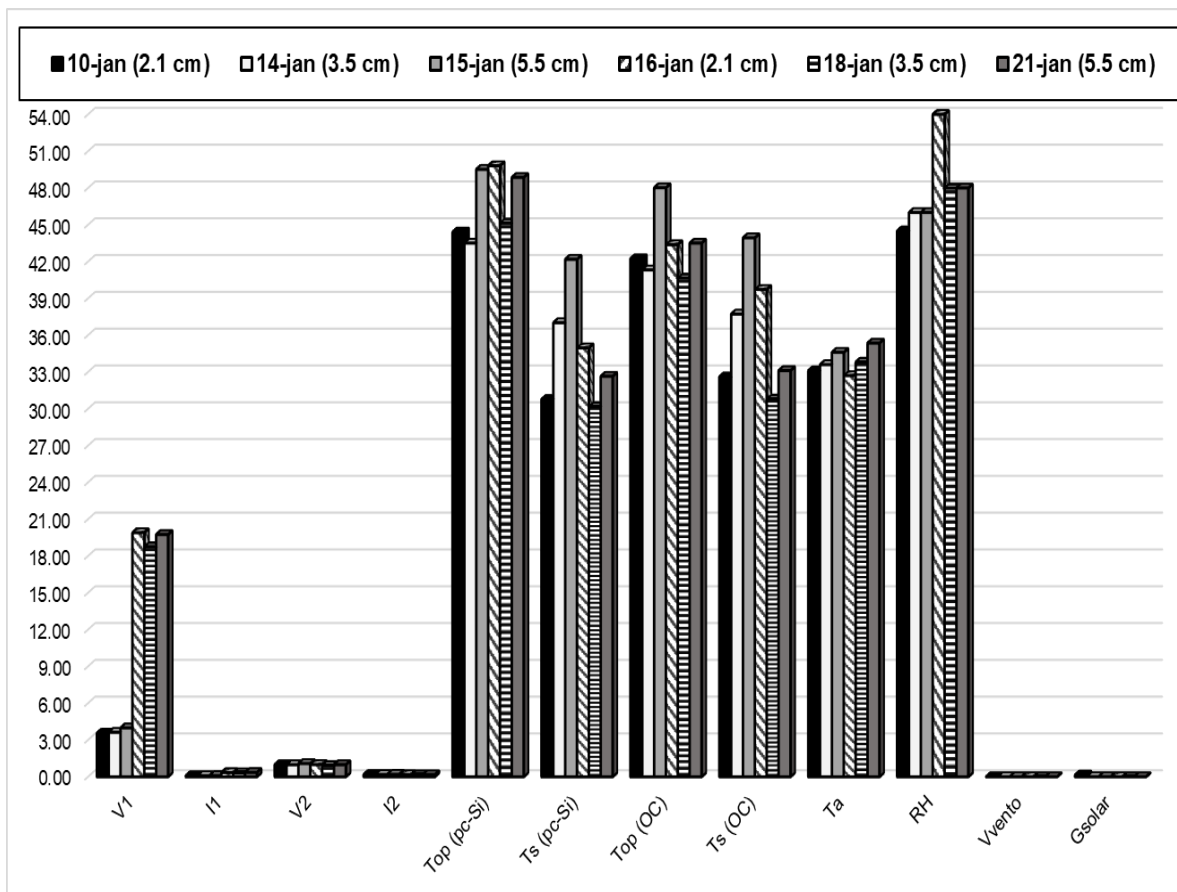
Ainda pela Tabela 14, detecta-se algumas particularidades inerentes aos sistemas BIPVs postos em bancada. Nos Ensaios I e IV que caracterizaram-se pela colocação dos blocos de concreto dentro das caixas de isolamento térmico, as T_s dos sistemas BIPVs com o módulo FV de células orgânicas foi maior do que os sistemas BIPVs com os módulos FVs de pc-Si. Nos ensaios onde não foi colocada a caixa de isolamento, Ensaios II e III, a T_s dos sistemas BIPVs com os módulos FVs de pc-Si foram superiores do que os sistemas BIPVs com as células orgânicas. As T_{OP} dos módulos FVs, avaliando os sistemas BIPVs, foram superiores à 46°C , em todos os ensaios envolvendo esses sistemas.

Figura 104 – Gráfico das médias dos valores dos parâmetros coletados a partir dos ensaios com os sistemas BIPVs.



Fonte: Autor.

Figura 105 – Gráfico das médias dos valores dos parâmetros coletados a partir dos ensaios com os sistemas BAPVs.



Fonte: Autor.

6. Conclusões

Este trabalho tratou da avaliação do desempenho da integração (sistemas BIPVs) e aplicação (sistemas BAPVs) de módulos fotovoltaicos a elementos construtivos. Nesse sentido, os sistemas BAPVs e BIPVs podem ser considerados exemplos promissores onde a aplicação e/ou integração das células FVs podem corroborar com a eficiência energética no ambiente construído. Tais sistemas agregam uma série de características, uma vez que abordam o conceito da geração distribuída no meio urbano, ao passo que também favorecem a discussão das fontes renováveis de energia em um dos setores que mais consome energia e insumos no mundo, o da construção civil.

Entretanto, para assegurar que os empreendimentos BAPV e BIPV sejam efetivamente eficientes para o usuário e o ambiente ao redor, pesquisas e estudos com o foco em identificar os processos inerentes à troca de calor (ou transferência) com o ambiente, ou mesmo com o elemento construído, são necessárias e podem ser exploradas em diferentes âmbitos. Neste trabalho, o intuito foi identificar se o método de fixação dos módulos FVs ao elemento construtivo (aplicado ou integrado) exerce influências em ambas as partes. Sendo assim, a bancada apresentada no Capítulo “Materiais e Métodos” foi desenvolvida para coletar os parâmetros que são abordados na literatura enquanto agentes atenuantes da eficiência de módulos FVs. Ainda, procurou-se identificar trabalhos onde os sistemas BAPVs e BIPVs eram estudados em suas potencialidades e principais problemáticas.

Dos testes efetuados, constatou-se que os módulos FVs operam em circunstâncias ambientais diferentes das condições de teste padrão (STC) determinadas em algumas normas como a ASTM E1036-96, IEC 61853-1 e a NBR11876/EB2176. Nessas normas, são considerados os parâmetros de radiação solar igual à 1000 W/m^2 , massa de ar igual à 1,5 e a temperatura de operação das células 25°C . Sendo assim, ao avaliar os ensaios contendo os sistemas BIPVs por exemplo, e através das imagens com os gradientes de temperatura fornecidas pela máquina termográfica, comprovou-se que as células FVs de fato operam em temperaturas acima do padrão fornecido pela STC.

Nos ensaios contendo os sistemas BIPVs, com os módulos FVs de pc-Si Eco-Worthy, pc-Si adaptado e composto por células orgânicas, comprovou-se que as células FVs de fato operam em temperaturas superiores à determinada pela STC (T_{OP} igual à 25°C). Nos Ensaios I e II, onde foram utilizados os módulos de pc-Si (Eco-Worthy) e o módulo composto por células orgânicas, a T_{OP} nesses equipamentos foi 49% e 48% (Ensaio I), 52% e 46% (Ensaio II) superiores ao valor determinado pelas normas. Analisando os ensaios posteriores com os sistemas BIPVs com o módulo de pc-Si adaptado e o painel com as células orgânicas, as T_{OP} foram 50% e 48% superiores aos 25°C delimitado pelas normas, no Ensaio III. Já no Ensaio IV, as T_{OP} foram 51% e 46% maiores do que a T_{OP} situada nas normas estudadas.

Conforme a composição da bancada de testes efetuada para emulação dos sistemas BIPVs, um bloco de concreto sem a integração com módulos FVs foi colocado junto aos sistemas BIPVs para coleta dos dados de T_s nesse bloco puro. Comparando os resultados gerados pelo nó sensor (MCP9700A) nos Ensaios I, III e IV, a T_s no bloco de concreto foi maior (1%, 3%, e 7%, respectivamente) do que a temperatura detectada na superfície de integração dos módulos FVs de pc-Si com o bloco de concreto. Entretanto, nesses mesmos ensaios as T_s média coletada da superfície de integração do elemento fotovoltaico com o bloco de concreto foram 8%, 5% e 1% superiores à T_s coletada da superfície do bloco de concreto puro.

Ainda, pelos Ensaios I, II e IV, foi possível identificar que a T_s dos sistemas BIPVs integrados com as células orgânicas (OC) obtiveram as médias de temperatura, coletadas pelos sensores MCP9700A, 8%, 11% e 8% maiores do que a T_s nos sistemas BIPVs com as células de pc-Si (tanto para o módulo FV da Eco-Worthy quanto para o módulo adaptado). Outra conclusão retirada dos ensaios contendo os sistemas BIPVs engloba a T_a como fator contribuinte no desempenho da T_s associada à superfície de integração do sistema BIPV, sendo que com o acréscimo da T_a a T_s nos sistemas BIPVs, e no bloco de concreto puro também se eleva.

Analisando os Ensaios I e II, a T_a foi $1,75^{\circ}\text{C}$ maior no Ensaio II. Como consequência, a T_s no sistema BIPV com o módulo FV de pc-Si da Eco-Worthy elevou-se $2,67^{\circ}\text{C}$ e o módulo FV de OC também aumentou $4,35^{\circ}\text{C}$ (isso no Ensaio II). Nos Ensaios III e IV, este mesmo evento pôde ser verificado onde a T_a aumentou $1,75^{\circ}\text{C}$ ocasionando o

acrécimo da T_s em ambos os sistemas BIPVs. No caso, o sistema BIPV com o módulo FV de pc-Si teve a T_s média elevada em $2,45^\circ\text{C}$. O sistema BIPV com o módulo composto pelas células FVs de OC a temperatura aumentou-se discretamente em torno de $0,64^\circ\text{C}$.

Aponta-se, ainda, que nos ensaios onde a caixa de isolamento das laterais dos blocos de concreto foram utilizadas, as T_s vinculadas aos três blocos de concreto (sistemas BIPVs e concreto puro) foram menores do que quando comparadas com os blocos sem a caixa de isolamento. Comparando os Ensaios I e II, onde o Ensaio II não conteve a caixa de isolamento das laterais dos blocos, a T_s foi 7% maior no sistema BIPV com as células de pc-Si (módulo FV Eco-Worthy); sendo que no sistema BIPV com as células orgânicas a T_s foi 10% superior; e no bloco de concreto puro a T_s foi 12% mais acentuada.

Avaliando os parâmetros coletados a partir dos ensaios contendo os sistemas BIPVs, nos experimentos I e II verificou-se que a V_{VENTO} exerce influência na temperatura de operação das células FVs no módulo pc-Si (Eco-Worthy). Quando a velocidade média do vento foi $0,4 \text{ m/s}$ a T_{OP} das células FVs foi 7% menor do que o Ensaio II onde a média da incidência da V_{VENTO} foi 0 m/s . Nos Ensaios III e IV a mesma relação pode ser constatada com os resultados coletados. No Ensaio III, a V_{VENTO} média foi 0 m/s resultando em um acréscimo de 8% na T_{OP} das células nesse experimento, sendo que no Ensaio IV a média da V_{VENTO} foi de $0,4 \text{ m/s}$.

Quando analisados os parâmetros elétricos dos módulos FVs integrados aos sistemas BIPVs dos Ensaios I e II, o módulo FV de pc-Si da Eco-Worthy respondeu com mais expressividade à incidência da G_{SOLAR} . A radiação solar média obtida nesses ensaios favoreceu a geração de $V_{\text{SAÍDA}}$ no módulo FV da Eco-Worthy (dados coletados pelo sensor INA219). Por exemplo, no Ensaio II a G_{SOLAR} média aumentou cerca de 85% (sendo $0,23 \text{ W/m}^2$ no Ensaio I e $1,50 \text{ W/m}^2$ no Ensaio II) favorecendo assim o acréscimo da $V_{\text{SAÍDA}}$ no módulo em 19% ($13,11 \text{ V}$). O módulo FV com as células orgânicas não apresentou particularidades quanto aos parâmetros elétricos coletados pelo nó sensor ($V_{\text{SAÍDA}}$ e $I_{\text{SAÍDA}}$). Esse fato repetiu-se em todos os ensaios contendo os sistemas BIPVs com as células de OC.

O papel do parâmetro umidade relativa do ar (RH) nos ensaios contendo os sistemas BIPVs também é discutido. Separando os ensaios por tecnologia fotovoltaica, identificou-

se que, nos Ensaios I e II, quando a RH elevou-se 25% a T_s reduziu cerca de 7% (nos sistemas BIPVs com o módulo FV de pc-Si da Eco-Worthy). Nos Ensaios III e IV, a RH aumentou 8%, resultando em uma diminuição de 9% da T_s no sistemas BIPVs com o módulo FV de pc-Si adaptado. Outra relação constatada foi inerente a RH e T_a . Ao passo que RH aumentou a T_a diminui. Analisando os Ensaios I e II, a RH diminui 33% e a T_a aumentou em 5%. Nos Ensaios III e IV, quando a RH aumentou cerca de 8%, a T_a diminuiu cerca de 5%.

A partir da composição sistêmica do BIPV, a relação de transferência de calor entre a placa fotovoltaica e o elemento construtivo se dá pelo processo de condução. Nos testes efetuados em bancada, verificou-se que as T_s associadas aos ensaios contendo os módulos FVs de pc-Si adaptado e o módulo FV de células orgânicas, foram maiores quando comparadas com o sistema BIPV com o módulo FV da Eco-Worthy. Tal fato é evidenciado a partir da forma como esses módulos FVs foram construídos. Pelas Figura 40 e Figura 41, pode ser observado que entre as ilhas construídas com as células FVs não há nenhum elemento que impeça a incidência dos raios solares na superfície frontal do bloco de concreto. A partir do método de confecção desses painéis, onde as células foram posicionadas sobre o material EVA, esse material, por ser transparente, favoreceu a penetração dos raios solares que afetaram também a superfície do bloco de concreto.

Os sistemas BAPVs consideram a aplicação dos módulos FVs às edificações por meio de uma estrutura auxiliar de sustentação. Portanto, nos ensaios foram utilizando os métodos de fixação dos módulos FVs ao elemento construtivo conforme proposto por GOOSSENS, GOVERDE, CATTLOOR (2018) onde as distâncias adotadas entre os blocos de concretos e os módulos FVs foram de 2,1 cm; 3,5 cm e 5,5 cm. Com essa adaptação, algumas considerações podem ser retiradas dos experimentos efetuados em bancada. Nos ensaios contendo os sistemas BAPVs, os parâmetros de V_{VENTO} e G_{SOLAR} não apresentaram valores significativos a ponto de favorecerem análises direcionadas à participação de cada um nos demais parâmetros como T_a , T_{OP} , RH, $V_{SAÍDA}$ e $I_{SAÍDA}$.

Verificando os dados colocados na Tabela 14 onde estão explícitos os valores de T_{OP} das células dos módulos FVs aplicados aos sistemas BAPVs, conclui-se que, nesses sistemas, esse parâmetro também opera em uma escala superior ao valor determinado pelas normas destinadas à avaliação de módulos FVs. Nos Ensaios V, VI e VII, onde os

módulos FVs utilizados foram o equipamento de células de pc-Si adaptado e o módulo com células orgânicas, as T_{OP} das células foram 46%, 45% e 45% (módulo pc-Si adaptado) superiores aos 25°C apontados pela STC. Já o módulo FV composto pelas células orgânicas apresentaram valores 45%, 43% e 35% maiores. Nos Ensaios VIII, IX e X efetuados com os módulos de pc-Si da Eco-Worthy e com o painel de OC as T_{OP} capturadas pela máquina termográfica foram 48% e 43% (Ensaio VIII); 49% e 41% (Ensaio IX); 51% e 47% (Ensaio X) todos os valores superiores ao valor de T_{OP} delimitado pelas normas ASTM E1036-96, IEC 61853-1 e a NBR11876/EB2176.

Nos ensaios com os sistemas BAPVs, os valores associados aos parâmetros elétricos dos módulos FVs não apresentaram mudanças expressivas a ponto de gerar maiores análises. A partir dos dados coletados pelos sensores MCP9700A a T_{OP} dos módulos FVs de pc-Si foram maiores do que a T_{OP} nos módulos FVs de células orgânicas, em todos os ensaios contendo o sistema BAPV. Logo, as T_{OP} nos módulos FVs de pc-Si (Eco-Worthy e adaptado) foram 5% (Ensaio V), 5% (Ensaio VI), 3% (Ensaio VII), 13% (Ensaio VIII), 10% (Ensaio IX) e 11% (Ensaio X) maiores do que a T_{OP} no módulo FV de células orgânicas.

Todavia, ao avaliar o comportamento da T_s na superfície dos blocos de concreto voltadas aos módulos FVs, identificou-se que nos sistemas BAPVs com as células orgânicas esse parâmetro foi superior nos sistemas com as células orgânicas. Sendo que na ordem da composição dos ensaios (Ensaio V ao Ensaio X) as porcentagens de acréscimo da T_s no sistema BAPV com as células orgânicas, quando comparados com os sistemas BAPVs com as células de pc-Si, foram de 6%, 2%, 4%, 12%, 2% e 1%, respectivamente.

Ao analisar os dados da T_s especificamente nos sistemas BAPVs com as células de pc-Si encontram-se resultados que demonstram que os sistemas BAPVs, com o módulo FV adaptado, obteve T_s superiores aquelas referentes aos sistemas BAPVs com o módulo Eco-Worthy. Comparando os ensaios com as mesmas distâncias de separação entre os elementos componentes do sistema BAPV, verifica-se que a T_s é 12% (Ensaio V e VIII), 23% (Ensaio VI e IX) e 29% (Ensaio VII e X) maior nesses sistemas.

Nos Ensaio V, VI e VII identifica-se que o aumento da distância entre o módulo FV e o bloco de concreto acarreta em dois fenômenos: as temperaturas coletadas, T_{OP} e T_s ,

a partir do aumento da distância e para os mesmos elementos fotovoltaicos, elevam-se conforme a distância também é variada. Para o caso onde a distância entre o módulo FV e o bloco de concreto era 5,5 cm, a T_{OP} no sistema BAPV com as células de pc-Si (adaptado) foi 10% maior do que a T_{OP} no sistema BAPV com 2,1 cm. Já a T_S também foi cerca de 27% maior no sistema composto pelo mesmo módulo FV. Ainda, avaliando os sistemas BAPVs com distância de 3,5 cm, nota-se também o aumento da T_{OP} em 2% e a T_S de 17% quando comparados esses dados com o sistema BAPV com o 2,1 cm de espaçamento.

Conclui-se, também, pelos dados dos sensores de T_S , que esse parâmetro é relativamente maior nos sistemas BAPVs com as OC, uma vez que a composição das ilhas com as células viabiliza a passagem dos raios solares através do EVA (utilizado como elemento de apoio para as células FVs). Logo, a forma como o módulo FV é construído exerce influência na temperatura superficial do elemento construtivo. Sendo assim, estratégias de melhoramento na elaboração desses equipamentos podem favorecer o desempenho térmico da envoltória construtiva, isso para ambos os sistemas (BAPVs e BIPVs). O módulo FV da fabricante Eco-Worthy foi desenvolvido de forma que ao posicionar o mesmo em cima do bloco de concreto durante o período de incidência dos raios solares, na superfície do bloco se forma uma região sobreada que colabora com o resfriamento dessa face.

O Ensaio VIII caracterizou-se com a maior média de umidade relativa do ar RH (54%). Em aspectos gerais, ao passo que a RH eleva-se, a T_{OP} das células de pc-Si aumentam também. Quando analisada a T_{OP} do ensaio citado, o valor médio das T_{OP} coletadas pelo nó sensor foi de 48,81°C. Por outro lado, a temperatura ambiente média desse dia foi a menor identificada nas simulações contendo os sistemas BAPVs (32,7°C).

As simulações efetuadas no *software* ANSYS foram estudos preliminares. A partir da composição sistêmica do BIPV, procurou-se identificar como o elemento construtivo comporta-se considerando uma superfície de aquecimento (que equivaleria ao módulo FV). Uma vez que as T_{OP} dos módulos FVs operam acima dos valores citados nas normas estudadas neste trabalho, os processos de transferência de calor podem ocorrer de forma mais acentuada nos sistemas BIPVs, visto o contato direto entre o módulo FV e a edificação.

Das simulações efetuadas no ANSYS pode-se retirar algumas considerações. As T_{OP} consideradas foram de 28°C, 48°C e 54°C. Essas temperaturas foram extraídas a partir dos ensaios efetuados em bancada com os módulos FVs de pc-Si (Eco-Worthy) e o módulo FV composto pelas células orgânicas simulando os sistemas BIPVs. Pelas imagens resultantes das simulações no ANSYS identificou-se que quando a T_{OP} do módulo FV de pc-Si foi imposta em 28°C, a temperatura na outra face do bloco de concreto (na região mais centralizada do bloco) ainda alcançava valores em cerca de 27°C (conforme a Figura 92 – Resultado da simulação do software ANSYS para o sistema BIPV com integração com o módulo FV de pc-Si onde a T_{OP} do módulo é igual a 28°C.). Comparando com o resultado simulatório do sistema BIPV com as células orgânicas, a temperatura na face inferior do bloco apresentou valores na escala de 26,33°C (Figura 93 **Figura 93** – Resultado da simulação do software ANSYS para o sistema BIPV com integração com o módulo FV de células orgânicas onde a T_{OP} do módulo é igual a 28°C.). Assim, a integração do módulo FV de pc-Si acarretou em um acréscimo de 2% na temperatura da face inferior do bloco de concreto.

Ao elevar a T_{OP} das superfícies integradas aos módulos FVs nos sistemas BIPVs simulados no ANSYS verifica-se que a temperatura superficial na face posterior (na região central do bloco) atinge valores significativamente altos. Comparando as simulações para cada caso de sistema BIPV, nos sistemas contendo a integração com o módulo FV de pc-Si (Eco-Worthy), e com a T_{OP} em 48°C, a T_s na face posterior dos blocos de concreto foi 19% maior do que no sistema BIPV com as células orgânicas. Já no sistema BIPV com o módulo FV da Eco-Worthy onde a T_{OP} foi 64°C, a T_s na face logo abaixo foi 9% maior do que o sistema BIPV com as células orgânicas. Isso demonstra que o método de integração do módulo FV exerce influência direta na absorção de calor pelo bloco de concreto.

Conclui-se que pela metodologia montada neste trabalho os parâmetros ambientais exercem influência considerável no desempenho térmico dos módulos FVs. Entretanto, algumas melhorias podem ser feitas nos métodos apresentados neste trabalho e que possibilitarão elaborar análises mais aprofundadas acerca do desempenho dos sistemas BAPVs e BIPVs, considerando os módulos FVs ou o elemento construtivo como objeto de estudo.

Como sugestões para trabalhos futuros propõe-se:

- Ensaiar os sistemas BAPVs e BIPVs, simultaneamente, com as mesmas tecnologias fotovoltaicas para identificar a resposta nas $V_{SAÍDA}$ dos módulos a partir dos sistemas diversificados;
- Efetuar coletas de dados com volume maior de amostras para que tendências, comportamentos, respostas sistêmicas e outras constatações e conclusões possam ser estabelecidas acerca dos sistemas BIPV e BAPV estudados;
- Adotar células fotovoltaicas com outros componentes (como o silício amorfo – a-Si);
- Aprimorar os métodos de simulação dentro do *software* ANSYS, considerando os valores de transmitância térmica (U) apontados pelas normas de desempenho térmico das edificações, 4,4 (para concreto maciço com espessura de 10 cm - ABNT NBR 15220-3), ou o mesmo valor de U para laje maciça conforme a Portaria Inmetro Nº 50 recomenda;
- Ainda, dentro do ANSYS é possível acrescentar os valores referentes à velocidade do vento, radiação solar e temperatura ambiente que podem fornecer análises mais aprofundadas acerca dos sistemas BAPVs e BIPVs conforme esses parâmetros se alteram;
- Como apontado, as normas de desempenho térmico em edificações não contemplam, ainda, os módulos FVs enquanto partes componentes da envoltória construtiva. Sendo assim, com o aprofundamento do tema dos sistemas BAPVs e BIPVs, estudos e análises voltadas às interpretações envolvendo a resposta dos elementos construtivos quando integrados ou aplicados com os módulos fotovoltaicos podem favorecer o apontamento desses equipamentos enquanto agentes componentes das fachadas e telhados das edificações. Com isso, o tema das fontes renováveis de energia ganha espaço dentro da grande área da construção civil e tende a colaborar com a disseminação da energia solar fotovoltaica nesse setor.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 1ª edição. 2002. Disponível em: < http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf >. Acesso em 09 jan. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 2ª edição. 2008. Disponível em: < http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf >. Acesso em 09 jan. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Revista de Pesquisa e Desenvolvimento, No5, agosto de 2015. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876444/RevistaP%26D_05_2013.pdf/ad5028b7-0776-6050-a963-8281619c3348 >. Acesso em 21 jan 2018.

AL-NIMR, M. A.; AL-AMMARI, W., A. A Novel Hybrid PV-distillation System. Solar Energy, V. 135, pp. 874 – 883, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1985 “E 1036-15 Standard Methods of Testing Electrical Performance of non-Concentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells”. Disponível em: < <https://www.astm.org/Standards/E1036.htm> >. Acesso em 24 maio 2018.

ANTONIOLLI, A. F.; MONTENEGRO, A. A.; ZOMER, C. D.; RÜTHER, R. Avaliação Técnica e Econômica entre Sistemas Fotovoltaicos Aplicados a Edificações (BAPV) e Sistemas Idealmente Instalados para Máxima Geração Anual. In: VI Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2016.

ARMSTRONG, S.; HURLEY, W. G. A Thermal Model for Photovoltaic Panels Under Varying Atmospheric Conditions. Applied Thermal Engineering, V. 30, I. 11-12, pp. 1488 – 1495, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15220-3. Desempenho Térmico de Edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, 2005. Disponível em: < <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=635> >. Acesso em 30 abr 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15575-5. Edificações Habitacionais – Desempenho: requisitos para sistemas de coberturas, 2013. Disponível em: < <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=195616> >. Acesso em 23 abr 2018.

ATMEL ATMEGA328 Datasheet. Disponível em: < <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-PDS-DS40002061A.pdf> >. Acesso em 23 mar 2018.

AVRUTIN, V.; IZYUMSKAYA, N.; MORKOÇ, H. Semiconductor Solar Cells: Recent Progress in Terrestrial Applications. *Superlattices and Microstructures*, V. 49, I. 4, 2011, pp. 337 – 364.

Basnet, Arjun. Architectural Integration of Photovoltaic and Solar Thermal Collector Systems into Buildings, 2012. Master's Thesis in Sustainable Architecture, Norwegian University of Science and Technology Faculty of Architecture and Fine Arts Department of Architectural Design, History and Technology, Trondheim, Norwegian, 2012.

BELTRÃO, Ricardo Esberard de Albuquerque. Efeito da Temperatura na Geração de Energia de Módulos Fotovoltaicos Submetidos a Condições Climáticas Distintas: Estudo de Caso para as Localidades de Recife e Araripina. 2008, 171 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

BERARDI, U.; NALDI, MATTEO, N. The impact of the Temperature Dependent Thermal Conductivity of Insulating Materials on the Effective Building Envelope Performance. *Energy and Buildings*, V. 144, pp. 262 – 275, 2017.

BODON, J. H.; PELEGRINI, A. V.; HEEMANN, A. Sistemas Fotovoltaicos Integrados em Edificações: Tecnologias e Oportunidades com Foco no Mercado Brasileiro. In: VIII Congresso Internacional de Bionergia, São Paulo, 2013.

BOHÓRQUEZ, M. A. M.; GÓMEZ, J. M. E.; MÁRQUEZ, J. M. A. A New and Inexpensive Temperature-Measuring System: Application to Photovoltaic Solar Facilities. *Solar Energy*, V. 83, pp. 883 – 890, 2009.

BÜHLER, Alexandre José. Determinação de Parâmetros Fotovoltaicos a partir de Ensaios de Curva Característica sem Iluminação. 2007, 89 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BHATTACHARYA, T.; CHAKRABORTY, A. K.; PAL, K. Effects of Ambient Temperature and Wind Speed on Performance of Monocrystalline Solar Photovoltaic Module in Tripura, India. *Journal of Solar Energy*, V. 2014, pp. 1 – 5, 2014.

BUDAY, Michael S. Measuring Irradiance, Temperature and Angle of Incidence Effects on Photovoltaic Modules in Auburn Hills, Michigan. Master's Practicum, University of Michigan: Ann Arbor 1-26, 64 f., 2011.

CANTOR, Guillermo Andrés Rodríguez. Influência dos Fatores Climáticos no Desempenho de Módulos Fotovoltaicos em Regiões de Clima Tropical. 2017, 176 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica Centro de Referência Para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, Ministério de Minas e Energia. Energia Solar – Princípios e Aplicações. 2006. Disponível em: < http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf >. Acesso em 02 fev. 2018.

CHANDRA, S.; AGRAWAL, S.; CHAUHAN, D. S. Effect of Ambient Temperature and Wind Speed on Performance Ratio of Polycrystalline Solar Photovoltaic Module: An Experimental Analysis. *International Energy Journal*, V. 18, pp. 171 – 180, 2018.

CHAICHAN, M. T.; KAZEM, H. A. Experimental Analysis of Solar Intensity on Photovoltaic in Hot and Humid Weather Conditions. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, V. 7, I. 3, pp. 91 – 96, 2016.

CRONEMBERGER, J.; CAAMAÑO-MARTÍN, E.; SÁNCHEZ, S. V. Assessing the Solar Irradiation Potential for Solar Photovoltaic Applications in Buildings at Low Latitudes: Making the Case for Brazil. *Energy and Buildings*, V. 55, pp. 264 – 272, 2012.

CUSTÓDIO, I. P.; RÜTHER, R. Influência da Integração de Energia Fotovoltaica a uma Edificação na sua Temperatura Interna e no Consumo Energético da Rede Elétrica Pública. In: XIV ENCAC e X ENLAC, Balenário Camboriu, 2017.

DAVIS, M. W.; FANNEY, A. H.; DOUGHERTY, B. P. Prediction of Building Integrated Photovoltaic Cell Temperatures. American Society of Mechanical Engineers, *Journal Solar Energy Engineering*, V. 123, pp. 200 – 210, Washington – DC, United States, 2001.

DEL CUETO, J. A. Comparison of Energy Production and Performance from Flat-Plate Photovoltaic Module Technologies Deployed at Fixed Tilt. In: 29th Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002, New Orleans, Louisiana, USA, 2002.

DENOIX, T.; SECHILARIU, M.; LOCMONT, F. Experimental Comparison of Photovoltaic Panel Operating Cell Temperature Models. In: 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2014, Dallas, Texas, USA.

DHAR, S.; SRIDHAR, R.; AVASTHY, V. Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. In: National Power System Conference IIT-BHU, Varanasi, India, pp. 1 – 5, 2012.

DIDONÉ, E. L.; WAGNER, A.; PEREIRA, F. O. R.; Estratégias para Edifícios de Escritórios Energia Zero no Brasil com Ênfase em BIPV. Ambiente Construído, Porto Alegre, V. 14, N. 3, pp. 27 – 42, 2014.

DOBRZANSKI, L. A.; SZCZSENA, M.; SZINDLER, M.; DRYGATA, A. Electrical Properties Mono- and Polycrystalline Silicon Solar Cells. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. V. 59, I. 2., pp. 67 – 74, 2013.

DUBEY, S.; SARVAIYA, J. N.; SESHADRI, B. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and its Effect on PV Production in the World - A Review. Energy Procedia, V. 33, 311 – 321, 2013.

Eiffert, Patrina; KISS, Gregory J. Building-Integrated Photovoltaic Designs for Commercial and Institutional Structures – A Sourcebook for Architects and Engineers. U.S. Department of Energy's (DOE's) Office of Power Technologies, Photovoltaics Division, and the Federal Energy Management Program. Springfield, 2000.

Estação Meteorológica Vantage Vue Davis (300 metros) – K6250. Disponível em: < <http://www.agrosystem.com.br/produtos/agrometeorologia/davis/vantage-vuer/> >. Acesso em 05 set 2018.

Esquemático elétrico Arduino Nano. Disponível em: < <https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoNano30Schematic.pdf> >. Acesso em 25 mar 2018.

EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION. Global Market Outlook for Photovoltaics Until 2016, 2012. Disponível em: < www.solarpowereurope.org/fileadmin/user_upload/Publications/GlobalMarketOutlook-2016.pdf >. Acesso em 08 fev. 2018.

FALCÃO, Vivienne Denise. Fabricação de Células Solares de CdS/CdTe. 2005, 120 f. Dissertação (Curso de Mestrado em Ciência dos Materiais), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

FARKAS, K.; ANDRESEN, I.; HESTNES, A. G. Architectural Integration of Photovoltaic Cells: Overview of Materials and Products from an Architectural Point of View. In: 3rd International Conference on Smart and Sustainable Built Environments (SASBE), Delft, The Netherlands, 2012.

FITRIATY, P.; SHEN, Z. Predicting Energy Generation from Residential Building Attached Photovoltaic Cells in a Tropical Area Using 3D Modeling Analysis. *Journal of Cleaner Production* XXX, pp. 1 – 15, 2018.

GAILLARD, L.; MÉNÉZO, C.; GIROUX, S.; PABIOU, H.; LE-BERRE, R. Experimental Study of Thermal Response of PV Modules Integrated into Naturally-Ventilated Double Skin Facades. In: 2nd International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, Freiburg, Germany, 2013. *Energy Procedia*, V. 38, pp. 1254 – 1261, 2014.

GASPARIN, F. P.; KRENZINGER, A. Comparação Entre Coeficientes Térmicos de Módulos Fotovoltaicos Determinados com Simulador Solar e com Iluminação Natural. *Revista Brasileira de Energia Solar*, V. 6, N. 2, pp. 102 – 111, 2015,

GAVIRIA, L. R.; PEREIRA, F. O. R.; MIZGIER, M. O. Influência da Configuração Urbana na Geração Fotovoltaica com Sistemas Integrados às Fachadas. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, V. 13, N. 4, pp. 7 – 23, 2013.

GOOSSENS, D.; GOVERDE, H.; CATTLOOR, F. Effect of Wind on Temperature Patterns, Electrical Characteristics, and Performance of Building-Integrated and Building-Applied Inclined Photovoltaic Modules. *Solar Energy*, V. 170, 64 – 75, 2018.

GOOSSENS, D.; KERSCHAEVE, E. V. Aeolian Dust Deposition on Photovoltaic Solar Cells: The Effects of Wind Velocity and Airborne Dust Concentration on Cell Performance. *Solar Energy*, V. 66, I. 4, 277 – 289, 1999.

IMENES, A. G. Performance of BIPV and BAPV Installations in Norway. In: 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Portland, Oregon, United States, pp. 3147 – 3152, 2016.

InfinityPV. Organic Solar Cell Birectional. Disponível em: < <https://infinitypv.com/products/opv/solar-tape> >. Acesso em 03 fev. 2018

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Renewable Energy – Markets & Policies, Deploying Renewables, 2011. Disponível em: < www.iea.org/publications/freepublications/publication/Deploying_Renewables2011.pdf >. Acesso em 20 mar. 2018.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Technology Roadmaps – Solar Photovoltaic Energy, 2010. Disponível em: < https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/pv_roadmap.pdf >. Acesso em 08 fev. 2018.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, Volume 1: Power Sector, Issue 4/5, 2012. Disponível em < https://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-solar_pv.pdf >. Acesso em 08 fev. 2018.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Letting in the Light – How Solar Photovoltaics Will Revolutionize the Electricity System, 2016. Disponível em: < https://www.res4africa.org/wp-content/uploads/2016/09/IRENA_Letting_in_the_Light_2016.pdf >. Acesso em 20 fev. 2018.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable Energy Statistics 2017. Disponível em: < http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2017.pdf >. Acesso em 03 fev. 2018.

IRSHAD; JAFFREY, Z. A.; HAQUE, A. Temperature Measurement of Solar Module in Outdoor Operating Conditions Using Thermal Imaging. *Infrared Physics & Technology*, V. 92, pp. 134 – 138, 2018.

JOVANOVIĆ, U.; MANČIĆ, D.; JOVANOVIĆ, I.; PETRUŠIĆ, Z. Temperature Measurement of Photovoltaic Modules Using Non-Contact Infrared System. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, V. 12, pp. 904 – 910, 2017.

KALDELLIS, J. K.; KAPSALI, M.; KAVADIAS, K. A. Temperature and Wind Speed Impact on the Efficiency of PV Installations. Experience Obtained from Outdoor Measurements in Greece. *Renewable Energy*, V. 66, 612 – 624, 2014.

KAPLANI, E.; KAPLANIS, S. Thermal Modelling and Experimental Assessment of the Dependence of PV Module Temperature on Wind Velocity and Direction, Module Orientation and Inclination. *Solar Energy*, V. 107, 443 – 460, 2014.

Kayal, Sara. *Application of PV Panels in Large Multi-Story Buildings*, 2009. Master of Science in Architecture, California Polytechnic State University, Faculty of Architecture, San Luis Obispo, 2009.

KENE, R. O.; OLWAL, T.; CHOWDHURY, S. P. D. Performance Prediction of Photovoltaic Arrays. In: 52nd International Universities Power Engineering Conference, Heraklion, Greece, pp. 1 – 6, 2017.

KLISE, G. T.; STEIN, J. S. Models Used to Assess the Performance of Photovoltaic Systems. SANDIA REPORT, SAND2009-8258, Unlimited Release, Printed December 2009. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico/Livermore, California.

KOEHL, M.; HECK, M.; WIESMEIER, S.; WIRTH, J. Modeling of the Nominal Operating Cell Temperature Based on Outdoor Weathering. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, V. 95, 1638 – 1646, 2011.

KOWAR, M. P.-; DANIEL, A. Photovoltaic Cells Based on Organic Composites. In: 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Trento, Italy, 2016.

KRAUTER, S.; ARAÚJO, R. G.; SCHROER, S.; HANITSCH, R.; SALHI, M. J.; TRIEBEL, C.; LEMOINE, R. Combined Photovoltaic and Solar Thermal Systems for Facade Integration and Building Insulation. *Solar Energy*, V. 67, N. 4 – 6, pp. 239 – 248, 1999.

LABORATÓRIO DE MODELAGEM E ESTUDOS DE RECURSOS RENOVÁVEIS DE ENERGIA; CENTRO DE CIÊNCIA DO SISTEMA TERRESTRE; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos, São Paulo. 2ª edição. Disponível em: < http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html >. Acesso em 18 jan. 2018.

LIMA, Bruno Wilmer Fontes. Geração Distribuída Aplicada à Edificações: Edifícios de Energia Zero e o Caso do Laboratório de Ensino da FEC-Unicamp, 2012, 170 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

LU, X.; ZHAO, Y.; WANG, Z.; ZHANG, J.; SONG, Y. Influence of Environmental Temperature and Device Temperature Difference Output Parameters of c-Si Solar Cells. *Solar Energy*, V. 136, pp. 333 – 341, 2016.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. Handbook of photovoltaic Science and Engineering. 1 st. ed. England, John Wiley & Sons Ltd, 2003.

MATTEI, M.; NOTTON, G.; CRISTOFARI, C.; MUSELLI, M.; POGGI, P. Calculation of the Polycrystalline PV Module Temperature Using a Simple Method of Energy Balance. *Renewable Energy*, V. 31, pp. 553 – 567, 2006.

MARION, B.; KROPOSKI, B.; EMERY, K.; DEL CUETO, J.; MYERS, D.; OSTERWALD, C. Validation of a Photovoltaic Module Energy Ratings Procedure at NREL. Technical Report. National Renewable Energy Laboratory, 1999.

MARTÍNEZ, M. A.; ANDÚJAR, J. M.; ENRIQUE, J. M. Temperature Measurement in PV Facilities on a Per-Panel Scale. *Sensors*, V. 14, pp. 13309 – 13323, 2016.

Máquina Termográfica Fluke Modelo Ti100. Disponível: < <https://www.fluke.com/pt-br/produto/termovisor/termovisores/fluke-ti100> >. Acesso em 25 set 2018.

MCEVOY, A.; CASTANER, L.; MARKVART, T. Solar cells: Materials, Manufacture and Operation. 2nd Edition. Oxford: Academic Press, 2012.

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; KAMALISARVESTANI, M. Effect of Dust, Humidity and Air Velocity on Efficiency of Photovoltaics Cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 12, 2920 – 2925, 2012.

MICROSHIP – Low-Power Liner Active Thermistor ICs MCP9700/9700A, MCP9701/9701A (*Datasheet*). Disponível em: < <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/20001942g.pdf> >. Acesso em 28 mar 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. Nota Técnica. Rio de Janeiro: EPE, 2012. 58 p. Disponível em: < http://bibliotecadigital.seplan.planejamento.gov.br/bitstream/handle/iditem/242/NT_EnergiaSolar_2012.pdf?sequence=1 >. Acesso em 18 jan. 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017 (ano base 2016). Disponível em: < <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2017vf.pdf> >. Acesso em 20 ja. 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, ELETROBRAS, PROCEL. Eficiência Energética na Arquitetura. 3ª edição. Disponível em: < http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf >. Acesso em 08 jan. 2018.

Módulo fotovoltaico em pc-Si Eco-Worthy. Disponível em: < <http://www.eco-worthy.com/catalog/worthy-polycrystalline-solar-panel-p-133.html> >. Acesso em 04 mar. 2018.

Módulo fotovoltaico com células orgânicas. Infinity OPV. Solar Tape 1m bidirectional Solar tape (> 3%). Disponível em: < <https://infinitypv.com/shop/solar-cells/1m-bidirectional-solar-tape-3> >. Acesso em 05 mar. 2018.

MOUSA, Ola. BIPV/BAPV Barriers to Adoption: Architect's Perspectives from Canada and the United States. 2014, 156 f. Dissertação. Universidade de Waterloo, Canada.

MOTA, L.; MOTA, A.; PEZZUTO, C.; CARVALHO, M.; LAVORATO, M.; COIADO, L.; OLIVEIRA, E. Development of a Surface Temperature Sensor to Enhance Energy Efficiency Actions in Buildings. *Sensors*, V. 18, pp. 1 – 16, 2018.

MUZATHIK, A. H. Photovoltaic Modules Operating Temperature Estimation Using a Simple Correlation. *International Journal of Energy Engineering*, V. 4, I. 4, pp. 151 – 158, 2014.

NAKANO, Alvaro. Simulação de Desempenho Energético de Tecnologias Fotovoltaicas em Fachada de Edifício no Município de São Paulo. 2017, 143 f. Dissertação, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

NEVES, Guilherme Marques. Influência do Espectro da Radiação Solar em Módulos Fotovoltaicos. 2016. 198 f. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

NORDMANN, L. C. T.; CLAVADETSCHER, L. Understanding Temperature Effects on PV System Performance. In: *Proc. Third World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2003, Osaka, Japan, pp. 2243 – 2246.

OH, J.; TAMIZHMANI, G. S.; PALOMINO, E. Temperatures of Building Applied Photovoltaic Modules: Air Gap Effects. *Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components and Systems III*, San Diego, CA, United States, V. 777305, august 2010.

OLIVEIRA, E. D.; PODELESKI, F.; MOTA, L. T. M.; PEZZUTO, C. C.; MOTA, A. A. Monitoramento de Temperatura do Ar e de Superfície em Edificações Usando Redes Sem Fio Padrão IEEE 802.15.4. In: *XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído*, Campinas, São Paulo, 2015.

OLIVEIRA, Everton Dias. Monitoramento de Temperatura em Edificações Usando Redes Sem Fio. 2015, 85 f. Dissertação (Programa de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Centro de Ciências Exatas, Ambientais e da Terra, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas.

ORTEGA, Lisbeth Lucia Martinez. Conversão Fotovoltaica: Comparação de Modelos de Desempenho. 2013, 116 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

PARK, J.; KIM, T.; LEIGH, S.-B. Application of Phase-Change Material to Improve the Electrical Performance of Vertical-Building-Added Photovoltaics Considering the Annual Weather Conditions. *Solar Energy*, V. 105, abril 2014, pp. 561 – 574.

PENG, C.; YANG, J. The Effect of Photovoltaic Panels on the Rooftop Temperature in the EnergyPlus Simulation Environment. *International Journal of Photoenergy*, V. 2016, Article ID 9020567, pp 01 – 12, 2016.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL–CRESESB, 2014. 529 p. Disponível em: < http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf >. Acesso em 15 fev. 2018.

PRIEB, César Wilhelm Massen. Desenvolvimento de um Sistema de Ensaio de Módulos Fotovoltaicos. 2002, 67 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RAMOS, Cristina de Moura. Procedimentos para Caracterização e Qualificação de Módulos Fotovoltaicos. 2006, 140 f. Dissertação (Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia), Universidade de São Paulo. São Paulo.

Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). Global Status Report. Paris, 2017. Disponível em: < http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf >. Acesso em 17 jan. 2018.

RIBEIRO, I. P.; MATOS, F. F. S.; ALEXANDRIA, A. R. Avaliação Computacional da Influência da Temperatura na Potência de um Painel Fotovoltaico. *Conexões – Ciência e Tecnologia*, V. 10, N. 5, pp. 28 – 33, 2016.

RITZEN, Michiel Joep. Environmental Impact Assessment of Building Integrated Photovoltaics – Numerical and Experimental Carrying Capacity Based Approach. 2017, 217 f. Dissertação de Mestrado, Eindhoven University of Technology, Eindhoven.

ROSSO, A. P.; LUDKE, M. C.; RAMPINELLI, G. A.; MARCELINO, R.; GRUBER, V. Desenvolvimento e Ensaio de Módulos Fotovoltaicos Integrados em Revestimentos Cerâmicos. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, 2018.

ROUHOLAMINIA, A.; POURGHARIBSHAHIA, H.; FADAEINEDJADA, R.; ABDOLZADEHB. M. Temperature of a Photovoltaic Module Under the Influence of Different Environmental Conditions – Experimental Investigation. *International Journal of Ambient Energy*, V. 37, I. 3, pp. 266 - 272, 2016.

RÜTHER, R. Edifícios Solares Fotovoltaicos: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à rede Elétrica Pública no Brasil. 2004. 114 f. Florianópolis: Editora UFSC/LABSOLAR, 2004.

RÜTHER, R.; SALAMONI, I. O Potencial dos Setores Urbanos Brasileiros para Geração de Energia Solar Fotovoltaica de Forma Integrada às Edificações. *Fórum Patrimônio*, V. 4, N. 1, 2011, pp. 84 – 94.

SAHRI, A.; TOUMI, S.; RAMENAH, H.; TANOUGAST, C. Temperature Effects on the Power Production Based Photovoltaic Cells. In: *25th International Conference on Microelectronics (ICM)*, Beirut, Lebanon, 2013.

SANTOLIN, Edson Antonio. Aplicação de Sensores à Fibra Óptica no Monitoramento Térmico de Painel Fotovoltaico. 2016, 105 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco.

SCHAMS, B.; TAMIZHMANI, G. S. BAPV Modules with Different Air Gaps: Effect of Temperature on Relative Energy Yield and Lifetime. In *37th Photovoltaic Specialists Conference*, Seattle, Washington DC, United States, pp. 3213 – 3217, 2011.

SHAH, A.; TORRES, P.; TSCHARNER, R.; WYRSCH, N.; KEPPNER, H. Photovoltaic Technology: The Case for Thin Film Solar Cells. *Science* 30, V. 285, I. 5428, pp. 692 – 298, 1999.

SLAVIK, R.; CEKON, M. Study of Surface Temperature in the Field of Buildings. *Procedia Engineering*, V. 161, pp. 1135 – 1143, 2016.

SICK, E.; ERGE, T. *A Design Handbook for Architects and Engineers*. 1 St. ed. United Kingdom: Routledge, 1996.

SILVA, Bruno Phillip Alves da. Metodologia para Determinação de Temperatura em Painéis Fotovoltaicos por Meio de Termografica Quantitativa. 2017, 60 f. Dissertação (Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2017.

SILVESTRE, S. M. S.; PEREIRA, F. O. R. Avaliação da Irradiação Solar e do Potencial Fotovoltaico na Envoltória de Edifícios Residenciais. In: XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Maceió, Alagoas, pp. 3249 – 3258, 2014.

SINGH, P.; RAVINDRA, N. M. Temperature Dependence of Solar Cell Performance – An Analysis. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, V. 101, pp. 36 – 45, 2012.

Solar Power Europe. Global Market Outlook for Solar Power 2016-2020. Disponível em: < <https://resources.solarbusinesshub.com/solar-industry-reports/item/global-market-outlook-for-solar-power-2016-2020> >.

SOLIMAN, A. M. A.; HASSAN, H.; AHMED, M.; OOKAWARA, S. A 3D Model of the Effect of Using Heat Spreader on the Performance of Photovoltaic Panel (PV). *Mathematics and Computers in Simulation*, V. 157, pp. 1 – 14, 2018.

SOLOMON SYSTECH – Semiconductor Technical Data. SSD1306 (Display OLED). Disponível em: < <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf> >. Acesso em 04 abr 2018.

SOUZA, D.; LINS, A. E. B.; ELY, V. H. M. B. Projeções do Cenário Urbano: uma Análise para Insolação Através do *Software Cityzoom*. In: 13º Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Canela, Rio Grande do Sul, 2010.

Supervisório Telemetry Viewer. Disponível em: < <http://farrellf.com/TelemetryViewer/> >. Acesso em 30 mar 2018.

Texas Instruments – INA219 Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor with I2C Interface. Disponível em: < <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf> >. Acesso em 18 abr. 2018.

THOMAS, R.; GRAINER, T. Photovoltaic in Buildings - A Design Guide: Department of Trade and Industry. London, 1999.

TIAN, W.; WANG, Y.; REN, J.; ZHU, L. Effect of Urban Climate on Building Integrated Photovoltaics Performance. *Energy Conversion and Management*, V. 48, pp. 1 – 8, 2007.

TINA, G. M.; ABATE, R. Experimental Verification of Thermal Behavior of Photovoltaic Modules. IN: The 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Ajaccio, France, pp. 579 – 584, may 2008.

TINA, G. M.; SCROFANI, S. Electrical and Thermal Model for PV Module Temperature Evaluation. In: The 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Ajaccio, France, pp. 584 – 590, may 2008.

TOLEDO, C.; LÓPEZ, R. V.; ABAD, J. L.; URBINA, A. Y. Building Integrated Photovoltaics (BIPV) Vs. Building Attached Photovoltaics (BAPV): Balance Between Energy Production and Architectural Design. In: 20th International Congress on Project Management and Engineering, Cartagena, Colombia, pp. 1861 – 1869, 2016.

TRINURUK, P.; SORAPIPATANA, C.; CHENVIDHYA, D. Estimating Operating Cell Temperature of BIPV Modules in Thailand. *Renewable Energy*, V. 34, Issue 11, pp. 2515 - 2523, 2009.

U. S. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Total energy use in buildings: Analysis and evaluation methods, 2016. Disponível em: < http://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_PSR_Annex53.pdf >. Acesso em 22 jan. 2018.

VASEL, A.; IAKOVIDIS, F. The Effect of Wind Direction on the Performance of Solar PV Plants. *Energy Conversion and Management*, V. 153, pp. 455 – 461, 2017.

ZHOU, C.; LIANG, R.; ZHANG, J.; RIAZ, A. Experimental Study on Dynamic Thermal Response of Building Attached Photovoltaic (BAPV) Curtain Wall System. In: 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, 2017, Jinan, China. Published in *Procedia Engineering*, V. 2015, pp. 314 – 320, 2017.

ZHOU, J. C.; ZHANG, Z.; LIU, H. J.; YI, Q. Temperature Distribution and Back Sheet Role of Polycrystalline Silicon Photovoltaics Modules. *Applied Thermal Engineering*, V. 111, pp. 1296 – 1303, 2017.

Zomer, Clarissa Debiazi. Método de Estimativa da influência do Sombreamento Parcial na Geração Energética de Sistemas Solares Fotovoltaicos Integrados em edificações. 2014, 258 f. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Santa Catarina, 2014.

ZOMER, C. D.; COSTA, M. R.; NOBRE, A.; RÜTHER, R. Performance Compromises of Building-Integrated and Building-Applied Photovoltaics (BIPV and BAPV) in Brazilian Airports. *Energy and Buildings*, V. 66, pp. 607 – 615, 2013.

WANG, W.; LIU, Y.; WU, X.; XU, Y.; YU, W.; ZHAO, C.; ZHONG, Y. Environmental Assessments and Economic Performance of BAPV and BIPV Systems in Shanghai. *Energy Building*, V. 130, 2016, pp. 98 – 106.

WANG, Y; TIAN, W.; REN, J.; ZHU, L.; WANG, Q. Influence of a Building's Integrated Photovoltaics on Heating and Cooling Loads. *Applied Energy*, V. 83, pp. 989 -1003, 2006.

WEN, Z.; YUKUN, Z.; ZHE, L.; ZHENG, Z.; RUI, Z.; JIAXUAN, C. A Rapid Evaluation Method of Existing Building Applied Photovoltaic (BAPV) Potential. *Energy and Buildings*, V. 135, pp. 39 – 49, 2017.

WILCOX, John Robert. Solar Cell Temperature Dependent Efficiency and Very High Temperature Efficiency Limits. 2013, 304 p. Master's Dissertation. Faculty of Purdue University, West Lafayette, Indiana.

Anexos

I. Algoritmo desenvolvido em linguagem de programação C++ compatível com a plataforma Arduino

Utilizando a plataforma de acesso livre Arduino, foi desenvolvido para este trabalho um algoritmo programado em linguagem C++ adaptável ao microcontrolador Atmega328. Abaixo segue o código comentado.

```
#include <OLED_I2C.h> //inclusão da biblioteca do display OLED
#include <Adafruit_INA219.h> //inclusão da biblioteca para utilização do INA2019
#define OLED_RESET 4 // definindo o reset do display para 4
#define REF 1068.0 // Valor de referência para os cálculos da conversão AD (1068
representa o valor da referência interna de tensão em mV).

OLED display(SDA, SCL); // Inicializa a instância de comunicação com o display OLED
Adafruit_INA219 S1; // Inicializa a instância para o INA219 1 com o nome S1 (Sensor 1)
Adafruit_INA219 S2; // Inicializa a instância para o INA219 2 com o nome S2 (Sensor 2)
extern uint8_t SmallFont[]; // Importa as Fontes para o display OLED
float t1,t2,t3,t4, v1, v2, c1, c2; // Declara as variáveis globais do tipo float para os dados
de temperatura, corrente, tensão e corrente elétrica
long millis_; // Variável millis_ do tipo long para reter as informações de tempo.

void setup() {
  Serial.begin(38400); // Inicializa a comunicação serial com velocidade de 38400 bps
  S1.begin(0x40); // Inicializa o sensor S1 (INA) no endereço 0x40;
  S2.begin(0x41); // Inicializa o sensor S2 (INA) no endereço 0x41;
  display.begin(); // Inicializa o display OLED no endereço 0x3c (128x64, endereço padrão
  da biblioteca)
}
```

```

display.clrScr(); // Limpa o display após reiniciar o hardware
display.setFont(SmallFont); // Configura a fonte Small para escrita no display
display.update() // Aplica as alterações no display.
analogReference(INTERNAL); // Padroniza a referência interna da conversão AD para
a tensão de 1,1 V (Arduino Nano)
}
void loop()
{
if(millis()% 300000 ==0) // Executa o código dentro do if a cada 5 minutos)
{
millis_=millis(); // Guarda o valor atual de millis
V1= S1.getBusVoltage_V(); // Faz a leitura do valor de tensão do canal 1;
c1 = S1.getCurrent_mA(); // Faz a leitura do valor da corrente do canal 1;
v2 = S2.getBusVoltage_V(); // Faz a leitura do valor de tensão do canal 2;
c2 = S2.getCurrent_mA(); // Faz a leitura do valor da corrente do canal 2;
t1 = (analogRead(0)*(REF/1023))-500,0; // Calcula a temperatura 1
// Offset >> 0° = 500mV, escala >> 10mV = 1°, ou seja 725 mV é equivalente a (725 -
500)/10 = 22,5°C
t2 = (analogRead(1)*(REF/1023))-500,0; // Calcula a temperatura 2
t3 = (analogRead(2)*(REF/1023))-500,0; // Calcula a temperatura 3
t4 = (analogRead(3)*(REF/1023))-500,0; // Calcula a temperatura 4
exibe_dsp(); // Executa a função de exibição no display.
envia_dados(); // Envia os dados via Serial para o Software Telemetry ou Terminal do
Arduino.
}
}
void exibe_dsp()// Função para exibir as informações no display OLED
{
String var; // Variável do tipo String para guardar os textos a serem exibidos na tela
display.clrScr(); // Limpa o buffer da tela.

```

display.print("Measure:", CENTER, 0); // Imprime a mensagem no centro da tela na primeira linha (linha 0)

var = "V1: "+ String(v1); // Monta as mensagens de Tensão, Corrente, Potencia e temperatura para os dois sensores, o processo em cada linha é o mesmo. Conversão de string.

display.print(var, LEFT, 10); // posiciona cada variável em um lugar pré definido do display. São 6 linhas de informação por 2 colunas.

var = "C1: "+ String(c1,1);

display.print(var, LEFT, 20);

var = "P1: "+ String(p1,0);

display.print(var, LEFT, 30);

var = "T1: "+ String(t1,1);

display.print(var, LEFT, 40);

var = "T2: "+ String(t2,1);

display.print(var, LEFT, 50);

var = "V2: "+ String(v2);

display.print(var, RIGHT, 10);

var = "C2: "+ String(c2,1);

display.print(var, RIGHT, 20);

var = "P2: "+ String(p2,0);

display.print(var, RIGHT, 30);

var = "T3: "+ String(t3,1);

display.print(var, RIGHT, 40);

var = "T4: "+ String(t4,1);

display.print(var, RIGHT, 50);

display.update(); // Atualiza os dados no display.

}

void envia_dados() // Envia os dados pela comunicação serial.

{

String send_txt; // Cria variável do tipo string para transmitir os dados.

```
send_txt = v1; // Monta o frame de dados separado por virgula (Padrão de dados do
Telemetry).
send_txt += ",";
send_txt += c1;
send_txt += ",";
send_txt += v2;
send_txt += ",";
send_txt += c2;
send_txt += ",";
send_txt += t1;
send_txt += ",";
send_txt += t2;
send_txt += ",";
send_txt += t3;
send_txt += ",";
send_txt += t4;
Serial.println(send_txt); // Envia os dados com um \r \n no final.
}
```