

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA

CAMILA DE OLIVEIRA SILVEIRA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS À REDE ELÉTRICA COM DIFERENTES TECNOLOGIAS NO
ESTADO DO PARANÁ**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2020

CAMILA DE OLIVEIRA SILVEIRA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS
À REDE ELÉTRICA COM DIFERENTES TECNOLOGIAS NO ESTADO DO
PARANÁ**

**Performance Analysis of Grid Connected Photovoltaic Systems with Different
Technologies in the State of Paraná**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior.

CURITIBA

2020



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite o download e o compartilhamento da obra desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-la ou utilizá-la para fins comerciais.



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - CAMPUS CURITIBA
SECRETARIA GERAL DO STRICTO SENSU SEDE CENTRO - CT



TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 14

A Dissertação de Mestrado intitulada **Análise do Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica com Diferentes Tecnologias no Estado do Paraná**, defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Camila de Oliveira Silveira**, no dia 18 de setembro de 2020, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, área de concentração Automação e Sistemas de Energia, linha de pesquisa Processamento e Análise de Energia, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia.

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior / UTFPR

Prof. Dr. Jorge Assade Leludak / UTFPR

Prof. Dr. Wilson Negrão Macêdo / UFPA

Este Termo de Aprovação encontra-se na pasta do aluno na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação realizada após a entrega da versão final, incluindo correções necessárias, permitindo o encaminhamento para análise e publicação no Repositório Institucional.

Assinado eletronicamente por

Coordenador do Programa
OHARA KERUSAUSKAS RAYEL

Dedico à minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus pelo dom da vida e por me manter capacitada em realizar os meus estudos durante a minha caminhada.

Agradeço aos meus pais por me proporcionarem as oportunidades de estudo ao longo da minha vida e pelo incentivo à minha formação acadêmica.

Agradeço ao meu irmão por me motivar a seguir os meus objetivos e por todos os momentos descontraídos e alegres.

Agradeço aos demais familiares e amigos que estiveram presentes e me apoiaram nesta jornada.

Agradeço ao meu orientador por todos os ensinamentos e pela confiança depositada em meu trabalho.

Agradeço a todos os professores e colegas do LABENS, que contribuíram de forma positiva para o meu aprendizado.

Por fim, agradeço à UTFPR pelo apoio e infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento desta pesquisa e a COPEL-Distribuição pelo apoio e financiamento dos recursos para realização deste projeto de P&D "ANEEL PD 2866-0464/2017 - Metodologia Para Análise, Monitoramento e Gerenciamento da GD por Fontes Incentivadas".

RESUMO

SILVEIRA, Camila de Oliveira. **Análise do Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica com Diferentes Tecnologias no Estado do Paraná.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

O aproveitamento do potencial solar para geração de eletricidade depende das características técnicas dos equipamentos instalados e das particularidades do local de instalação. O projeto de pesquisa P&D firmado entre a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e a Companhia Paranaense de Energia (COPEL) permitiu a instalação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFVCR) com diferentes tecnologias nos câmpus Campo Mourão, Cornélio Procópio, Curitiba, Medianeira, Pato Branco e Ponta Grossa, localizados em distintas mesorregiões paranaenses. A escolha entre as diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos, bem como a disponibilidade de irradiação incidente no plano dos geradores fotovoltaicos são alguns dos fatores que determinam o desempenho da planta. Por meio de índices de mérito calculados com medições reais de geração de energia e radiação foi possível acompanhar e comparar o desempenho entre os sistemas implantados em cada câmpus. Em geral, os SFVCR de filmes finos apresentaram os melhores desempenhos em todos os câmpus, exceto em Cornélio Procópio, onde o sistema de m-Si foi superior ao de CIGS. Em relação à tecnologia de silício cristalino, o sistema de m-Si foi superior ao de p-Si em todos os casos, exceto em Campo Mourão. Dependendo da tecnologia, o fator de capacidade variou de 16,80% a 21,03%, enquanto a produtividade mensal oscilou entre 123,29 kWh/kWp e 153,89 kWh/kWp. Ambos os índices apresentaram maiores potenciais em Cornélio Procópio e Pato Branco. As taxas de desempenho foram em sua grande maioria superiores a 80%, concentrando os maiores valores em Medianeira para os SFVCR de filmes finos e em Cornélio Procópio para os SFVCR de silício cristalino. O período analisado oferece uma visão geral do comportamento relativo ao desempenho das plantas fotovoltaicas nas diferentes mesorregiões paranaenses.

Palavras-chave: Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede; Tecnologias fotovoltaicas; Desempenho; Índices de mérito; Paraná.

ABSTRACT

SILVEIRA, Camila de Oliveira. **Performance Analysis of Grid Connected Photovoltaic Systems with Different Technologies in the State of Paraná.** 2020. Dissertation (Master in Electrical Engineering) – Federal Technological University of Parana. Curitiba, 2020.

The use of the solar potential for electricity generation depends on the technical characteristics of the installed equipment and the particularities of the installation site. The R&D research project signed between the Federal Technological University of Paraná (UTFPR) and Paraná Company of Energy (COPEL) allowed the installation of Grid Connected Photovoltaic Systems (GCPVS) for different technologies in the campuses Campo Mourão, Cornélio Procópio, Curitiba, Medianeira, Pato Branco and Ponta Grossa, located in different mesoregions of Paraná. The choice between the different technologies of photovoltaic modules, as well as the availability of radiation incident in the plan of the photovoltaic generators are some of the factors that determine the performance of the plant. Through figures of merit calculated with real measurements of power generation and radiation, it was possible to monitor and compare the performance between the systems implanted in each campus. In general, the GCPVS of thin film technologies showed the best performances in all campuses, except in Cornélio Procópio, where the system of m-Si was superior of CIGS. Regarding crystalline silicon technology, the system of m-Si was superior to p-Si in all cases, except in Campo Mourão. Depending on the technology, the capacity factor varied from 16.80% to 21.03%, while the monthly productivity ranged between 123.29 kWh/kWp and 153.89 kWh/kWp. Both indexes had higher potentials in Cornélio Procópio and Pato Branco. The performance ratios were mostly greater than 80%, concentrating the highest values in Medianeira for thin films' GCPVS and in Cornélio Procópio for the crystalline silicon. The analyzed period offers an overview of the behavior related to the performance of photovoltaic plants in the different regions of Paraná.

Keywords: Grid Connected Photovoltaic Systems; Photovoltaic technologies; Performance; Figures of merit; Paraná.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição do espectro eletromagnético.....	28
Figura 2 – Representação das componentes da radiação solar.....	29
Figura 3 – Mapa da irradiação global horizontal do Paraná: destaque para as localidades onde estão instalados os SFVCR.....	32
Figura 4 - Mapa da irradiação no plano inclinado da latitude do Paraná: destaque para as localidades onde estão instalados os SFVCR.	33
Figura 5 – Representação do efeito fotovoltaico.	34
Figura 6 – Hierarquia do processo de agrupamento: célula, módulo e painel fotovoltaico.....	35
Figura 7 – Simbologia de um módulo fotovoltaico.	35
Figura 8 – Evolução da produção de módulos fotovoltaicos.....	36
Figura 9 – Comparativo da produção de módulos fotovoltaicos em 2019.....	37
Figura 10 – Comparativo da produção de módulos de filmes finos em 2019.....	37
Figura 11 – Geometria das células fotovoltaicas de silício monocristalino. Da esquerda para a direita: quadrada com as arestas levemente aparadas, quadrada com as arestas aparadas, e redonda.	39
Figura 12 – Tecnologia m-Si: a) módulo fotovoltaico; b) painel fotovoltaico.	40
Figura 13 – Célula fotovoltaica de silício policristalino.....	40
Figura 14 – Tecnologia p-Si: a) módulo fotovoltaico; b) painel fotovoltaico.	41
Figura 15 – Tecnologia CIGS: a) módulo fotovoltaico; b) painel fotovoltaico.	41
Figura 16 – Tecnologia CdTe: a) módulo fotovoltaico; b) painel fotovoltaico.	42
Figura 17 – Representação de funcionamento de um SFVCR.....	45
Figura 18 - Capacidade mundial instalada de sistemas fotovoltaicos.....	46
Figura 19 - Capacidade mundial de sistemas fotovoltaicos e suas respectivas adições em 2019.....	47
Figura 20 - SFVCR e estações solarimétricas da EPESOL Curitiba. As quatro fileiras de painéis fotovoltaicos correspondem às tecnologias de: m-Si, p-Si, CIGS e CdTe.	56
Figura 21 - Vista superior dos câmpus onde estão localizadas as EPESOL: a) Campo Mourão; b) Cornélio Procópio; c) Curitiba; d) Medianeira; e) Pato Branco; f) Ponta Grossa.....	57
Figura 22 – Estação SONDA à esquerda e estação EPE à direita.....	58

Figura 23 – Piranômetros instalados na posição horizontal e inclinada, destacados em azul e vermelho, respectivamente: a) CMP10; b) CMP6.	61
Figura 24 – Sensor de temperatura preso na parte traseira do módulo fotovoltaico.	63
Figura 25 - Sombreamento nos módulos de m-Si às 7:39h.....	95
Figura 26 – Fim do sombreamento nos módulos de m-Si às 8:09h.....	95
Figura 27 – Fator de capacidade médio para o período analisado dos SFVCR com diferentes tecnologias nas seis mesorregiões paranaenses.....	116
Figura 28 – Produtividade média em kWh/kWp para o período analisado dos SFVCR com diferentes tecnologias nas seis mesorregiões paranaenses.	117
Figura 29 – Taxa de desempenho média para o período analisado dos SFVCR com diferentes tecnologias nas seis mesorregiões paranaenses.....	122

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Capacidade de microgeração e minigeração distribuída por SFVCR no Brasil.....	48
Gráfico 2 - Capacidade de microgeração e minigeração distribuída por SFVCR no Paraná.	49
Gráfico 3 – Capacidade acumulada de microgeração e minigeração distribuída por SFVCR nas cidades que contêm EPESOL.	50
Gráfico 4 - Geração de energia dos SVFCR e valores de irradiação disponíveis na EPESOL CM.	76
Gráfico 5 - Fator de capacidade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CM.	77
Gráfico 6 - Produtividade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CM.	78
Gráfico 7 – Taxa de desempenho mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CM.	79
Gráfico 8 - Temperatura média nos painéis fotovoltaicos na EPESOL CM.	80
Gráfico 9 - Geração de energia dos SVFCR e valores de irradiação disponíveis na EPESOL CP.....	82
Gráfico 10 – Fator de capacidade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CP.....	83
Gráfico 11 – Produtividade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CP.....	84
Gráfico 12 – Taxa de desempenho mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CP.....	86
Gráfico 13 - Temperatura média nos painéis fotovoltaicos na EPESOL CP.	86
Gráfico 14 - Geração de energia dos SVFCR e valores de irradiação disponíveis na EPESOL CT.....	88
Gráfico 15 - Fator de capacidade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CT.....	89
Gráfico 16 - Produtividade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CT.....	90
Gráfico 17 – Taxa de desempenho mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CT.....	91

Gráfico 18 - Temperatura média nos painéis fotovoltaicos na EPESOL CT.	92
Gráfico 19 – Curva da potência CA no início do dia 21/06/2020.	94
Gráfico 20 - Geração de energia dos SVFCR e valores de irradiação disponíveis na EPESOL MD.	97
Gráfico 21 - Fator de capacidade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL MD.	97
Gráfico 22 - Produtividade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL MD.	98
Gráfico 23 – Taxa de desempenho mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL MD.	100
Gráfico 24 - Temperatura média nos painéis fotovoltaicos na EPESOL MD.	101
Gráfico 25 - Geração de energia dos SVFCR e valores de irradiação disponíveis na EPESOL PB.	103
Gráfico 26 - Fator de capacidade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL PB.	103
Gráfico 27 - Produtividade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL PB.	104
Gráfico 28 – Taxa de desempenho mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL PB.	106
Gráfico 29 - Temperatura média nos painéis fotovoltaicos na EPESOL PB.	107
Gráfico 30 - Geração de energia dos SVFCR e valores de irradiação disponíveis na EPESOL PG.	108
Gráfico 31 – Fator de capacidade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL PG.	109
Gráfico 32 – Produtividade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL PG.	110
Gráfico 33 - Taxa de desempenho mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL PG.	112
Gráfico 34 - Temperatura média nos painéis fotovoltaicos na EPESOL PG.	113
Gráfico 35 – Curva de irradiação em Campo Mourão em 10/03/2020.	118
Gráfico 36 - Curva da potência de saída dos geradores fotovoltaicos em Campo Mourão em 10/03/2020.	118
Gráfico 37 - Curva da potência de saída do gerador fotovoltaico de CIGS em Campo Mourão em 10/03/2020.	119

Gráfico 38 - Curva de irradiância em Campo Mourão em 19/05/2020.....	120
Gráfico 39 – Curva da potência de saída do gerador fotovoltaico de CIGS em 19/05/2020.....	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos SFVCR.....	43
Quadro 2 – Comparação do desempenho entre as diferentes tecnologias de SFVCR.	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de irradiação global horizontal média diária anual nas cidades onde estão localizadas as EPESOL.....	32
Tabela 2 - Valores de irradiação no plano inclinado da latitude média diária anual nas cidades onde estão localizadas as EPESOL.	33
Tabela 3 - Eficiências de diferentes tecnologias de células e módulos fotovoltaicos em laboratório.	38
Tabela 4 - Capacidade atual e prevista de geração por usinas fotovoltaicas de geração centralizada.	49
Tabela 5 – Produtividades anuais nas cidades que contêm EPESOL.....	53
Tabela 6 – Orientação geográfica das EPESOL.	55
Tabela 7 - Estações solarimétricas presentes em cada EPESOL.	58
Tabela 8 – Especificações elétricas dos módulos fotovoltaicos em condições STC.	59
Tabela 9 – Especificações elétricas dos inversores.	60
Tabela 10 – Especificações elétricas dos piranômetros CMP6 e CMP10.....	62
Tabela 11 – Cronograma de acesso e análise dos dados de geração de energia....	65
Tabela 12 – Cronograma de acesso e análise dos dados de irradiância.....	67
Tabela 13 – Distância das EMA do INMET mais próximas dos EPESOL.....	68
Tabela 14 – Diferença percentual atribuída no cálculo da irradiação.	71
Tabela 15 – Variação percentual entre os valores calculados e os apresentados no Atlas para a EPESOL CM.	78
Tabela 16 – Comparação de desempenho mensal para as diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CM.	80
Tabela 17 – Variação percentual entre os valores calculados e os apresentados no Atlas para a EPESOL CP.....	85
Tabela 18 – Comparação de desempenho mensal para as diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CP.....	87
Tabela 19 – Variação percentual entre os valores calculados e os apresentados no Atlas para a EPESOL CT.....	90
Tabela 20 – Comparação de desempenho mensal para as diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CT.....	93
Tabela 21 – Variação percentual entre os valores calculados e os apresentados no Atlas para a EPESOL MD.	99

Tabela 22 – Comparação de desempenho mensal para as diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL MD.	101
Tabela 23 – Variação percentual entre os valores calculados e os apresentados no Atlas para a EPESOL PB.	105
Tabela 24 – Comparação de desempenho mensal para as diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL PB.	107
Tabela 25 – Variação percentual entre os valores calculados e os apresentados no Atlas para a EPESOL PG.	111
Tabela 26 – Comparação de desempenho mensal para as diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL PG.	113
Tabela 27 – Comparação dos parâmetros diários medidos e calculados.	121

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira De Normas Técnicas
AM	<i>Air Mass</i> (Massa de Ar)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CM	Campo Mourão
CONFAZ	Conselho Nacional de Política Fazendária
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CP	Cornélio Procópio
CT	Curitiba
DGS	<i>Deutsche Gesellschaft fur Sonnenenergie</i>
EMA	Estação Meteorológica Automática
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPESOL	Estação de Pesquisa em Energia Solar
EPIA	<i>European Photovoltaic Industry Association</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISE	<i>Institute for Solar Energy Systems</i>
LABENS	Laboratório de Energia Solar da UTFPR
LABREN	Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia
LABSOL	Laboratório de Energia Solar da UFRGS
MD	Medianeira
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
PB	Pato Branco
PERC	<i>Passivated Emitter Rear Contact</i>
PG	Ponta Grossa
PVPS	<i>Photovoltaic Power Systems Programme</i>

REN21	<i>Renewable Energy Policy Network for the 21st Century</i>
RS-485	<i>Recommendad Standart – 485</i>
SFVCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica
SFVI	Sistema Fotovoltaico Isolado
SIGA	Sistema de Informações de Geração da ANEEL
SIN	Sistema Interligado Nacional
SONDA	Sistema de Organização de Dados Ambientais
SRE	<i>Standard Reference Environment</i> (Padrão de Referência do Ambiente)
STC	<i>Standard Test Conditions</i> (Condições Padrão de Ensaio)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
μm	Micrômetro
CdS	Sulfeto de Cádmió
CdTe	Telureto de Cádmió
CIGS	Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio
E	Energia Gerada
FC	Fator de Capacidade
G	Irradiância Global Horizontal
G ₀	Irradiância Extraterrestre
G _{dif}	Irradiância Difusa
G _{dir}	Irradiância Direta Horizontal
G _n	Irradiância Direta Normal
G _i	Irradiância no Plano Inclinado
G _{tot}	Irradiância Total
GWp	Giga Watt pico
H	Irradiação Global Horizontal em um dia
H _{dif}	Irradiação Difusa em um dia
H _{dir}	Irradiação Direta Horizontal em um dia
H _n	Irradiação Direta Normal em um dia
H _i	Irradiação no Plano Inclinado em um dia
H _{tot}	Irradiação Total em um dia
I	Irradiação Global Horizontal em uma hora
I _{dif}	Irradiação Difusa em uma hora
I _{dir}	Irradiação Direta Horizontal em uma hora
I _n	Irradiação Direta Normal em uma hora
I _i	Irradiação no Plano Inclinado em uma hora
I _{tot}	Irradiação Total em uma hora
kWp	Kilo Watt pico
kWh/m ² .ano	Kilo Watt hora por metro ao quadrado ao ano
kWh/kWp.ano	Kilo Watt hora por kilo Watt pico ao ano
MWp	Mega Watt pico

m ²	Metro ao quadrado
m-Si	Silício Monocristalino
N.D.	Não disponível
nm	Nanômetro
P _{FV}	Potência Nominal do SFVCR
PR	Taxa de Desempenho ou <i>Performance Ratio</i>
p-Si	Silício Policristalino
TWp	Tera Watt Pico
V	Volts
Y _f	Produtividade Final ou <i>Final Yield</i>
Y _r	Produtividade de Referência ou <i>Reference Yield</i>
Wh	Watt hora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	TEMA	21
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA	23
1.3	PROBLEMA	24
1.4	OBJETIVOS	25
1.4.1	Objetivo Geral	25
1.4.2	Objetivos Específicos	25
1.5	JUSTIFICATIVA	26
1.6	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	26
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO	27
2	REVISÃO DA LITERATURA	28
2.1	CONCEITOS DE RADIAÇÃO SOLAR	28
2.1.1	Irradiância	30
2.1.2	Irradiação	31
2.2	CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	34
2.2.1	Efeito Fotovoltaico	34
2.2.2	Tecnologias de Células Fotovoltaicas	35
2.2.2.1	Silício monocristalino	39
2.2.2.2	Silício policristalino	40
2.2.2.3	Disseleneto de cobre, índio e gálio	41
2.2.2.4	Telureto de cádmio	42
2.3	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	42
2.3.1	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica	44
2.4	PANORAMA DA CAPACIDADE INSTALADA DE SFVCR	46
2.4.1	Cenário Mundial	46
2.4.2	Cenário Brasileiro	48
2.4.3	Cenário Paranaense	49
2.5	DESEMPENHO DE SFVCR	51
2.5.1	Fator de Capacidade de um SFVCR	52
2.5.2	Produtividade de um SFVCR	53
2.5.3	Taxa de Desempenho de um SFVCR	54
3	AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS DAS EPESOL DA UTFPR	55

3.1	EPESOL	55
3.2	AQUISIÇÃO DE DADOS	59
3.2.1	SFVCR	59
3.2.2	Estações Solarimétricas	61
3.2.3	Sensores de Temperatura	63
3.3	TRATAMENTO DE DADOS	64
3.3.1	Geração de Energia	64
3.3.2	Irradiação	66
3.3.3	Temperatura nos Painéis Fotovoltaicos	72
4	CARACTERIZAÇÃO E DESEMPENHO DOS SFVCR	75
4.1	CAMPO MOURÃO	76
4.2	CORNÉLIO PROCÓPIO	81
4.3	CURITIBA	87
4.4	MEDIANEIRA	96
4.5	PATO BRANCO	102
4.6	PONTA GROSSA	108
5	RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE AS EPESOL	115
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	124
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	127
	REFERÊNCIAS	128
	APÊNDICE A – DISPONIBILIDADE DIÁRIA DE ACESSO AOS DADOS DOS EQUIPAMENTOS DAS EPESOL	135
	APÊNDICE B – DISPONIBILIDADE DIÁRIA DE ACESSO AOS DADOS DE IRRADIÂNCIA DAS ESTAÇÕES SONDA, EPE E EMA DO INMET	141
	APÊNDICE C – DISPONIBILIDADE DIÁRIA DE ACESSO AOS DADOS DOS SENSORES DE TEMPERATURA	144

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o tema do trabalho proposto, bem como os problemas e as justificativas que motivaram o seu desenvolvimento. Também são apresentados os objetivos a serem alcançados, a metodologia utilizada e a estrutura que o documento está redigido.

1.1 TEMA

A constante preocupação com a preservação do meio ambiente aliada a busca pela diversificação da matriz elétrica e o crescente aumento da demanda por energia, impulsionou a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis (NASCIMENTO, 2017). O desenvolvimento de parques geradores que contam com a participação de energias limpas no Brasil e no mundo contribuem para a redução da emissão de gases poluentes e de combustíveis fósseis para a geração de eletricidade (BRASIL, 2018d).

O Brasil possui ampla extensão territorial e grande incidência solar, apresentando índices de irradiação elevados assim como Alemanha, Espanha, Itália, Portugal e França, onde estudos para aproveitamento de energia solar foram amplamente disseminados e projetos continuam sendo implantados (PEREIRA et al., 2017). O uso das tecnologias que utilizam o Sol como fonte primária para geração de energia elétrica, especialmente a fotovoltaica, tem crescido substancialmente nos últimos anos. A Ásia é o continente que apresenta o maior crescimento de energia fotovoltaica desde 2013, sendo responsável por 68% do aumento da capacidade instalada mundial em 2019. Ao final deste mesmo ano havia capacidade suficiente em operação para produzir cerca de 2,8% da geração global anual de eletricidade (REN21, 2020).

A geração fotovoltaica pode estar presente de forma centralizada, como em usinas de grande porte, ou de forma distribuída, integrada em telhados e coberturas de edificações, por exemplo, através de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFVCR). O cenário da geração distribuída atingiu crescimento exponencial em 2016, com a expressiva redução dos custos de geradores solares fotovoltaicos. Neste sentido, a oferta desta tecnologia através das concessionárias distribuidoras de

energia elétrica deve tomar um grande impulso no país à medida que os benefícios vão sendo compreendidos pelo setor (PEREIRA et al., 2017).

Visando explorar o potencial de energia solar no Brasil, algumas políticas públicas foram implementadas devido a necessidade de impulsionar o desenvolvimento desta forma sustentável de energia. A Resolução Normativa 482 de 2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, por meio da compensação de energia elétrica. Esta medida permite que a energia ativa gerada possa ser cedida à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa pelo mesmo proprietário da unidade consumidora onde os créditos foram gerados (BRASIL, 2012). Em 2016, a Resolução Normativa 687 de 2015 entrou em vigor, tornando o sistema de compensação mais abrangente. Denominou-se microgeração distribuída por fonte solar qualquer central geradora com potência instalada de até 75 kWp, e minigeração, aquela com potência acima de 75 kWp e menor ou igual a 5 MWp. Implantou-se também a modalidade de autoconsumo remoto, onde um consumidor pode abater o valor do consumo em outra unidade consumidora, desde que seja atendida pela mesma distribuidora. Caso a geração de energia elétrica seja maior que o consumo, a unidade consumidora ficará com créditos de energia com um prazo de 60 meses de validade (BRASIL, 2015).

Em 2018, o Convênio ICMS 42/18 autorizou a aderência do estado do Paraná às disposições do Convênio ICMS 16/15 do Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ)¹, considerando que a maioria dos estados brasileiros já o haviam aderido em anos anteriores. Tal medida possibilita a isenção de impostos incidentes sobre o fornecimento de energia elétrica ao proprietário das unidades consumidoras de microgeração e minigeração distribuída, tornando o investimento de SFVCR mais atrativo (BRASIL, 2018b).

O SFVCR é composto basicamente pelo painel fotovoltaico e um inversor. As células fotovoltaicas que compõem os módulos para a fabricação dos painéis são classificadas de acordo com as tecnologias empregadas. Destacam-se entre elas o silício cristalino, classificado em monocristalino (m-Si) e policristalino (p-Si), e os filmes

¹ Órgão responsável por celebrar convênios para efeito de concessão ou revogação de isenções, incentivos e benefícios fiscais e financeiro do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) (BRASIL, 2018a).

finos, os quais podem ser fabricados por diversos tipos de materiais, dentre eles o disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e o telureto de cádmio (CdTe) (RÜTHER, 2004).

Em termos de viabilidade econômica e energética, é importante verificar a eficiência de conversão de energia solar em elétrica para cada tecnologia de células fotovoltaicas. Além disso, a localidade geográfica onde o SFVCR está inserido, as condições de instalação, bem como os índices de irradiação no local são fundamentais para garantir um bom desempenho do sistema.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Esta pesquisa consiste no estudo dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica compostos pelas tecnologias de m-Si, p-Si, CIGS e CdTe. Por meio do projeto de P&D “PD 2866-0464/2017 - Metodologia Para Análise, Monitoramento e Gerenciamento da GD por Fontes Incentivadas” da Companhia Paranaense de Energia (COPEL)², foram instaladas Estações de Pesquisa em Energia Solar (EPESOL) nos câmpus Campo Mourão, Cornélio Procópio, Curitiba, Medianeira, Pato Branco e Ponta Grossa da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Cada EPESOL contém pelo menos uma estação solarimétrica padrão Sistema de Organização de Dados Ambientais (SONDA) ou Empresa de Pesquisa Energética (EPE), além de SFVCR com diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos. No período de outubro de 2019 a setembro de 2020 foram analisados os desempenhos dos SFVCR de cada EPESOL. A análise foi realizada com a coleta de dados de geração de energia dos sistemas, bem como de radiação solar provenientes de piranômetros situados nas estações solarimétricas. A temperatura nos módulos de fotovoltaicos também será analisada para verificar quais os seus impactos no desempenho dos sistemas. Os resultados foram confrontados a fim de comparar os desempenhos entre as diferentes tecnologias e determinar qual delas é a mais eficiente em determinada região do estado.

² Concessionária de energia elétrica de maior representatividade no Paraná. A Companhia atende diretamente cerca de 4,6 milhões de unidades consumidoras distribuídas em 394 municípios, sendo 3,8 milhões de residências, 73 mil indústrias, 405 mil estabelecimentos comerciais e 351 mil propriedades rurais (COPEL, 2019).

1.3 PROBLEMA

A matriz elétrica brasileira é representada majoritariamente por usinas hidrelétricas devido ao grande potencial hídrico presente no país. Embora a oferta de energia elétrica proveniente de recursos hídricos tenha uma grande representatividade, cuja participação é equivalente à 64,9% no cenário nacional, ela apresenta dificuldades de expansão de caráter socioambiental e financeiro causados sobretudo pelas longas linhas de transmissão (BRASIL, 2018d, 2020a).

O consumo de energia elétrica no Brasil atingiu 626,3 TWh em 2019, sendo 4,1% superior ao ano anterior (BRASIL, 2020a). Estima-se que até 2050 a projeção de consumo sofra um aumento de 3,1% ao ano (BRASIL, 2016). Como alternativa, a geração de energia solar por meio de sistemas fotovoltaicos pode auxiliar no suprimento dessa demanda.

Em 2019 a fonte solar caracterizou 1,0% na oferta interna de energia elétrica por fonte solar na matriz elétrica brasileira e 1,5% de participação na capacidade instalada (BRASIL, 2020a). O acesso ao setor fotovoltaico possibilita a geração distribuída de eletricidade para consumo próprio e contribui para a redução de perdas no Sistema Interligado Nacional (SIN), reduzindo a distância entre as plantas de geração e a unidade consumidora (PEREIRA et al., 2017).

Em função do grande aproveitamento do potencial solar para geração de eletricidade e a crescente expansão da indústria fotovoltaica no mercado mundial, o dimensionamento de SFVCR depende do conhecimento das características das células fotovoltaicas, possibilitando o comissionamento e a detecção de erros a fim de aumentar a confiabilidade do sistema (ZILLES et al., 2012).

Os índices de eficiência de conversão de energia de uma célula fotovoltaica têm grande relevância em análises de desempenho de um SFVCR. Entretanto as perdas que ocorrem durante este processo de conversão, especialmente as causadas por temperatura, impactam significativamente nos resultados obtidos. Os módulos de silício cristalino estão sujeitos a apresentar um menor desempenho quando expostos a uma temperatura ambiente superior à 25 °C, entretanto, as tecnologias de filmes finos são menos suscetíveis a esta situação (TIEPOLO et al., 2017).

Neste contexto, a geração de energia de um SFVCR está intimamente relacionada às condições de instalação do sistema, capacidade instalada e tecnologia que os módulos fotovoltaicos são compostos. A análise de desempenho dos sistemas

implementados nos câmpus da UTFPR permite determinar e comparar o desempenho das tecnologias instaladas.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Analisar o desempenho de SFVCR com diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos situados em distintas mesorregiões paranaenses.

1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para a realização deste trabalho estão elencados em:

- a) apresentar a revisão da literatura sobre conceitos de radiação solar, tecnologias de células fotovoltaicas, sistemas fotovoltaicos, índices de mérito, capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos no mundo, no Brasil e, mais especificamente, nas cidades do Paraná onde estão instaladas as EPESOL;
- b) apresentar as EPESOL implantadas no seis câmpus da UTFPR;
- c) identificar os dias com falhas na coleta de dados;
- d) verificar a geração de energia dos SFVCR;
- e) calcular os valores de irradiação com base nas estações solarimétricas SONDA e EPE;
- f) calcular a diferença percentual entre a estação SONDA/EPE e a respectiva Estação Meteorológica Automática (EMA) do INMET mais próxima;
- g) comparar os valores de irradiação e produtividade com os índices apresentados no Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná;
- h) verificar a temperatura nos módulos fotovoltaicos;
- i) calcular os índices de mérito por meio de medições reais dos SFVCR nas cidades que representam as seis mesorregiões paranaenses;
- j) determinar qual SFVCR apresenta o melhor desempenho em cada EPESOL.

1.5 JUSTIFICATIVA

Até 2029, a projeção da capacidade instalada da microgeração e minigeração distribuída com aproveitamento solar fotovoltaico no âmbito da Resolução Normativa 482 será de aproximadamente 10 GWp. Neste mesmo ano, a fonte solar quando comparada às fontes hidrelétrica, termelétrica e eólica, corresponderá a 63% da energia gerada e 86% da capacidade instalada no cenário da microgeração e minigeração distribuída no âmbito da Resolução Normativa 482 (BRASIL, 2020b).

Segundo Tiepolo et al. (2017), o estado do Paraná apresenta bons índices de irradiação solar, favorecendo a instalação de sistemas fotovoltaicos. Em relação à orientação voltada ao norte geográfico, a média anual da irradiação global horizontal no estado é 1.705 kWh/m² e a média anual da irradiação no plano inclinado igual a latitude é 1.789 kWh/m². A produtividade analisada no plano inclinado apresenta média anual de 1.432 kWh/kWp e reforça o potencial da geração fotovoltaica no território paranaense, indicando a viabilidade energética da instalação de SFVCR no estado.

Diante do cenário favorável para instalação dos sistemas fotovoltaicos e a necessidade de ser amplamente explorado, este trabalho apresenta um acompanhamento da operação de SFVCR com diferentes tecnologias nos câmpus Campo Mourão, Cornélio Procopio, Curitiba, Medianeira, Pato Branco e Ponta Grossa da UTFPR. Serão analisados os dados de geração de energia elétrica desde o início de operação de cada sistema e os seus índices de mérito, denominados: Fator de Capacidade, Produtividade e Taxa de Desempenho. Tais índices permitem a comparação entre os sistemas, os quais podem variar de acordo com a disponibilidade do recurso solar na localidade de instalação e da tecnologia empregada. Com base nas informações obtidas através deste estudo, foi possível identificar o potencial da geração fotovoltaica por diferentes tecnologias no Paraná.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A primeira etapa para elaborar esta dissertação é a realização de uma pesquisa bibliográfica com o propósito de buscar, de forma mais detalhada, o conhecimento acerca do estudo da energia solar fotovoltaica. A etapa seguinte é a realização da coleta mensal dos dados de radiação solar das estações solarimétricas

SONDA e EPE e, concomitantemente, dos dados de geração de energia de cada tecnologia dos SFVCR. Com os dados reais de geração de energia mensal e dos valores de irradiação, são calculados os índices de mérito. A análise de desempenho permite um estudo comparativo do fator de capacidade, da produtividade e da taxa de desempenho entre as tecnologias vinculadas ao SFVCR nas diferentes EPESOL e que, de forma geral, representam diferentes microclimas no estado do Paraná. Com isto, ao fim da pesquisa, pretende-se apontar qual tecnologia apresenta melhor desempenho nas variadas regiões analisadas e registrar as conclusões deste estudo.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

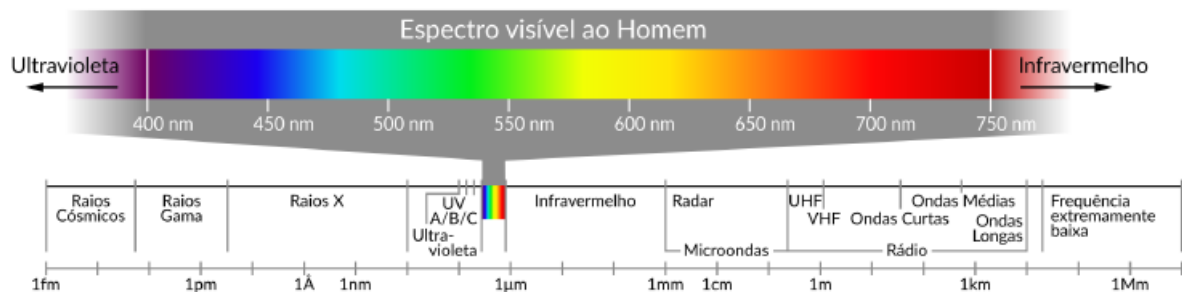
Este trabalho está organizado em 6 capítulos, sendo esta Introdução o primeiro deles. No Capítulo 2 é abordada a revisão da literatura sobre conceitos de radiação solar, tecnologias de células fotovoltaicas, sistemas fotovoltaicos, índices de mérito, bem como a capacidade instalada de SFVCR no mundo, no Brasil e no estado do Paraná. No Capítulo 3 são apresentadas as EPESOL, bem como a metodologia empregada para a aquisição e o tratamento dos dados de geração de energia, radiação e temperatura. No Capítulo 4 são expostos os resultados dos índices de mérito de cada EPESOL, calculados com base em medições reais dos SFVCR. No Capítulo 5 são discutidas as análises de desempenho dos SFVCR e identificadas quais tecnologias são mais vantajosas em cada EPESOL, além de apresentar qual localidade do Paraná é a mais adequada para a instalação de SFVCR de acordo com os cálculos dos índices de mérito provenientes do capítulo anterior. Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais obtidas a partir dos dados gerados por este trabalho, além de sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CONCEITOS DE RADIAÇÃO SOLAR

A energia proveniente do Sol é uma fonte inesgotável de energia e cobre uma ampla faixa do espectro eletromagnético ilustrado na Figura 1, no qual existem algumas parcelas que podem ser captadas pelo homem sob luz visível. Os comprimentos de onda que variam de 400 nm à 750 nm são perceptíveis aos seres humanos, enquanto os demais não são sensíveis ao olhar humano, como o ultravioleta e o infravermelho. A energia responsável por alimentar os processos naturais e/ou artificiais do sistema Terra/atmosfera corresponde a aproximadamente 81% do espectro da luz visível ao homem até ao infravermelho próximo (PEREIRA et al., 2017).

Figura 1 – Composição do espectro eletromagnético.



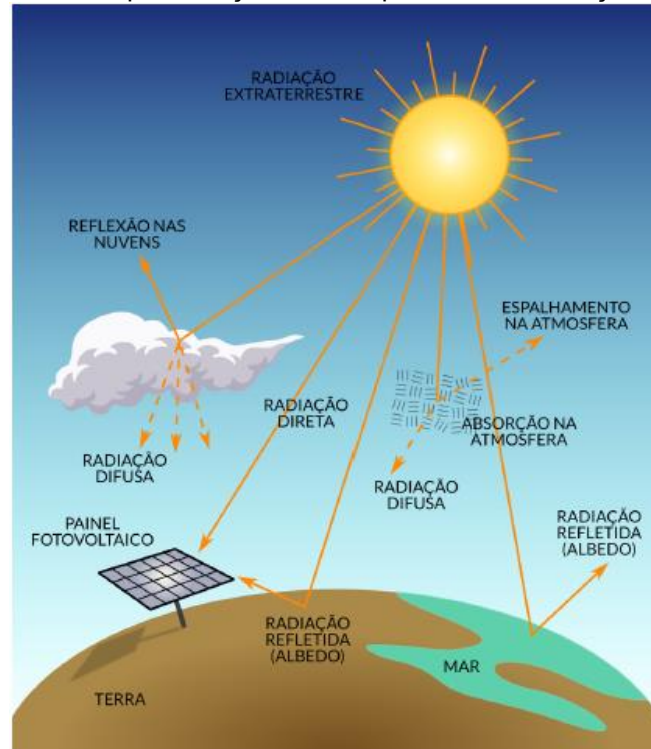
Fonte: Pereira et al. (2017).

Dentre os processos artificiais, aliados com o desenvolvimento científico e tecnológico, enquadra-se a geração fotovoltaica de eletricidade por meio do efeito fotovoltaico. Este processo está associado a uma corrente elétrica e a uma diferença de potencial de um material semiconductor exposto à radiação eletromagnética, convertendo diretamente a energia correspondente ao espectro visível em energia elétrica (PEREIRA et al., 2017; PINHO E GALDINO, 2014).

A energia solar incide na superfície da Terra sob diferentes comprimentos de onda de radiação que, ao entrar em contato com a atmosfera, sofrem processos de reflexão, absorção e espalhamento. Tais fenômenos são influenciados por fatores astronômicos e físicos que estabelecem a variabilidade e a redução da intensidade da energia ao longo do percurso, como por exemplo as estações do ano. Sendo assim, a radiação solar total é composta por até três componentes classificadas em direta,

difusa e refletida devida ao albedo, conforme ilustra a Figura 2 (PEREIRA et al., 2017; TIEPOLO et al., 2017).

Figura 2 – Representação das componentes da radiação solar.



Fonte: Tiepolo et al. (2017).

A radiação direta é a componente da radiação solar que chega à superfície terrestre sem sofrer desvios causados pela atmosfera em sua trajetória. Esta parcela terá intensidade variável conforme a posição do Sol ao longo do dia e do ano. Já a radiação difusa ocorre devido ao espalhamento de moléculas, aerossóis e nuvens a partir de todas as direções. A porcentagem de radiação difusa que chega à superfície da Terra é cerca de 20% em dias claros e sem nuvens, podendo chegar até 100% em dias totalmente nublados. Caso a superfície esteja inclinada em relação à horizontal, deverá levar-se em conta o seu coeficiente de reflexão, denominado albedo. Haverá então, uma terceira componente refletida pelo ambiente do entorno, isto é, a radiação refletida devida ao albedo (TIEPOLO et al., 2017; PINHO E GALDINO, 2014; VIANA, 2010).

A expressão radiação solar pode ser referenciada em termos de fluxo de potência ou em termos de energia por unidade de área, recebendo assim as denominações de irradiância e irradiação, respectivamente (PINHO E GALDINO, 2014).

2.1.1 Irradiância

Segundo Duffie e Beckman (2013), a irradiância solar é a taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície. Esta grandeza é simbolizada por G e é expressa na unidade $[W/m^2]$, podendo se apresentar das seguintes maneiras conforme a NBR 10899 (ABNT, 2013):

- a) irradiância global horizontal (G_{HOR}): é a taxa de energia total por unidade de área resultante da soma das componentes difusa e direta horizontal;
- b) irradiância no plano inclinado na latitude (G_{TOT}): é a taxa de energia total por unidade de área resultante da soma das componentes direta, difusa e de albedo, incidente sobre um plano inclinado na latitude do local em relação à superfície terrestre.
- c) irradiância direta (G_{DIR}): é a taxa de energia por unidade de área que não sofreu os processos radiativos de absorção e espalhamento que ocorrem na atmosfera, podendo ser normal ou horizontal. A normal incide perpendicularmente à superfície e a horizontal incide diretamente numa superfície horizontal;
- d) irradiância difusa (G_{DIF}): é a taxa de energia por unidade de área proveniente de todas as direções decorrentes dos processos de espalhamento pelos constituintes atmosféricos, como moléculas, materiais particulados e nuvens;

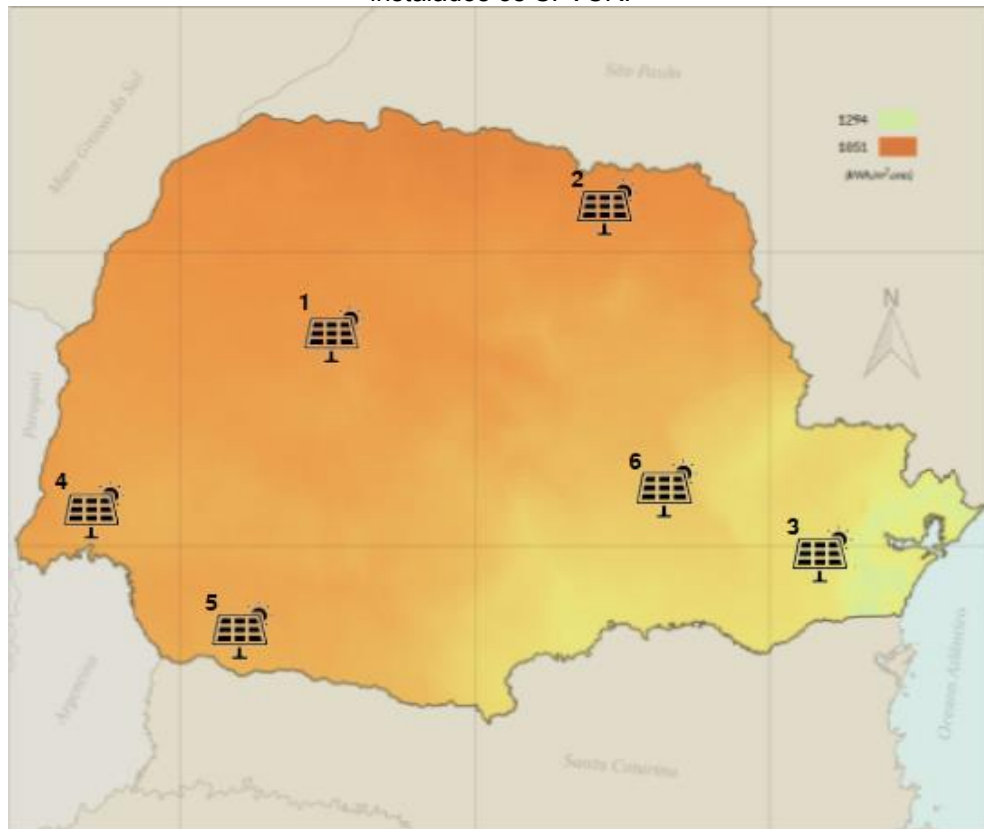
2.1.2 Irradiação

De acordo com Duffie e Beckman (2013), a irradiação solar é a irradiância solar integrada durante um intervalo de tempo e é expressa na unidade [Wh/m²]. Esta grandeza pode ser simbolizada por I quando o intervalo de tempo considerado seja equivalente a uma hora, ou H , caso o período analisado seja ao longo do dia. Assim como a irradiância, a irradiação pode se apresentar das seguintes maneiras conforme a NBR 10899 (ABNT, 2013):

- a) irradiação global horizontal (I_{HOR} ou H_{HOR}): é a irradiância global horizontal, integrada durante um intervalo de tempo especificado;
- b) irradiação no plano inclinado (I_{TOT} ou H_{TOT}): é a irradiância no plano inclinado na latitude, integrada durante um intervalo de tempo especificado;
- c) irradiação direta (I_{DIR} ou H_{DIR}): é a irradiância direta, integrada durante um intervalo de tempo especificado;
- d) irradiação difusa (I_{DIF} ou H_{DIF}): é a irradiância difusa, integrada durante um intervalo de tempo especificado;

A Figura 3 apresenta o mapa da irradiação global horizontal do Paraná, com destaque para as cidades onde estão instaladas as EPESOL. As cidades de Campo Mourão, Cornélio Procópio, Curitiba, Medianeira, Pato Branco e Ponta Grossa estão numeradas de 1 a 6. Os respectivos valores de irradiação global horizontal podem ser consultados na Tabela 1. A variação foi calculada de acordo com o alcance mensal determinado pelos gráficos da Ferramenta Interativa Web do Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná (TIEPOLO et al., 2017).

Figura 3 – Mapa da irradiação global horizontal do Paraná: destaque para as localidades onde estão instalados os SFVCR.



Fonte: Adaptado de Tiepolo et al. (2017).

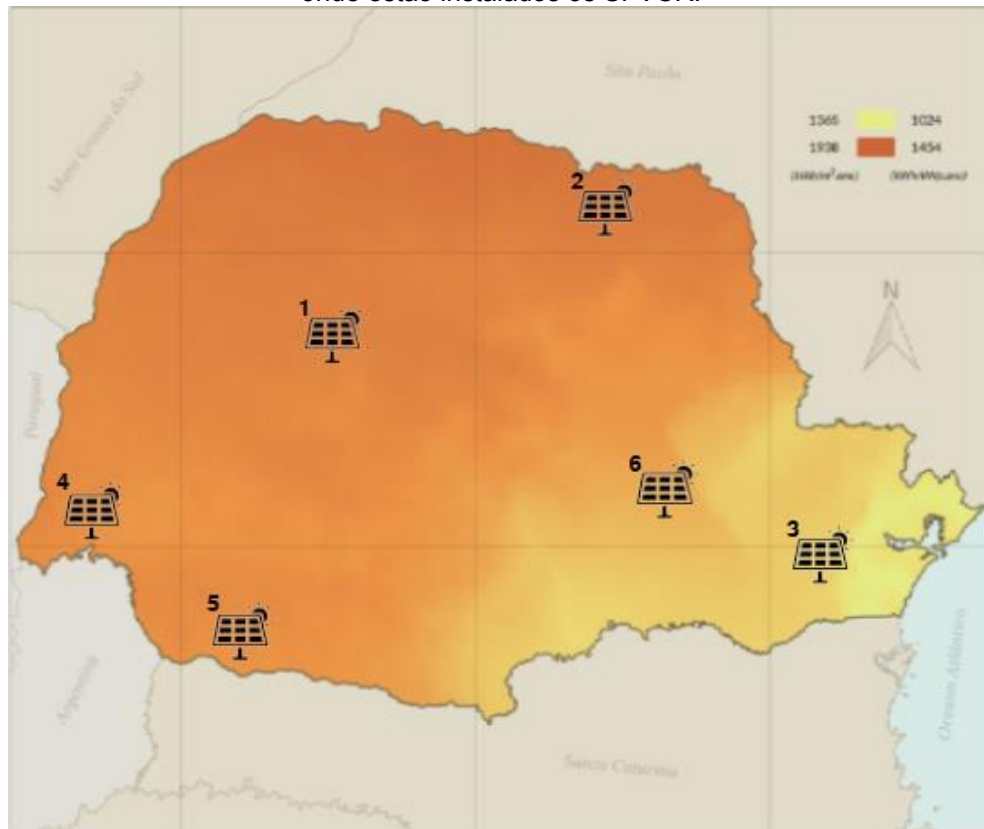
Tabela 1 – Valores de irradiação global horizontal média diária anual nas cidades onde estão localizadas as EPESOL.

Cidade	Varição da irradiação global horizontal [kWh/m ² .dia]	Média diária da irradiação global horizontal [kWh/m ² .dia]
1 - Campo Mourão	4,79 – 4,93	4,87
2 - Cornélio Procópio	4,88 – 5,02	4,96
3 - Curitiba	4,14 – 4,26	4,20
4 - Medianeira	4,70 – 4,81	4,76
5 - Pato Branco	4,66 – 4,76	4,72
6 - Ponta Grossa	4,15 – 4,62	4,40

Fonte: Tiepolo et al. (2017).

Por outro lado, a Figura 4 apresenta o mapa da irradiação no plano inclinado da latitude do Paraná, com destaque para as cidades de Campo Mourão, Cornélio Procópio, Curitiba, Medianeira, Pato Branco e Ponta Grossa, numeradas de 1 a 6. Os respectivos valores de irradiação no plano inclinado da latitude podem ser consultados na Tabela 2. A variação foi calculada de acordo com o alcance mensal determinado pelos gráficos da Ferramenta Interativa Web do Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná (TIEPOLO et al., 2017).

Figura 4 - Mapa da irradiação no plano inclinado da latitude do Paraná: destaque para as localidades onde estão instalados os SFVCR.



Fonte: Adaptado de Tiepolo et al. (2017).

Tabela 2 - Valores de irradiação no plano inclinado da latitude média diária anual nas cidades onde estão localizadas as EPESOL.

Cidade	Varição da irradiação no plano inclinado da latitude [kWh/m ² .dia]	Média diária da irradiação no plano inclinado da latitude [kWh/m ² .dia]
1 - Campo Mourão	5,02 – 5,17	5,08
2 - Cornélio Procópio	5,12 – 5,26	5,19
3 - Curitiba	4,36 – 4,48	4,40
4 - Medianeira	4,91 – 5,02	4,97
5 - Pato Branco	4,91 – 5,01	4,95
6 - Ponta Grossa	4,35 – 4,86	4,63

Fonte: Tiepolo et al. (2017).

Segundo Pinho e Galdino (2014), a geração de energia de um sistema fotovoltaico está intimamente relacionada aos índices de irradiação no local, uma vez que a corrente elétrica e a tensão de circuito aberto são diretamente proporcionais à variação de irradiação solar. Diante desta premissa, a produção de energia é mais favorável quando a instalação dos módulos fotovoltaicos é realizada no plano inclinado pois, conforme pode ser observado na Tabela 2, apresenta maior média anual de irradiação quando comparado aos do plano horizontal exibidos na Tabela 1.

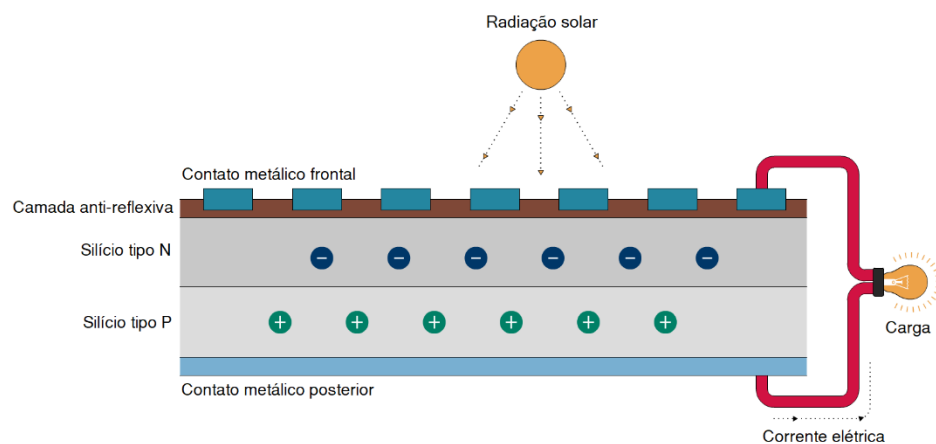
2.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

2.2.1 Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é o processo físico básico no qual uma célula fotovoltaica converte a energia solar em energia elétrica. A radiação é composta por fótons, os quais são capazes de transportar a energia correspondente aos diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético. Quanto menor o comprimento de onda, maior a frequência e a energia transmitida. Considerando que a faixa do espectro visível da radiação solar possui um elevado número de fótons em relação ao seu comprimento de onda, pode-se afirmar que nessa faixa a densidade de energia é maior (NREL, 1995).

Ao incidir sobre um material semicondutor, os fótons que compõem a radiação solar podem ser refletidos ou absorvidos por este material, isto é, uma célula fotovoltaica. Caso os fótons sejam absorvidos, uma diferença de potencial devido à separação dos portadores de carga pela junção p-n ocasionará a geração de eletricidade atrelada à transferência de energia dos fótons para os elétrons contidos nos átomos da célula. Após o processo de dopagem, no qual impurezas são introduzidas de forma controlada no material semicondutor a fim de criar um campo elétrico através da junção p-n, as propriedades elétricas da célula fotovoltaica fornecem a tensão necessária para acionar a corrente através de uma carga externa. A representação do princípio de funcionamento do efeito fotovoltaico está ilustrada na Figura 5 (NREL, 1995; PINHO E GALDINO, 2014).

Figura 5 – Representação do efeito fotovoltaico.

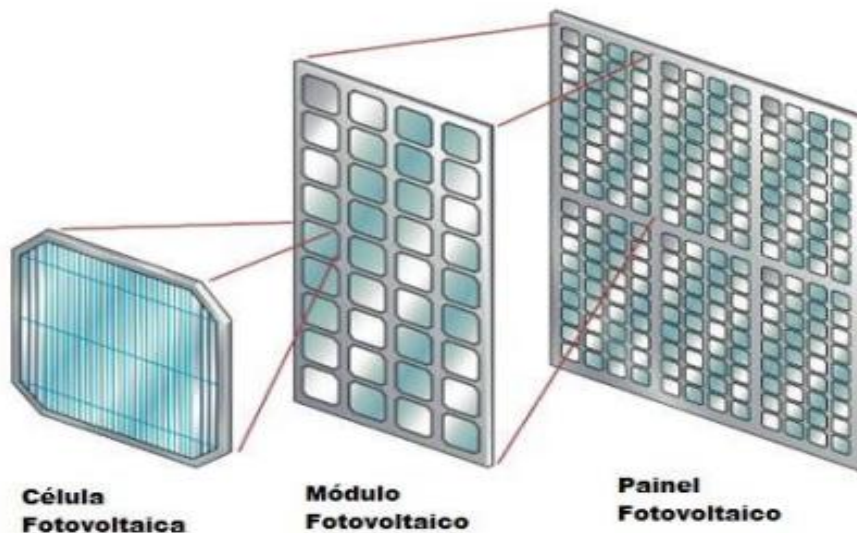


Fonte: Adaptado de EPIA e Greenpeace (2011).

2.2.2 Tecnologias de Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são dispositivos que se constituem de materiais semicondutores, os quais apresentam condutividade elétrica entre o isolante e o condutor. Em geral, a potência que uma célula fotovoltaica consegue fornecer é muitas vezes é insuficiente para a maioria das aplicações. Assim, o agrupamento de células tem o intuito de aumentar a potência total do projeto. A Figura 6 apresenta o processo de agrupamento de células até a formação do painel fotovoltaico (CUNHA, 2014).

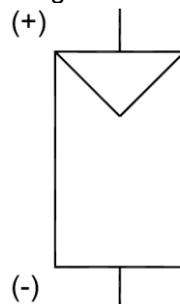
Figura 6 – Hierarquia do processo de agrupamento: célula, módulo e painel fotovoltaico.



Fonte: Cunha (2014).

Os painéis fotovoltaicos presentes nos sistemas fotovoltaicos constituem-se de módulos fotovoltaicos, que nada mais são que conjuntos de células fotovoltaicas devidamente interligadas. A Figura 7 ilustra a simbologia utilizada para a representação de um módulo fotovoltaico.

Figura 7 – Simbologia de um módulo fotovoltaico.

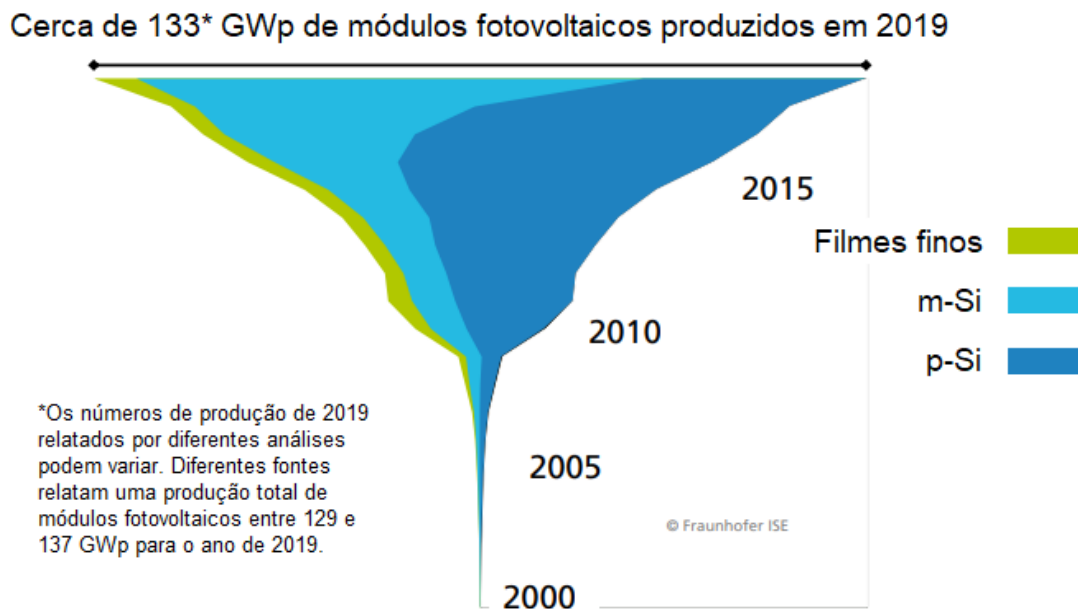


Fonte: Pinho e Galdino (2014).

O arranjo das células está relacionado com a utilização da tensão e corrente que são desejáveis no projeto. As células conectadas em série determinam o nível de tensão do módulo, enquanto as conectadas em paralelo influenciam no nível de corrente (LAMBERTS et al., 2010). O desempenho de células fotovoltaicas é influenciado pela irradiância incidente e sua distribuição espectral, bem como pela temperatura de operação da célula. As condições padrão de ensaio (STC) consideram a irradiância solar (G) de 1.000 W/m^2 sob uma distribuição espectral padrão para massa de ar (AM) de 1,5 e temperatura da célula de 25°C (PINHO E GALDINO, 2014).

Entre as tecnologias desenvolvidas para células e módulos fotovoltaicos, destacam-se a de silício cristalino e a de filmes finos. Tradicionalmente, a tecnologia mais utilizada e que predomina 90% da produção mundial de módulos é a de silício cristalino, como o silício monocristalino (m-Si) e o silício policristalino (p-Si). Conforme pode ser observado na Figura 8, até o ano de 2019 esse cenário continuou estável e a produção de módulos fotovoltaicos atingiu aproximadamente 133 GWp, superando em 10 GWp o ano anterior.

Figura 8 – Evolução da produção de módulos fotovoltaicos.

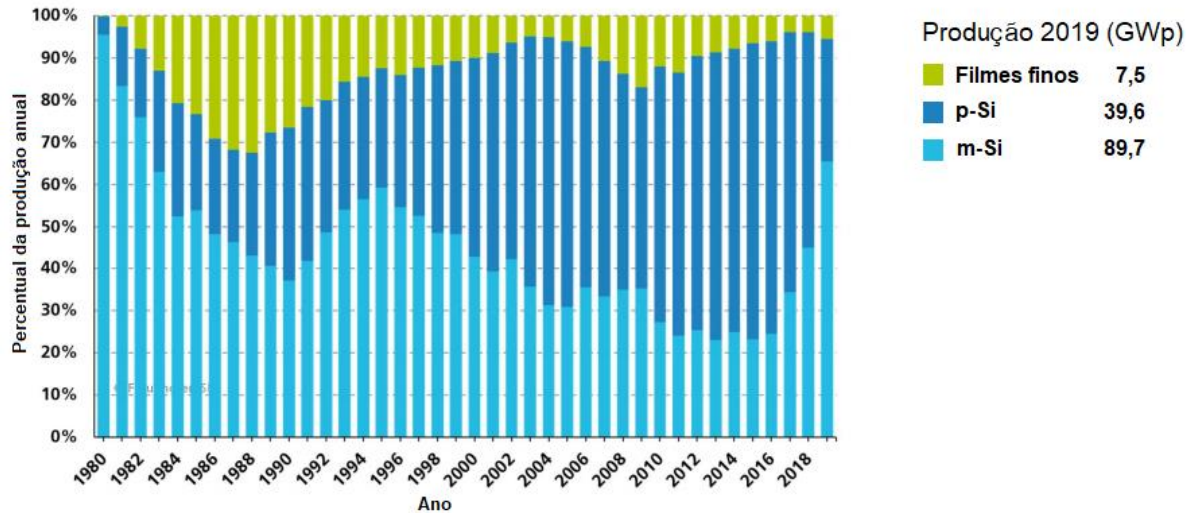


Fonte: Adaptado de Fraunhofer ISE (2020).

Em 2019 o p-Si foi responsável por 28,95% e o m-Si por 65,57% da produção total de aproximadamente 133 GWp de módulos fotovoltaicos, enquanto os filmes finos representaram 5,48% deste total. Dentre os 7,5 GWp de filmes finos produzidos,

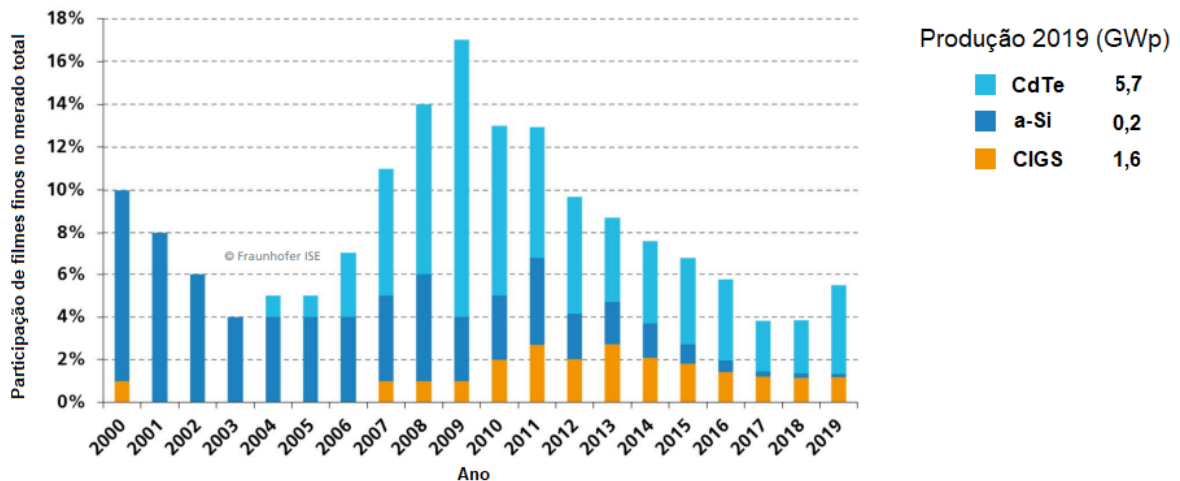
5,7 GWp são referentes ao CdTe e 1,6 GWp ao CIGS. Essa informações estão detalhadas na Figura 9 e na Figura 10.

Figura 9 – Comparativo da produção de módulos fotovoltaicos em 2019.



Fonte: Adaptado de Fraunhofer ISE (2020).

Figura 10 – Comparativo da produção de módulos de filmes finos em 2019.



Fonte: Adaptado de Fraunhofer ISE (2020).

A tecnologia de silício cristalino é a mais tradicional em função da sua robustez e confiabilidade (RUTHER, 2004). Como o silício não é um elemento químico puro, para a sua fabricação é necessário separar o oxigênio não desejado do dióxido de silício, criando assim o silício metalúrgico com pureza de 98%. O silício em estado bruto deve ser purificado através de processos químicos, reduzindo o percentual de impurezas em cada estágio de destilação até que se atinja a pureza necessária para produzir células monocristalinas ou policristalinas de elevada qualidade (DGS, 2008).

Em relação à produção das células de tecnologia cristalina, há um fator limitante devido a espessura das lâminas e isso impacta diretamente na dificuldade de baixar os custos. Por outro lado, a tecnologia de filmes finos detém um potencial de redução de custos quando produzidos em grande escala, uma vez que a quantidade de energia envolvida no processo de produção é reduzida. (RUTHER, 2004). Segundo o ITRPV (2020), a espessura das lâminas de m-Si em 2019 era de 160 μm . O *payback* energético deste tipo de célula varia de 7 meses a 2 anos, dependendo das condições de instalação e dos níveis de radiação solar do local onde o sistema é instalado (FRAUNHOFER ISE, 2020).

Em termos de viabilidade econômica e energética, é importante observar a eficiência de cada tecnologia, a qual pode ser visualizada na Tabela 3. Para efeitos de projeto, o custo, o tipo do painel que se pretende empregar e o local de instalação, são fatores fundamentais para garantir um bom desempenho do sistema (TONIN, 2017).

Tabela 3 - Eficiências de diferentes tecnologias de células e módulos fotovoltaicos em laboratório.

Tecnologias		Eficiência de conversão das células	Eficiência de conversão dos módulos
Silício cristalino	m-Si	26,1%	22,7%
	p-Si	23,3%	20,4%
Filmes finos	CIGS	23,4%	19,2%
	CdTe	22,1%	19,0%

Fonte: NREL (2020a, 2020b).

A eficiência dos módulos fotovoltaicos sempre será inferior à eficiência das células, visto que a distribuição ocupada pelas células causa alguns espaços vazios nos módulos. Ainda cabe ressaltar que a evolução das eficiências de células e módulos fotovoltaicos tem acontecido de forma significativa visto que o mercado fotovoltaico é dinâmico e a renovação de fabricantes de diferentes tecnologias de células é constante (PINHO E GALDINO, 2014).

Enquanto a tecnologia de silício cristalino é classificada como a primeira geração na produção de células e módulos fotovoltaicos, os filmes finos são classificados como a segunda geração (PINHO E GALDINO, 2014). Há ainda a terceira geração de células e módulos, que não são objetos de estudo nesta pesquisa.

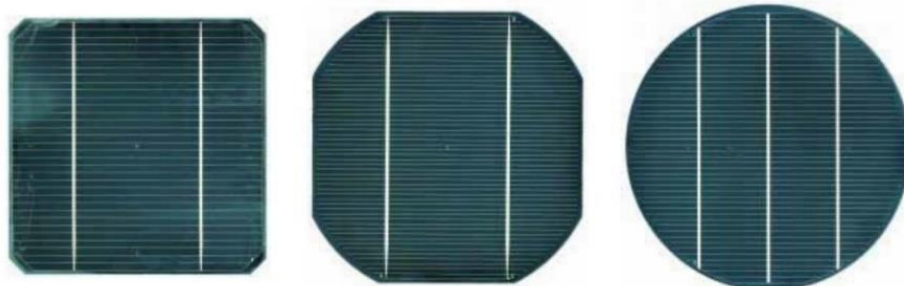
Dentre as células de silício cristalino, pode existir uma camada de passivação que permite o aumento da reflexão dos raios solares nas células, melhorando a

captação de energia da radiação e fazendo com que estas células sejam mais eficientes que as convencionais de silício cristalino não passivado (VILLALVA, 2019). Denomina-se como tecnologia PERC (*Passivated Emitter Rear Cell*) a presença desta camada de passivação, a qual permite o aumento da eficiência da célula. De acordo com ITRPV (2020), a tecnologia PERC constituiu mais de 60% da indústria fotovoltaica em 2019 e irá dominar o mercado nos próximos anos, atingindo 80% da produção em 2022.

2.2.2.1 Silício monocristalino

O silício monocristalino usado na fabricação de células fotovoltaicas pode ser obtido pelo método *Czochralski*, em que o núcleo do cristal de silício é imerso em silício fundido juntamente com uma pequena quantidade de dopante, como o elemento boro, formando então um semiconductor dopado do tipo p. Com a orientação do núcleo do cristal bem definida, é extraído do material fundido um cilindro de silício monocristalino do tipo p, o qual é cortado em lâminas de aproximadamente 0,3 mm. Para obter a junção p-n é necessário introduzir impurezas do tipo n, em que o silício entra em contato com o vapor de fósforo em um forno de difusão sob altas temperaturas (PINHO E GALDINO, 2014; DGS, 2008). As geometrias das células obtidas neste processo podem ser redondas ou quadradas, com as arestas aparadas, conforme ilustra a Figura 11. O módulo e o painel fotovoltaico de m-Si estão apresentados na Figura 12.

Figura 11 – Geometria das células fotovoltaicas de silício monocristalino. Da esquerda para a direita: quadrada com as arestas levemente aparadas, quadrada com as arestas aparadas, e redonda.



Fonte: DGS (2008).

Figura 12 – Tecnologia m-Si: a) módulo fotovoltaico; b) painel fotovoltaico.

a)



b)

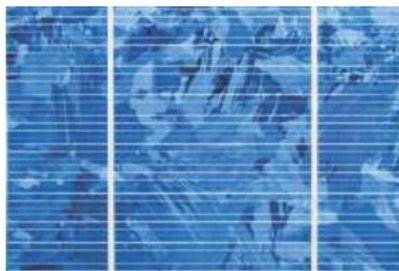


Fonte: Hanwha Q Cells (2017b); LABENS (2020).

2.2.2.2 Silício policristalino

A fabricação de células fotovoltaicas de silício policristalino se dá a partir de lâminas obtidas da solidificação de um bloco composto de pequenos cristais. Tais lâminas já são produzidas com a espessura final da célula, tornando o processo mais simples e barato em relação ao custo da produção do m-Si. Entretanto a presença de interfaces entre os vários cristais torna a célula mais espessa, podendo apresentar defeitos na estrutura cristalina e reduzir a sua eficiência em termos de conversão fotovoltaica, conforme pode ser observado na Figura 13 (PINHO E GALDINO, 2014; RUTHER, 2004). O módulo e o painel fotovoltaico de p-Si estão apresentados na Figura 14.

Figura 13 – Célula fotovoltaica de silício policristalino.



Fonte: EPIA e Greenpeace (2011).

Figura 14 – Tecnologia p-Si: a) módulo fotovoltaico; b) painel fotovoltaico.

a)



b)



Fonte: Hanwha Q Cells (2017a); LABENS (2020).

2.2.2.3 Disseleneto de cobre, índio e gálio

Além de serem bastante utilizadas em aplicações arquitetônicas devido a sua aparência estética, as células fotovoltaicas de tecnologia CIGS apresentam alta eficiência de conversão de energia em relação às outras de filmes finos (RUTHER, 2004). O módulo e o painel fotovoltaico de CIGS estão apresentados na Figura 15.

Figura 15 – Tecnologia CIGS: a) módulo fotovoltaico; b) painel fotovoltaico.

a)



b)



Fonte: Solibro GmbH (2017); LABENS (2020).

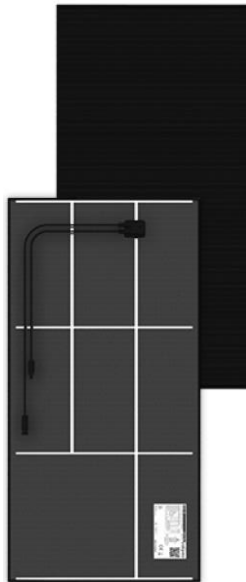
2.2.2.4 Telureto de cádmio

As células de telureto de cádmio são formadas por uma camada transparente de sulfeto de cádmio (CdS) do tipo n e uma camada absorvente de CdTe do tipo p, otimizando o aproveitamento da radiação solar ao obter uma junção p-n formada por dois semicondutores diferentes (DGS, 2008; PINHO E GALDINO, 2014).

A elevada eficiência de conversão da energia solar em energia elétrica é o grande atrativo desta tecnologia. Apesar do elemento químico cádmio apresentar toxicidade no seu estado físico gasoso, o composto CdTe não é considerado tóxico e tem elevada estabilidade. O módulo e o painel fotovoltaico de CdTe estão apresentados na Figura 16.

Figura 16 – Tecnologia CdTe: a) módulo fotovoltaico; b) painel fotovoltaico.

a)



b)



Fonte: Solibro GmbH (2017); LABENS (2020).

2.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados quanto a interligação com o sistema público de fornecimento de energia elétrica e quanto à sua configuração. O Quadro 1 apresenta a classificação dos sistemas fotovoltaicos de acordo com a NBR 11704 (ABNT, 2008).

Quadro 1 – Classificação dos SFVCR.

Tipo de sistema		Alimentação dos consumidores	Acumulação de energia elétrica	Componentes básicos	Aplicações típicas
Sistemas Conectados à Rede Elétrica	Puros	Tensão alternada	Não	Inversor	Aplicações residenciais, comerciais e industriais, produção de energia para a rede pública
	Híbridos	Tensão alternada	Não	Inversor e gerador complementar	Aplicações residenciais, comerciais e industriais, produção de energia para a rede pública
			Sim	Inversor, gerador complementar e acumulador	Eletrificação rural, uso industrial, suprimento ininterrupto de energia
	Sistemas Isolados	Puros	Tensão contínua	Não	Seguidor de potência máxima (desejável)
Sim				Controlador de carga e acumulador	Iluminação, telecomunicações, sinalização náutica, cerca elétrica, proteção catódica
Tensão alternada			Não	Inversor	Bombeamento, uso industrial
			Sim	Controlador de carga, acumulador e inversor	Eletrificação rural, bombeamento, telecomunicações, uso industrial, iluminação
Híbridos		Tensão contínua	Sim	Controlador de carga, acumulador e gerador complementar	Telecomunicações, iluminação, sinalização rodoviária e ferroviária
		Tensão alternada	Opcional	Controlador de carga, acumulador opcional e gerador complementar	Iluminação, uso industrial

Fonte: ABNT (2008).

Em relação à interligação com a rede pública de energia elétrica, os Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFVI) são instalados geralmente em locais que não possuem acesso à rede elétrica e necessitam de um elemento armazenador de energia, como o uso de baterias. Já nos SFVCR, a rede elétrica da concessionária é vista como elemento armazenador de energia, pois toda a energia gerada é inserida em paralelo com a energia da rede (URBANETZ JUNIOR, 2010). Por outro lado, no que se refere à configuração dos sistemas, a presença do gerador fotovoltaico como único elemento gerador de energia elétrica caracteriza um sistema puro, enquanto a associação com outros tipos de geradores qualifica um sistema híbrido (ABNT, 2008).

Um sistema fotovoltaico em geral é composto pelo painel fotovoltaico e pelos dispositivos de controle, supervisão, armazenamento e condicionamento da energia elétrica gerada, incluindo também toda parte de cabeamento, estrutura de suporte e a fundação, quando necessária (LAMBERTS et al., 2010).

2.3.1 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica

Os SFVCR são aqueles em que a potência produzida pelo gerador fotovoltaico é entregue diretamente à rede elétrica. Estes sistemas são vantajosos por apresentarem elevada produtividade, visto que toda a energia gerada é utilizada. Além disso, não necessitam de baterias, as quais possuem baixa vida útil quando comparada aos módulos fotovoltaicos e aos inversores (PINHO E GALDINO, 2014; URBANETZ JUNIOR, 2010).

Um SFVCR é composto basicamente pelo painel fotovoltaico e o inversor. Enquanto o painel fotovoltaico realiza a conversão direta da energia solar em energia elétrica em corrente contínua (CC), o inversor permite a conversão de tensão contínua proveniente do gerador fotovoltaico para uma tensão em corrente alternada (CA) com amplitude e frequência determinadas a fim de atender as condições impostas pela rede elétrica pública e possibilitar a interconexão à rede (PINHO E GALDINO, 2014, RUTHER, 2004).

O princípio de funcionamento de um SFVCR está baseado primeiramente na captação de energia solar pelos painéis fotovoltaicos. O inversor converte a energia dos painéis em 110 V ou 220 V, possibilitando o abastecimento de todos os equipamentos da unidade consumidora em conjunto com a rede elétrica pública. Em unidades com microgeração ou minigeração distribuída, caso a geração de energia

seja maior que a demanda, o excedente é devolvido para a rede e gera créditos para utilização futura, mantendo a qualidade da energia e respeitando o sistema de compensação. Quando a geração de energia é inferior ao consumo, a diferença é suprida automaticamente pela energia elétrica da distribuidora. A quantidade de energia gerada pelo SFVCR e injetada na rede é registrada por um medidor bidirecional ou dois medidores unidirecionais (ANEEL, 2017b). O princípio de funcionamento de um SFVCR está ilustrado na Figura 17.

Embora a instalação seja predominante nos telhados dos edifícios, a utilização de SFVCR em diferentes formas de construção permite a integração da tecnologia fotovoltaica ao entorno construído. Ainda assim, projetos fotovoltaicos de grande porte podem ser construídos na superfície do solo, possibilitando a formação de grandes centrais fotovoltaicas conectadas à rede (DGS, 2008). De acordo com Ruther (2004), essas duas configurações se distinguem pela proximidade ou não com o consumidor.

Figura 17 – Representação de funcionamento de um SFVCR.



Fonte: Neosolar (2016).

Caso a geração de energia ocorra de forma descentralizada, isto é, a localização da instalação é próxima ao local de consumo, como em telhados ou fachadas de prédios, considera-se que o sistema está integrado a uma edificação. Já se o sistema estiver localizado a uma certa distância da unidade consumidora, a geração é centralizada, ou seja, em forma de usinas, onde complexos sistemas de transmissão e distribuição estão envolvidos.

2.4 PANORAMA DA CAPACIDADE INSTALADA DE SFVCR

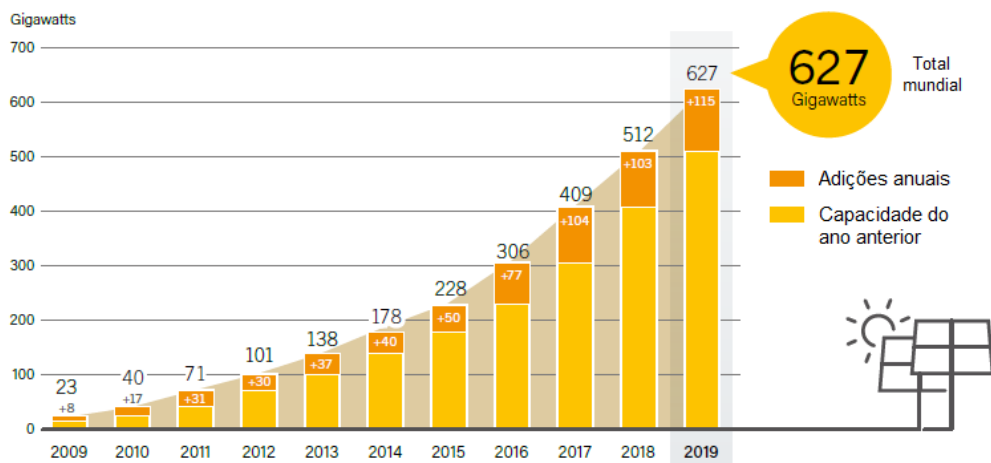
2.4.1 Cenário Mundial

Historicamente a concentração de plantas fotovoltaicas ocorreu predominantemente em países europeus, especialmente na Alemanha, onde políticas públicas de incentivos foram adotadas para promover o desenvolvimento desta tecnologia (TIEPOLO et al., 2015). Entretanto, novos mercados emergiram e países de todos os continentes começaram a contribuir para o crescimento global (REN21, 2020).

Em 2006 a Alemanha dominava o mercado fotovoltaico mundial com o maior sistema considerado até então, cuja potência instalada era de 11 MWp. Em 2015 a China passou a liderar este mercado e em 2016 instalou uma planta de 1,5 GWp, a qual é considerada a maior do mundo até então. A expectativa é superar este recorde com projetos que estão em desenvolvimento no Egito, na Índia e na própria China, com a instalação de uma planta de 2 GWp (NREL, 2019).

O mercado fotovoltaico pode ser considerado a opção mais competitiva para a geração de eletricidade em um número crescente de aplicações residenciais e comerciais. A adição da capacidade instalada de energia solar fotovoltaica teve grande representatividade mundial em 2019, alcançando o total de 627 GWp decorrente do acréscimo de 115 GWp de novas instalações no cenário mundial, conforme ilustra a Figura 18 (REN21, 2020).

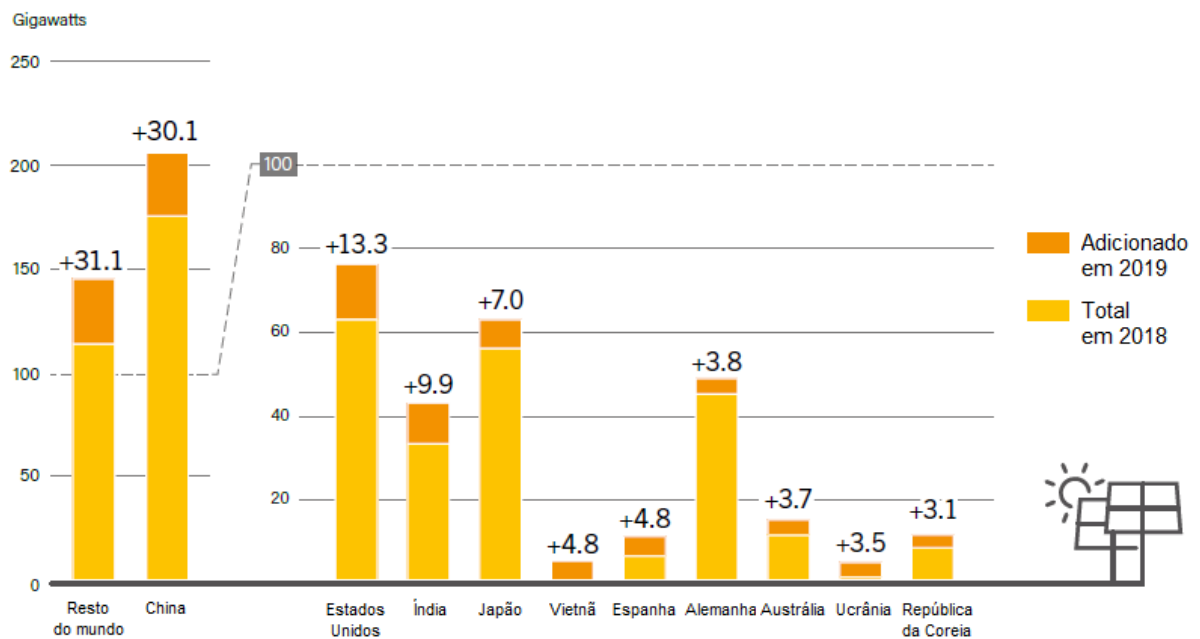
Figura 18 - Capacidade mundial instalada de sistemas fotovoltaicos.



Fonte: Adaptado de REN21 (2020).

No ano de 2017 a China surpreendeu ao atingir 53,1 GWp em termos de capacidade de energia solar fotovoltaica adicionada, ultrapassando em 2,1 GWp em relação ao que havia sido instalado mundialmente em 2015. Embora a China ainda seja a líder do *ranking* dos países com maior capacidade instalada acumulada, a adição de novas instalações em 2019 caiu aproximadamente 18% em relação à 2018. De acordo com a Figura 19, ao final de 2019 os cinco países com maior capacidade acumulada eram China, Estados Unidos, Japão, Alemanha e Índia. Este último, contribuiu em 9,9 GWp com novas instalações, sendo considerado o segundo maior mercado da Ásia (REN21, 2020).

Figura 19 - Capacidade mundial de sistemas fotovoltaicos e suas respectivas adições em 2019.



Fonte: Adaptado de REN21 (2020).

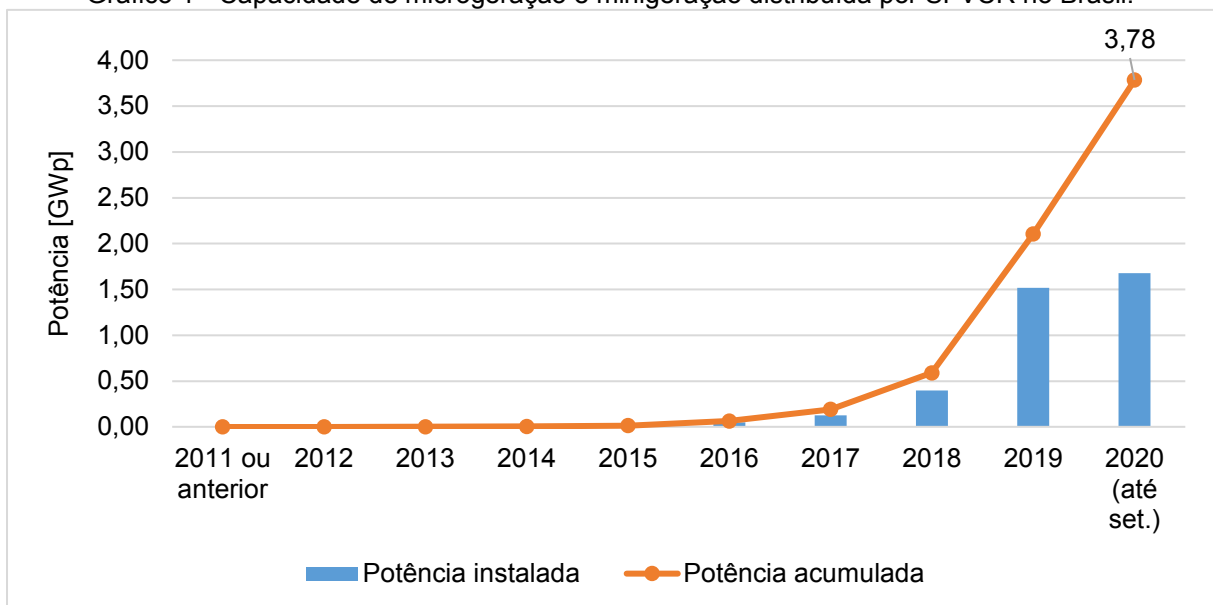
Em relação à América Latina, grande parte do crescimento da capacidade instalada ocorreu em 2019, ano em que o Brasil adicionou mais de 2,0 GWp e foi considerado o país que mais contribuiu para o aumento da capacidade instalada na região. O aumento de incentivos governamentais, a queda dos preços de módulos, o aumento das tarifas de eletricidade e o aumento da conscientização ambiental são fatores que contribuíram para o avanço do setor fotovoltaico (REN21, 2020). Essa tendência já era prevista em 2017, quando o Brasil foi responsável por ocupar a décima posição na escala dos países que mais adicionaram potência de energia solar fotovoltaica, representando uma participação de 0,9% no total instalado global neste mesmo ano (REN 21, 2018).

2.4.2 Cenário Brasileiro

O Brasil apresenta uma evolução na potência instalada de energia solar fotovoltaica. O total de 6,80 GWp atingido até setembro de 2020 é composto por 3,78 GWp de geração distribuída e 3,02 GWp de geração centralizada (ANEEL, 2020a, 2020b).

Em termos de microgeração e minigeração distribuída no país, é possível verificar a potência instalada de unidades consumidoras com base no Registro das Unidades Consumidoras com Geração Distribuída disponibilizado pela ANEEL (ANEEL, 2020b). A capacidade acumulada de energia solar fotovoltaica, de acordo com o Gráfico 1, era de aproximadamente 3,78 GWp até setembro de 2020.

Gráfico 1 - Capacidade de microgeração e minigeração distribuída por SFVCR no Brasil.



Fonte: Adaptado de ANEEL (2020b).

Paralelamente ao cenário de microgeração e minigeração distribuída, existem outras usinas que não estão cadastradas nesses sistemas e, portanto, não são beneficiadas com o sistema de compensação. Criado pela ANEEL, o Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA) reúne informações sobre as usinas regularizadas em operação, em construção e em construção não iniciada, tanto hidrelétricas como termelétricas, eólicas, fotovoltaicas nucleares e outras fontes alternativas sobre o parque gerador brasileiro (ANEEL, 2020a). A capacidade instalada por usinas fotovoltaicas de geração centralizada até setembro de 2020 era próxima de 3,02 GWp no país.

Está prevista para os próximos anos uma adição de 13,40 GWp na capacidade de geração por central geradora solar fotovoltaica do Brasil, proveniente das 16 usinas em construção somadas às 324 usinas outorgadas, porém com construção não iniciada (ANEEL, 2020a), conforme apresenta a Tabela 4.

Tabela 4 - Capacidade atual e prevista de geração por usinas fotovoltaicas de geração centralizada.

	Usinas em operação	Usinas em construção	Usinas em construção não iniciada
Quantidade	3.905	16	324
Potência outorgada	3.018.266,25 kWp	557.216,06 kWp	12.848.569,89 kWp

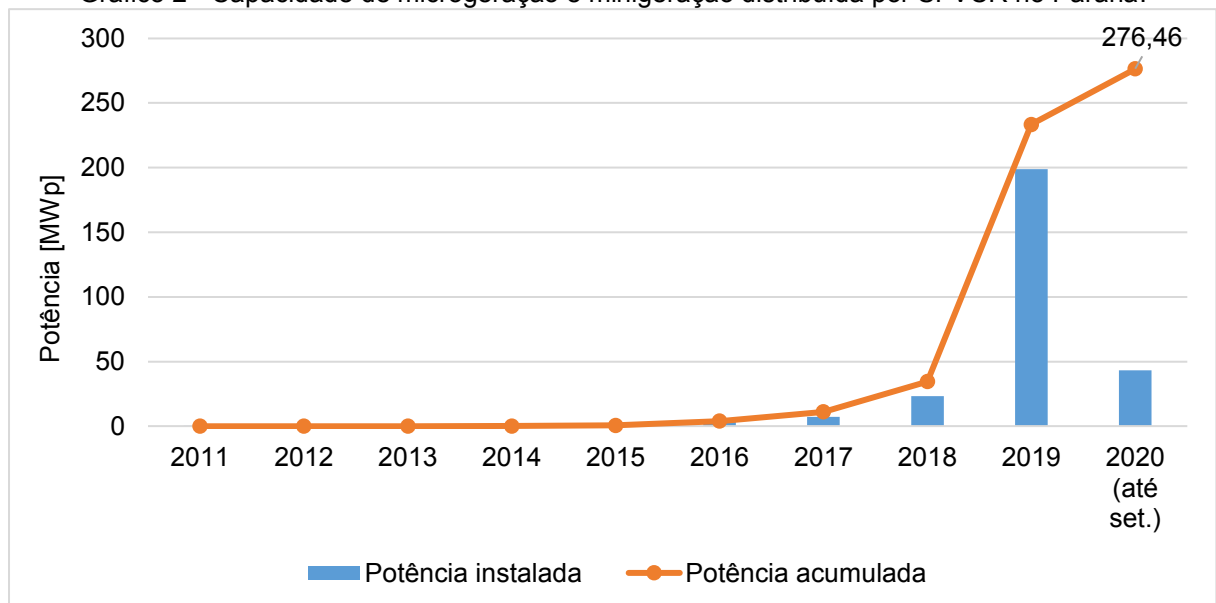
Fonte: Adaptado de ANEEL (2020a).

As plantas em operação correspondem a 1,73% na matriz elétrica brasileira. Já as plantas em construção e em construção não iniciada representam 5,47% e 51,75%, respectivamente, da potência que será instalada no país quando comparada a outras fontes (ANEEL, 2020a).

2.4.3 Cenário Paranaense

O Gráfico 2 apresenta as potências instaladas dos SFVCR no Paraná que estão em operação desde 2011 e o respectivo potencial acumulado de 276,46 MWp de geração distribuída até setembro de 2020 (ANEEL, 2020b).

Gráfico 2 - Capacidade de microgeração e minigeração distribuída por SFVCR no Paraná.



Fonte: Adaptado de ANEEL (2020b).

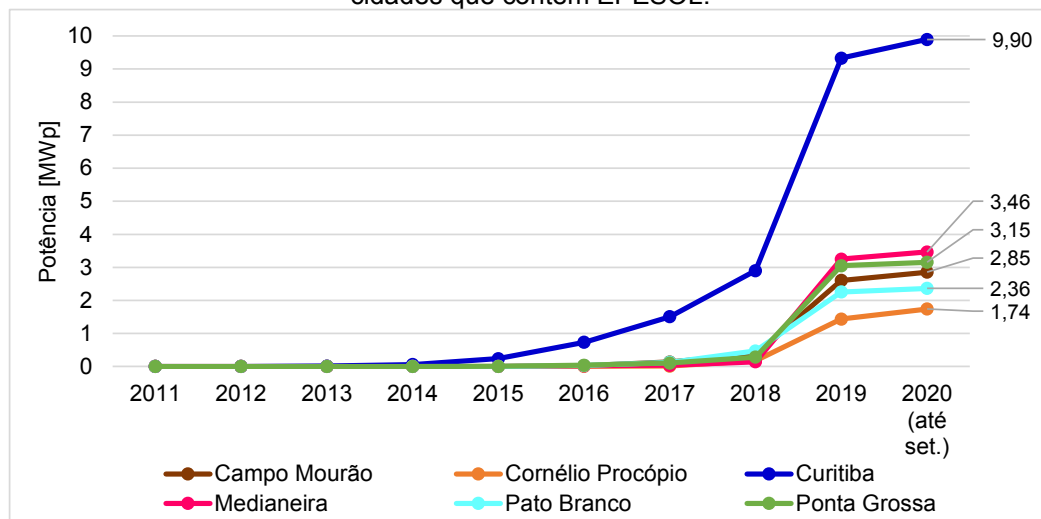
Além dos 276,46 MWp de geração distribuída, o Paraná registra 172,06 kWp de geração centralizada de quatro empreendimentos que, embora apresentem potência instalada inferior a 5 MWp, não são beneficiados com o sistema de compensação de energia.

A região sul, seguida da região sudeste, destaca-se com a segunda maior porcentagem com geração distribuída no Brasil, representando 27,81% da potência instalada. Desta porcentagem, 7,25% pertence ao Paraná, estado que ocupa o segundo lugar no *ranking* de capacidade instalada na região sul (ANEEL, 2020b).

Em 2011, antes da Resolução 482 de 2012, houve a instalação do primeiro SFVCR no Paraná na área de concessão da COPEL. Este sistema continua em operação e está localizado no Escritório Verde, pertencente à UTFPR Câmpus Curitiba - Sede Centro (URBANETZ JUNIOR et al., 2014). Entretanto o impulso de crescimento da implantação de SFVCR ocorreu no ano de 2016, fato que se estendeu de maneira significativa nos anos seguintes.

Segundo Tiepolo et al. (2017), o estado do Paraná apresenta bons índices de irradiação solar, favorecendo a instalação de sistemas fotovoltaicos. Este potencial se torna ainda mais evidente uma vez que a média de irradiação no estado é superior à de 27 países da Europa, região considerada referência em tecnologia solar. A média anual da irradiação global horizontal no Paraná é de 1.705 kWh/m² e a média anual da irradiação no plano inclinado igual a latitude é 1.789 kWh/m². O Gráfico 3 apresenta a evolução do crescimento da capacidade acumulada de SFVCR nas cidades paranaenses onde estão localizadas as EPESOL até setembro de 2020.

Gráfico 3 – Capacidade acumulada de microgeração e minigeração distribuída por SFVCR nas cidades que contêm EPESOL.



Fonte: Adaptado de ANEEL (2020b).

A cidade de Curitiba tem a maior capacidade instalada quando comparada às demais, enquanto Cornélio Procopio possui a menor. A microgeração e a minigeração distribuída por SFVCR nas seis cidades estudadas representam 8,49% do total de 276,46 MWp presente no território paranaense. O excedente de potência instalada está instalada em sua maioria nos grandes centros do estado, como Maringá, Londrina, Cascavel e Foz do Iguaçu (ANEEL, 2020b).

Através do projeto P&D da COPEL, os SFVCR da UTFPR irão contribuir ainda mais para a capacidade instalada e o avanço tecnológico e científico no estado do Paraná.

2.5 DESEMPENHO DE SFVCR

A crescente conscientização sobre a importância do potencial da tecnologia fotovoltaica resultou no investimento de programas de pesquisas concentrados na avaliação do desempenho técnico de sistemas fotovoltaicos. As ferramentas de avaliação existentes se baseiam nas Diretrizes Europeias e na Norma IEC 61724, visando adequar os procedimentos de coleta de dados a fim de possibilitar a sua comparação e facilitar a troca de informações (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 1998; IEA-PVPS, 2000).

De acordo com IEA-PVPS (2000), o monitoramento de plantas fotovoltaicas tem os seguintes objetivos:

- a) determinar o desempenho da planta e seus componentes;
- b) apresentar resultados de forma clara a fim de ser facilmente entendida pelo usuário;
- c) comparar instalações fotovoltaicas de diferentes capacidades e aplicações, operando em localidades e condições climáticas distintas;
- d) fornecer dados para uma avaliação geral do potencial da tecnologia fotovoltaica a fim de maximizar a eficiência do projeto e otimizar a operação do sistema.

O desempenho de um SFVCR pode ser avaliado por meio dos índices de mérito, os quais são classificados em fator de capacidade, produtividade e taxa de desempenho. Tais índices permitem a comparação entre diferentes SFVCR independente das condições ambientais onde encontram-se instalados, levando em consideração os parâmetros característicos de cada tecnologia (ZILLES et al., 2012).

2.5.1 Fator de Capacidade de um SFVCR

O fator de capacidade (FC) permite avaliar a capacidade real de geração de energia em função da capacidade que o sistema poderia gerar em condições ideais, caso pudesse operar em potência nominal durante 24 horas por dia (URBANETZ JUNIOR et al., 2013). O fator de capacidade é calculado conforme apresentado na Equação 1.

$$FC = \frac{E}{P_{FV} \cdot t} \quad (1)$$

Onde:

E = energia gerada [kWh];

P_{FV} = potência nominal do SFVCR [kWp];

t = período [h] (geralmente 1 mês ou 1 ano).

Segundo Benedito (2009), o fator de capacidade esperado no Brasil compreende as porcentagens entre 13% e 18%, variando de acordo com a disponibilidade do recurso solar, da tecnologia empregada no SFVCR e no dimensionamento adotado. O fator de capacidade esperado para a região sul do país é de 14,2% (QUAGLIA, 2010) e em Curitiba, 12,1% (NAKABAYASHI, 2014). Essa diferença ocorre devido à própria natureza do recurso solar, o qual sofre variações climáticas significativas ao longo do dia, como a presença de nebulosidade, fazendo com que um SFVCR seja capaz de operar em sua potência nominal durante poucas horas (ALMEIDA, 2012). Em estudos realizados por Silveira et al. (2018), os SFVCR que se encontram em operação desde 2011 e 2016 na UTFPR Câmpus Curitiba confirmam os valores próximos da expectativa no Paraná, apresentando fatores de

capacidade de 12,85% no SFVCR instalado no Escritório Verde da Sede Centro, e de 13,97% para o SFVCR localizado na Sede Neville.

2.5.2 Produtividade de um SFVCR

A produtividade, ou *final yield* (Y_f), é o indicador que estabelece a produção de energia elétrica em função de cada 1 kWp de potência nominal instalada no SFVCR. Uma planta fotovoltaica pode alcançar elevada produtividade caso o sistema seja instalado nas condições ideais de geração e esteja menos suscetível a fatores externos, como temperatura e sujeira, por exemplo (TIEPOLO et al., 2017). E A Equação 2 apresenta a maneira que a produtividade de um SFVCR deve ser calculada.

$$Y_f = \frac{E}{P_{FV}} \left[\frac{kWh}{kWp} \right] \quad (2)$$

Onde:

E = energia gerada [kWh];

P_{FV} = potência nominal do SFVCR [kWp].

As produtividades anuais esperadas nas cidades onde estão localizadas as EPESOL estão apresentadas na Tabela 5. Estes valores consideram um sistema de 1 kWp com taxa de desempenho de 75%.

Tabela 5 – Produtividades anuais nas cidades que contêm EPESOL.

Cidade	Varição da produtividade [kWh/kWp.ano]	Média da produtividade [kWh/kWp.ano]
Campo Mourão	1.376 – 1.414	1.393
Cornélio Procópio	1.410 – 1.441	1.420
Curitiba	1.193 – 1.225	1.208
Medianeira	1.346 – 1.373	1.354
Pato Branco	1.344 – 1.370	1.363
Ponta Grossa	1.189 – 1.330	1.268

Fonte: Tiepolo et al. (2017).

2.5.3 Taxa de Desempenho de um SFVCR

A taxa de desempenho, ou *performance ratio* (PR), é definida como a relação entre a produtividade final (Y_f) e a produtividade de referência (Y_r), dado por um número adimensional. Este índice pode ser entendido como o percentual de energia solar disponível na superfície do painel fotovoltaico que será convertida em energia elétrica, ou seja, a energia que será efetivamente disponibilizada pelo SFVCR no ponto de conexão com a rede elétrica. Neste processo de conversão são consideradas perdas que nem sempre são mensuráveis, ocorridas devido à temperatura, sombreamento, acúmulo de sujeira, falha de operação do sistema, eficiência do inversor, entre outros fatores (TIEPOLO et al., 2017; IEA-PVPS, 2014). A taxa de desempenho pode ser calculada conforme a Equação 3.

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} = \frac{Y_f}{H_{tot}/G} \quad (3)$$

Onde:

Y_f = produtividade final [kWh/kWp];

Y_r = produtividade de referência;

H_{tot} = irradiação no plano do painel fotovoltaico em 1 dia [kWh/m²];

G = irradiância solar de 1 kW/m².

Embora a taxa de desempenho de 75% seja adotada internacionalmente na elaboração de mapas fotovoltaicos, no Brasil é possível encontrar valores próximos e até mesmo superiores a 80%. O desempenho de um SFVCR é aperfeiçoado à medida que equipamentos certificados e de boa qualidade são empregados, assim como o dimensionamento do sistema é realizado de forma correta (TIEPOLO et al., 2017; FRAUNHOFER ISE, 2020).

3 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS DAS EPESOL DA UTFPR

Este capítulo irá apresentar as EPESOL da UTFPR e a metodologia para aquisição e tratamento de dados de geração de energia, irradiância e temperatura nos painéis fotovoltaicos em seis das dez mesorregiões do Estado do Paraná.

3.1 EPESOL

A rede de EPESOL coordenada pelo LABENS (Laboratório de Energia Solar) consiste em estações solarimétricas e SFVCR instalados nos câmpus da UTFPR em Campo Mourão, Cornélio Procópio, Curitiba, Medianeira, Pato Branco e Ponta Grossa, sendo que cada câmpus representa uma mesorregião do Estado.

Estudos *in loco* foram realizados para determinar os locais dos câmpus com área disponível e suficiente para abrigar cada EPESOL. Além disso, foram verificados os locais com menores índices de sombreamento a fim de potencializar a geração de energia dos SFVCR e não comprometer o desempenho das estações solarimétricas.

Os módulos de fotovoltaicos foram instalados seguindo as condições ótimas, com o ângulo de inclinação correspondente à latitude da localidade de instalação. Por meio de imagens de satélite do Google Earth (2020), foi possível determinar as coordenadas geográficas de cada EPESOL, cujos valores estão apresentados na Tabela 6. Em relação ao desvio azimutal, os módulos estão orientados ao norte geográfico em cinco EPESOL. Apenas em Cornélio Procópio, onde a superfície de instalação é a cobertura da edificação de um dos blocos da universidade, os módulos acompanham o posicionamento da cobertura e seguem um desvio azimutal de 12° para o oeste.

Tabela 6 – Orientação geográfica das EPESOL.

Mesorregião	Câmpus da UTFPR com EPESOL	Latitude	Longitude
Centro Ocidental	Campo Mourão – (CM)	24,06° S	52,38° O
Norte Pioneiro	Cornélio Procópio – (CP)	23,19° S	50,66° O
Metropolitana de Curitiba	Curitiba – (CT)	25,50° S	49,31° O
Oeste	Medianeira – (MD)	25,30° S	54,11° O
Sudoeste	Pato Branco – (PB)	26,20° S	52,69° O
Centro Oriental	Ponta Grossa – (PG)	25,05° S	50,13° O

Fonte: Autoria própria (2020).

A configuração da distribuição dos módulos de fotovoltaicos é a mesma em todas as EPESOL, exceto em Medianeira, onde o espaço disponível para implantação era reduzido. O padrão estabelecido pode ser observado na Figura 20, adotando-se como referência a EPESOL Curitiba. Os SFVCR em estudo estão destacados em vermelho, onde também é possível observar a presença de uma estação solarimétrica padrão SONDA ao fundo. A área delimitada em azul destaca a presença de uma estação solarimétrica padrão EPE. Na mesma imagem há ainda um sistema fotovoltaico com armazenamento de energia, que não será objeto de estudo nesta pesquisa. As demais EPESOL podem ser visualizadas na Figura 21.

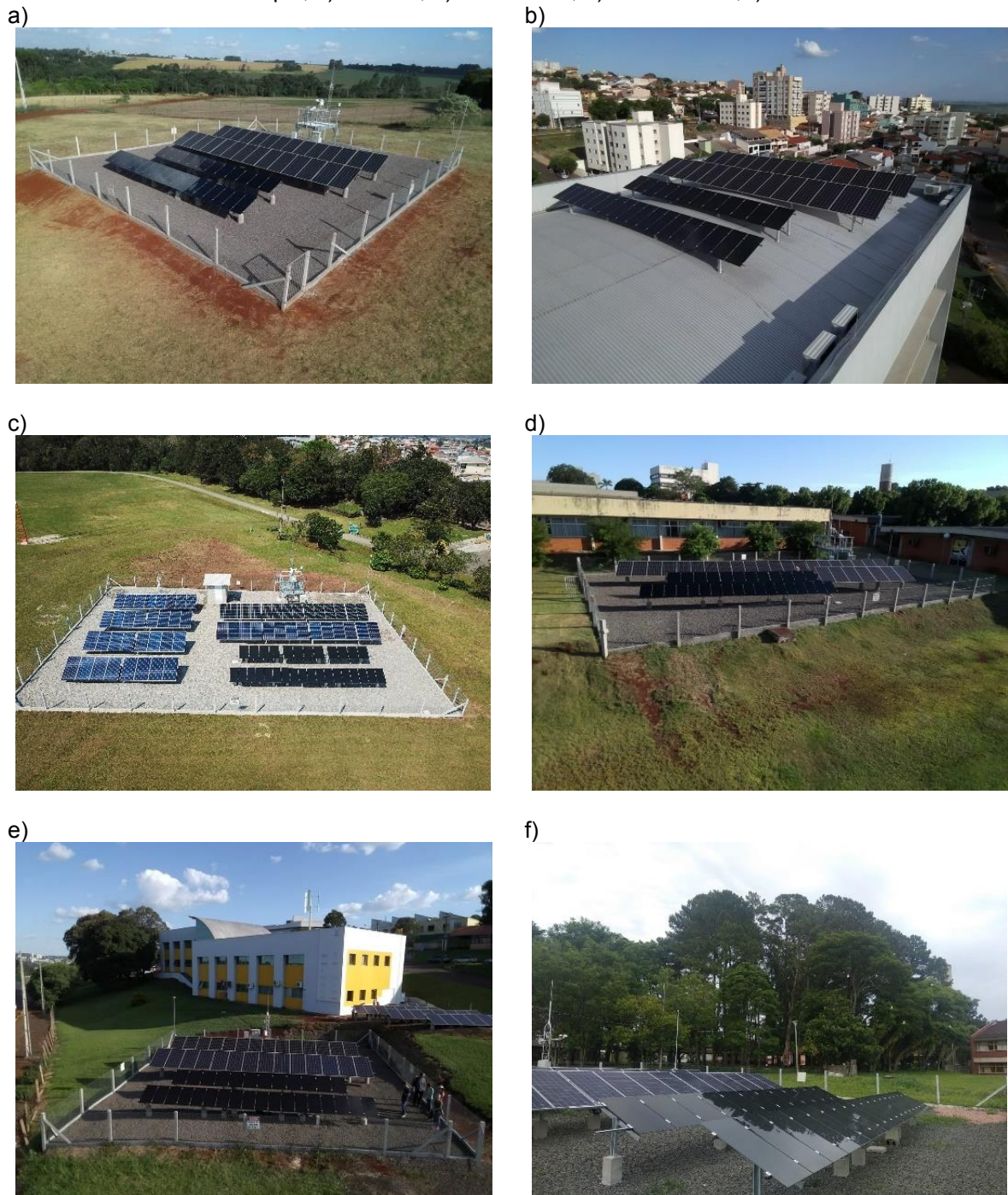
Figura 20 - SFVCR e estações solarimétricas da EPESOL Curitiba. As quatro fileiras de painéis fotovoltaicos correspondem às tecnologias de: m-Si, p-Si, CIGS e CdTe.



Fonte: Adaptado de LABENS (2020).

Os SFVCR com quatro tecnologias distintas de módulos fotovoltaicos resultam em um total de 13,1 kWp de potência instalada, sendo 5,11 kWp de m-Si, 4,69 kWp de p-Si, 1,68 kWp de CIGS e 1,53 kWp de CdTe. É importante destacar que em todas as EPESOL os módulos instalados de m-Si são de tecnologia PERC.

Figura 21 - Vista superior dos câmpus onde estão localizadas as EPESOL: a) Campo Mourão; b) Cornélio Procópio; c) Curitiba; d) Medianeira; e) Pato Branco; f) Ponta Grossa.



Fonte: LABENS (2020).

Em todas as EPESOL há pelo menos uma estação solarimétrica, SONDA ou EPE, ilustradas na Figura 22. As estações contêm equipamentos meteorológicos e radiométricos, dentre eles piranômetros responsáveis por medir componentes da radiação solar.

Figura 22 – Estação SONDA à esquerda e estação EPE à direita.



Fonte: LABENS (2020).

A relação do tipo de estação presente em cada EPESOL está detalhada na Tabela 7. A classificação dos diferentes piranômetros está de acordo com a norma ISO 9060:1990, atualizada no ano de 2018, que estabelece os métodos e instrumentos para a medição da radiação solar (ISO, 2018).

Tabela 7 - Estações solarimétricas presentes em cada EPESOL.

EPESOL		Estação
Campo Mourão	CM	SONDA
Cornélio Procópio	CP	EPE
Curitiba	CT	SONDA
		EPE
Medianeira	MD	SONDA
Pato Branco	PB	EPE
Ponta Grossa	PG	EPE

Fonte: Autoria própria (2020).

A EPESOL Curitiba é a única que possui os dois padrões de estações solarimétricas. Isso se deve ao fato do espaço físico ocupado pelo LABENS da UTFPR também estar localizado no câmpus Curitiba, permitindo o fácil acesso dos pesquisadores às instalações de uma planta que contém todos os equipamentos previstos no projeto. Entretanto neste câmpus apenas a estação SONDA será objeto de estudo nesta pesquisa.

3.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

O processo de coleta, transmissão, armazenamento e validação de dados ainda se encontra em fase de ajustes, visto que a implantação das EPESOL ocorreu a partir do último trimestre de 2019, período que pode ser considerado recente até então. Desta forma, em cada EPESOL existem particularidades decorrentes dos dias que apresentam falta de dados, os quais são passíveis de acontecer a qualquer momento no sistema.

3.2.1 SFVCR

Os módulos que compõem o SFVCR apresentam características distintas de acordo com a tecnologia empregada. As principais especificações elétricas definidas pelos manuais dos fabricantes para cada modelo de módulo fotovoltaico utilizado na EPESOL estão definidas na Tabela 8.

Tabela 8 – Especificações elétricas dos módulos fotovoltaicos em condições STC.

	m-Si	p-Si	CIGS	CdTe
Fabricante	QCells	QCells	Solibro	Calyxo
Modelo	Q.Peak L-G5.0.G	Q.Power L-G5	SL2-140	CX3pro 85
Potência nominal [Wp]	365	335	140	85
Tensão de operação [V]	39,38	37,80	86,50	46,20
Tensão de circuito aberto [V]	48,16	46,30	106,70	59,00
Corrente de operação [A]	9,27	8,87	1,62	1,84
Corrente de curto circuito [A]	9,75	9,40	1,79	2,11
Eficiência [%]	≥18,80	≥17,20	≥14,90	≥11,80
Temperatura de operação nominal na célula fotovoltaica [°C]	45±3	45±3	42	45±2
Coefficiente de temperatura em relação à potência nominal [%/°C]	-0,39	-0,40	-0,32	-0,25

Fonte: Calyxo TS Solar GmbH (2018), Hanwha Q Cells (2017a, 2017b); Solibro GmbH (2017).

O acesso aos dados de geração de energia é realizado por meio da memória de massa dos inversores alocados sob os painéis fotovoltaicos. O SFVCR de m-Si, assim como o de p-Si, foi instalado com dois inversores da marca NHS Solar (modelo 3K – GSM1) de 3 kW. Para as tecnologias de CIGS e CdTe foi necessária a instalação de um inversor da mesma marca (modelo 1K5 – GSM1) de 1,5 kW para cada SFVCR.

As principais especificações técnicas dos inversores fornecidos pela NHS Solar estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Especificações elétricas dos inversores.

	Inversor 1K5 – GSM1	Inversor 3K – GSM1
Potência máxima CC [V]	1950	3900
Tensão máxima CC [V]	450	500
Faixa de tensão do MPPT [V]	80~400	80~450
Tensão de partida [V]	80	80
Corrente máxima CC [A]	10	18
Proteção sobrecorrente CC [A]	12,5	22,5
Potência nominal CA [VA]	1500	3000
Máxima potência CA [VA]	1500	3000
Corrente máxima CA [A]	7,5	13,5
Proteção sobrecorrente CA [A]	11	20
Parâmetros nominais da rede	50/60 Hz; 220/230 VAC	

Fonte: NHS Solar (2018).

Considerando que o Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI) é a razão entre a potência nominal do inversor e a potência nominal instalada dos módulos, o FDI calculado é de 1,17 para a tecnologia de m-Si, 1,28 para p-Si, 0,89 para CIGS e 0,98 para CdTe. Nota-se que os inversores alocados sob os painéis de silício cristalino operam de forma subcarregada, enquanto os inversores das tecnologias de filmes finos operam sobrecarregados.

O computador de supervisão (*ST-One*) é um dispositivo que coleta informações dos inversores com periodicidade de um minuto. O padrão *Recommendad Standart – 485* (RS-485) é utilizado para realizar a comunicação entre os inversores e o *ST-One*, sendo que cada dispositivo possui um endereço de memória. À medida que o *ST-One* envia uma requisição de leitura, apenas o inversor que possui o endereço corresponde à requisição responderá. Na requisição de dados o inversor responde informações agregadas internamente, como por exemplo, os valores de tensão e corrente fornecidos pelos painéis fotovoltaicos bem como a energia elétrica transferida. Estas informações são recebidas pelo *ST-One* e são armazenadas e transmitidas via *internet* para um servidor *File Transfer Protocol* (FTP) em arquivos no formato CSV.

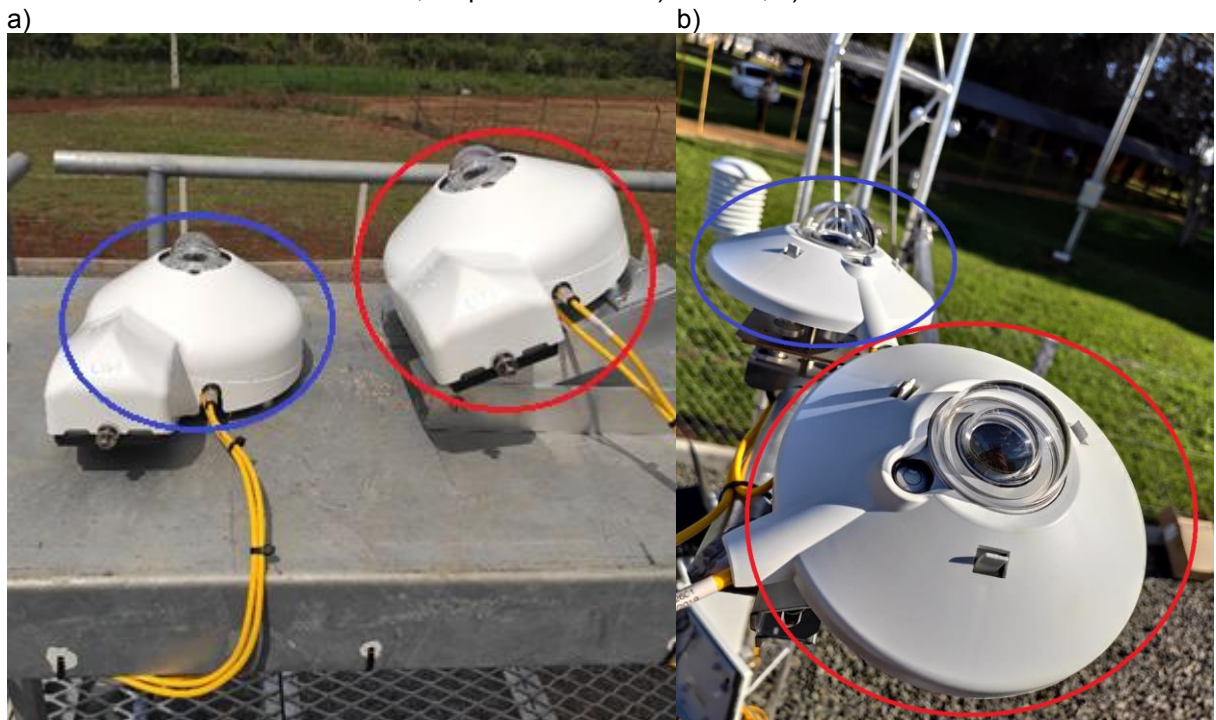
Os problemas mais comuns que podem ocasionar a falta de dados são: erros de comunicação com o padrão RS-485, falhas de frequência, isolamento ou tensão da

rede, falhas de conexão com os cabos dos inversores, sobretensão do painel fotovoltaico, aquecimento ou desligamento do inversor ou até mesmo do *ST-One*. Em muitos casos, ao detectar um erro, não é possível resolvê-lo remotamente, fazendo com que seja necessária uma visita *in loco* para solucioná-lo enquanto uma grande quantidade de dados pode ser perdida neste intervalo.

3.2.2 Estações Solarimétricas

Os piranômetros que serviram de base neste estudo para o cálculo da irradiação solar são os modelos CMP10 e CMP6 da marca *Kipp & Zonen*, ambos presentes nas estações SONDA e EPE, respectivamente. Os dois instrumentos podem fornecer dados de irradiância global horizontal e no plano inclinado. A diferenciação ocorre de acordo com o ângulo com que os equipamentos estão instalados, conforme ilustrado na Figura 23. Caso o piranômetro esteja instalado com uma determinada inclinação, os dados de irradiância serão referentes à mesma inclinação. Neste caso, eles foram instalados com o mesmo ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos da EPESOL correspondente.

Figura 23 – Piranômetros instalados na posição horizontal e inclinada, destacados em azul e vermelho, respectivamente: a) CMP10; b) CMP6.



Fonte: LABENS (2020).

O CMP10 é um piranômetro de padrão secundário, sendo tecnicamente superior ao CMP6, classificado como primeira classe. Ambos são produzidos pela *Kipp & Zonen*. Apesar da faixa espectral ser a mesma, a diferenciação entre eles se deve principalmente ao tempo de resposta e à sensibilidade de cada um, conforme especificado na Tabela 10.

Tabela 10 – Especificações elétricas dos piranômetros CMP6 e CMP10.

	Piranômetro CMP6	Piranômetro CMP10
Faixa espectral	285 a 2800 nm	285 a 2800 nm
Tempo de resposta (63%)	< 6 s	< 1,7 s
Tempo de resposta (95%)	< 18 s	< 5 s
Sensibilidade	5 a 20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	7 a 14 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Não - estabilidade (variação/ano)	< 1%	< 0,5%
Não - linearidade (100 a 1000 W/m^2)	< 1%	< 0,2%

Fonte: Kipp & Zonen (2016).

Os detectores dos piranômetros são baseados em um elemento de sensoriamento térmico chamado termopilha, o qual é composto por 64 junções de termopares no modelo CMP6 e por 32 junções no CMP10. Embora a construção do detector ser diferente entre os modelos, o princípio de funcionamento é o mesmo.

A medição ocorre à medida que a radiação incide sobre o sensor de termopilha, aquecendo-o e produzindo uma pequena tensão de saída em função da irradiância absorvida. O tempo de resposta caracteriza o intervalo para que a saída atinja 95% ou 63% do valor final após reagir à mudança de radiação incidente que foi medida em um determinado instante. A sensibilidade da termopilha é determinada principalmente pelas propriedades físicas do próprio detector e a variação percentual deste parâmetro ao longo de um ano é definida como não - estabilidade. O desvio percentual da sensibilidade em uma determinada faixa de irradiância caracteriza o efeito não-linear do aparelho, causado em grande parte por perdas de calor (KIPP & ZONEN, 2016).

O armazenamento de dados é realizado a partir da medição dos sinais de tensão de saída em função da irradiância que são enviados para um *data logger* modelo CR1000X, da *Campbell Scientific*. Este dispositivo converte a medição em variáveis radiométricas e, a cada minuto, a média dos valores medidos a cada segundo é armazenada e transmitida via *internet* para um servidor FTP em arquivos no formato CSV.

A configuração do *data logger* sofre constantes atualizações a fim de aperfeiçoar a coleta de dados, ocasionando eventuais problemas de comunicação que implicam na perda de algumas informações. Outros problemas comuns que podem ocasionar a falta de dados são: desnível dos sensores, conectores com mau contato, inversão de cabos que realizam as conexões elétricas e erro na sensibilidade dos piranômetros.

3.2.3 Sensores de Temperatura

Os valores de temperatura nos painéis fotovoltaicos foram obtidos por meio dos sensores modelo CS240 PT-1000 Classe A, fornecidos pela *Campbell Scientific*. Conforme ilustrado na Figura 24, os sensores permanecem presos com uma fita na parte traseira de um dos módulos para cada tecnologia de SFVCR, totalizando então, quatro sensores de temperatura em cada EPESOL. A medição ocorre a cada segundo e a médias desses valores é enviada a cada minuto para o mesmo *data logger* em que são gravados os dados de irradiação.

Figura 24 – Sensor de temperatura preso na parte traseira do módulo fotovoltaico.



Fonte: LABENS (2020).

Os dados de temperatura são armazenados e transmitidos via *internet* para um servidor FTP em arquivos no formato CSV. A temperatura detectada no módulo pode servir como parâmetro de avaliação de irradiância e de conversão de energia no SFVCR.

3.3 TRATAMENTO DE DADOS

Após a aquisição dos dados brutos dos equipamentos presentes nos SFVCR e nas estações solarimétricas, bem como dos próprios sensores de temperatura, o tratamento dos dados de geração de energia, irradiação e temperatura nos painéis fotovoltaicos foi realizado no *software Excel*®.

3.3.1 Geração de Energia

Os valores mensais de energia foram calculados através da análise dos dados de periodicidade de um minuto coletados no período de 24 horas. Os dados de geração de energia são acumulados, isto é, o valor de energia armazenado a cada minuto é somado ao valor registrado no minuto anterior. A geração de um dia específico equivale à diferença entre o último e o primeiro dado armazenado naquele mesmo dia. Por sua vez, a geração mensal resulta da subtração entre o último e o primeiro dado armazenado naquele mesmo mês.

Partindo do princípio de que a análise é realizada mensalmente, quando algum equipamento do SFVCR apresenta problemas consecutivos que o impedem de fornecer dados de geração ao usuário, o mês referente ao ocorrido é descartado da análise em função da impossibilidade de recuperação dos dados perdidos. Assim, considera-se o início da análise o primeiro dia do próximo mês desde que os dados estejam disponíveis.

Na Tabela 11 é apresentado o cronograma de acesso e análise dos dados de geração de energia em cada EPESOL. Para realizar o tratamento de dados, foram consideradas duas condições em relação à data de início do acesso e da análise dos dados de geração de energia:

- a) início do acesso aos dados: data em que os dados pararam de apresentar problemas, sendo disponibilizados a partir da meia noite do determinado dia;
- b) início da análise dos dados: data em que os dados começaram a ser analisados nesta pesquisa.

Tabela 11 – Cronograma de acesso e análise dos dados de geração de energia.

EPESOL	Geração de energia	
	Início do acesso aos dados	Início da análise dos dados
Campo Mourão	08/10/2019	01/01/2020
Cornélio Procópio	09/10/2019	01/11/2019
Curitiba	22/08/2019	01/10/2019
Medianeira	08/10/2019	01/12/2019
Pato Branco	03/09/2019	01/10/2019 ¹
Ponta Grossa	12/10/2019	01/11/2019

Fonte: Autoria própria (2020).

Nota: ¹ Data de início para a tecnologia m-Si, as demais iniciaram-se em 01/01/2020.

Considerando que os SFVCR de Curitiba foram os primeiros a ser instalados, assumiu-se que o início da análise seria em 01/10/2019, data de referência em que os recorrentes problemas de comunicação foram solucionados. Em Pato Branco, única EPESOL em que o início do acesso foi anterior a esta data, considerou-se a mesma data de referência adotada em Curitiba para o início da análise dos dados.

Nas demais EPESOL onde o início de acesso aos dados foi posterior a 01/10/2019, considerou-se o início da análise o primeiro dia do próximo mês, ou seja, 01/11/2019. As EPESOL Campo Mourão e Medianeira são exceções, visto que alguns problemas técnicos impediram o acesso aos dados de alguns dias neste intervalo, fazendo com que o início da análise fosse adiado.

Os detalhes da Tabela 11 podem ser visualizados no Apêndice A, o qual apresenta a disponibilidade diária de acesso aos dados dos equipamentos das EPESOL a partir de 01/10/2019. Foram elencadas quatro situações para realizar a análise referente aos dados de geração de energia:

- a) dados disponíveis: há dados disponíveis de geração de energia;
- b) dados indisponíveis: não há dados disponíveis de geração de energia;

- c) dados incompletos: a geração de energia foi interrompida;
- d) dados não analisados: há dados disponíveis, mas não foram analisados;
- e) inativo: período anterior ao início de acesso aos dados ou período em que a EPESOL permaneceu desligada.

Nos meses em que há “dados indisponíveis”, caso existam “dados disponíveis”, estes foram descartados e classificados como “dados não analisados”. Este método visa enfatizar apenas os meses em que os dados se encontram disponíveis por todos os dias para realizar a análise mensal. O mesmo critério é válido para situações em que o *status* da EPESOL é classificado como “inativo”.

3.3.2 Irradiação

Os dados de irradiância fornecidos em intervalos de um minuto foram integrados para a obtenção da irradiância diária no plano inclinado. Em seguida foi realizada a média dos valores diários para obter a irradiância média diária mensal.

Em razão da instalação das estações solarimétricas ter ocorrido após a instalação dos SFVCR, o cronograma de acesso e análise dos dados é diferente do apresentado na sessão 3.3.1, conforme pode ser visualizado na Tabela 12. Para realizar o tratamento de dados, foram consideradas duas condições em relação à data de início do acesso e da análise dos dados de irradiância:

- a) início do acesso aos dados: data em que os dados pararam de apresentar problemas, sendo disponibilizados a partir da meia noite do determinado dia;
- b) início da análise dos dados: data em que os dados começaram a ser analisados nesta pesquisa.

A análise dos dados de irradiância iniciou-se a partir do dia em que se encontravam acessíveis, desde que a análise de geração de energia já houvesse sido

iniciada. Caso contrário, considerou-se o início da análise dos dados de irradiação a data correspondente ao início da análise dos dados de geração de energia, como nos casos de Campo Mourão e Curitiba.

Tabela 12 – Cronograma de acesso e análise dos dados de irradiância.

EPESOL	Irradiação	
	Início do acesso aos dados	Início da análise dos dados
Campo Mourão	28/11/2019	01/01/2020
Cornélio Procópio	28/11/2019	28/11/2019
Curitiba	27/09/2019	01/10/2019
Medianeira	01/12/2019	01/12/2019
Pato Branco	28/11/2019	28/11/2019
Ponta Grossa	28/11/2019	28/11/2019

Fonte: Autoria própria (2020).

Em determinados dias após a data de início da análise houve perdas de dados de irradiância em decorrência de novos problemas de comunicação com o data logger ou até mesmo de atualizações no sistema de armazenamento de dados. Sendo assim, nos dias em que não há dados de irradiância disponíveis para o plano inclinado, também não há dados disponíveis para o plano horizontal. Deste modo, foi necessário realizar a aquisição de dados de irradiação da Estação Meteorológica Automática (EMA) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) mais próxima da respectiva EPESOL para complementar os dias em que a irradiação é desconhecida. Este método foi utilizado em dois casos:

- a) quando a data de início da análise dos dados de geração de energia é anterior à análise dos dados de irradiação, como no caso de Cornélio Procópio, Pato Branco e Ponta Grossa, para complementar os dias com ausência de dados de irradiação no período em que as estações solarimétricas estavam inativas;
- b) nas estações solarimétricas cujos dados diários de irradiância estavam incompletos ou indisponíveis no decorrer da análise, evitando a alteração da taxa de desempenho em função de uma possível distorção da média da irradiação diária mensal.

O INMET possui uma rede de EMA que compreende mais de 500 cidades no território brasileiro, cujas informações podem ser acessadas por meio do seu portal eletrônico. Adotou-se como critério de escolha de cada EMA a mínima distância existente até a EPESOL de referência. Caso os dados da EMA mais próxima estejam indisponíveis, considerou-se a segunda menor distância entre outra EMA e a referente EPESOL. Estas duas condições estão designadas na Tabela 13 como opção “1” e “2”, respectivamente. Sendo assim, cada estação solarimétrica terá uma ou duas EMA complementares.

Tabela 13 – Distância das EMA do INMET mais próximas dos EPESOL.

EPESOL	EMA complementar	Opção	Distância
Campo Mourão	A822 - Nova Tebas - PR	1	59,2 km
Cornélio Procópio	A842 - Nova Fátima - PR	1	26,5 km
Curitiba	A807 - Curitiba - PR	1	10,9 km
Medianeira	A846 - Foz do Iguaçu - PR	1	49,8 km
	A855 - Planalto - PR	2	59,4 km
Pato Branco	A816 - Novo Horizonte - SC	1	28,3 km
	A876 - Clevelândia - PR	2	41,7 km
Ponta Grossa	A819 - Castro - PR	1	32,2 km

Fonte: Adaptado de Google Earth (2019), INMET (2020).

Foram elencadas seis situações para realizar a análise referente aos dados de irradiação:

- a) dados disponíveis: há dados disponíveis de irradiância durante o dia;
- b) dados não analisados: há dados disponíveis, mas não foram analisados;
- c) inativo: período anterior ao início de acesso aos dados ou período em que a EPESOL permaneceu desligada;
- d) EMA 1: os dados de irradiância estão incompletos ou indisponíveis durante o dia e adotou-se a irradiação diária fornecida pela EMA designada como opção 1;

- e) EMA 2: os dados de irradiância estão incompletos ou indisponíveis durante o dia e adotou-se a irradiação diária fornecida pela EMA designada como opção 2;
- f) EPE/SONDA: os dados de irradiância da SONDA estão incompletos ou indisponíveis durante o dia e adotou-se a irradiação diária fornecida pela EPE (exclusivo para EPESOL Curitiba).

Apenas em Medianeira e Pato Branco foi necessário recorrer às duas opções complementares, entretanto, a EMA A846 de Foz do Iguaçu não apresentou dados disponíveis no período e a EMA A855 de Planalto acabou atendendo os cálculos da EPESOL Medianeira quando necessário.

Exclusivamente em Curitiba, onde há duas estações solarimétricas, adotou-se como padrão a estação SONDA para realizar a análise. Esta escolha visa priorizar os equipamentos que, além de financeiramente mais caros, apresentam qualidade e confiabilidade superiores em relação aos da EPE. Nos dias em que os dados de irradiância da SONDA se encontravam indisponíveis, utilizou-se os dados da EPE. Caso ambas não apresentassem dados, utilizou-se a EMA A807 do INMET.

Em razão dos dados disponibilizados pelo INMET serem referentes ao plano horizontal, foi necessária a utilização do *software* RADIASOL para determinar os valores da irradiação incidente no plano dos painéis fotovoltaicos de acordo com o ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos de cada EPESOL. O RADIASOL foi desenvolvido e disponibilizado pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LABSOL), sendo capaz de simular o valor da irradiação no plano inclinado por meio de parâmetros de entrada como coordenadas geográficas, irradiação no local, ângulo de inclinação e orientação geográfica dos painéis fotovoltaicos (LABSOL, 2019).

Embora a escolha das EMA tenha priorizado as menores distâncias, os resultados de irradiação podem apresentar graus de incerteza, visto que os processos de interpolação de dados observados em superfície não se comportam de forma precisa entre as EMA que estão relativamente distantes das EPESOL.

Segundo Pereira et al. (2017), os erros de interpolação causados por estações distantes em mais de 30 km entre si, são superiores aos erros de estimativas

produzidas por modelos de transferência radiativa BRASIL-SR³. Desta forma, adotou-se o método detalhado a seguir para calcular a diferença percentual que pode ocorrer no cálculo de irradiação no plano inclinado em função da irradiação global horizontal.

Quando uma EMA e uma SONDA ou EPE apresentam dias com dados disponíveis em comum, estes dias são contabilizados para calcular a média da irradiação diária global horizontal proveniente de cada estação e, em seguida, é calculada a diferença percentual em função da diferença das médias obtidas. Esta diferença é atribuída no cálculo da irradiação global horizontal diária baseadas nas EMA. O resultado é então inserido no RADIASOL no campo referente ao mês em que o dado foi calculado. O valor final fornecido pelo *software* é então atribuído ao dia em que a irradiação no plano inclinado é desconhecida na estação SONDA ou EPE.

Quando alguma estação SONDA ou EPE é identificada com o *status* “inativo”, significa que a estação solarimétrica não estava em operação e os dados de irradiância não foram medidos, portanto não foi realizada a análise dos dados da EMA complementar no dia correspondente. Do mesmo modo, nos dias em que a EMA se encontra com o *status* “inativo”, a análise diária das estações SONDA ou EPE não foi realizada.

No Apêndice B é apresentado um cronograma da disponibilidade diária de acesso aos dados de irradiância das estações SONDA, EPE e EMA do INMET. Foram elencadas quatro situações para realizar a análise:

- a) dados disponíveis: a estação apresentou dados de irradiância durante o dia;
- b) dados indisponíveis: a estação apresentou dados incompletos ou nenhum dado de irradiância durante o dia;
- c) dados não analisados: a estação complementar apresentou dados incompletos ou nenhum dado de irradiância durante o dia;

3 Modelo físico que utiliza dados de cobertura de nuvens, topografia, albedo de superfície, temperatura, umidade relativa e visibilidade atmosférica para todo o território brasileiro. Os resultados são validados por meio de comparação estatística com base em dados medidos por meio de piranômetros instalados na rede de EMA operada pelo INMET e pela rede SONDA operada pelo LABREN/INPE (PEREIRA et al., 2017).

- d) inativo: período anterior ao início de acesso aos dados de irradiância ou período em que a estação permaneceu desligada.

Na Tabela 14 é apresentada a quantidade de dias contabilizados para calcular as médias e a respectiva diferença percentual da irradiação diária global horizontal medida pelas EMA em relação à estação SONDA ou EPE.

Tabela 14 – Diferença percentual atribuída no cálculo da irradiação.

EPESOL - Estação	EMA complementar	Quantidade de dias analisados	Irradiação [kWh/m ² .dia]		Diferença percentual EMA – SONDA/EPE
			Média EMA	Média SONDA/EPE	
CM - SONDA	A822	151	5,32	5,25	1,24%
CP - EPE	A842	120	5,59	5,68	-1,61%
CT - SONDA	A807	295	4,58	4,60	-0,39%
MD - SONDA	A855	300	5,03	4,98	0,96%
PB - EPE	A816	97	6,31	6,56	-3,73%
	A876	269	5,22	5,31	-1,76%
PG - EPE	A819	300	4,27	4,73	-9,73%

Fonte: Autoria própria (2020).

Em situações em que foram utilizadas duas EMA complementares, como em Pato Branco, caso alguma EMA apresentasse “dado indisponível” em determinado dia, o dado da EPE continuaria sendo contabilizado como “dado disponível” para comparar com a outra EMA caso ela também apresentasse o mesmo *status* naquele mesmo dia. Essas situações ocorreram nos dias 30 e 31 de janeiro de 2020, por exemplo.

O sinal de saída do piranômetro pode ser negativo ou apresentar valores muito pequenos, geralmente inferiores à milésimos de irradiância. Este efeito está relacionado à temperatura que o sensor troca com a radiação com a atmosfera relativamente fria. Em geral, a atmosfera é mais fria que a temperatura ambiente na superfície da Terra e, por meio da transferência radiativa, as cúpulas do piranômetro acabam perdendo energia para a atmosfera uma vez que estão mais frias que o próprio instrumento. A diferença de temperatura no interior da cúpula e a carcaça do piranômetro é responsável por gerar valores negativos de irradiância durante a noite, os quais foram desprezados em todos os cálculos.

3.3.3 Temperatura nos Painéis Fotovoltaicos

Com o intuito de analisar a média da máxima temperatura nos painéis fotovoltaicos durante o mês, identificou-se diariamente o maior valor medido em cada tecnologia de módulo fotovoltaico por meio dos sensores de temperatura. O método de considerar a maior temperatura no dia possibilitou uma análise relevante para o estudo da taxa de desempenho dos SFVCR, visto que é o momento em que ocorrem perdas significativas em função do coeficiente de temperatura relativo à potência nominal do módulo ser negativo.

A análise da temperatura nos painéis fotovoltaicos foi realizada em todos os meses em que há resultados dos índices de mérito, exceto outubro (para Curitiba e Pato Branco) e novembro (para Cornélio Procópio, Pato Branco e Ponta Grossa), nos quais ainda não havia sido realizada a verificação da correta fixação dos sensores.

Em alguns dias, a máxima temperatura observada no módulo de determinada tecnologia destoava das demais, com uma diferença inferior ou superior à 10°C. Neste caso, os valores que apresentaram essa diferença foram desprezados e substituídos. O método consiste em identificar o próximo dia em que as temperaturas das quatro tecnologias estão estabelecidas e, em seguida, verificar qual delas apresenta um valor mais próximo em relação à tecnologia cuja temperatura foi desprezada. Adotou-se como referência a tecnologia que apresentou a menor diferença, assumindo sua respectiva temperatura no dia em que o dado foi desprezado.

Nos dias em que há apenas uma temperatura disponível dentre as quatro tecnologias, assumiu-se que este valor foi o mesmo em todos os painéis fotovoltaicos.

Nos dias em que as quatro tecnologias não apresentaram dados, calculou-se a estimativa da maior temperatura da célula fotovoltaica (T_c) em função da maior temperatura ambiente observada em determinado horário por meio da Equação 4, proposta por Duffie e Beckman (2013). Os valores previamente fixados estão de acordo com o SRE (Padrão de Referência do Ambiente). De acordo com Yang et al. (2018), esta equação é a que apresenta o menor erro médio entre o cálculo e o valor medido, sendo este erro de 5,20%.

$$T_c = T_a + \left[\left(\frac{G}{G_{NOCT}} \right) \cdot \left(\frac{9,5}{5,7 + 3,8 \cdot V_w} \right) \cdot (T_{cNOCT} - T_{aNOCT}) \cdot \left(1 - \left(\frac{\eta_c}{\tau\alpha} \right) \right) \right] \quad (4)$$

Onde:

T_a = temperatura ambiente [°C];

G = irradiância solar [W/m²];

G_{NOCT} = irradiância total segundo SRE, fixada em 800 W/m²;

V_w = velocidade do vento [m/s];

$T_{c_{NOCT}}$ = temperatura de operação nominal na célula fotovoltaica, fornecida pelo fabricante do módulo fotovoltaico [°C];

$T_{a_{NOCT}}$ = temperatura ambiente de acordo com SRE, fixada em 20°C;

η_c = eficiência do módulo fotovoltaico;

$\tau\alpha$ = produto da transmitância-absortância, valor exato desconhecido, porém estimado em 0,9.

Como os dados de temperatura nos módulos, temperatura ambiente, velocidade do vento e irradiância são armazenados no mesmo datalogger, quando não há dados de temperatura nos módulos, também não há dados dos outros parâmetros de entrada para aplicar a fórmula. Neste caso, foram consideradas os dados das EMA do INMET definidas na Tabela 13 para a realização dos cálculos. A disponibilidade diária dos dados dos sensores de temperatura está definida no Apêndice C, em que foram considerados oito casos:

- a) Dados disponíveis: há dados disponíveis medidos pelos sensores de temperatura nos módulos;
- b) Dados não analisados: não foi realizada a análise de temperatura nos módulos fotovoltaicos em razão dos índices de mérito não terem sido calculados no mês em questão;
- c) Substituição por m-Si: os dados de temperatura nos módulos foram desprezados e substituídos pelos dados referentes à tecnologia m-Si;
- d) Substituição por p-Si: os dados de temperatura nos módulos foram desprezados e substituídos pelos dados referentes à tecnologia p-Si;

- e) Substituição por CIGS: os dados de temperatura nos módulos foram desprezados e substituídos pelos dados referentes à tecnologia CIGS;
- f) Substituição por CdTe: os dados de temperatura nos módulos foram desprezados e substituídos pelos dados referentes à tecnologia CdTe;
- g) EMA1: os dados de temperatura nos módulos estão indisponíveis e a temperatura foi estimada com base nos dados fornecidos pela EMA designada como opção 1;
- h) EMA2: os dados de temperatura nos módulos estão indisponíveis e a temperatura foi estimada com base nos dados fornecidos pela EMA designada como opção 2.

A metodologia adotada neste trabalho contemplou uma periodicidade mensal para a coleta e análise de desempenho de todos os dados. Eventualmente, problemas técnicos nos equipamentos que afetam a aquisição e o tratamento de dados foram identificados até o dia 30/09/2020, data final da análise, reduzindo a quantidade de meses analisados.

4 CARACTERIZAÇÃO E DESEMPENHO DOS SFVCR

Este capítulo irá apresentar os resultados decorrentes do tratamento dos dados de geração de energia, irradiação e temperatura nos painéis fotovoltaicos de acordo com as particularidades de cada região. Por meio dos índices de mérito, será analisado o desempenho dos SFVCR de diferentes tecnologias em cada EPESOL.

Os valores de potência nominal fornecidos pelo fabricante dos módulos fotovoltaicos, ou seja, a potência CC instalada, serviram como base para o cálculo dos índices de mérito dos SFVCR e da avaliação do desempenho de cada tecnologia em função das condições de instalação em cada mesorregião do Paraná. Ademais, os dados de temperatura nos módulos fotovoltaicos serviram de parâmetro para verificar as perdas ocorridas na taxa de desempenho em cada mês analisado.

Com o propósito de elevar a precisão das respostas, a realização dos cálculos envolveu todas as casas decimais fornecidas por cada uma das medições, entretanto, todos os resultados numéricos são apresentados com apenas duas. As pequenas diferenças que podem aparecer entre os resultados foram enfatizadas nos gráficos, adotando-se escalas reduzidas de 10% a 30% para o fator de capacidade, 70 a 200 kWh/kWp.mês para a produtividade e 70% a 94% para a taxa de desempenho. Nos meses em que não há indicação de dados nos gráficos, deve-se interpretar que não foi possível realizar a aquisição de dados, bem como calcular os índices de mérito. Neste caso, os dados foram representados como “N.D.” (não disponíveis).

A irradiação no plano inclinado e a produtividade são parâmetros que além de calculados, estão presentes no Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná (TIEPOLO et al., 2017) por meio do Mapa Interativo disponibilizado em seu portal eletrônico. Sendo assim, calculou-se para cada EPESOL a variação percentual entre essas duas fontes, utilizando-se como referência os valores do Atlas pelo fato deste apresentar um estudo de dados históricos de 17 anos da irradiação em todo o estado.

Por fim, as tecnologias foram classificadas numa escala de 1 a 4 em função dos seus desempenhos mensais com base nos três índices de mérito calculados em cada EPESOL.

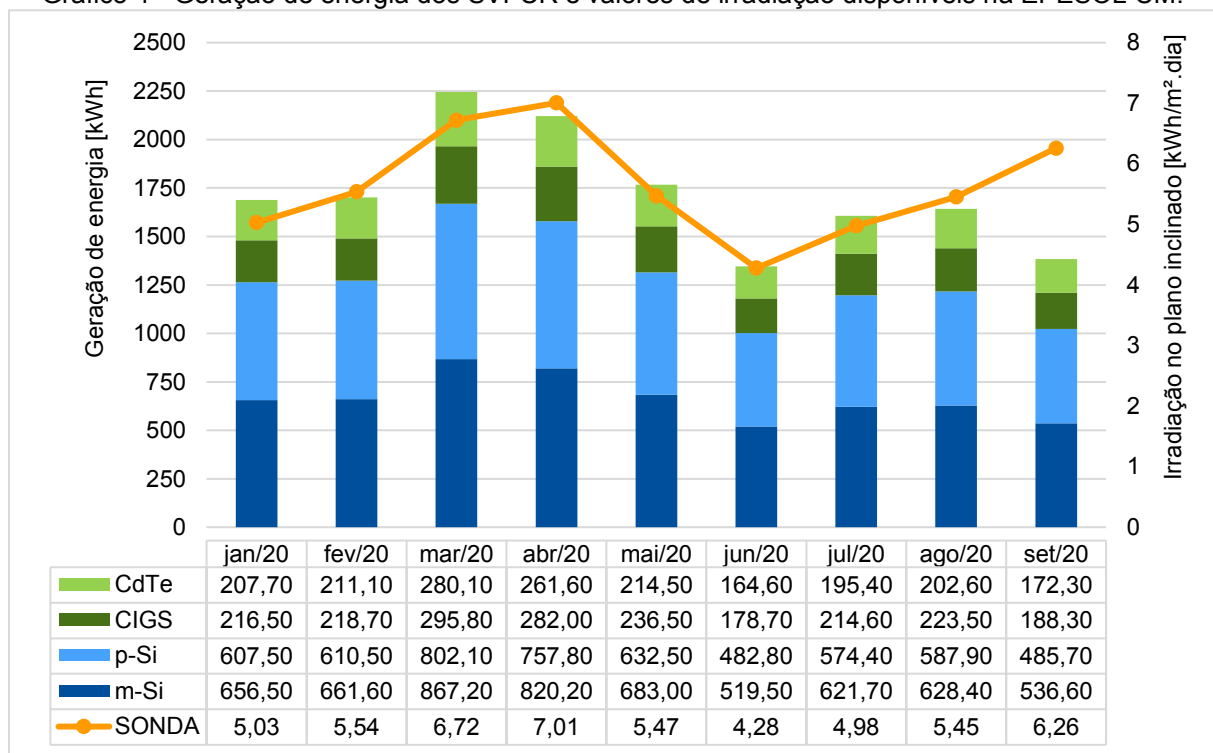
4.1 CAMPO MOURÃO

O acesso aos dados de geração de energia dos SFVCR instalados na EPESOL Campo Mourão teve início em 08/10/2019. Entretanto no período de 17/10/2019 a 13/12/2019 todos os inversores apresentaram problemas de comunicação. Sendo assim, considerou-se o início da análise a partir de 01/01/2020.

Os dados de irradiação no plano inclinado encontram-se disponíveis desde 28/11/2019. Como o início da análise dos dados de geração de energia foi somente em janeiro, os dados de irradiação coletados neste intervalo não foram avaliados uma vez que não seria possível calcular os índices de mérito no período. Portanto, iniciou-se a análise na mesma data em que a geração de energia começou a ser avaliada.

De acordo com o Gráfico 4, o total mensal de energia gerada pelos quatro SFVCR variou de 1,35 MWh a 2,25 MWh.

Gráfico 4 - Geração de energia dos SVFCR e valores de irradiação disponíveis na EPESOL CM.

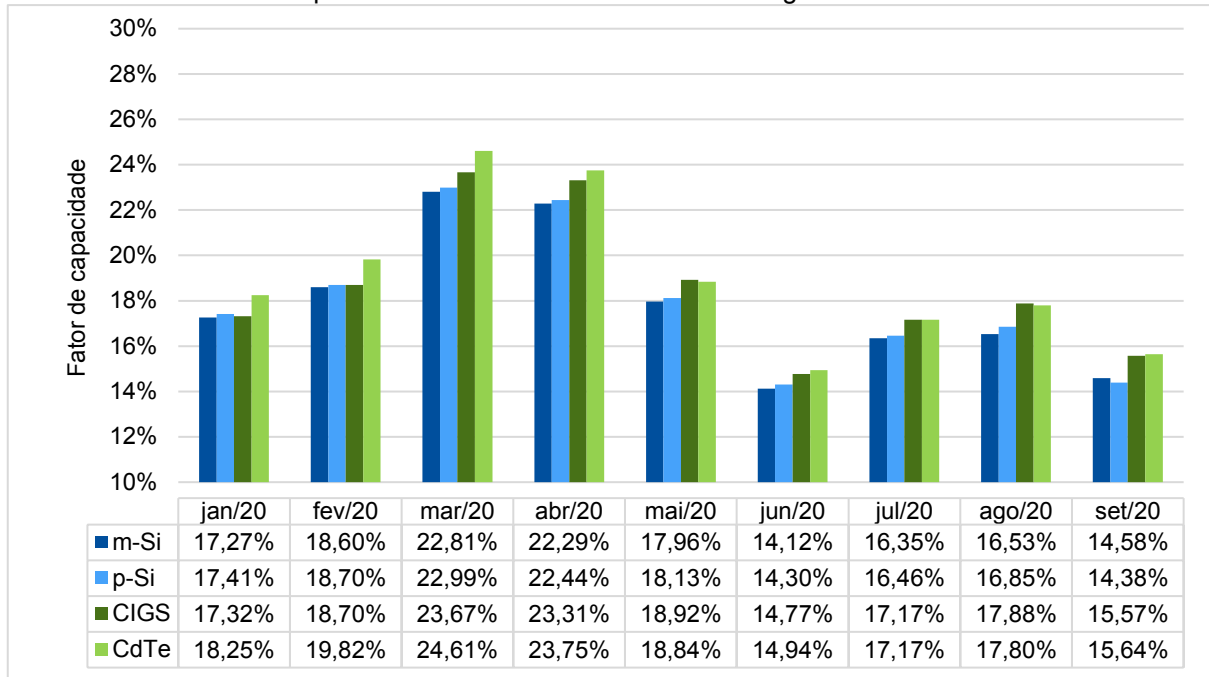


Fonte: Autoria própria (2020).

Os resultados obtidos para os fatores de capacidade podem ser observados no Gráfico 5. Exceto em maio, julho e agosto, o CdTe se destaca com o maior fator de capacidade dentre as tecnologias, atingindo o valor máximo em março, com

24,61%. A menor média encontrada foi para a tecnologia m-Si em junho, com uma porcentagem de 14,12%.

Gráfico 5 - Fator de capacidade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CM.



Fonte: Autoria própria (2020).

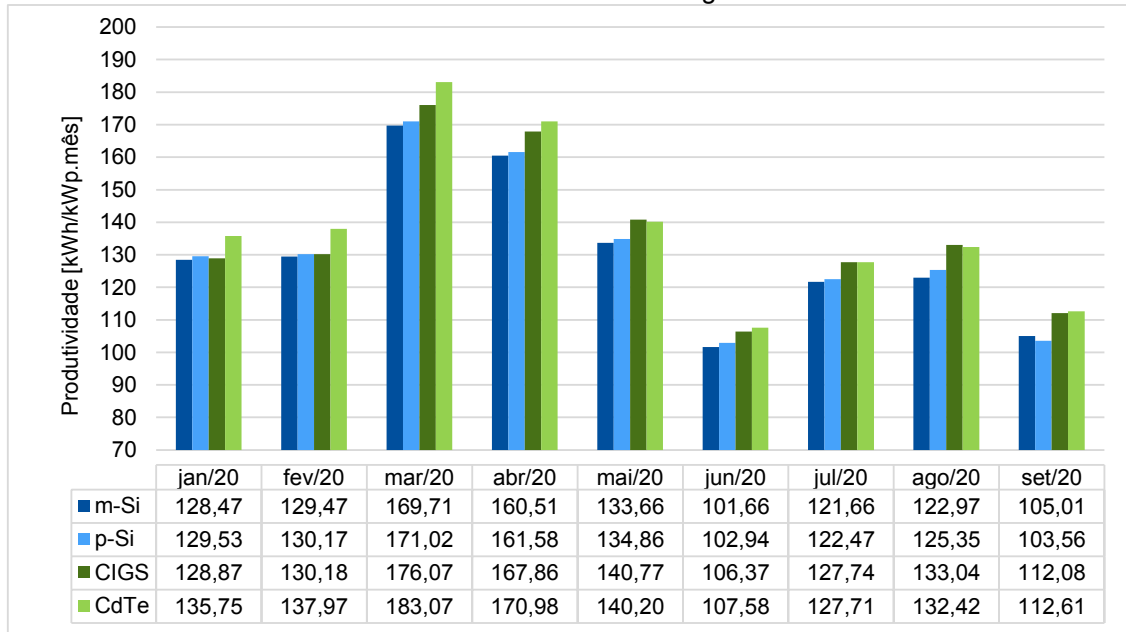
As médias por tecnologia dos fatores de capacidade relativos aos meses de janeiro a setembro foram: 17,84% para m-Si, 17,96% para p-Si, 18,59% para CIGS e 18,98% para CdTe. Em uma análise mensal, as médias considerando todas as tecnologias foram: 17,56% em janeiro, 18,96% em fevereiro, 23,52% em março, 22,95% em abril, 18,46% em maio, 14,53% em junho, 16,79% em julho, 17,26% em agosto e 15,04% em setembro.

Os resultados obtidos para as produtividades podem ser observados no Gráfico 6, cujo comportamento é semelhante ao apresentado para o fator de capacidade. Exceto em maio, julho e agosto, o CdTe se destaca com a maior produtividade dentre as tecnologias, atingindo o valor máximo em março, com 183,07 kWh/kWp. A menor média encontrada foi para a tecnologia m-Si em junho, com um total de 101,66 kWh/kWp.

As médias por tecnologia das produtividades relativas aos meses de janeiro a setembro foram: 130,35 kWh/kWp para m-Si, 131,28 kWh/kWp para p-Si, 135,89 kWh/kWp para CIGS e 138,70 kWh/kWp para CdTe. Em uma análise mensal, as médias considerando todas as tecnologias foram: 130,66 kWh/kWp em janeiro, 131,95 kWh/kWp em fevereiro, 174,97 kWh/kWp em março, 165,23 kWh/kWp em abril,

137,37 MWh em maio, 104,64 kWh/kWp em junho, 124,90 kWh/kWp em julho, 128,45 kWh/kWp em agosto e 108,32 kWh/kWp em setembro.

Gráfico 6 - Produtividade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CM.



Fonte: Autoria própria (2020).

Definidas as médias diárias mensais de irradiação no plano inclinado e as médias mensais de produtividade, considerando todas as tecnologias de SFVCR, realizou-se uma comparação entre os valores obtidos pela EPESOL Campo Mourão e os apresentados no Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná. Calculou-se a variação percentual entre as duas fontes utilizando-se como referência os valores do Atlas. A variação percentual obtida está apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 – Variação percentual entre os valores calculados e os apresentados no Atlas para a EPESOL CM.

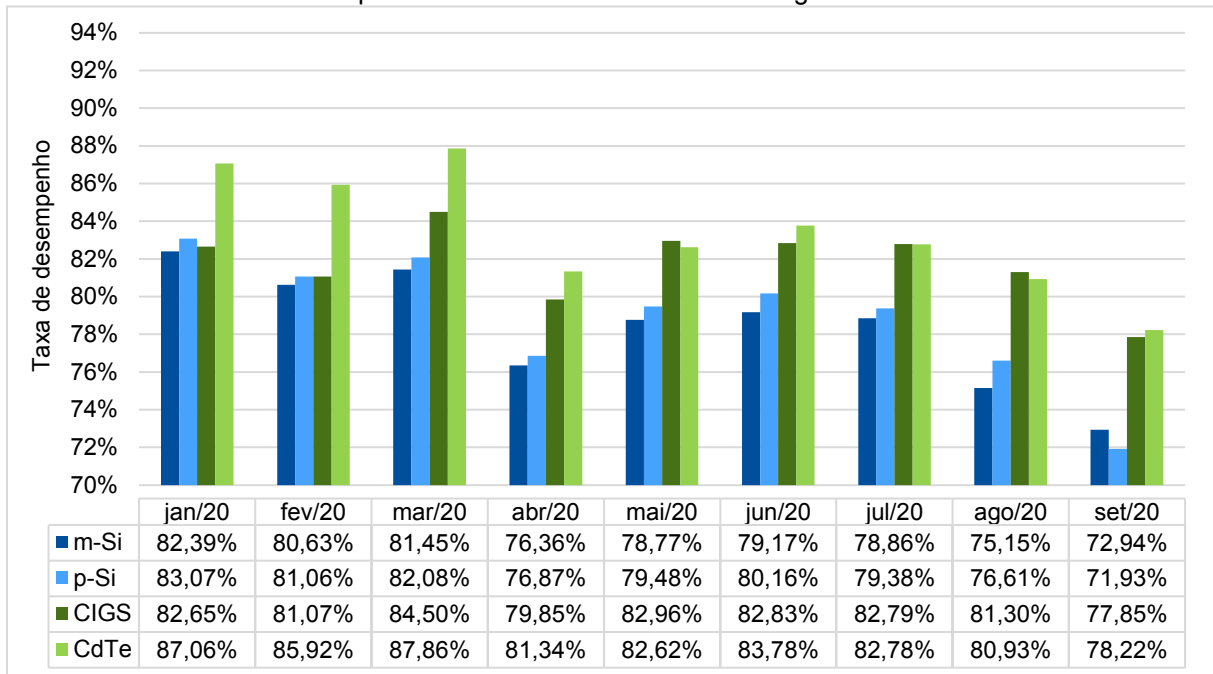
Período	Variação percentual EPESOL - Atlas [%]	
	Irradiação no plano inclinado	Produtividade
Janeiro 2020	-7,03%	3,81%
Fevereiro 2020	1,97%	11,79%
Março 2020	22,66%	37,33%
Abril 2020	33,47%	40,15%
Mai 2020	21,37%	31,11%
Junho 2020	3,14%	12,15%
Julho 2020	13,89%	22,83%
Agosto 2020	3,89%	5,43%
Setembro	26,97%	-2,42%

Fonte: Autoria própria (2020).

Exceto em janeiro, a irradiação obtida pela EPESOL CM foi de 1,97% a 33,47% superior à apresentada no Atlas, indicando que nesse período os níveis de radiação foram mais altos que a média histórica no local. As produtividades do SFVCR também podem ser consideradas elevadas uma vez que a expectativa apresentada no Atlas é inferior em oito dos nove meses analisados. Segundo Tiepolo et al. (2017), o total anual esperado na localidade é de 1.213 kWh/kWp.

De acordo com o Gráfico 7, obteve-se as maiores taxas de desempenho por tecnologia em março, atingindo o valor máximo em 87,86% com o CdTe. Em junho foram registrados os menores valores de irradiação e, conforme o Gráfico 8, também foram observados os menores valores de temperatura nos painéis fotovoltaicos. Entretanto as porcentagens relativas às taxas de desempenho deste mês não superaram às calculadas em março. As menores taxas de desempenho por tecnologia ocorreram em setembro, mês que a EPESOL apresentou problemas na coleta de dados.

Gráfico 7 – Taxa de desempenho mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CM.

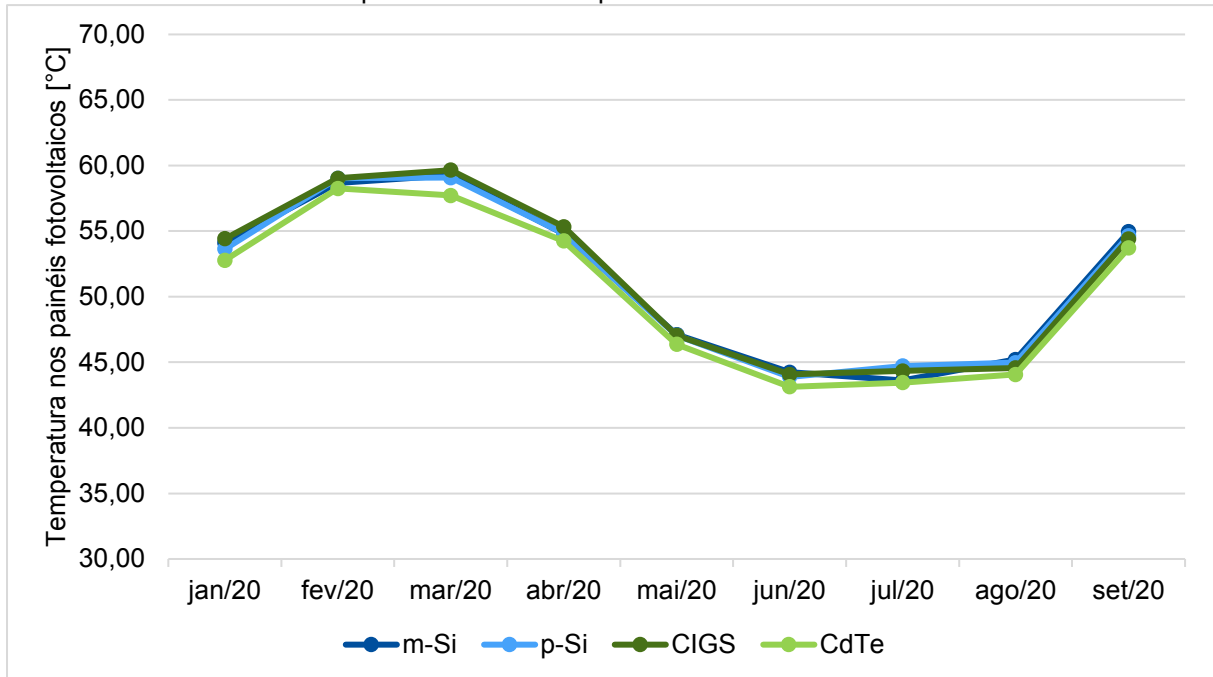


Fonte: Autoria própria (2020).

As médias por tecnologia das taxas de desempenho relativas aos meses de janeiro a setembro foram: 78,41% para m-Si, 78,96% para p-Si, 81,76% para CIGS e 83,39% para CdTe. Em uma análise mensal, as médias considerando todas as tecnologias foram: 83,79% em janeiro, 82,17% em fevereiro, 83,97% em março,

78,60% em abril, 80,96% em maio, 81,48% em junho, 80,95% em julho, 78,50% em agosto e 75,23% em setembro.

Gráfico 8 - Temperatura média nos painéis fotovoltaicos na EPESOL CM.



Fonte: Autoria própria (2020).

Na Tabela 16 é representado o desempenho de SFVCR na EPESOL Campo Mourão em cada mês analisado, sendo que as diferentes tecnologias estão numeradas de 1 a 4. A numeração foi baseada nos resultados mensais dos três índices de mérito calculados, em que “1” representa o melhor desempenho numa escala de 1 a 4.

Tabela 16 – Comparação de desempenho mensal para as diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CM.

Período	m-Si	p-Si	CIGS	CdTe
Janeiro 2020	4	2	3	1
Fevereiro 2020	4	3	2	1
Março 2020	4	3	2	1
Abril 2020	4	3	2	1
Mai 2020	4	3	1	2
Junho 2020	4	3	2	1
Julho 2020	4	3	1	2
Agosto 2020	4	3	1	2
Setembro 2020	3	4	2	1

Fonte: Autoria própria (2020).

Para todos os índices de mérito calculados, a tecnologia CdTe apresentou melhor desempenho em todos os meses analisados, exceto em maio, julho e agosto. Nos meses de fevereiro a abril, além de junho, os melhores resultados depois do CdTe foram: CIGS, p-Si e m-Si. Em abril, o desempenho de todas as tecnologias foi levemente reduzido em função do desligamento do *ST-One* que permaneceu até o às 15:58h do dia 01/04/2020. Há divergências nos meses de janeiro, maio, julho, agosto e setembro, em que a ordem de desempenho das tecnologias não foi a mesma em relação à maioria dos meses observados. Em maio e agosto o desempenho do gerador de tecnologia CIGS não foi reduzido uma vez que o efeito do sobrecarregamento do inversor não foi observado. Em julho, embora os cálculos apontem o desempenho de CIGS superior ao de CdTe, a diferença entre as duas tecnologias pode ser considerada desprezível.

Em uma análise que considera os nove meses de operação da planta de Campo Mourão, o desempenho do SFVCR de p-Si foi 0,69% superior ao de m-Si, enquanto o SFVCR de CdTe superou em 1,99% o de CIGS.

4.2 CORNÉLIO PROCÓPIO

O acesso aos dados de geração de energia dos SFVCR instalados na EPESOL CP teve início em 09/10/2019. Entretanto nesta EPESOL houve problemas de vistorias junto à COPEL, suspendendo a operação dos SFVCR de 09/12/2019 a 27/02/2020. Sendo assim, em 2019 analisou-se apenas o mês de novembro e, em 2020, considerou-se a partir de 01/03/2020 para realizar a análise.

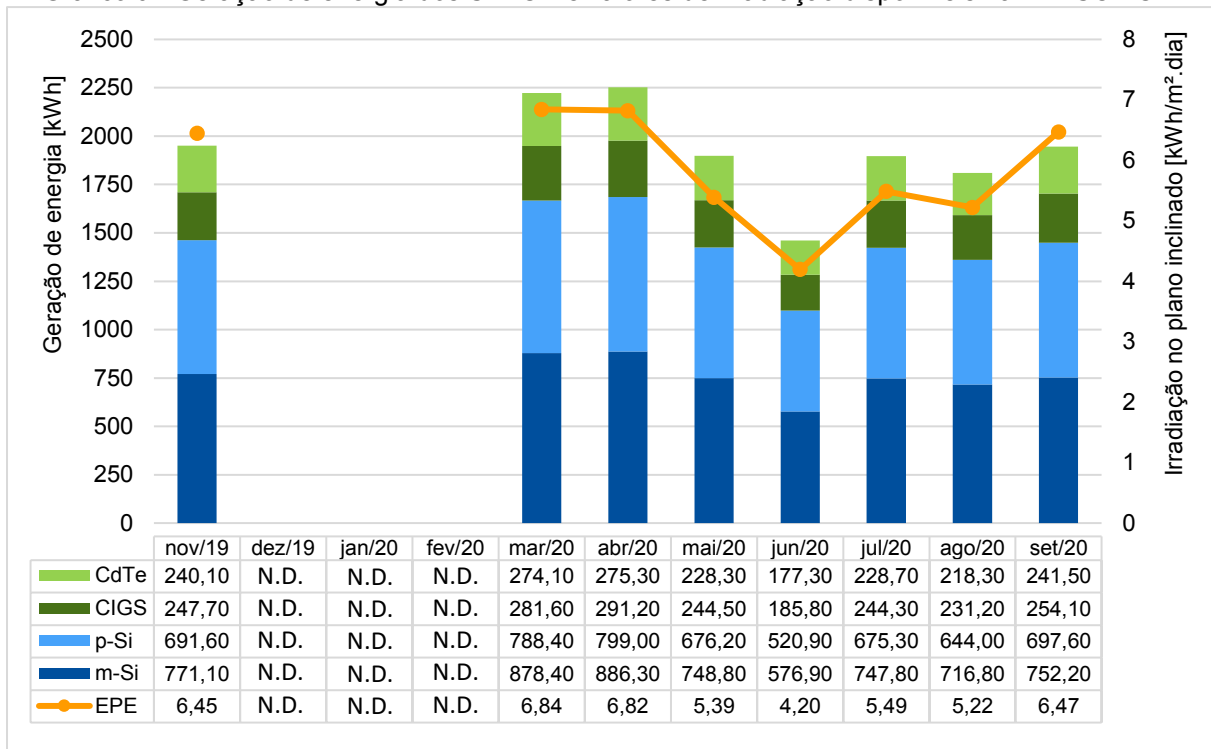
Assim como os SFVCR, a estação EPE também está instalada na cobertura da edificação. Neste caso, o desvio azimutal do piranômetro que mede a irradiação no plano inclinado seguiu o padrão das demais solarimétricas e está orientado ao norte geográfico. Em função do desvio azimutal dos módulos fotovoltaicos ser diferente de zero, utilizou-se os dados de irradiância provenientes do piranômetro que está no plano horizontal e o RADIASOL para calcular a irradiação no plano inclinado.

Os dados de irradiação global horizontal encontram-se disponíveis desde 28/11/2019. Sendo assim, foram coletados os dados da EMA A842 para calcular a irradiação nos dias de novembro em que a estação EPE não estava em operação. Assim como os SFVCR, a estação EPE também permaneceu desativada pelo mesmo

motivo entre 09/12/2019 e 27/02/2020. Logo, o período de dezembro de 2019 a fevereiro de 2020 foi desconsiderado nesta análise.

De acordo com o Gráfico 9, o total mensal de energia gerada pelos quatro SFVCR variou de 1,46 MWh a 2,25 MWh. Embora a irradiação seja ligeiramente maior em março, a geração de energia foi 300 kWh superior no mês seguinte. A interrupção de geração de energia no dia 9 de março e a substituição dos valores de irradiação pela EMA A842 em dois dias do mês podem justificar esse cenário.

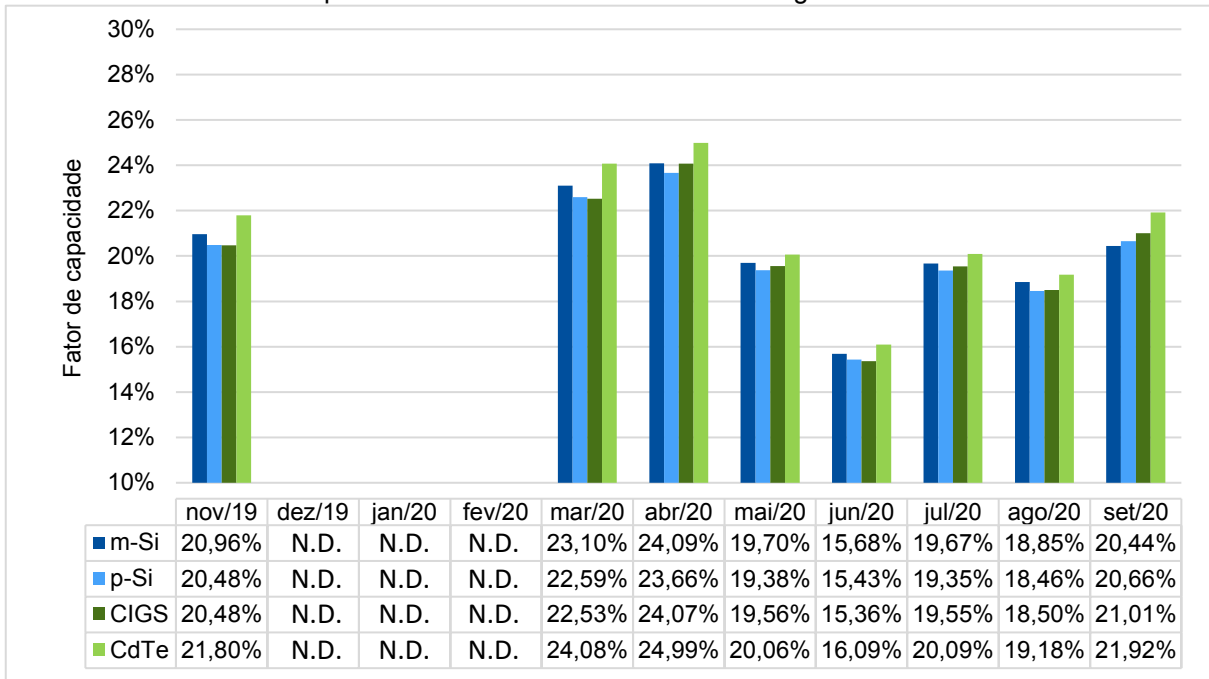
Gráfico 9 - Geração de energia dos SFVCR e valores de irradiação disponíveis na EPESOL CP.



Fonte: Autoria própria (2020).

Os resultados obtidos para os fatores de capacidade podem ser observados no Gráfico 10. Dentre as tecnologias, o CdTe se destaca com o maior fator de capacidade em todos os meses, atingindo o valor máximo em abril, com 24,99%. A menor média encontrada foi para a tecnologia CIGS em junho, com uma porcentagem de 15,36%.

Gráfico 10 – Fator de capacidade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CP.

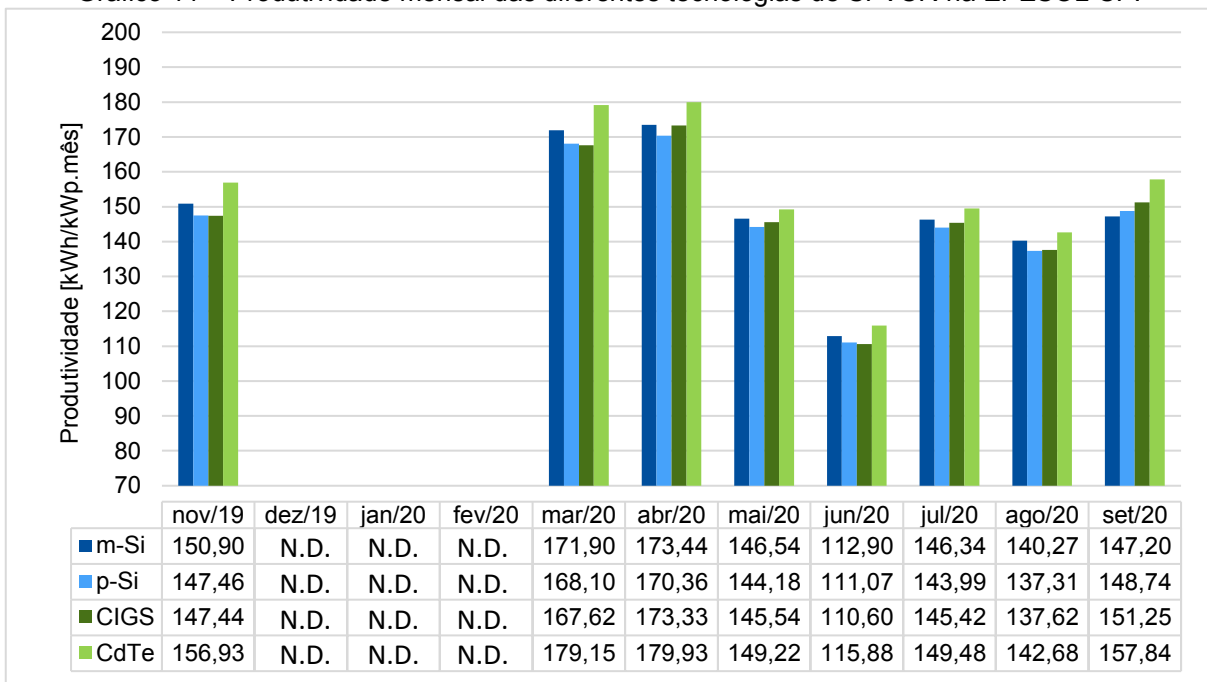


Fonte: Autoria própria (2020).

As médias por tecnologia dos fatores de capacidade relativos aos meses de novembro, além de março a setembro foram: 20,31% para m-Si, 20,00% para p-Si, 20,13% para CIGS e 21,03% para CdTe. Em uma análise mensal, as médias considerando todas as tecnologias foram: 20,93% em novembro, 23,08% em março, 24,20% em abril, 19,67% em maio, 15,64% em junho, 19,66% em julho, 18,75% em agosto e 21,01% em setembro.

Os resultados obtidos para as produtividades podem ser observados no Gráfico 11, cujo comportamento é semelhante ao apresentado para o fator de capacidade.

Gráfico 11 – Produtividade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CP.



Fonte: Autoria própria (2020).

Dentre as tecnologias, o CdTe se destaca com a maior produtividade em todos os meses, atingindo o valor máximo em abril, com 179,93 kWh/kWp. A menor média encontrada foi para a tecnologia CIGS em junho, com um total de 110,60 kWh/kWp.

As médias por tecnologia das produtividades relativas aos meses de novembro, além de março a setembro foram: 148,69 kWh/kWp para m-Si, 146,40 kWh/kWp para p-Si, 147,35 kWh/kWp para CIGS e 153,89 kWh/kWp para CdTe. Em uma análise mensal, as médias considerando todas as tecnologias foram: 150,68 kWh/kWp em novembro, 171,69 kWh/kWp em março, 174,27 kWh/kWp em abril, 146,37 kWh/kWp em maio, 112,61 kWh/kWp em junho, 146,31 kWh/kWp em julho, 139,47 kWh/kWp em agosto e 151,26 kWh/kWp em setembro.

Definidas as médias diárias mensais de irradiação no plano inclinado e as médias mensais de produtividade, realizou-se uma comparação entre os valores obtidos pela EPESOL CP e os apresentados no Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná. Na Tabela 17 são apresentadas as variações percentuais calculadas entre as duas fontes, utilizando-se como referência os valores do Atlas.

Tabela 17 – Variação percentual entre os valores calculados e os apresentados no Atlas para a EPESOL CP.

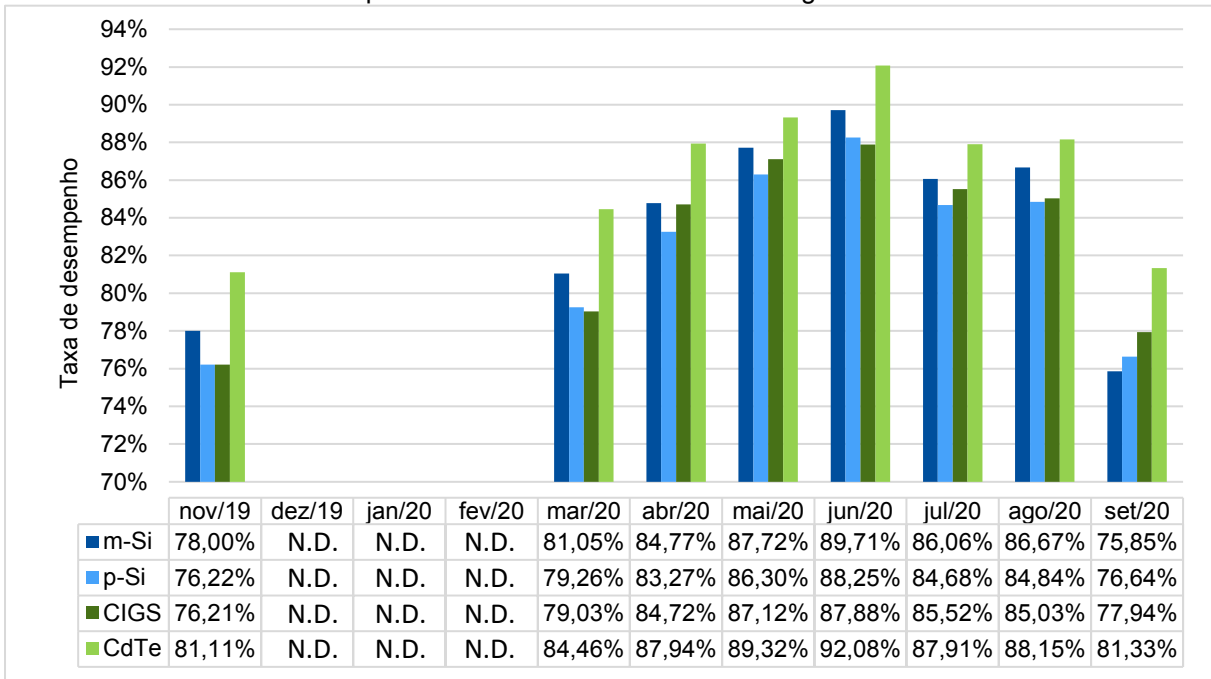
Período	Variação percentual EPESOL - Atlas [%]	
	Irradiação no plano inclinado	Produtividade
Novembro 2019	16,62%	21,03%
Dezembro 2019	N.D.	N.D.
Janeiro 2020	N.D.	N.D.
Fevereiro 2020	N.D.	N.D.
Março 2020	23,73%	33,46%
Abril 2020	27,72%	44,86%
Mai 2020	16,90%	36,46%
Junho 2020	-5,94%	12,39%
Julho 2020	18,98%	36,40%
Agosto 2020	-5,07%	8,94%
Setembro 2020	25,13%	29,95%

Fonte: Autoria própria (2020).

Exceto em junho, a irradiação obtida pela EPESOL CP foi de 16,62% a 27,72% superior à apresentada no Atlas, indicando que nesse período os níveis de radiação foram mais altos que a média histórica no local. As produtividades do SFVCR também podem ser consideradas elevadas uma vez que a expectativa apresentada no Atlas é inferior em todos os meses analisados. Segundo Tiepolo et al. (2017), o total anual esperado na localidade é de 1.425 kWh/kWp.

De acordo com o Gráfico 12, obteve-se as maiores taxas de desempenho por tecnologia em junho, atingindo o valor máximo em 92,08% com o CdTe. As médias por tecnologia das taxas de desempenho relativas aos meses de novembro, além de março a setembro foram: 83,73% para m-Si, 82,43% para p-Si, 82,93% para CIGS e 86,54% para CdTe. Em uma análise mensal, as médias considerando todas as tecnologias foram: 77,88% em novembro, 80,95% em março, 85,18% em abril, 87,61% em maio, 89,48% em junho, 86,04% em julho, 86,17% em agosto e 77,94% em setembro.

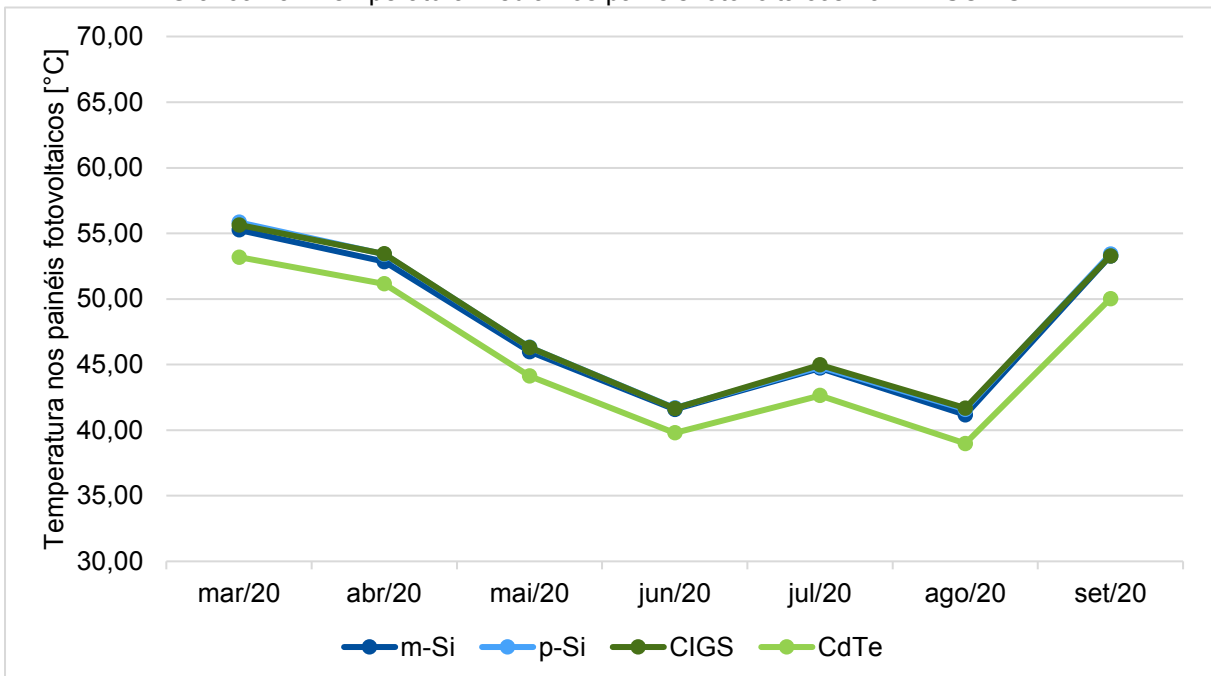
Gráfico 12 – Taxa de desempenho mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CP.



Fonte: Autoria própria (2020).

Analisando o comportamento do Gráfico 13, a temperatura nos painéis fotovoltaicos em março foi 3,97% a 4,58% superior a abril, ocasionando uma perda mais significativa na taxa de desempenho daquele mês. As menores taxas de desempenho por tecnologia em setembro podem ser justificadas pelas maiores perdas ocasionadas por temperatura nos painéis fotovoltaicos observadas neste mês.

Gráfico 13 - Temperatura média nos painéis fotovoltaicos na EPESOL CP.



Fonte: Autoria própria (2020).

Na Tabela 18 é representado o desempenho mensal dos SFVCR na EPESOL CP, sendo que as diferentes tecnologias estão numeradas de 1 a 4. A classificação foi baseada nos resultados mensais dos três índices de mérito calculados, em que “1” representa o melhor desempenho numa escala de 1 a 4.

Tabela 18 – Comparação de desempenho mensal para as diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CP.

Período	m-Si	p-Si	CIGS	CdTe
Novembro 2019	2	3	4	1
Dezembro 2019	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Janeiro 2020	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Fevereiro 2020	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Março 2020	2	3	4	1
Abril 2020	2	4	3	1
Maio 2020	2	4	3	1
Junho 2020	2	3	4	1
Julho 2020	2	4	3	1
Agosto 2020	2	4	3	1
Setembro 2020	4	3	2	1

Fonte: Autoria própria (2020).

Para todos os índices de mérito calculados, a tecnologia CdTe apresentou melhor desempenho em todos os meses analisados. Nos meses de abril, maio, julho e agosto, os melhores resultados depois do CdTe foram: m-Si, CIGS e p-Si. Já em novembro, março e junho, o desempenho do CIGS foi inferior ao p-Si.

Em uma análise que considera os oito meses de operação da planta de Cornélio Procópio, o desempenho do SFVCR de m-Si foi 1,55% superior ao de p-Si, enquanto o SFVCR de CdTe superou em 4,41% o de CIGS.

4.3 CURITIBA

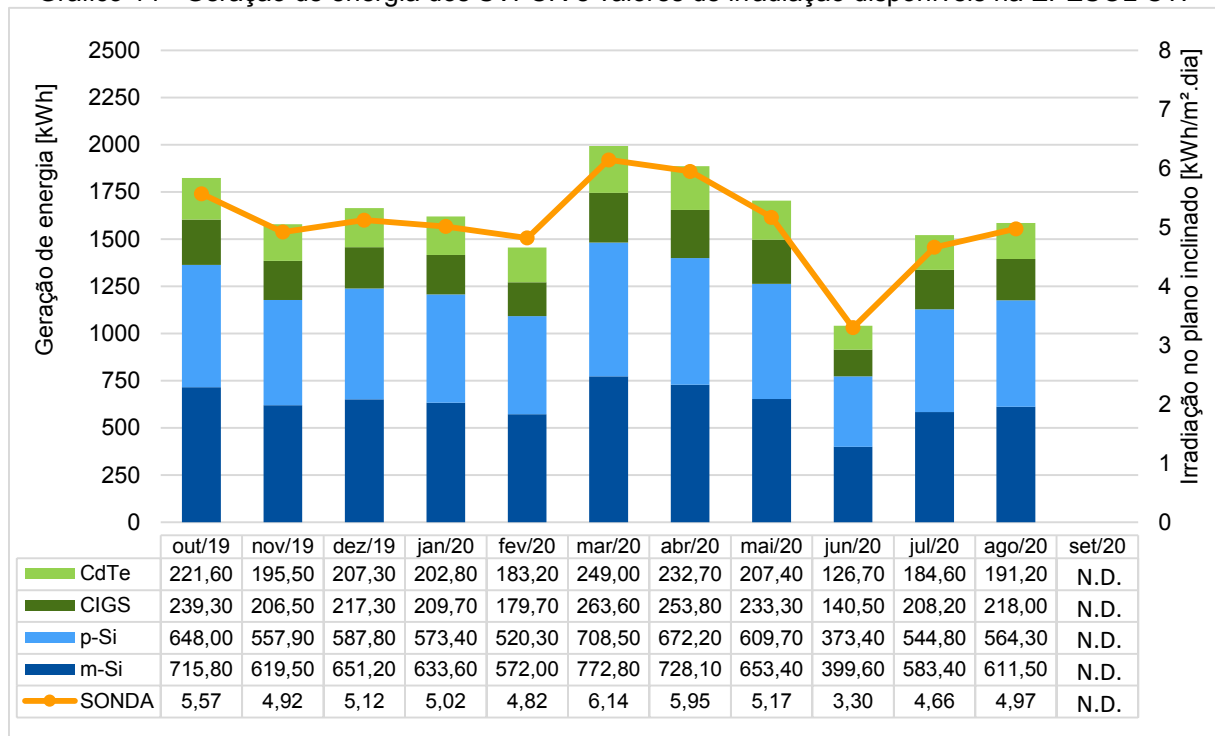
Os dados de geração de energia dos SFVCR instalados na EPESOL CT ficaram disponíveis em 22/08/2019. Entretanto assumiu-se na metodologia que o acesso aos dados seria a partir de 01/10/2019 a fim de descartar os problemas de instalação e comunicação ocorridos frequentemente neste intervalo.

Os dados de irradiação no plano inclinado encontram-se disponíveis desde 27/09/2019. Entretanto, devido aos ajustes e perdas de alguns dados durante a

validação no processo de programação do *data logger* e armazenamento no servidor FTP, o mês de setembro foi desconsiderado nesta análise.

Em setembro de 2020 a EPESOL Curitiba apresentou inúmeras falhas de envio de dados devido a problemas de *internet* no câmpus. Sendo assim, este mês foi desconsiderado da análise. De acordo com o Gráfico 14, o total mensal de energia gerada pelos quatro SFVCR variou de 1,04 MWh a 1,99 MWh.

Gráfico 14 - Geração de energia dos SFVCR e valores de irradiação disponíveis na EPESOL CT.

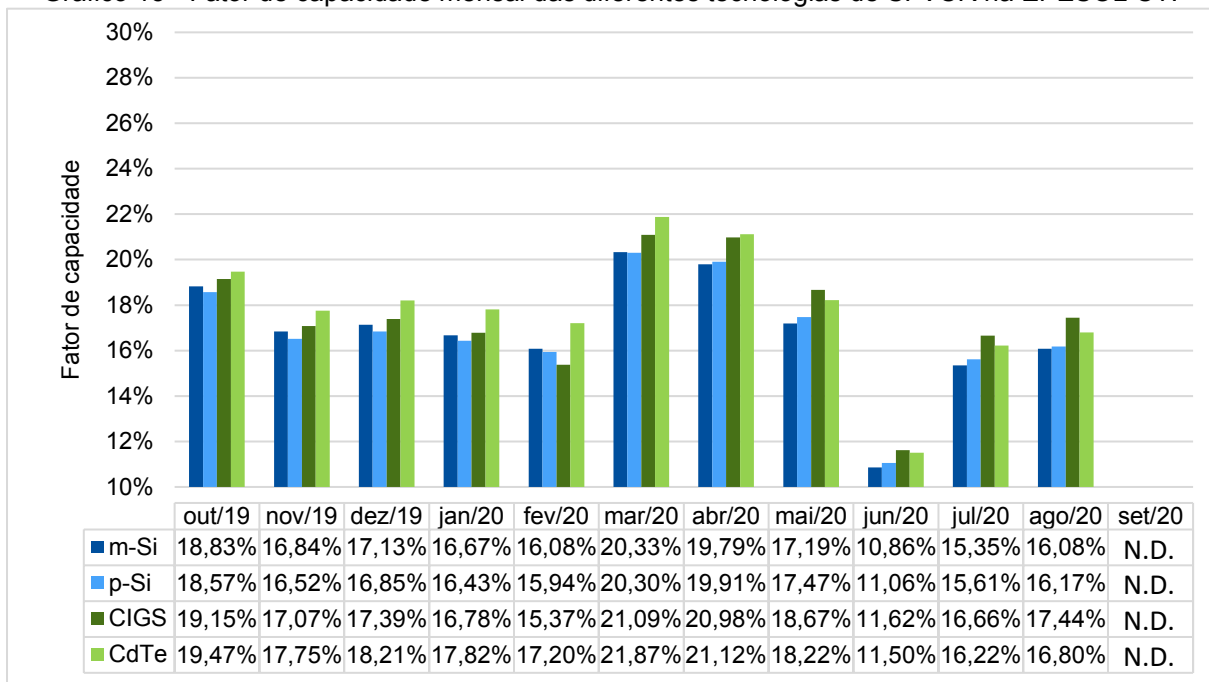


Fonte: Autoria própria (2020).

Os resultados obtidos para os fatores de capacidade podem ser observados no Gráfico 15. Exceto em maio, junho, julho e agosto, o CdTe se destaca com o maior fator de capacidade dentre as tecnologias, atingindo o valor máximo em março, com 21,87%. A menor média encontrada foi para a tecnologia m-Si em junho, com uma porcentagem de 10,86%.

As médias por tecnologia dos fatores de capacidade relativos aos meses de outubro a agosto foram: 16,83% para m-Si, 16,80% para p-Si, 17,47% para CIGS e 17,83% para CdTe. Em uma análise mensal, as médias considerando todas as tecnologias foram: 19,00% em outubro, 17,04% em novembro, 17,39% em dezembro, 16,92% em janeiro, 16,15% em fevereiro, 20,90% em março, 20,45% em abril, 17,89% em maio, 11,26% em junho, 15,96% em julho e 16,62% em agosto.

Gráfico 15 - Fator de capacidade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CT.

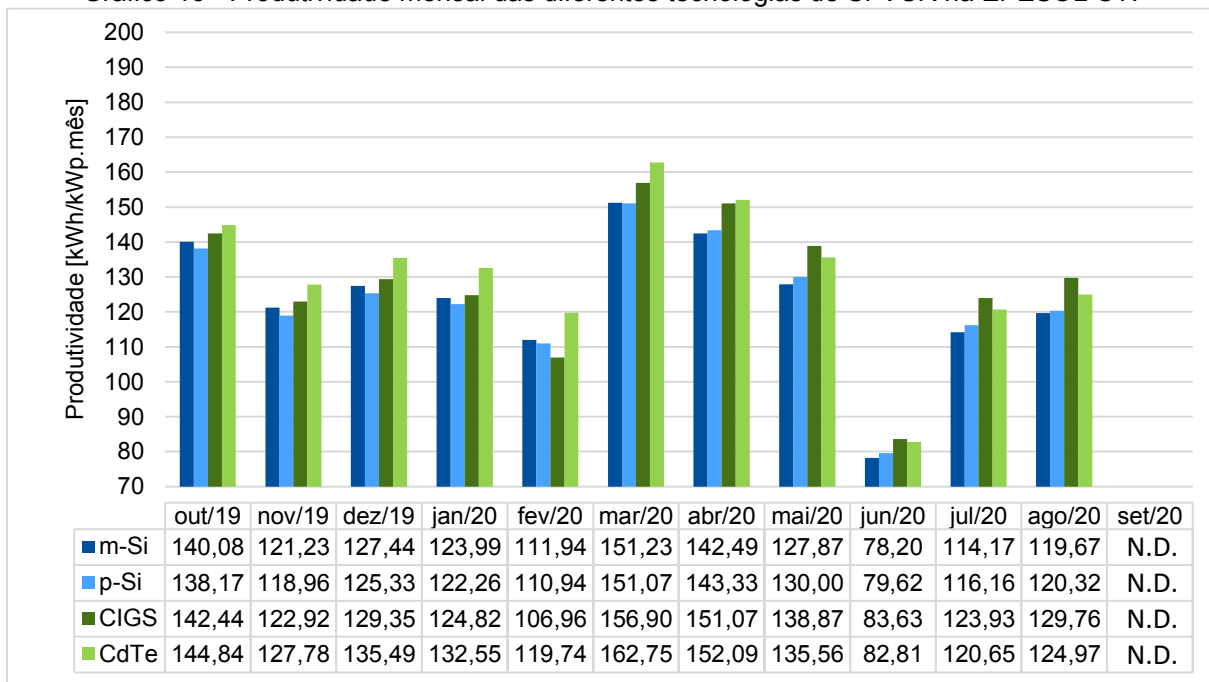


Fonte: Autoria própria (2020).

Os resultados obtidos para as produtividades podem ser observados no Gráfico 16, cujo comportamento é semelhante ao apresentado para o fator de capacidade. Exceto em maio, junho, julho e agosto, o CdTe se destaca com a maior produtividade dentre as tecnologias, atingindo o valor máximo em março, com 162,75 kWh/kWp. A menor média encontrada foi para a tecnologia m-Si em junho, com um total de 78,20 kWh/kWp.

As médias por tecnologia das produtividades relativas aos meses de outubro a agosto foram: 123,48 kWh/kWp para m-Si, 123,29 kWh/kWp para p-Si, 128,24 kWh/kWp para CIGS e 130,84 kWh/kWp para CdTe. Em uma análise mensal, as médias considerando todas as tecnologias foram: 141,38 kWh/kWp em outubro, 122,72 kWh/kWp em novembro, 129,40 kWh/kWp em dezembro, 125,91 kWh/kWp em janeiro, 112,39 kWh/kWp em fevereiro, 155,49 kWh/kWp em março, 147,24 kWh/kWp em abril, 133,07 kWh/kWp em maio, 81,06 kWh/kWp em junho, 118,73 kWh/kWp em julho e 123,68 kWh/kWp em agosto.

Gráfico 16 - Produtividade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CT.



Fonte: Autoria própria (2020).

Definidas as médias diárias mensais de irradiação no plano inclinado e as médias mensais de produtividade, realizou-se uma comparação entre os valores obtidos pela EPESOL CT e os apresentados no Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná. Na Tabela 19 são apresentadas as variações percentuais calculadas entre as duas fontes, utilizando-se como referência os valores do Atlas.

Tabela 19 – Variação percentual entre os valores calculados e os apresentados no Atlas para a EPESOL CT.

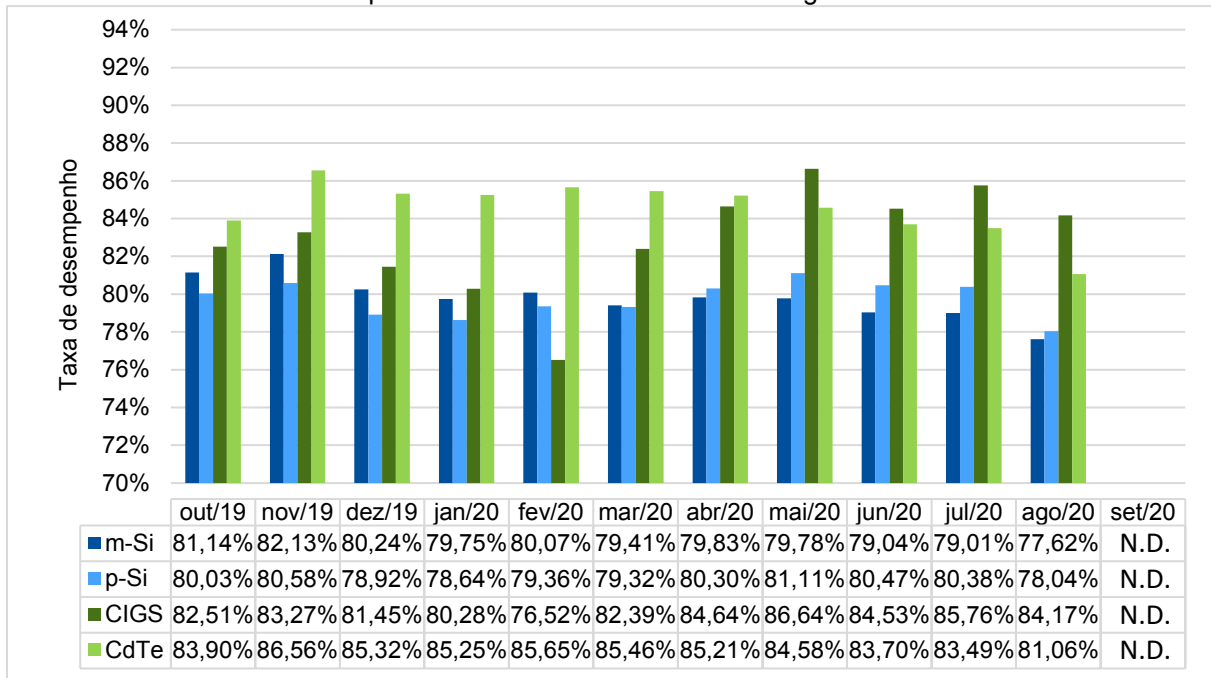
Período	Variação percentual EPESOL - Atlas [%]	
	Irradiação no plano inclinado	Produtividade
Outubro 2019	28,02%	39,90%
Novembro 2019	1,87%	13,00%
Dezembro 2019	3,70%	12,51%
Janeiro 2020	3,41%	11,58%
Fevereiro 2020	-2,22%	4,75%
Março 2020	29,33%	40,89%
Abril 2020	36,14%	49,64%
Mai 2020	33,25%	47,51%
Junho 2020	-9,40%	-1,02%
Julho 2020	23,98%	35,81%
Agosto 2020	5,14%	12,38%
Setembro 2020	N.D.	N.D.

Fonte: Autoria própria (2020).

Exceto em fevereiro e junho, a irradiação obtida pela EPESOL CT foi de 1,87% a 36,14% superior à apresentada no Atlas, indicando que nesse período os níveis de radiação foram mais altos que a média histórica no local. As produtividades do SFVCR também podem ser consideradas elevadas uma vez que a expectativa apresentada no Atlas é inferior em dez dos onze meses analisados. Segundo Tiepolo et al. (2017), o total anual esperado na localidade é de 1.213 kWh/kWp.

O Gráfico 17 apresenta as taxas de desempenho calculadas com base nos valores de irradiância medidos pela estação SONDA. Pode-se perceber que a partir de abril a taxa de desempenho do CIGS se aproxima do CdTe, ultrapassando esta tecnologia em maio, junho, julho e agosto. As menores taxas de desempenho por tecnologia não estão concentradas em um único mês. Dentre elas, a menor foi observada em fevereiro, em que o CIGS apresentou uma porcentagem de 76,46%.

Gráfico 17 – Taxa de desempenho mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CT.

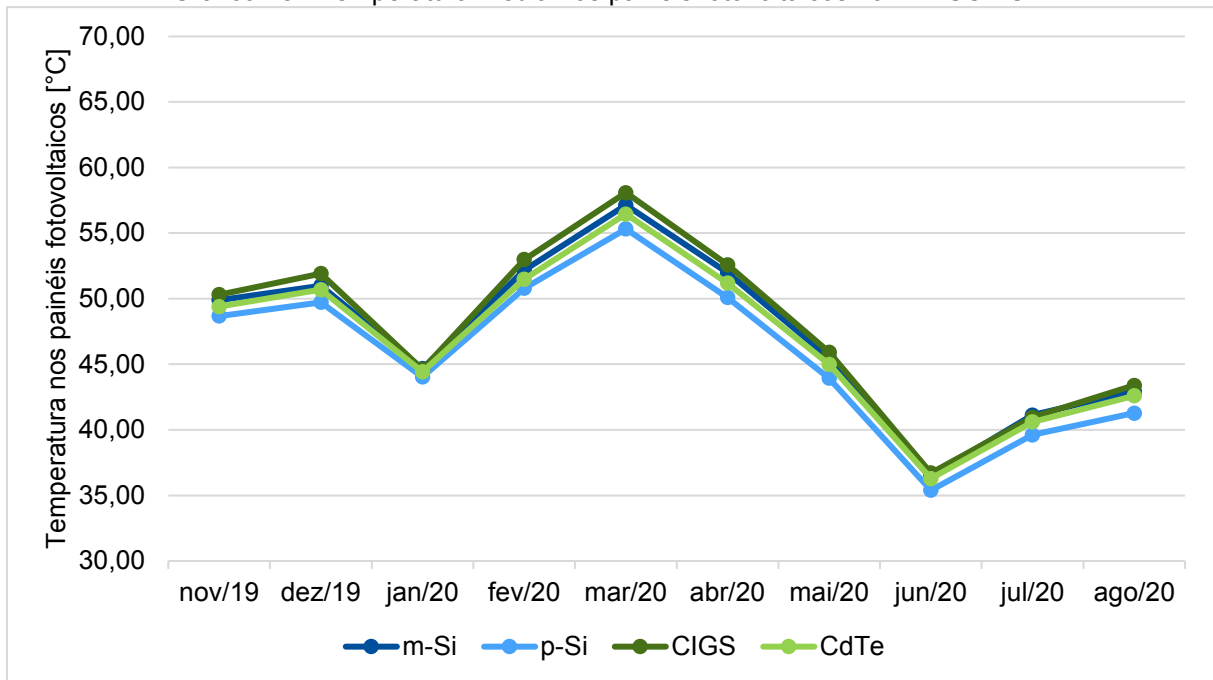


Fonte: Autoria própria (2020).

As médias por tecnologia relativas aos meses de outubro a agosto foram: 79,82% para m-Si, 79,74% para p-Si, 82,92% para CIGS e 84,56% para CdTe. Em uma análise mensal, as médias considerando todas as tecnologias foram: 81,89% em outubro, 83,13% em novembro, 81,48% em dezembro, 80,98% em janeiro, 80,40% em fevereiro, 81,64% em março, 82,50% em abril, 83,03% em maio, 81,94% em junho, 82,16% em julho e 80,22% em agosto.

O aumento de irradiação observado entre novembro e dezembro, bem como dos níveis de temperatura nos painéis fotovoltaicos observados no Gráfico 18, proporcionaram menores taxas de desempenho em dezembro para todas as tecnologias de SFVCR. Por outro lado, a redução do valor de irradiação observado entre março e abril, bem como dos níveis de temperatura nos painéis fotovoltaicos, proporcionaram maiores taxas de desempenho em abril para todas as tecnologias de SFVCR, exceto para a tecnologia CdTe.

Gráfico 18 - Temperatura média nos painéis fotovoltaicos na EPESOL CT.



Fonte: Autoria própria (2020).

Na Tabela 20 é representado o desempenho mensal dos SFVCR na EPESOL CT, sendo que as diferentes tecnologias estão numeradas de 1 a 4. A classificação foi baseada nos resultados mensais dos três índices de mérito calculados, em que “1” representa o melhor desempenho numa escala de 1 a 4.

Para todos os índices de mérito calculados, a tecnologia CdTe apresentou melhor desempenho na maioria dos meses analisados, exceto em maio, junho, julho e agosto. No período de outubro a janeiro, além do mês de março, os melhores resultados depois do CdTe foram: CIGS, m-Si e p-Si. Há divergências nos meses de fevereiro, abril, maio, junho, julho e agosto, em que a ordem de desempenho das tecnologias não foi a mesma em relação à maioria dos meses observados. Especialmente em fevereiro, a queda de desempenho da tecnologia CIGS pode ser justificada pelo desligamento do SFVCR quando foi realizada a troca de um dos

módulos, cujos contatos da caixa de conexões elétricas foram rompidos em um ensaio. Em maio, junho, julho e agosto o desempenho do gerador de tecnologia CIGS não foi reduzido uma vez que o efeito do sobrecarregamento do inversor não foi observado.

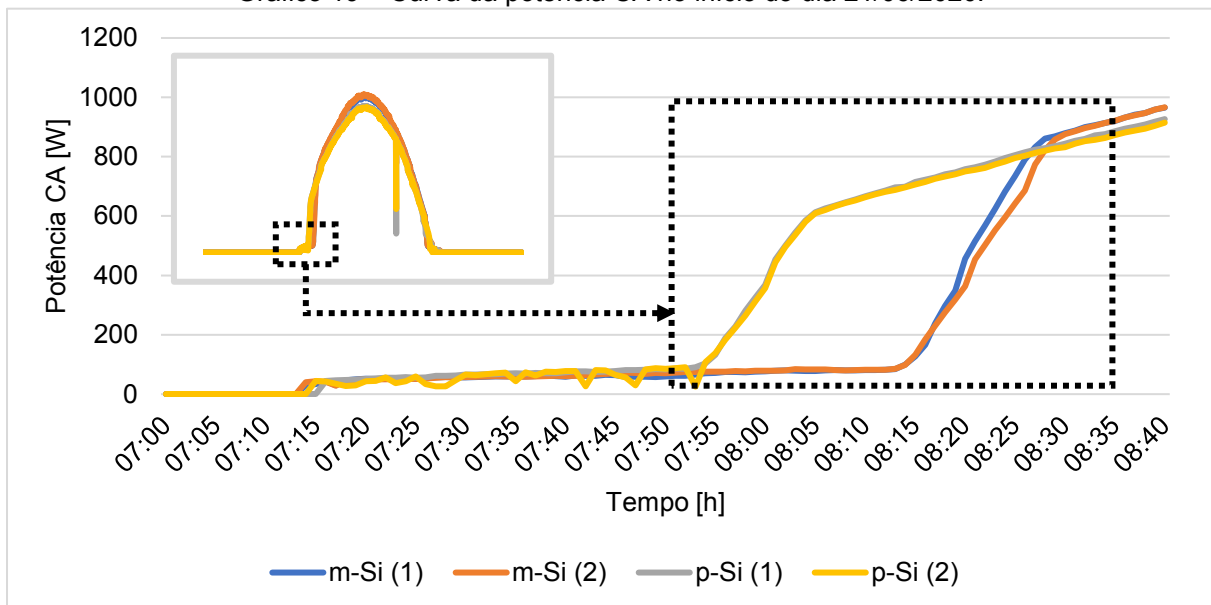
Tabela 20 – Comparação de desempenho mensal para as diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL CT.

Período	m-Si	p-Si	CIGS	CdTe
Outubro 2019	3	4	2	1
Novembro 2019	3	4	2	1
Dezembro 2019	3	4	2	1
Janeiro 2020	3	4	2	1
Fevereiro 2020	2	3	4	1
Março 2020	3	4	2	1
Abril 2020	4	3	2	1
Maio 2020	4	3	1	2
Junho 2020	4	3	1	2
Julho 2020	4	3	1	2
Agosto 2020	4	3	1	2
Setembro 2020	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

Fonte: Autoria própria (2020).

A partir de abril o desempenho do p-Si se torna superior ao do m-Si. Este cenário pode ser observado nos meses de outono e inverno, época em que o sol se posiciona mais baixo em relação à linha do horizonte e o painel de p-Si acaba provocando uma sombra parcial no painel de m-Si no início do dia. O Gráfico 19 ilustra o início da curva de potência CA no dia 21/06/2020, solstício de inverno, data em que a duração do dia é a mais curta do ano. A área tracejada destaca a diferença causada pelo intervalo da plena operação dos dois inversores alocados sob o painel de m-Si, indicados como m-Si (1) e m-Si (2), devido ao sombreamento causado nos módulos fotovoltaicos desta tecnologia.

Gráfico 19 – Curva da potência CA no início do dia 21/06/2020.



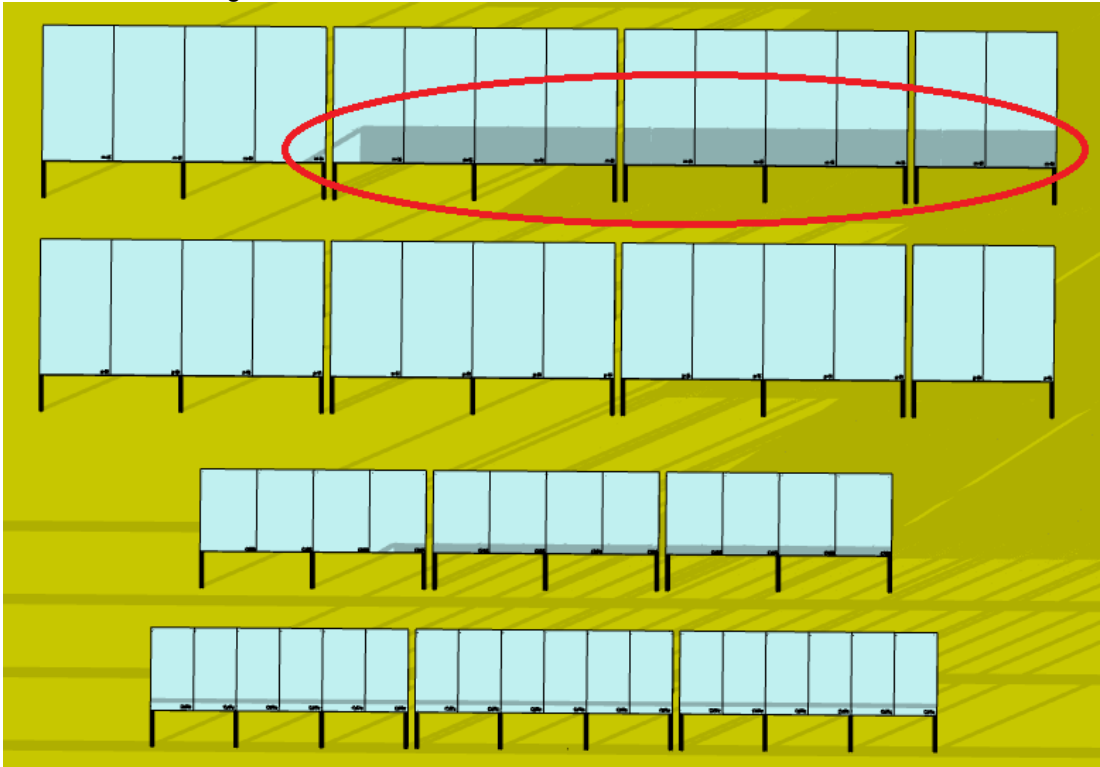
Fonte: Autoria própria (2020).

Enquanto a tensão de operação dos módulos de m-Si é de 39,38 V, a dos módulos de p-Si equivale a 37,80 V. Analisando o dia 21/06/2020 pode-se confirmar que os inversores alocados sob o painel de m-Si ligaram às 7:14h, dois minutos antes dos inversores de p-Si. Visto que a tensão de operação dos módulos de p-Si é menor, o retardo da operação dos dois inversores alocados sob o painel de p-Si, indicados como p-Si (1) e p-Si (2), está dentro do esperado.

Às 7:55h é possível identificar que a curva de potência CA dos inversores de p-Si se sobressaem em relação aos de m-Si em um intervalo de aproximadamente 30 minutos. Às 8:25h os módulos de m-Si deixam de ser sombreados e os inversores m-Si (1) e m-Si (2) entram em plena operação. A curva de potência CA de m-Si é elevada e se mantém superior à curva de potência CA de p-Si ao longo do dia.

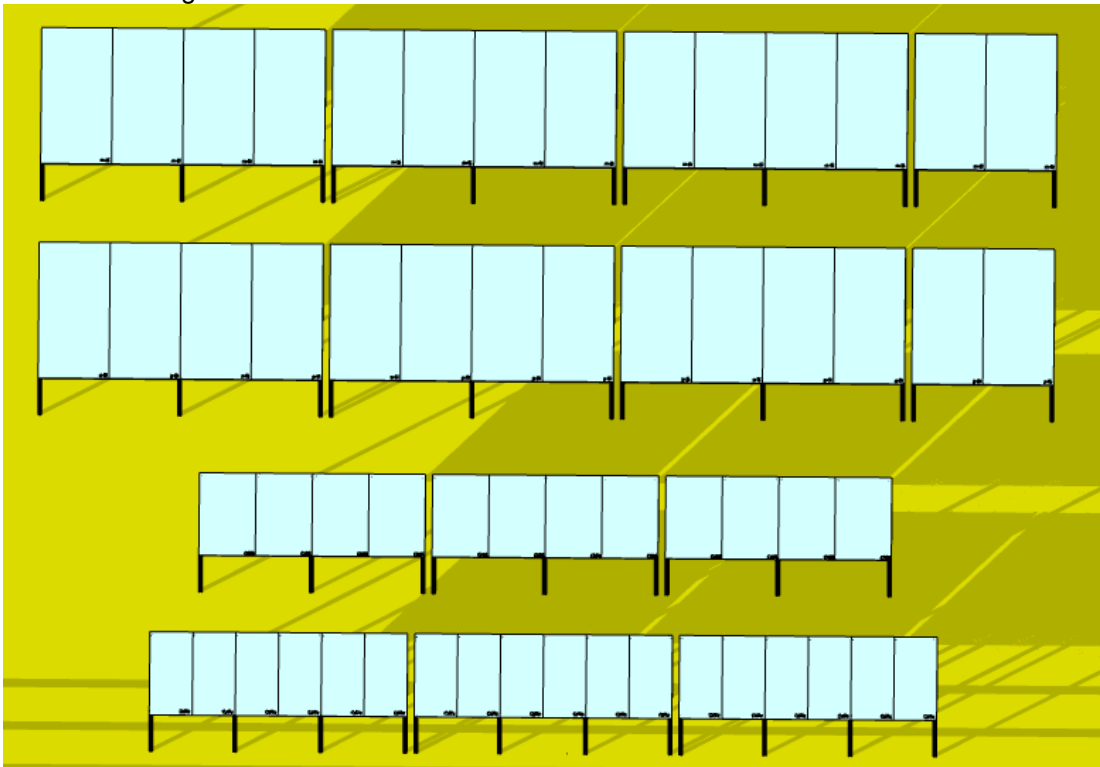
Realizou-se uma simulação no *software SketchUp* para verificar o sombreamento nos módulos de m-Si. Embora a duração do fenômeno seja a mesma, a diferenciação ocorre no horário do início e do fim do sombreamento identificado pelo *software*, sendo às 7:39h e 8:09h, respectivamente. Na Figura 25 é possível observar o sombreamento parcial nos módulos de m-Si, destacado em vermelho, limitando a potência de saída do inversor e, conseqüentemente, reduzindo o desempenho do gerador fotovoltaico. Na Figura 26 é demonstrado o cenário ideal de operação do gerador fotovoltaico, em que não há mais sombreamento nos módulos.

Figura 25 - Sombreamento nos módulos de m-Si às 7:39h.



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 26 – Fim do sombreamento nos módulos de m-Si às 8:09h.



Fonte: Autoria própria (2020).

De acordo com Tonolo (2019), o módulo apresenta redução de potência conforme a quantidade de células sombreadas, respeitando a quantidade de diodos

de *by-pass*. Estudos desenvolvidos por Hilgert (2020) identificaram três diodos de *by-pass* dentro da caixa de conexão do módulo fotovoltaico de m-Si, evitando o contra fluxo de corrente que pode gerar o sobreaquecimento das células sombreadas. A conexão dos diodos é realizada a cada duas colunas de células, sendo que o módulo de m-Si contém seis colunas.

Como o sombreamento ocorre no sentido horizontal, o bloqueio da radiação direta em uma célula é equivalente ao bloqueio em todas as células das colunas que fazem parte do conjunto da célula sombreada. Portanto, mesmo que o sombreamento ocorra em uma pequena área, o módulo pode ser integralmente afetado e a produção de energia é garantida por meio da radiação difusa incidente no momento (RUSCHEL E KRENZINGER, 2017).

Embora os diodos sejam ativados, os onze módulos sombreados no intervalo de 30 minutos retardam o crescimento da tensão e da potência de saída do inversor. Ao final do dia também é observado o mesmo fenômeno durante um intervalo de 30 minutos, resultando em uma perda de 1,82% da potência total do gerador fotovoltaico de m-Si no cenário do dia 21/06/2020.

Em uma análise que considera os onze meses de operação da planta de Curitiba, o desempenho do SFVCR de m-Si foi 0,10% superior ao de p-Si, enquanto o SFVCR de CdTe superou em 2,11% o de CIGS.

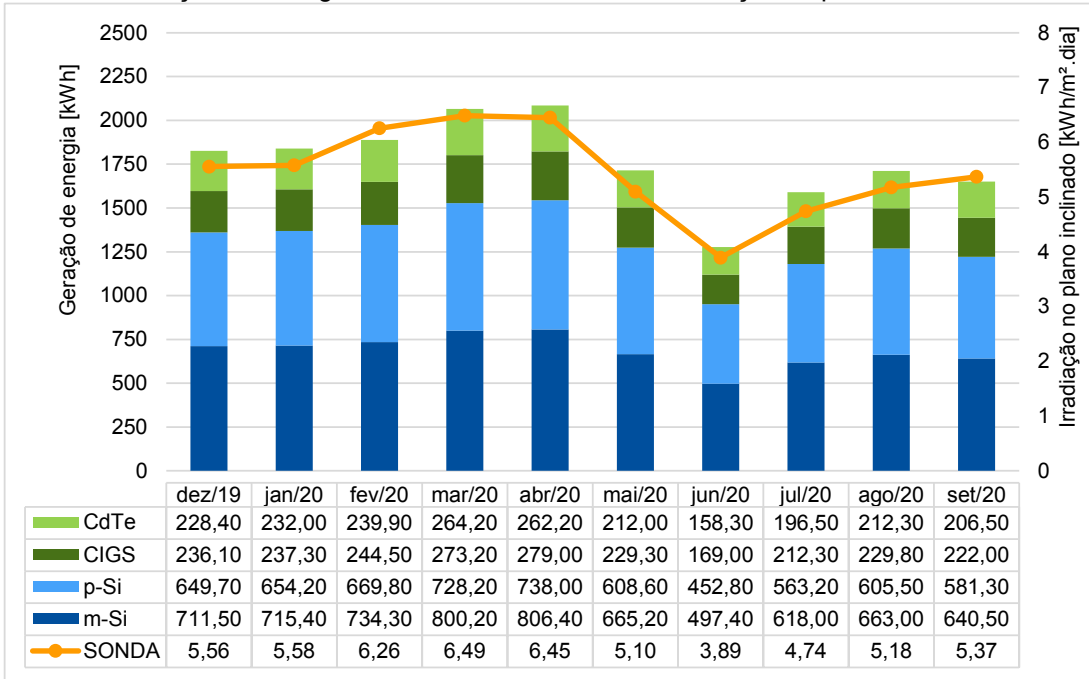
4.4 MEDIANEIRA

O acesso aos dados de geração de energia dos SFVCR instalados na EPESOL MD teve início em 08/10/2019. Entretanto no período de 20/10/2019 a 04/11/2019 os dados não foram armazenados devido a um desligamento do *ST-One*, cujo motivo não foi detectado. Sendo assim, considerou-se o início da análise a partir de 01/12/2019.

Os dados de irradiação no plano inclinado encontram-se disponíveis desde 01/12/2019.

De acordo com o Gráfico 20, o total mensal de energia gerada pelos quatro SFVCR variou de 1,28 MWh a 2,09 MWh.

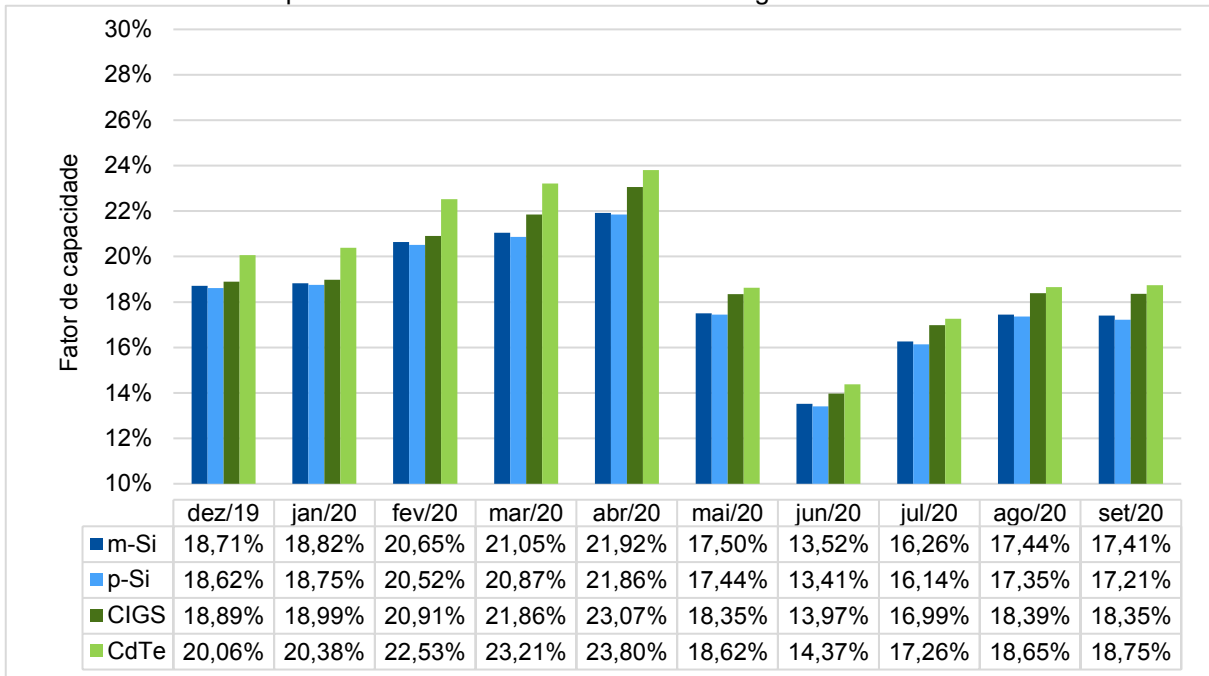
Gráfico 20 - Geração de energia dos SVFCR e valores de irradiação disponíveis na EPESOL MD.



Fonte: Autoria própria (2020).

Os resultados obtidos para os fatores de capacidade podem ser observados no Gráfico 21. Dentre as tecnologias, o CdTe se destaca com o maior fator de capacidade em todos os meses, atingindo o valor máximo em abril, com 23,80%. A menor média encontrada foi para a tecnologia p-Si em junho, com uma porcentagem de 13,41%.

Gráfico 21 - Fator de capacidade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL MD.



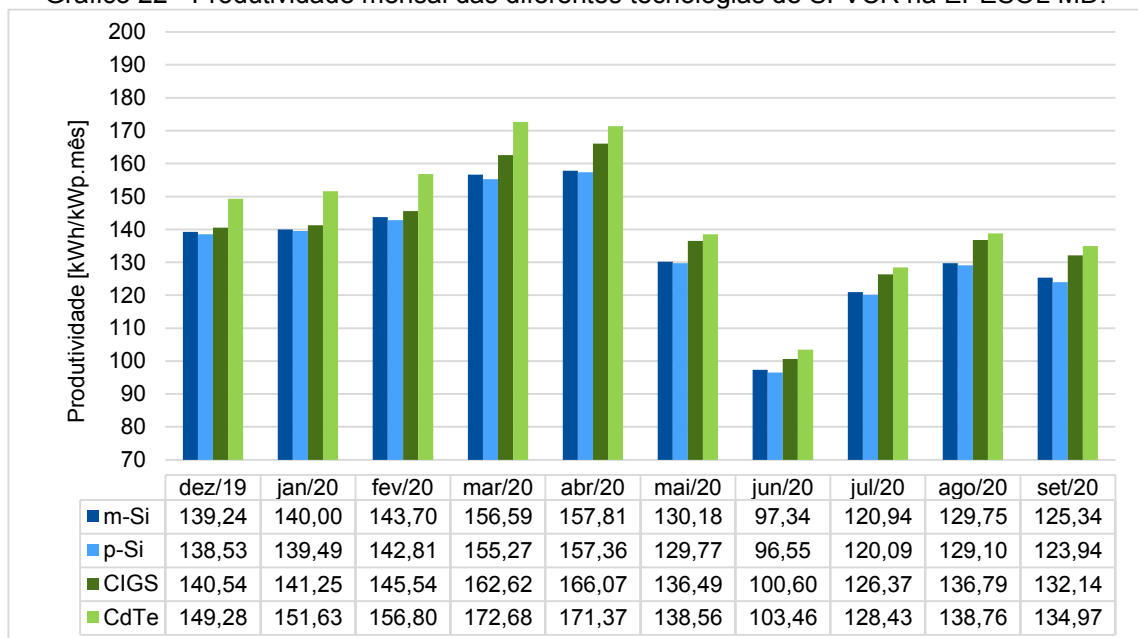
Fonte: Autoria própria (2020).

As médias por tecnologia dos fatores de capacidade relativos aos meses de dezembro a setembro foram: 18,33% para m-Si, 18,22% para p-Si, 18,97% para CIGS e 19,76% para CdTe. Em uma análise mensal, as médias considerando todas as tecnologias foram: 19,07% em dezembro, 19,23% em janeiro, 21,15% em fevereiro, 21,75% em março, 22,66% em abril, 17,98% em maio, 13,82% em junho, 16,66% em julho, 17,96% em agosto e 17,93% em setembro.

Os resultados obtidos para as produtividades podem ser observados no Gráfico 22, cujo comportamento é semelhante ao apresentado para o fator de capacidade. Dentre as tecnologias, o CdTe se destaca com a maior produtividade em todos os meses, atingindo o valor máximo em março, com 172,68 kWh/kWp. A menor média encontrada foi para a tecnologia p-Si em junho, com um total de 96,55 kWh/kWp.

As médias por tecnologia das produtividades relativas aos meses de dezembro a setembro foram: 134,09 kWh/kWp para m-Si, 133,29 kWh/kWp para p-Si, 138,84 kWh/kWp para CIGS e 144,59 kWh/kWp para CdTe. Em uma análise mensal, as médias considerando todas as tecnologias foram: 141,90 kWh/kWp em dezembro, 143,09 kWh/kWp em janeiro, 147,21 kWh/kWp em fevereiro, 161,79 kWh/kWp em março, 163,15 kWh/kWp em abril, 133,75 kWh/kWp em maio, 99,49 kWh/kWp em junho, 123,96 kWh/kWp em julho, 133,60 kWh/kWp em agosto e 129,10 kWh/kWp em setembro.

Gráfico 22 - Produtividade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL MD.



Fonte: Autoria própria (2020).

Definidas as médias diárias mensais de irradiação no plano inclinado e as médias mensais de produtividade, realizou-se uma comparação entre os valores obtidos pela EPESOL MD e os apresentados no Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná. Na Tabela 21 são apresentadas as variações percentuais calculadas entre as duas fontes, utilizando-se como referência os valores do Atlas.

Tabela 21 – Variação percentual entre os valores calculados e os apresentados no Atlas para a EPESOL MD.

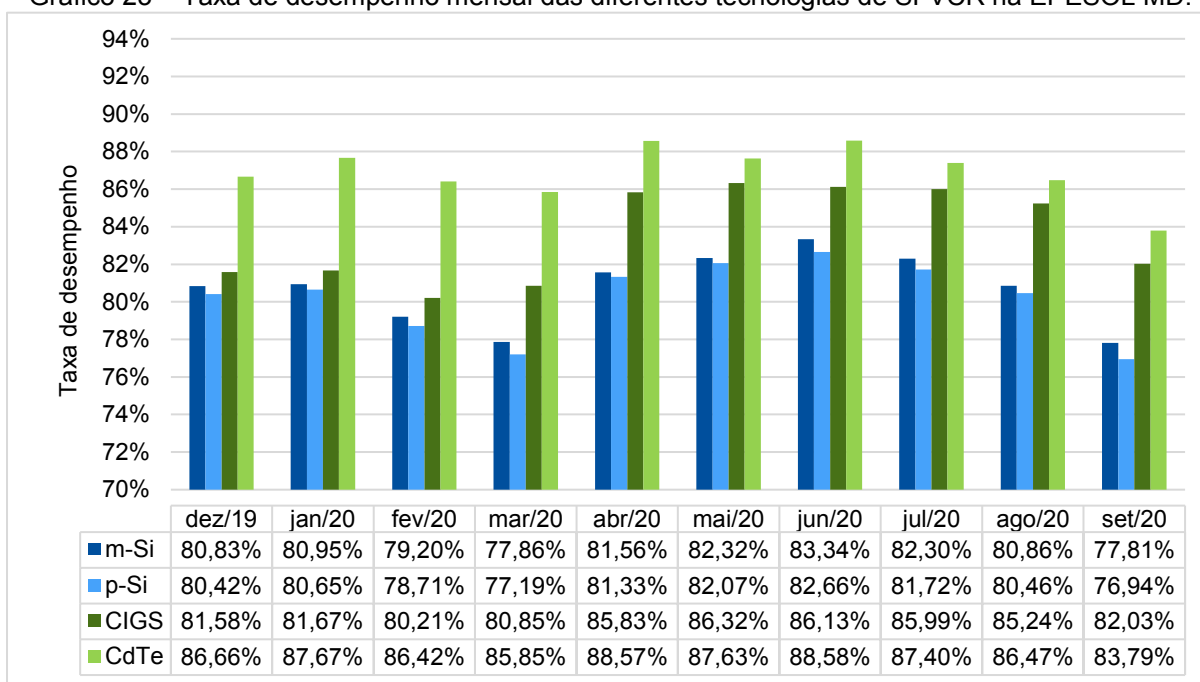
Período	Variação percentual EPESOL - Atlas [%]	
	Irradiação no plano inclinado	Produtividade
Dezembro 2019	-0,60%	9,24%
Janeiro 2020	-0,01%	10,43%
Fevereiro 2020	13,76%	22,91%
Março 2020	17,33%	25,76%
Abril 2020	29,51%	45,80%
Mai 2020	22,32%	37,84%
Junho 2020	2,19%	15,95%
Julho 2020	17,33%	31,97%
Agosto 2020	3,94%	15,54%
Setembro 2020	14,00%	21,91%

Fonte: Autoria própria (2020).

Exceto em dezembro e janeiro, a irradiação obtida pela EPESOL MD foi de 2,19% a 29,51% superior à apresentada no Atlas, indicando que nesse período os níveis de radiação foram mais altos que a média histórica no local. As produtividades do SFVCR também podem ser consideradas elevadas uma vez que a expectativa apresentada no Atlas é inferior em todos os meses analisados. Segundo Tiepolo et al. (2017), o total anual esperado na localidade é de 1.357 kWh/kWp.

De acordo com o Gráfico 23, obteve-se as maiores taxas de desempenho por tecnologia em maio e junho, atingindo o valor máximo em 88,58% com o CdTe. Assim como o valor de irradiação, os níveis de temperatura no plano dos painéis fotovoltaicos observados no Gráfico 24 foram menores nestes dois meses, elevando a taxa de desempenho da planta. As menores taxas de desempenho por tecnologia ocorreram em março, mês que apresentou o maior valor de irradiação. A tecnologia CIGS representa uma exceção, visto que apresentou a menor porcentagem em fevereiro.

Gráfico 23 – Taxa de desempenho mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL MD.

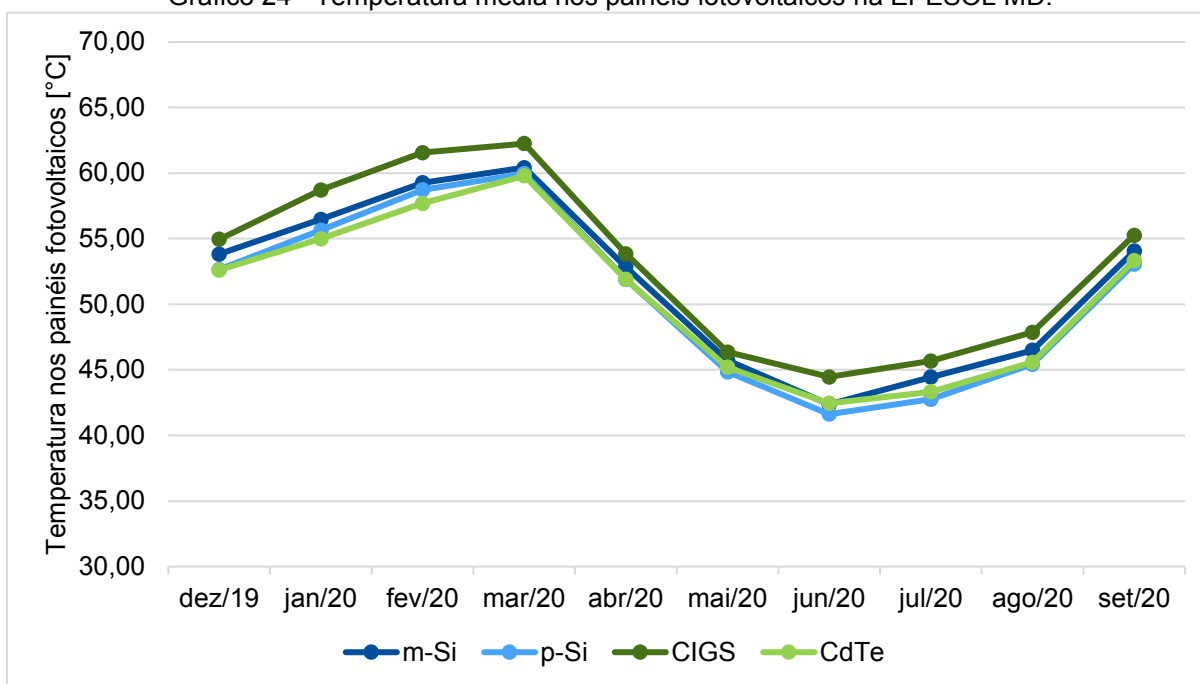


Fonte: Autoria própria (2020).

As médias por tecnologia das taxas de desempenho relativas aos meses de dezembro a setembro foram: 80,70% para m-Si, 80,21% para p-Si, 83,59% para CIGS e 86,90% para CdTe. Em uma análise mensal, as médias considerando todas as tecnologias foram: 82,37% em dezembro, 82,73% em janeiro, 81,13% em fevereiro, 80,44% em março, 84,32% em abril, 84,58% em maio, 85,18% em junho, 84,35% em julho, 83,26% em agosto e 80,14% em setembro.

Em geral, as taxas de desempenho das quatro tecnologias seguem o mesmo padrão de variação ao longo dos meses, ora variando positivamente, ora variando negativamente. A diferença ocorreu com a tecnologia CIGS, cuja taxa de desempenho aumentou em 0,87% de fevereiro para março enquanto para as demais tecnologias os resultados foram reduzidos. Além disso, houve um acréscimo das perdas devido à temperatura neste período, fato que não justifica o comportamento da tecnologia CIGS. Até então, não foi possível detectar o motivo desta eventualidade já que outras possíveis perdas não foram mensuradas na análise.

Gráfico 24 - Temperatura média nos painéis fotovoltaicos na EPESOL MD.



Fonte: Autoria própria (2020).

Na Tabela 22 é representado o desempenho mensal dos SFVCR na EPESOL MD, sendo que as diferentes tecnologias estão numeradas de 1 a 4. A classificação foi baseada nos resultados mensais dos três índices de mérito calculados, em que “1” representa o melhor desempenho numa escala de 1 a 4.

Tabela 22 – Comparação de desempenho mensal para as diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL MD.

Período	m-Si	p-Si	CIGS	CdTe
Dezembro 2019	3	4	2	1
Janeiro 2020	3	4	2	1
Fevereiro 2020	3	4	2	1
Março 2020	3	4	2	1
Abril 2020	3	4	2	1
Mai 2020	3	4	2	1
Junho 2020	3	4	2	1
Julho 2020	3	4	2	1
Agosto 2020	3	4	2	1
Setembro 2020	3	4	2	1

Fonte: Autoria própria (2020).

Para todos os índices de mérito calculados, a tecnologia CdTe apresentou melhor desempenho em todos os meses analisados. No período de dezembro a setembro, os melhores resultados depois do CdTe foram: CIGS, m-Si e p-Si.

Em uma análise que considera os dez meses de operação da planta de Medianeira, o desempenho do SFVCR de m-Si foi 0,61% superior ao de p-Si, enquanto o SFVCR de CdTe superou em 4,03% o de CIGS.

4.5 PATO BRANCO

O acesso aos dados de geração de energia dos SFVCR instalados na EPESOL PB teve início em 03/09/2019. Assim como a EPESOL CT, o mês de setembro apresentou problemas de instalação e comunicação, portanto foi desconsiderado nesta análise. Além disso, até dezembro apenas os dados referentes à tecnologia m-Si foram considerados, visto que as demais continuaram apresentando problemas de comunicação do *ST-One* com seus respectivos inversores. Sendo assim, no último trimestre de 2019 analisou-se apenas a tecnologia m-Si e a partir de 01/01/2020 as demais tecnologias começaram a ser analisadas.

A partir de 04/06/2020 os dados de geração de energia não foram armazenados devido a um problema de comunicação dos inversores, cujo motivo não foi detectado. Portanto, os meses de junho a setembro foram descartados da análise.

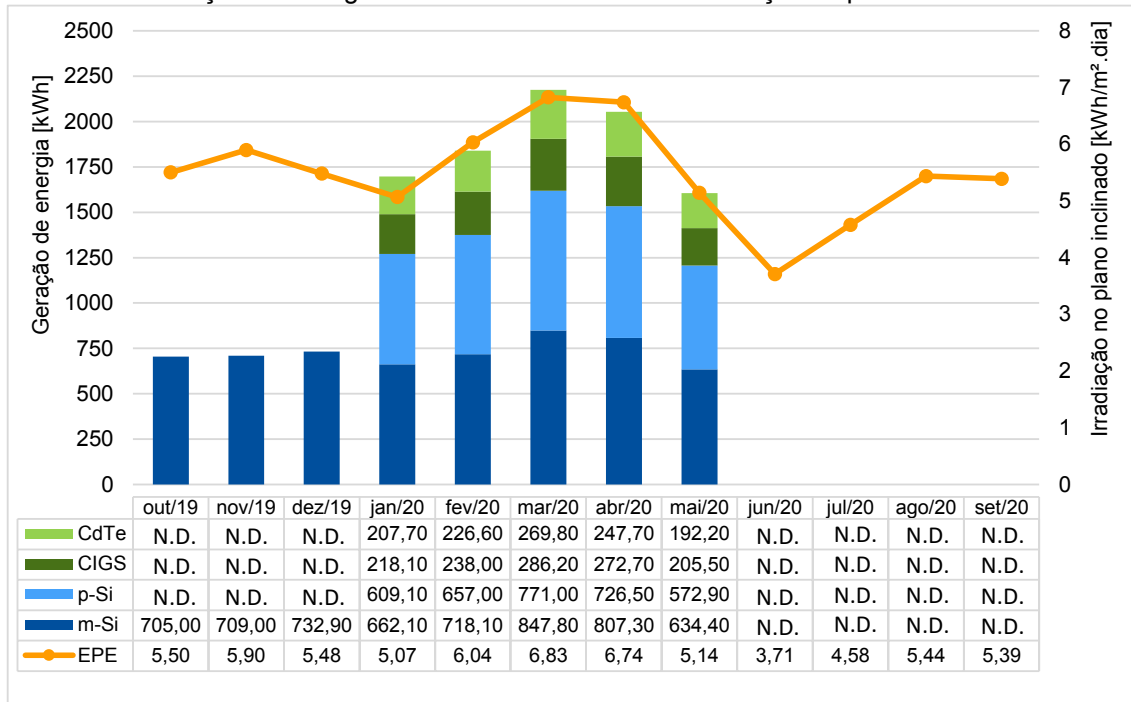
Os dados de irradiação no plano inclinado encontram-se disponíveis desde 28/11/2019. Sendo assim, foram coletados os dados da EMA A816 para calcular a irradiação de outubro e nos dias de novembro em a EPE não estava disponível.

De acordo com o Gráfico 25, excluindo-se os meses em que só há dados de m-Si, o total mensal de energia gerada pelos quatro SFVCR variou de 1,61 MWh a 2,17 MWh.

Em relação ao período em que só há dados de m-Si, dezembro se destaca em função da irradiação diminuir à medida que a geração de energia aumenta. Vale ressaltar que a irradiação calculada em 31 dias em outubro e em 27 dias de novembro foi baseada na EMA A816, visto que o acesso aos dados da estação EPE se encontrava indisponível.

Embora os valores de irradiação tenham sido corrigidos com uma taxa de 3,73%, não há proporcionalidade quando se observa o comportamento do gráfico até dezembro. Como no último trimestre de 2019 a instalação era recente e o sistema de coleta e armazenamento de dados estava sendo constantemente atualizado, pode-se assumir que a geração de energia não foi integralmente registrada.

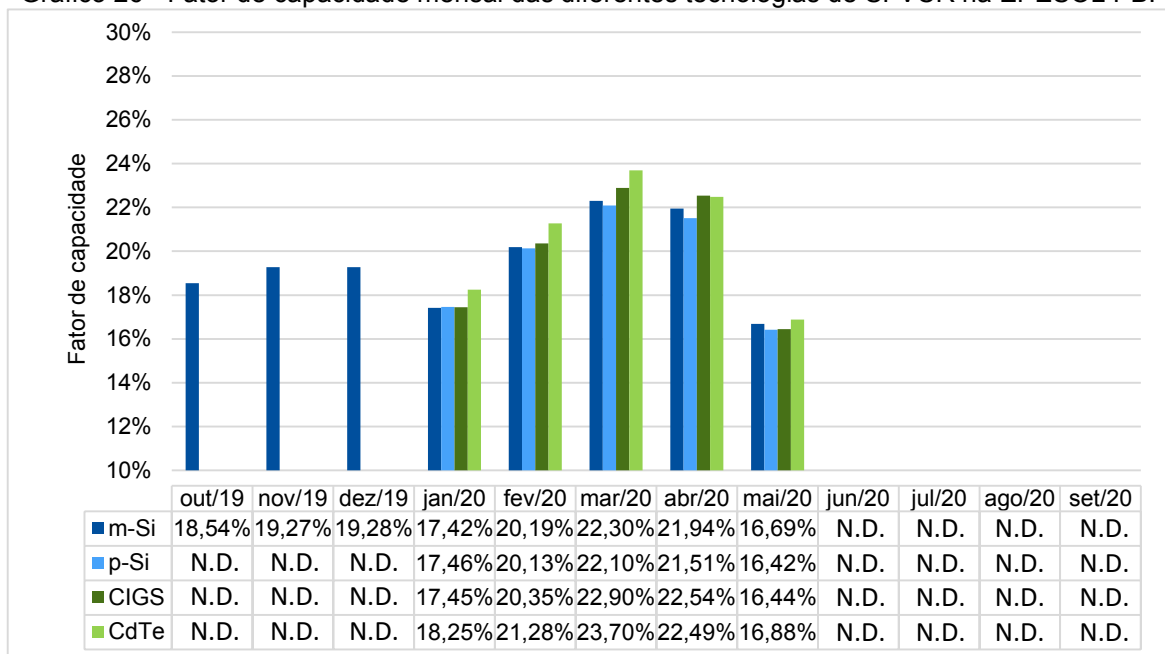
Gráfico 25 - Geração de energia dos SVFCR e valores de irradiação disponíveis na EPESOL PB.



Fonte: Autoria própria (2020).

Os resultados obtidos para os fatores de capacidade podem ser observados no Gráfico 26. Dentre as tecnologias, o CdTe se destaca com o maior fator de capacidade em todos os meses, atingindo o valor máximo em março, com 23,70%. A menor média encontrada foi para a tecnologia p-Si em maio, com uma porcentagem de 16,42%.

Gráfico 26 - Fator de capacidade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL PB.



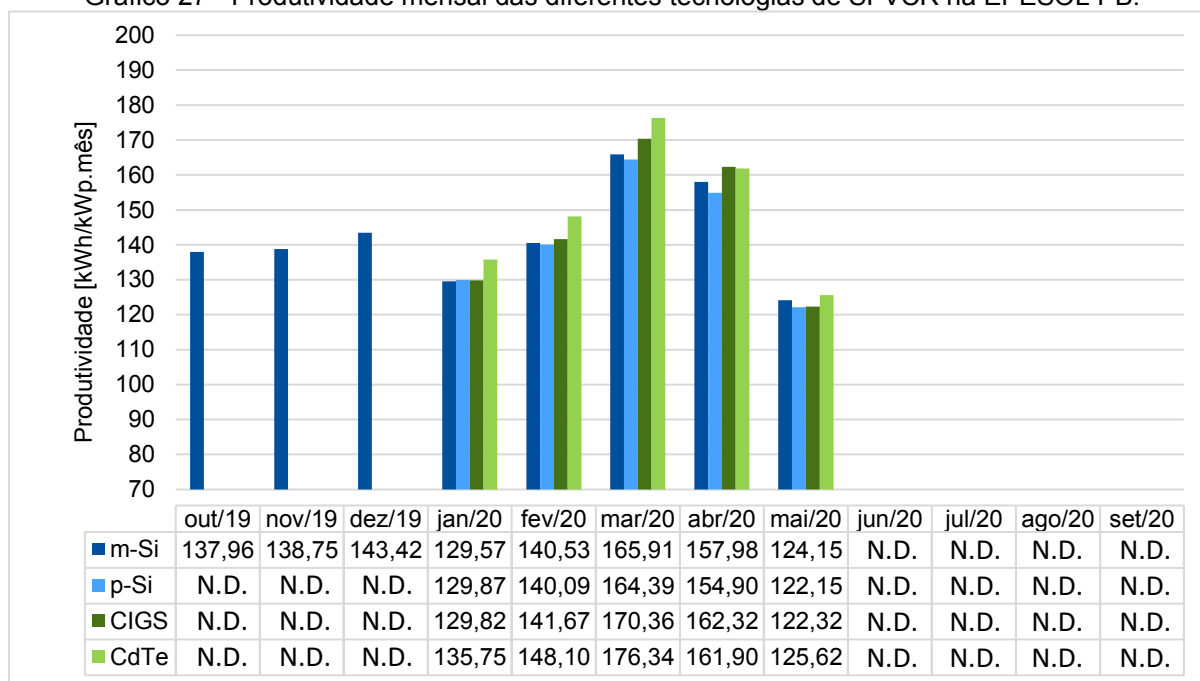
Fonte: Autoria própria (2020).

As médias por tecnologia dos fatores de capacidade relativos aos meses de janeiro a maio foram: 19,71% para m-Si, 19,52% para p-Si, 19,94% para CIGS e 20,52% para CdTe. Em uma análise mensal, as médias considerando todas as tecnologias foram: 17,64% em janeiro, 20,49% em fevereiro, 22,75% em março, 22,12% em abril e 16,61% em maio.

Os resultados obtidos para as produtividades podem ser observados no Gráfico 27, cujo comportamento é semelhante ao apresentado para o fator de capacidade. A diferença ocorre em dezembro, mês que a irradiação foi reduzida em relação a novembro, mas os índices de mérito relativos à tecnologia m-Si aumentaram. Dentre as tecnologias, o CdTe se destaca com a maior produtividade na maioria dos meses analisados, atingindo o valor máximo em março, com 176,34 kWh/kWp. A menor média encontrada foi para a tecnologia p-Si em maio, com um total de 122,15 kWh/kWp.

As médias por tecnologia das produtividades relativas aos meses de janeiro a maio foram: 143,63 kWh/kWp para m-Si, 142,28 kWh/kWp para p-Si, 145,30 kWh/kWp para CIGS e 149,54 kWh/kWp para CdTe. Em uma análise mensal, as médias considerando todas as tecnologias foram: 131,25 kWh/kWp em janeiro, 142,60 kWh/kWp em fevereiro, 169,25 kWh/kWp em março, 159,28 kWh/kWp em abril e 123,56 kWh/kWp em maio.

Gráfico 27 - Produtividade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL PB.



Fonte: Autoria própria (2020).

Definidas as médias diárias mensais de irradiação no plano inclinado e as médias mensais de produtividade, realizou-se uma comparação entre os valores obtidos pela EPESOL PB e os apresentados no Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná. Na Tabela 23 são apresentadas as variações percentuais calculadas entre as duas fontes, utilizando-se como referência os valores do Atlas.

Tabela 23 – Variação percentual entre os valores calculados e os apresentados no Atlas para a EPESOL PB.

Período	Variação percentual EPESOL - Atlas [%]	
	Irradiação no plano inclinado	Produtividade
Outubro 2019	8,77%	17,12%
Novembro 2019	6,29%	10,91%
Dezembro 2019	-0,30%	12,02%
Janeiro 2020	-8,84%	1,53%
Fevereiro 2020	11,76%	21,41%
Março 2020	25,77%	34,14%
Abril 2020	35,11%	41,96%
Mai 2020	21,30%	25,34%
Junho 2020	-3,60%	N.D.
Julho 2020	11,14%	N.D.
Agosto 2020	7,71%	N.D.
Setembro 2020	16,92%	N.D.

Fonte: Autoria própria (2020).

Exceto em dezembro, janeiro e junho, a irradiação obtida pela EPESOL PB foi de 6,29% a 35,11% superior à apresentada no Atlas, indicando que nesse período os níveis de radiação foram mais altos que a média histórica no local. As produtividades do SFVCR também podem ser consideradas elevadas uma vez que a expectativa apresentada no Atlas é inferior em todos os meses analisados. Segundo Tiepolo et al. (2017), o total anual esperado na localidade é de 1.354 kWh/kWp.

Analisando o Gráfico 28 e o Gráfico 29 no período de janeiro a março, as taxas de desempenho decresceram gradativamente em função do aumento de irradiação e da temperatura nos módulos nestes três meses. Considerando o período de janeiro a abril, obteve-se as maiores taxas de desempenho por tecnologia em janeiro, atingindo o valor máximo em 86,40% com o CdTe.

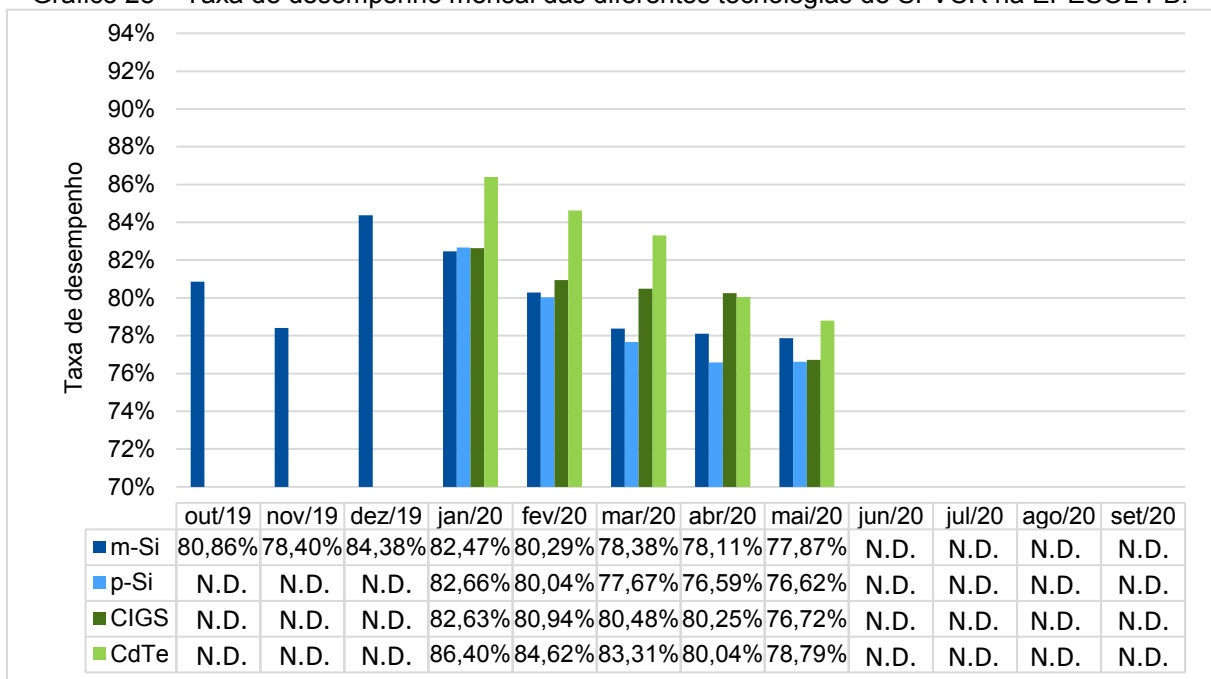
Em relação ao último trimestre de 2019 no qual foi calculada apenas a taxa de desempenho da tecnologia de m-Si, o comportamento observado para este índice de mérito é inversamente proporcional à irradiação. É possível observar que a taxa de

desempenho dispara em dezembro, consequência de uma maior produtividade em relação aos outros meses. Apesar da perda por temperatura variar de 53,75 °C a 55,85 °C em dezembro, os dados anteriores a este mês não estavam acessíveis, inviabilizando a análise deste parâmetro em relação à taxa de desempenho de m-Si neste período.

O decréscimo da taxa de desempenho ao longo dos meses pode estar relacionado ao longo período sem chuvas nos meses de março e abril, aumentando o índice de sujidade nos painéis fotovoltaicos e, conseqüentemente, prejudicando o desempenho da planta. Além disso, o fato de o SFVCR estar instalado próximo a uma rodovia contribui para o acúmulo de sujeira devido à fuligem de veículos e partículas de poeira.

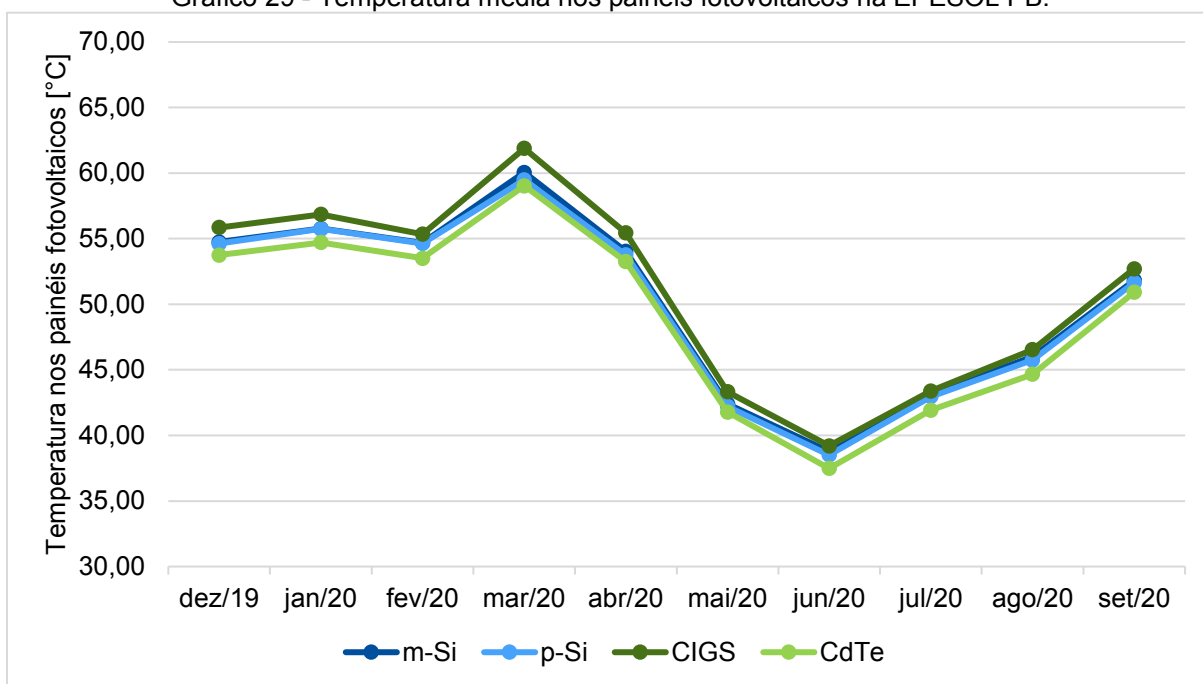
As médias por tecnologia das taxas de desempenho relativas aos meses de janeiro a maio foram: 79,42% para m-Si, 78,71% para p-Si, 80,21% para CIGS e 82,63% para CdTe. Em uma análise mensal, as médias considerando todas as tecnologias foram: 83,54% em janeiro, 81,47% em fevereiro, 79,96% em março, 78,75% em abril e 77,50% em maio.

Gráfico 28 – Taxa de desempenho mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL PB.



Fonte: Autoria própria (2020).

Gráfico 29 - Temperatura média nos painéis fotovoltaicos na EPESOL PB.



Fonte: Autoria própria (2020).

Na Tabela 24 é representado o desempenho mensal dos SFVCR na EPESOL PB, sendo que as diferentes tecnologias estão numeradas de 1 a 4. A classificação foi baseada nos resultados mensais dos três índices de mérito calculados, em que “1” representa o melhor desempenho numa escala de 1 a 4.

Tabela 24 – Comparação de desempenho mensal para as diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL PB.

Período	m-Si	p-Si	CIGS	CdTe
Janeiro 2020	4	2	3	1
Fevereiro 2020	3	4	2	1
Março 2020	3	4	2	1
Abril 2020	3	4	1	2
Mai 2020	2	4	3	1
Junho 2020	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Julho 2020	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Agosto 2020	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Setembro 2020	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

Fonte: Autoria própria (2020).

Para todos os índices de mérito calculados, a tecnologia CdTe apresentou melhor desempenho em todos os meses analisados, exceto em abril. Nos meses de fevereiro e março, os melhores resultados depois do CdTe foram: CIGS, m-Si e p-Si.

Há divergências nos meses de janeiro, abril e maio, em que a ordem de desempenho das tecnologias não foi a mesma em relação à maioria dos meses observados.

Em uma análise que considera os cinco meses de operação da planta de Pato Branco, o desempenho do SFVCR de m-Si foi 0,93% superior ao de p-Si, enquanto o SFVCR de CdTe superou em 3,01% o de CIGS.

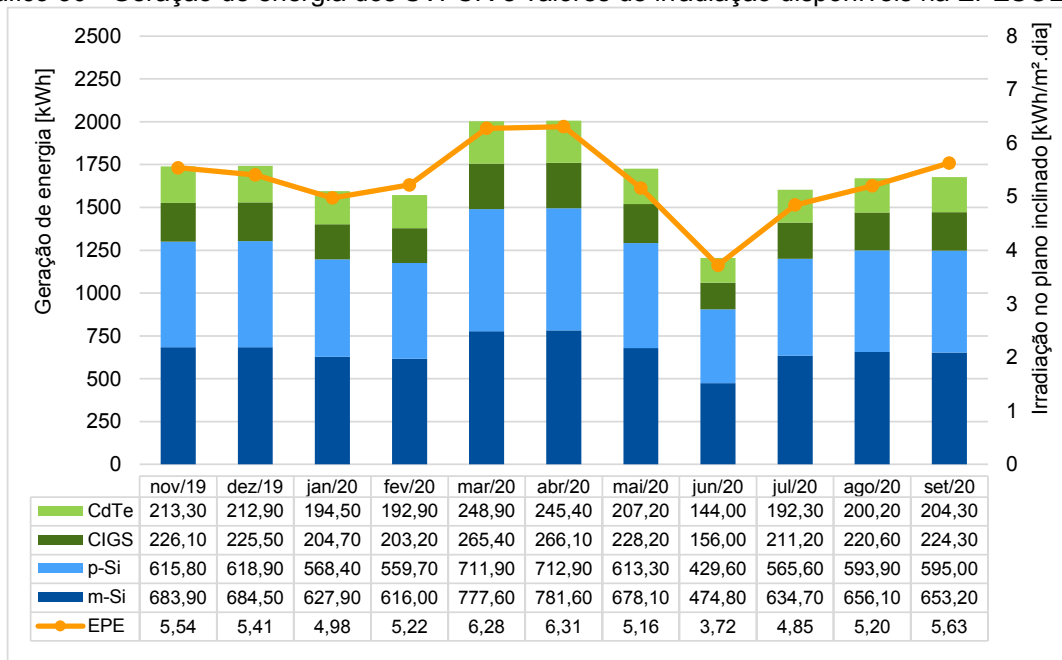
4.6 PONTA GROSSA

O acesso aos dados de geração de energia dos SFVCR instalados na EPESOL PG teve início em 12/10/2019. Sendo assim, considerou-se o início da análise a partir de 01/11/2019.

Os dados de irradiação no plano inclinado encontram-se disponíveis desde 28/11/2019. Sendo assim, foram coletados os dados da EMA A819 para calcular a irradiação nos dias de novembro em que a estação EPE não estava disponível.

De acordo com o Gráfico 30, o total mensal de energia gerada pelos quatro SFVCR variou de 1,20 MWh a 2,01 MWh. Embora a irradiação tenha sido estimada durante 27 dias em novembro com base na EMA 819, a irradiação calculada para este mês foi 2,25% superior à obtida em dezembro com os dados da EPE. Constatase que a diferença de 9,39% atribuída a essas duas estações é válida, visto que o total gerado de energia é equivalente em cada um destes meses.

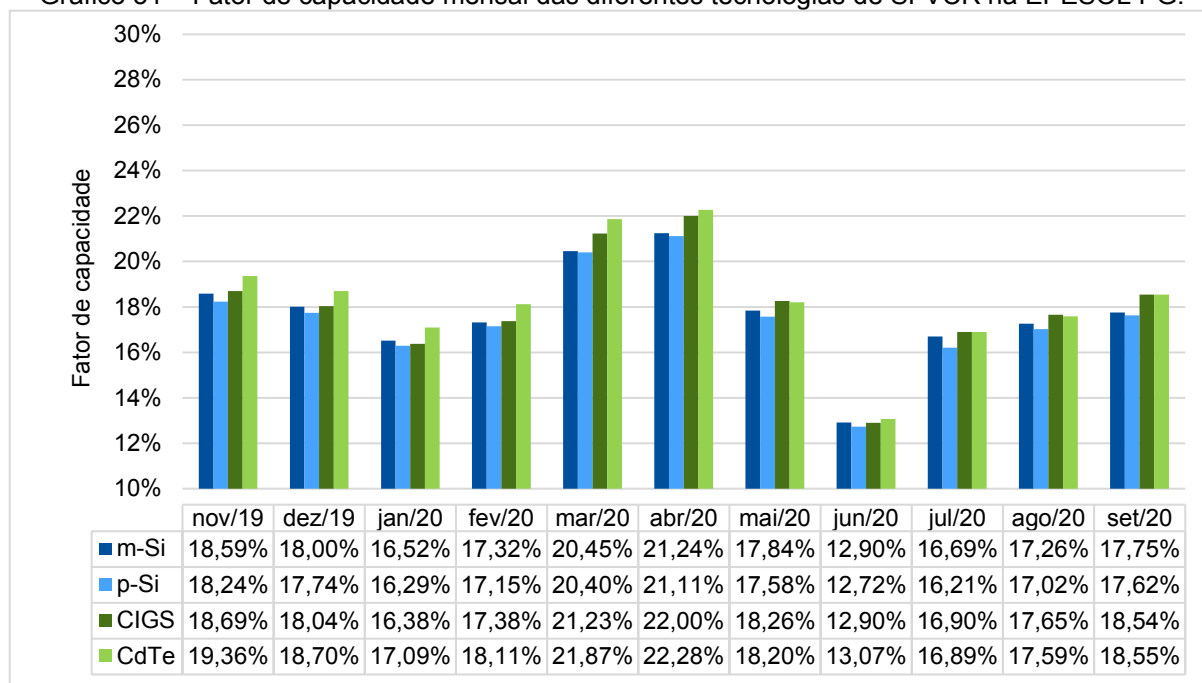
Gráfico 30 - Geração de energia dos SVFRCR e valores de irradiação disponíveis na EPESOL PG.



Fonte: Autoria própria (2020).

Os resultados obtidos para os fatores de capacidade podem ser observados no Gráfico 31. Dentre as tecnologias, o CdTe se destaca com o maior fator de capacidade na maioria dos meses, atingindo o valor máximo em abril, com 22,28%. A menor média encontrada foi para a tecnologia p-Si em junho, com uma porcentagem de 12,72%.

Gráfico 31 – Fator de capacidade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL PG.



Fonte: Autoria própria (2020).

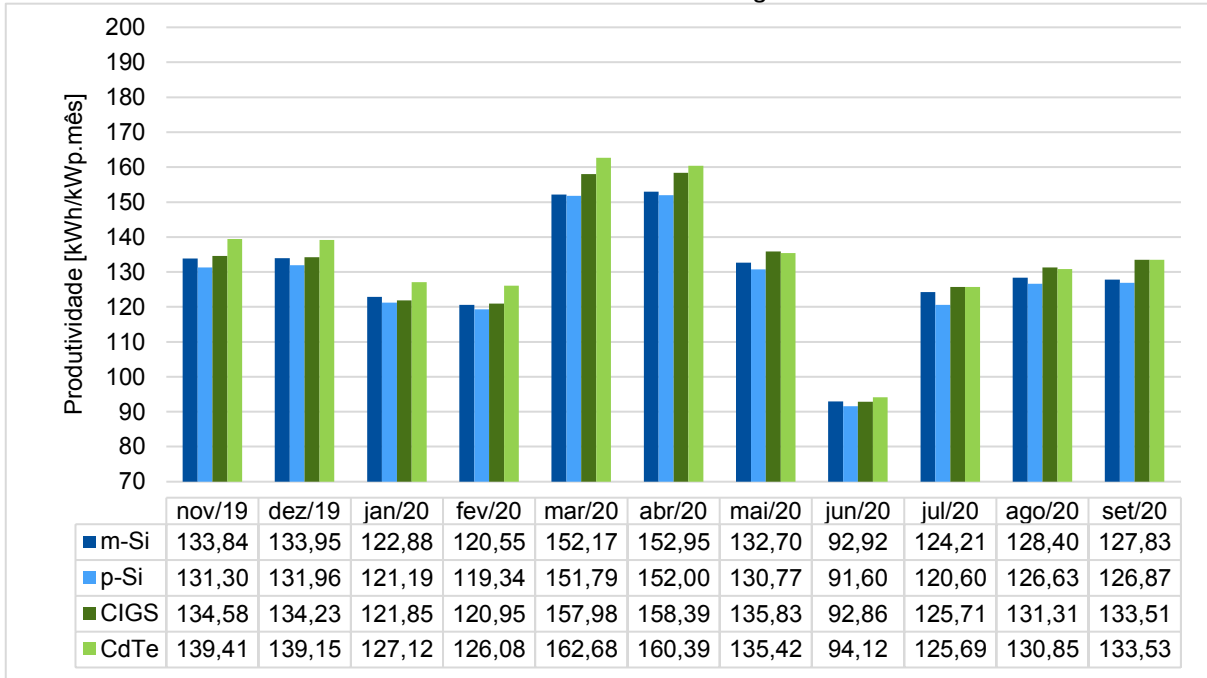
As médias por tecnologia dos fatores de capacidade relativos aos meses de novembro a setembro foram: 17,69% para m-Si, 17,46% para p-Si, 18,00% para CIGS e 18,34% para CdTe. Em uma análise mensal, as médias considerando todas as tecnologias foram: 18,72% em novembro, 18,12% em dezembro, 16,57% em janeiro, 17,49% em fevereiro, 20,99% em março, 21,66% em abril, 17,97% em maio, 12,90% em junho, 16,67% em julho, 17,38% em agosto e 18,12% em setembro.

Os resultados obtidos para as produtividades podem ser observados no Gráfico 32, cujo comportamento é semelhante ao apresentado para o fator de capacidade. A diferença ocorre de novembro para dezembro, período em que apesar da geração de energia dentre as tecnologias ser semelhante, o fator de capacidade é reduzido em função da maior quantidade de dias no mês.

Em contrapartida, a produtividade se mantém praticamente constante uma vez que não leva em conta essa diferença e os resultados são normalizados. Também houve divergência de janeiro para fevereiro pelo mesmo motivo citado anteriormente,

em que há diferença de dois meses analisados além de uma redução de geração de energia por todas as tecnologias de SFVCR. Exceto em maio, o CdTe se destaca com a maior produtividade dentre as tecnologias, atingindo o valor máximo em março, com 162,68 kWh/kWp. A menor média encontrada foi para a tecnologia p-Si em junho, com um total de 91,60 kWh/kWp.

Gráfico 32 – Produtividade mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL PG.



Fonte: Autoria própria (2020).

As médias por tecnologia das produtividades relativas aos meses de novembro a setembro foram: 129,31 kWh/kWp para m-Si, 127,64 kWh/kWp para p-Si, 131,56 kWh/kWp para CIGS e 134,04 kWh/kWp para CdTe. Em uma análise mensal, as médias considerando todas as tecnologias foram: 134,78 kWh/kWp em novembro, 134,82 kWh/kWp em dezembro, 123,26 kWh/kWp em janeiro, 121,73 kWh/kWp em fevereiro, 156,15 kWh/kWp em março, 155,94 kWh/kWp em abril, 133,68 kWh/kWp em maio, 92,87 kWh/kWp em junho, 124,05 kWh/kWp em julho, 129,30 kWh/kWp em agosto e 130,43 kWh/kWp em setembro.

Definidas as médias diárias mensais de irradiação no plano inclinado e as médias mensais de produtividade, realizou-se uma comparação entre os valores obtidos pela EPESOL PG e os apresentados no Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná. Na Tabela 25 são apresentadas as variações percentuais calculadas entre as duas fontes, utilizando-se como referência os valores do Atlas.

Tabela 25 – Variação percentual entre os valores calculados e os apresentados no Atlas para a EPESOL PG.

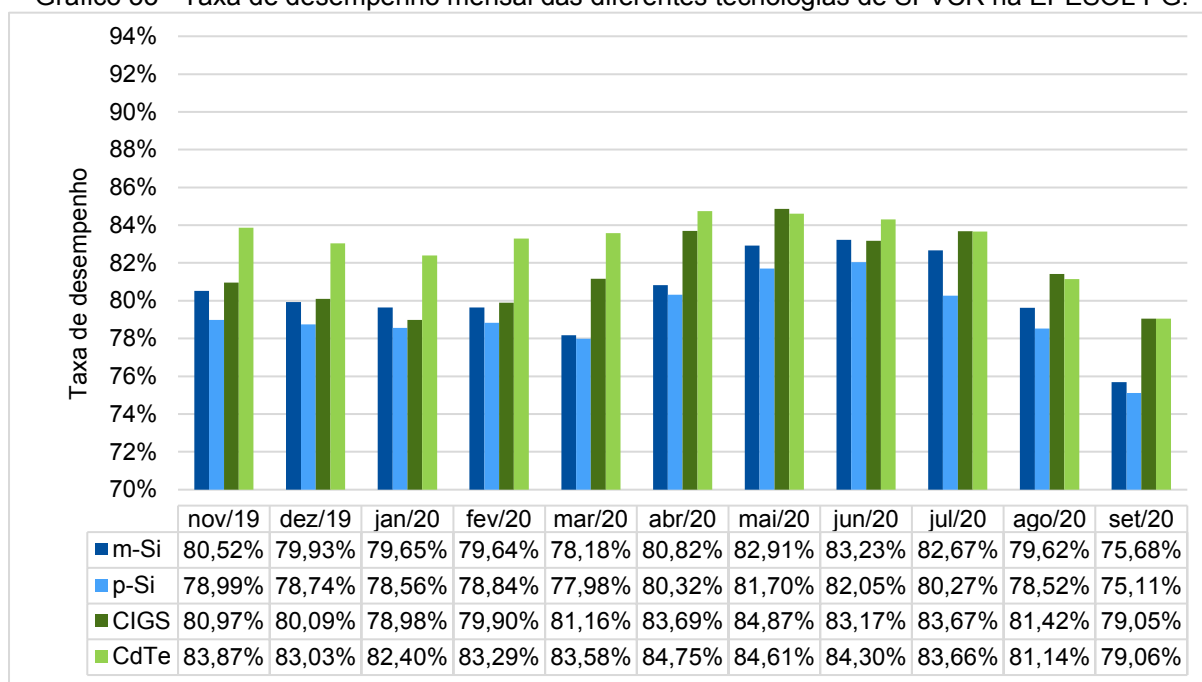
Período	Variação percentual EPESOL - Atlas [%]	
	Irradiação no plano inclinado	Produtividade
Novembro 2019	6,55%	15,20%
Dezembro 2019	3,96%	11,52%
Janeiro 2020	-1,46%	4,91%
Fevereiro 2020	0,96%	8,18%
Março 2020	24,58%	33,26%
Abril 2020	30,34%	43,19%
Mai 2020	24,11%	38,22%
Junho 2020	-5,55%	4,94%
Julho 2020	18,50%	30,35%
Agosto 2020	3,22%	10,34%
Setembro 2020	20,04%	23,52%

Fonte: Autoria própria (2020).

Exceto em janeiro e junho, a irradiação obtida pela EPESOL PG foi de 0,96% a 30,34% superior à apresentada no Atlas, indicando que nesse período os níveis de radiação foram mais altos que a média histórica no local. As produtividades do SFVCR também podem ser consideradas elevadas uma vez que a expectativa apresentada no Atlas é inferior em todos os meses analisados. Segundo Tiepolo et al. (2017), o total anual esperado na localidade é de 1.305 kWh/kWp.

De acordo com o Gráfico 33, obteve-se as maiores taxas de desempenho por tecnologia em maio e junho, atingindo o valor máximo em 84,87% com o CIGS. Embora as produtividades e os valores de irradiação terem sido próximos em novembro e dezembro, houve uma queda da taxa de desempenho neste período.

Gráfico 33 - Taxa de desempenho mensal das diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL PG.

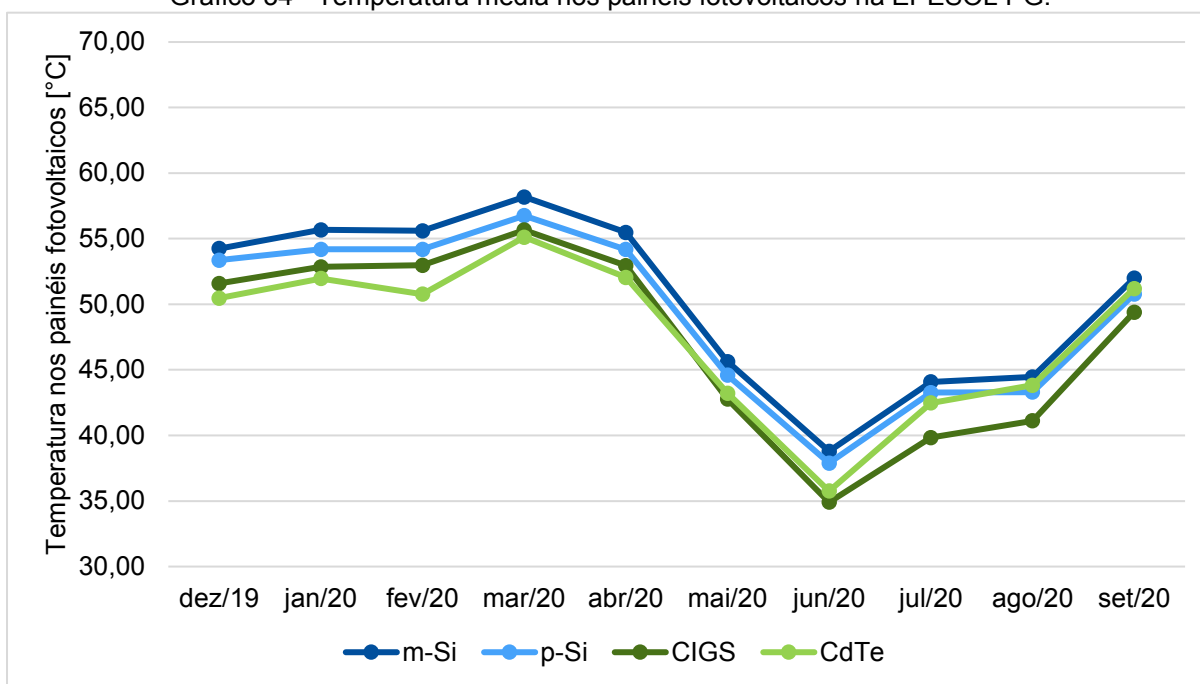


Fonte: Autoria própria (2020).

Não é possível identificar pelo Gráfico 34 se a perda por temperatura justifica esse cenário, visto que não há dados que possam ser comparados com o mês anterior. As menores taxas de desempenho por tecnologia ocorreram em janeiro e março, para as tecnologias de silício cristalino e filmes finos, respectivamente.

As médias por tecnologia das taxas de desempenho relativas aos meses de novembro a setembro foram: 80,26% para m-Si, 79,19% para p-Si, 81,54% para CIGS e 83,06% para CdTe. Em uma análise mensal, as médias considerando todas as tecnologias foram: 81,09% em novembro, 80,45% em dezembro, 79,90% em janeiro, 80,42% em fevereiro, 80,23% em março, 82,39% em abril, 83,53% em maio, 83,19% em junho, 82,57% em julho, 80,18% em agosto e 77,22% em setembro.

Gráfico 34 - Temperatura média nos painéis fotovoltaicos na EPESOL PG.



Fonte: Autoria própria (2020).

Na Tabela 26 é representado o desempenho mensal dos SFVCR na EPESOL PG, sendo que as diferentes tecnologias estão numeradas de 1 a 4. A classificação foi baseada nos resultados mensais dos três índices de mérito calculados, em que “1” representa o melhor desempenho numa escala de 1 a 4.

Tabela 26 – Comparação de desempenho mensal para as diferentes tecnologias de SFVCR na EPESOL PG.

Período	m-Si	p-Si	CIGS	CdTe
Novembro 2019	3	4	2	1
Dezembro 2019	3	4	2	1
Janeiro 2020	2	4	3	1
Fevereiro 2020	3	4	2	1
Março 2020	3	4	2	1
Abril 2020	3	4	2	1
Mai 2020	3	4	1	2
Junho 2020	2	4	3	1
Julho 2020	3	4	1	2
Agosto 2020	3	4	1	2
Setembro 2020	3	4	2	1

Fonte: Autoria própria (2020).

Para todos os índices de mérito calculados, a tecnologia CdTe apresentou melhor desempenho em todos os meses analisados, exceto em maio, julho e agosto. Na maioria dos meses analisados, os melhores resultados depois do CdTe foram:

CIGS, m-Si e p-Si. Em maio o desempenho do gerador de tecnologia CIGS não foi reduzido uma vez que o efeito do sobrecarregamento do inversor não foi observado. Em julho, embora os cálculos apontem o desempenho de CIGS superior ao de CdTe, a diferença entre as duas tecnologias pode ser considerada desprezível.

Em uma análise que considera os onze meses de operação da planta de Ponta Grossa, o desempenho do SFVCR de m-Si foi 1,34% superior ao de p-Si, enquanto o SFVCR de CdTe superou em 1,89% o de CIGS.

5 RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE AS EPESOL

Este capítulo irá apresentar uma análise comparativa do desempenho entre as diferentes tecnologias de SFVCR presentes nas EPESOL da UTFPR. A comparação dos resultados irá identificar qual tecnologia apresenta a melhor performance em determinada EPESOL durante um período específico.

Para identificar qual tecnologia de SFVCR apresenta o melhor desempenho foram obtidas as médias por tecnologia dos índices de mérito referentes aos meses em que os dados estavam disponíveis em cada EPESOL. No Quadro 2 são apresentados os resultados obtidos no período entre outubro de 2019 e setembro de 2020, sendo que em cada EPESOL os meses analisados compreendidos neste intervalo estão destacados com um “X”.

Quadro 2 – Comparação do desempenho entre as diferentes tecnologias de SFVCR.

EPESOL	Período											índice de mérito	SFVCR				
	out/19	nov/19	dez/19	jan/20	fev/20	mar/20	abr/20	mai/20	jun/20	jul/20	ago/20		set/20	m-Si	p-Si	CIGS	CdTe
CM				X	X	X	X	X	X	X	X	X	FC	17,84%	17,96%	18,59%	18,98%
													YF	130,35	131,28	135,89	138,70
													PR	78,41%	78,96%	81,76%	83,39%
CP		X				X	X	X	X	X	X	X	FC	20,31%	20,00%	20,13%	21,03%
													YF	148,69	146,40	147,35	153,89
													PR	83,73%	82,43%	82,93%	86,54%
CT	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		FC	16,83%	16,80%	17,47%	17,83%
													YF	123,48	123,29	128,24	130,84
													PR	79,82%	79,74%	82,92%	84,56%
MD			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	FC	18,33%	18,22%	18,97%	19,76%
													YF	134,09	133,29	138,84	144,59
													PR	80,70%	80,21%	83,59%	86,90%
PB				X	X	X	X	X					FC	19,71%	19,52%	19,94%	20,52%
													YF	143,63	142,28	145,30	149,54
													PR	79,42%	78,71%	80,21%	82,63%
PG		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	FC	17,69%	17,46%	18,00%	18,34%
													YF	129,31	127,64	131,56	134,04
													PR	80,26%	79,19%	81,54%	83,06%

Fonte: Autoria própria (2020).

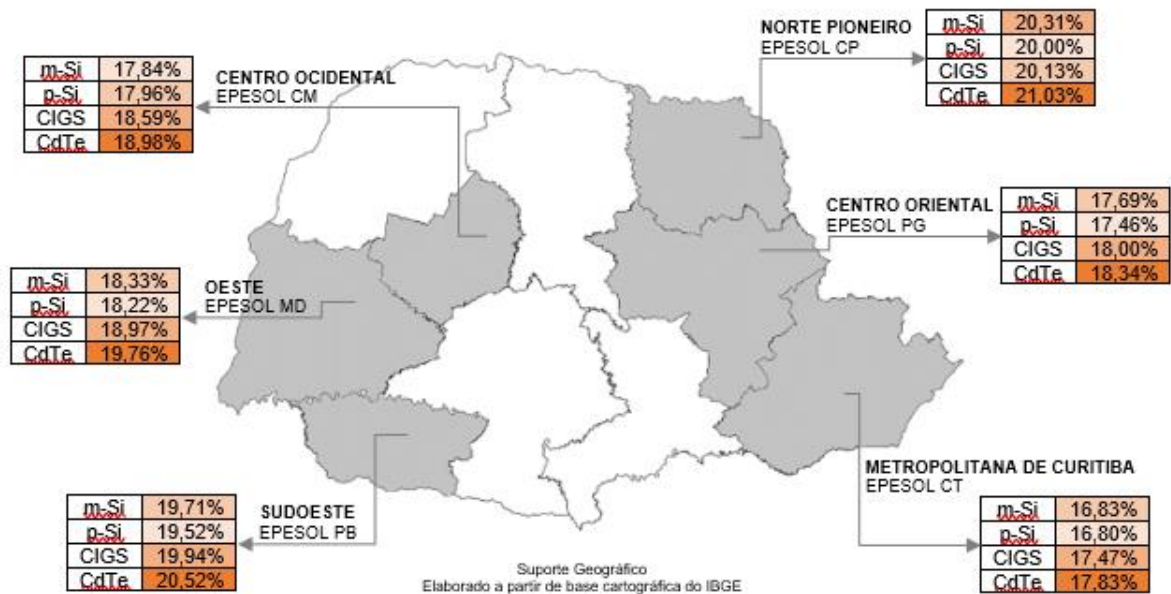
Observa-se que a classificação de desempenho entre as tecnologias em uma determinada EPESOL é a mesma independente do índice de mérito analisado. Em todas as EPESOL, o CdTe foi o que apresentou o melhor desempenho em relação às demais tecnologias. Exceto em Campo Mourão e Cornélio Procópio, os melhores resultados depois do CdTe, foram: CIGS, m-Si e p-Si.

Exceto em Cornélio Procópio, o desempenho dos filmes finos foi superior em relação aos de silício cristalino em todos os casos. Neste mesmo local, a tecnologia CIGS apresentou o terceiro melhor desempenho. Em Campo Mourão o desempenho de p-Si foi superior ao m-Si, ao contrário de todas as localidades.

No caso de Pato Branco, embora os dados da tecnologia m-Si estejam disponíveis desde outubro, considerou-se para o cálculo da média dos índices de mérito a partir de janeiro, mês em que todas as tecnologias de SFVCR estavam em operação.

Para identificar em qual EPESOL o SFVCR apresenta o melhor desempenho, analisou-se cada índice de mérito separadamente. Os resultados apresentados no Quadro 2 poderão ser visualizados em forma de mapas em função das diferentes mesorregiões paranaenses. As médias referentes ao fator de capacidade por tecnologia obtidas nas seis mesorregiões estão representadas na Figura 27.

Figura 27 – Fator de capacidade médio para o período analisado dos SFVCR com diferentes tecnologias nas seis mesorregiões paranaenses.

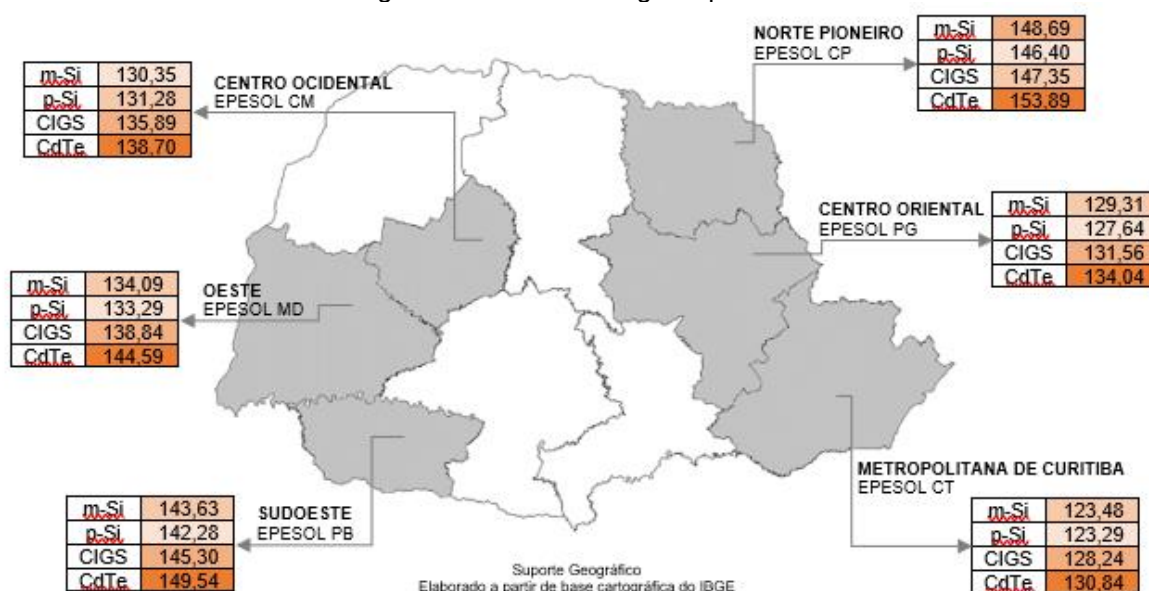


Fonte: Autoria própria (2020).

Os melhores resultados relativos aos fatores de capacidade para as quatro tecnologias de geradores fotovoltaicos foram identificados em Cornélio Procópio, seguido de Pato Branco, Medianeira, Campo Mourão, Ponta Grossa e Curitiba.

O comportamento da produtividade é o mesmo apresentado para o fator de capacidade, pois estes dois índices são proporcionais. As médias referentes à produtividade por tecnologia obtidas nas seis mesorregiões estão representadas na Figura 28.

Figura 28 – Produtividade média em kWh/kWp para o período analisado dos SFVCR com diferentes tecnologias nas seis mesorregiões paranaenses.

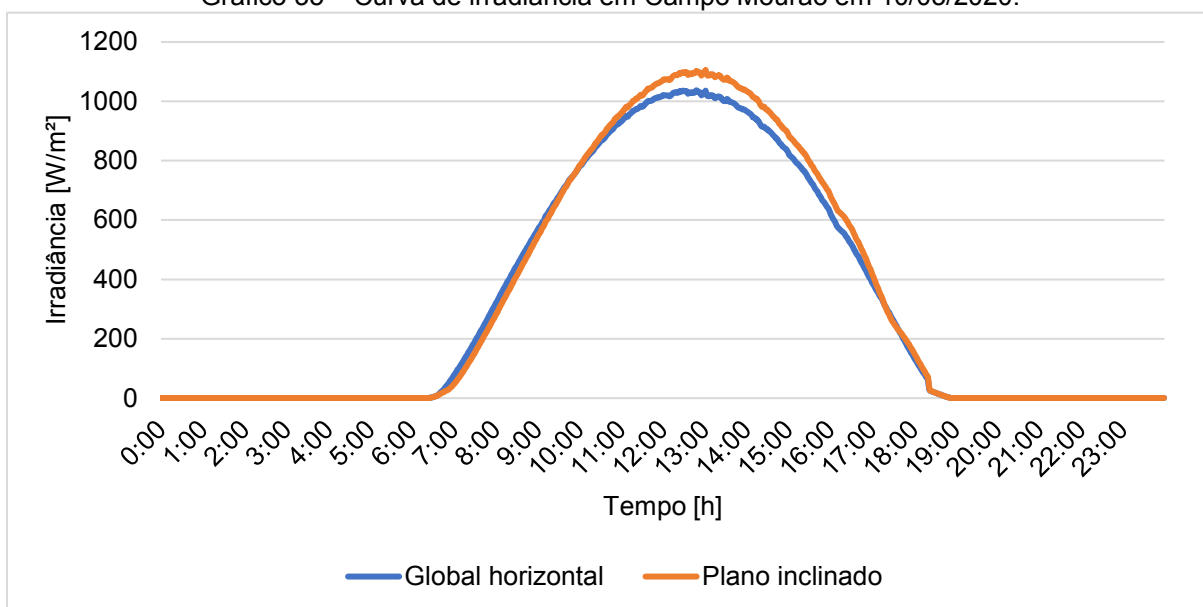


Fonte: Autoria própria (2020).

Considerando que nas EPESOL Campo Mourão, Curitiba e Ponta Grossa a taxa de desempenho do gerador fotovoltaico de CIGS foi superior ao do CdTe especialmente no período entre maio e agosto, analisou-se o comportamento dos inversores dos SFVCR. Compararam-se os dias 10/03/2020 e 19/05/2020 em Campo Mourão, em que o comportamento da curva de irradiância se apresenta de forma ideal, consequência de um dia de céu azul, sem nuvens.

A máxima irradiância observada para as componentes global horizontal e no plano inclinado no Gráfico 35 para o dia 10/03/2020 foi de 1.036,84 W/m² e 1.106,00 W/m², respectivamente.

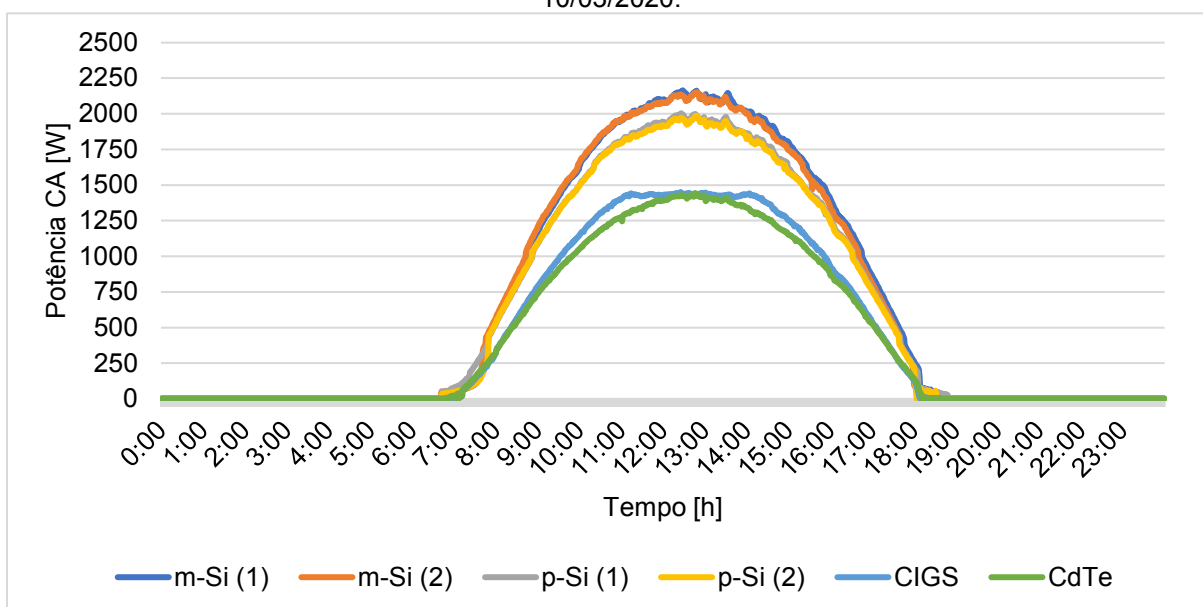
Gráfico 35 – Curva de irradiância em Campo Mourão em 10/03/2020.



Fonte: Autoria própria (2020).

Devido aos altos valores de irradiância, a potência de saída dos inversores foi elevada neste dia, atingindo os valores máximos de 2.164 W e 2.151 W para os geradores de m-Si, 2.003 W e 1.985 W para os geradores de p-Si, 1.450 W para o gerador de CIGS e 1.444 W para o gerador de CdTe. Observando o Gráfico 36 é possível perceber que a curva da potência CA do inversor alocado sob o painel de CIGS é ceifada quando se aproxima de 1.500 W, que é o valor máximo fornecido pelo datasheet do equipamento.

Gráfico 36 - Curva da potência de saída dos geradores fotovoltaicos em Campo Mourão em 10/03/2020.

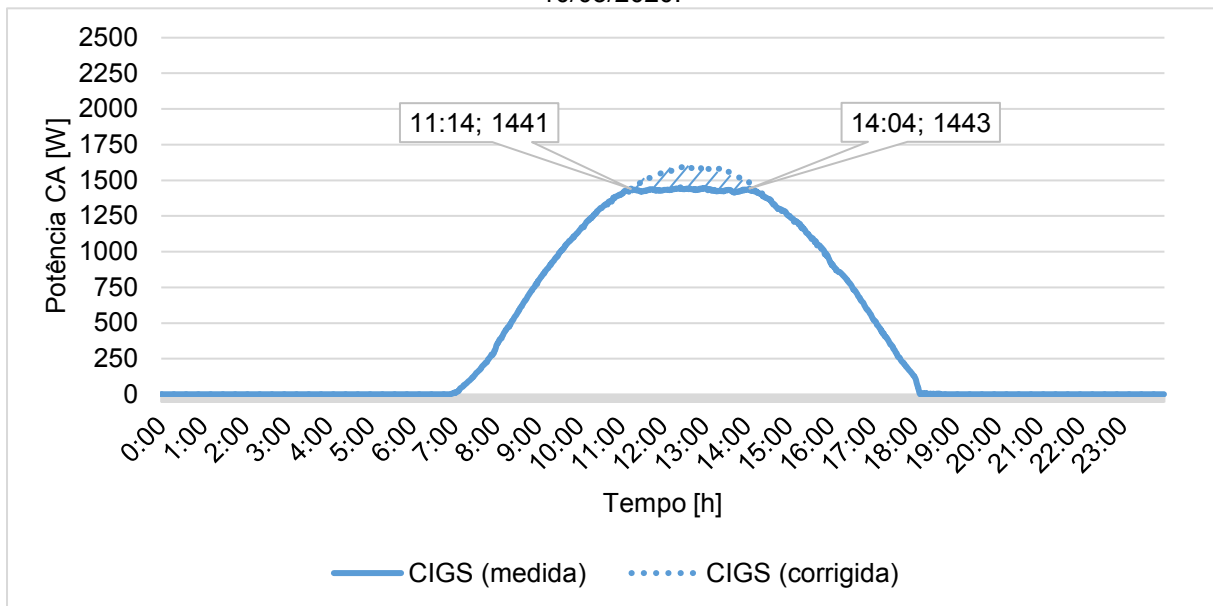


Fonte: Autoria própria (2020).

Excepcionalmente em Campo Mourão, a potência de saída é limitada antes mesmo de atingir a potência nominal do inversor, ou seja, 1500 W. Já nas demais EPESOL a limitação ocorre apenas quando potência nominal é atingida.

Em relação à curva correspondente ao gerador fotovoltaico de CIGS, pode-se constatar que a potência de saída é limitada à potência nominal pelo fato de o inversor operar sobrecarregado, afetando o desempenho desta tecnologia. Caso não houvesse a limitação, a curva de potência CA deveria apresentar o comportamento apresentado no Gráfico 37, sendo proporcional aos valores de irradiância no plano inclinado no intervalo entre às 11:14h e 14:04h, quando foi ceifada. Nestes horários os valores da potência CA foram de 1.441 W e 1.443 W, respectivamente.

Gráfico 37 - Curva da potência de saída do gerador fotovoltaico de CIGS em Campo Mourão em 10/03/2020.

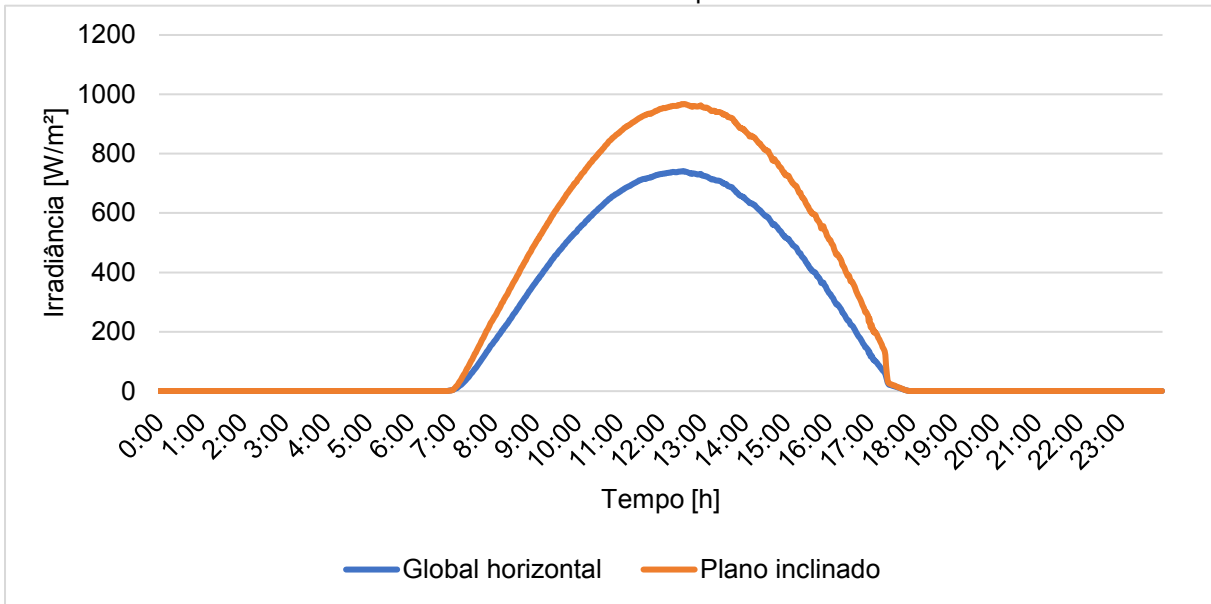


Fonte: Autoria própria (2020).

A área hachurada destacada com o auxílio da curva corrigida do gerador fotovoltaico de CIGS indica que a energia poderia ter um ganho de 3,09% sob as condições do dia 10/03/2020, caso o inversor não operasse de forma sobrecarregada.

Por outro lado, analisou-se o dia 19/05/2020 em que a máxima irradiância observada no Gráfico 38 para as componentes global horizontal e no plano inclinado foram de 740,91 W/m² e 967,59 W/m², respectivamente.

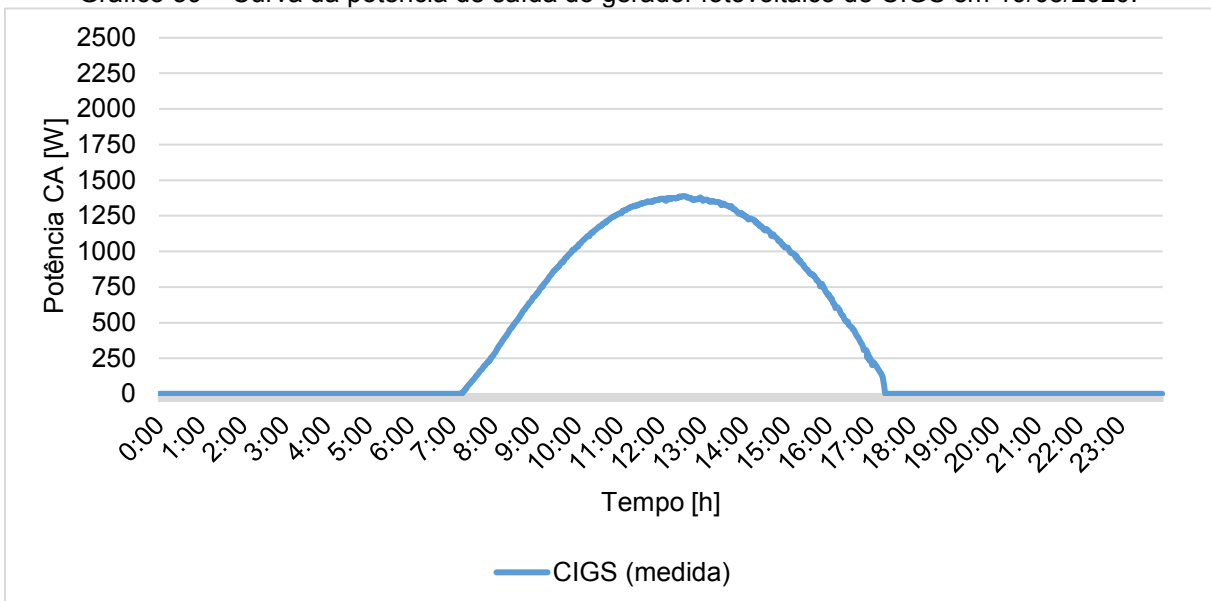
Gráfico 38 - Curva de irradiância em Campo Mourão em 19/05/2020.



Fonte: Autoria própria (2020).

A irradiância no dia 19/05/2020 foi inferior a 1.000 W/m^2 , enquanto a potência de saída do inversor atingiu o valor máximo de 1.389 W , conforme o Gráfico 39. Neste dia não houve o processamento pleno da potência CA do inversor uma vez que este parâmetro não foi reduzido. Pode-se perceber que a curva da potência de saída do gerador fotovoltaico de CIGS não foi ceifada quando se aproxima de 1.500 W , ao contrário do que ocorreu no dia 10/03/2020.

Gráfico 39 – Curva da potência de saída do gerador fotovoltaico de CIGS em 19/05/2020.



Fonte: Autoria própria (2020).

Na Tabela 27 estão definidos os valores medidos de potência, energia e irradiância, bem como os índices de mérito diários calculados para os dois dias analisados. Vale ressaltar que cada módulo fotovoltaico de CIGS tem 140 Wp de potência nominal CC instalada, resultando em um painel de 1,68 kWp para um inversor de 1.500 W.

Tabela 27 – Comparação dos parâmetros diários medidos e calculados.

	10/03/2020	19/05/2020
Máxima potência CA	1.450 W	1.389 W
Energia gerada	11 kWh	9,4 kWh
Máxima G_i	1.106,00 W/m ²	967,59 W/m ²
Fator de capacidade	27,28%	23,31%
Produtividade	6,55 kWh/kWp	5,60 kWh/kWp
Taxa de desempenho	82,47%	84,88%

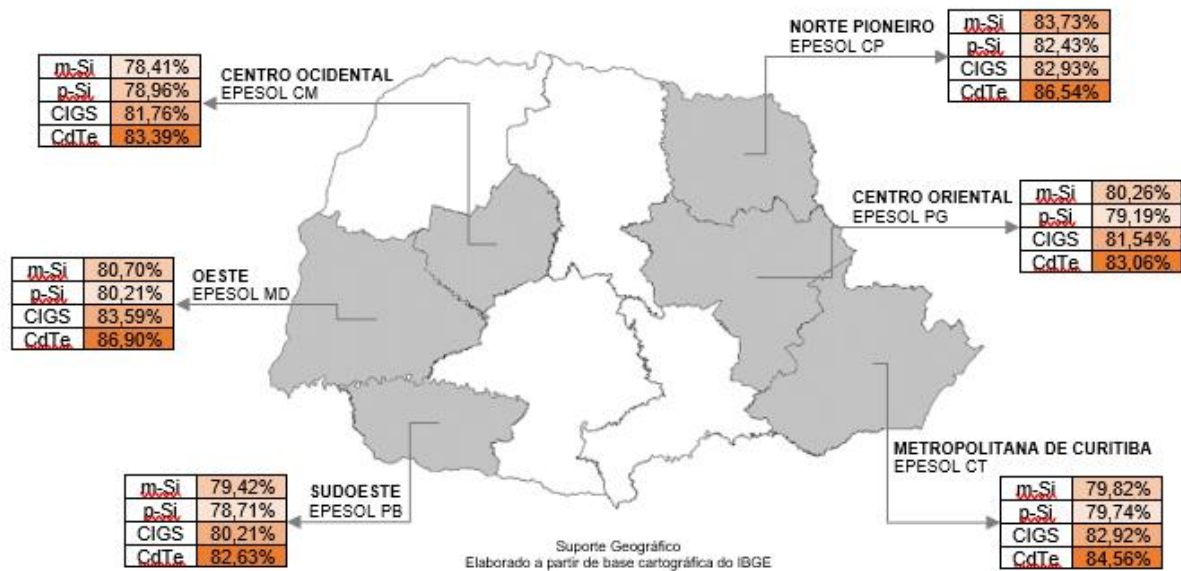
Fonte: Autoria própria (2020).

Ao comparar os dois dias expostos, observa-se que todos os parâmetros foram superiores em 10/03/2020, exceto a taxa de desempenho. Devido à limitação do inversor, a redução de 3,09% de energia disponibilizada impactou negativamente sobretudo na taxa de desempenho, cujo valor foi inferior ao dia no qual o inversor não operou sobrecarregado.

A diferença de 2,41% entre as duas taxas de desempenho foi inferior às perdas de 3,09% devido ao sobrecarregamento do inversor. Pode-se constatar que há outros fatores que interferem nessa análise, como por exemplo o índice de sujidade sobre os módulos e a temperatura, resultando em 0,68% de perdas. Além disso, o fato de o mês de maio ser mais próximo do inverno implica em um aumento da taxa de desempenho neste período, já que inversor não irá operar sobrecarregado e a temperatura diminui.

As médias referentes à taxa de desempenho por tecnologia obtidas nas seis mesorregiões estão representadas na Figura 29. Independente da tecnologia analisada, as médias foram superiores à 75%, ultrapassando o valor típico adotado para efeitos de projeto. Os valores de irradiação obtidos no respectivo período de análise de cada EPESOL serviram de base para avaliar a influência deste parâmetro no desempenho das plantas. Nota-se que a melhor taxa de desempenho não está concentrada em uma única EPESOL e pode variar de acordo com a tecnologia do módulo fotovoltaico de cada sistema.

Figura 29 – Taxa de desempenho média para o período analisado dos SFVCR com diferentes tecnologias nas seis mesorregiões paranaenses.



As maiores taxas de desempenho de m-Si e p-Si foram encontradas em Cornélio Procópio. Já em Medianeira foram identificadas as maiores taxas de desempenho de CIGS e CdTe. As menores porcentagens foram observadas em Pato Branco.

Em geral, o maior potencial para a instalação de SFVCR é encontrado nas mesorregiões Centro Ocidental, Norte Pioneiro e Oeste, visto que as taxas de desempenho nestas localidades costumam ser maiores quando comparada às demais. Segundo Tiepolo et al. (2017), a irradiação no plano inclinado é menor principalmente na região leste até o sudeste do estado, enquanto a maior incidência é encontrada no norte e se estende ao oeste do território paranaense. De fato, a irradiação média obtida no mesmo período em que os índices de mérito foram calculados teve maior representatividade em Cornélio Procópio, seguido de Campo Mourão, Medianeira, Pato Branco, Ponta Grossa e Curitiba.

Vale ressaltar que os meses de março e abril foram marcados por baixa precipitação em praticamente todas as cidades do Paraná, provocando maiores diferenças entre os valores observados quando comparados às médias históricas no Estado. Apenas em maio a maior frequência de frentes frias favoreceu a ocorrência de chuvas, principalmente no Oeste e no Sudoeste paranaense. Nas demais regiões o déficit continuou negativo (SIMEPAR, 2020a, 2020b, 2020c). As diferenças causadas sobretudo por fatores pluviométricos contribuíram para um grande período

de estiagem no Paraná, tornando o verão e parte do outono atípico em 2020. A ausência de chuva neste período comprometeu a autolimpeza dos painéis fotovoltaicos, minimizando o desempenho ao elevar o índice de sujidade das plantas. De acordo com Tonolo et al. (2018), a produção de energia do SFVCR é prejudicada quando há um longo período sem chuvas, mesmo que haja aumento da irradiação.

Em junho a precipitação ficou acima da média na maior parte do Paraná (SIMEPAR, 2020d), favorecendo a elevação da taxa de desempenho na maioria das mesoregiões estudadas. A efetividade da autolimpeza é demonstrada em estudos desenvolvidos por Tonolo et al. (2018), em que a taxa de desempenho dos SFVCR teve um aumento de até 8,5% entre a estiagem e um longo período de chuvas.

As temperaturas, por sua vez, ficaram perto ou acima das médias históricas em março, superando em até 2°C os valores considerados normais entre o sudoeste e o oeste do Paraná. Já em abril e maio as temperaturas ficaram perto ou abaixo das normais climatológicas no Estado (SIMEPAR, 2020a, 2020b, 2020c).

A dificuldade de definir apenas uma mesorregião em que todas as tecnologias apresentam o melhor desempenho pode estar atribuída às perdas ocorridas no processo de conversão de energia solar em energia elétrica. As diferenças entre as tecnologias de módulos fotovoltaicos atreladas às particularidades de cada localidade influenciam nas taxas de desempenho do SFVCR, as quais apresentam comportamentos distintos que podem estar relacionados aos parâmetros de temperatura dentre outros não quantificados neste trabalho.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho foi iniciado no ano de 2018 com a revisão da literatura e, em 2019, realizou-se o acompanhamento da instalação dos SFVCR e das estações solarimétricas que compõem a rede de EPESOL implantadas nos câmpus Campo Mourão, Cornélio Procópio, Curitiba, Medianeira, Pato Branco e Ponta Grossa da UTFPR, as quais estão localizadas em seis distintas mesorregiões paranaenses.

A coleta dos dados de geração de energia, irradiação e temperatura nos módulos fotovoltaicos compreendeu o período entre outubro de 2019 e setembro de 2020, sendo que em cada EPESOL existem particularidades, demonstrados nos Apêndices A, B e C, que limitam a quantidade de meses analisados. O cronograma diário da disponibilidade de acesso aos dados possibilitou identificar quando o desempenho da planta é reduzido em função da sua manutenção ou de eventuais problemas de ordem técnica, evidenciando a influência das ocorrências durante a operação do SFVCR e das estações solarimétricas.

Em função da potência instalada do SFVCR de m-Si ser 420 Wp maior que a capacidade do SFVCR de p-Si, a geração de energia pelo SFVCR de m-Si também é maior. As variações de geração de energia entre os sistemas com tecnologias de silício cristalino no período correspondente aos dados coletados de cada EPESOL são: 8,22% em Campo Mourão, 10,65% em Cornélio Procópio, 9,07% em Curitiba, 9,62% em Medianeira, 9,96% em Pato Branco e 10,42% em Ponta Grossa.

No caso dos filmes finos, a potência instalada do SFVCR de CIGS é 150 Wp superior à capacidade do SFVCR de CdTe, conseqüentemente, a geração de energia pelo SFVCR de CIGS também é maior. As variações de geração de energia entre os sistemas com tecnologias de filmes finos no período correspondente aos dados coletados de cada EPESOL são: 7,22% em Campo Mourão, 5,19% em Cornélio Procópio, 7,73% em Curitiba, 5,61% em Medianeira, 6,63% em Pato Branco e 7,80% em Ponta Grossa.

Os dados de irradiação foram coletados das estações SONDA e EPE, as quais se encontram adjacentes aos SFVCR onde a energia é gerada. Esses parâmetros foram medidos em tempo real com o intuito de estabelecer a taxa de desempenho para os SFVCR nas EPESOL. Nos dias em que não houve acesso aos dados de irradiação, utilizou-se os dados de irradiação disponibilizados pelo INMET.

A metodologia adotada para complementar os dias com ausência de dados de irradiação possibilitou definir a diferença percentual existente entre uma estação do INMET e uma estação do projeto de P&D. As estações EPE e SONDA apresentaram valores de irradiação entre 0,39% e 9,73% superiores quando comparadas às EMA do INMET, dependendo da EPESOL analisada. Apenas em Campo Mourão e Medianeira os valores foram menores, variando 1,24% e 0,96%, respectivamente.

Por meio da verificação dos dados históricos de irradiação e produtividade disponíveis no Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná foi possível identificar os meses em que as plantas apresentaram valores inferiores ou superiores à média histórica no local. As máximas variações de irradiação foram observadas em abril de 2019, compreendendo um intervalo entre 27,72% e 36,14%. Não foi possível afirmar qual tipo de estação solarimétrica dispõe de dados mais aproximados com o Atlas, visto que os dados das estações EPE apresentam variações semelhantes aos observados nas estações SONDA. Em relação à produtividade, pode-se perceber que os valores obtidos pelas EPESOL são maiores que os apresentados no Atlas, cuja taxa de desempenho de 75% adotada para obter os índices de produtividade é inferior às porcentagens obtidas na prática por meio das EPESOL. Em geral, o período analisado pode ser considerado atípico visto que a maioria dos resultados é superior em relação aos índices definidos no Atlas.

As perdas ocorridas por temperatura no processo de conversão de energia serviram como parâmetro para justificar a variação mensal da taxa de desempenho da planta. Os módulos de silício cristalino tendem a apresentar um menor desempenho quando expostos a uma temperatura ambiente superior à 25°C devido aos maiores coeficientes de temperatura em relação à sua potência nominal. Por sua vez, apesar dos menores índices de eficiência de conversão de energia, os módulos de CdTe apresentam as menores perdas ocasionadas por temperatura, apresentando resultados superiores de desempenho em todas as EPESOL. Ao comparar os Gráfico 8, Gráfico 13, Gráfico 18, Gráfico 24, Gráfico 29 e Gráfico 34, percebe-se que os resultados de temperatura por tecnologia apresentam diferentes perfis dependendo da EPESOL analisada. Algumas hipóteses podem justificar este cenário, como: troca de conexão dos sensores; descalibração dos sensores; diferença nas cores dos módulos fotovoltaicos, favorecendo uma temperatura maior nos módulos mais escuros; posição do módulo favorável à ventilação, sujeito a uma temperatura mais

baixa. Seria necessária uma visita *in loco* em todas as EPESOL para identificar os supostos desvios em relação aos valores medidos.

Outro parâmetro importante a se considerar é o FDI. Nota-se que os índices de mérito dos SFVCR podem ser afetados, sobretudo a taxa de desempenho que é influenciada pelos valores de irradiância, condições do local de instalação, sujidade, temperatura e sombreamento. Portanto, pode haver perdas de eficiência dos sistemas sobrecarregados de CIGS nos momentos de altos valores de irradiância devido a limitação da potência transferida pelos inversores. Apesar do inversor do gerador de CdTe também operar de forma sobrecarregada, o seu FDI é quase unitário. Logo, a potência de saída não se apresenta de forma limitada, refletindo a real potência do gerador fotovoltaico assim como os inversores dos geradores de m-Si e p-Si que operam subcarregados.

Além do SFVCR de CdTe apresentar o melhor desempenho em todas as EPESOL, as médias relativas aos meses analisados demonstraram que os sistemas com tecnologias de filmes finos apontam resultados superiores quando comparadas aos sistemas com tecnologias de silício cristalino, exceto em Cornélio Procópio onde o SFVCR de m-Si foi superior ao de CIGS. As diferenças de desempenho entre as duas gerações de tecnologias, ou seja, de silício cristalino e filmes finos foram de 4,99% em Campo Mourão, 2,03% em Cornélio Procópio, 4,97% em Curitiba, 5,96% em Medianeira, 2,98% em Pato Branco e 3,25% em Ponta Grossa.

Em relação as diferenças de desempenho de SFVCR com tecnologias de uma mesma geração, Campo Mourão é a única EPESOL onde o SFVCR de p-Si foi superior ao de m-Si. Vale ressaltar que os módulos de m-Si são de tecnologia PERC, em que a presença de uma camada de passivação permite o aumento da eficiência da célula. As variações são mais acentuadas entre os filmes finos em razão das maiores diferenças de eficiências e coeficientes de temperatura em relação à potência nominal do módulo.

A confiabilidade dos dados se torna significativa à medida que o seu armazenamento é aprimorado. O ideal seria ter a mesma quantidade de dias para poder comparar os resultados, pois quantidades diferentes de amostras podem superestimá-los ou subestimá-los. A partir do mês de março, os problemas que resultavam em perdas de dados pontuais em determinadas EPESOL foram reduzidos. Desta forma, os dias com dados indisponíveis se tornaram indicativos de problemas

gerais envolvendo todos os câmpus, como a atualização do sistema para compor o banco de dados.

Com a atualização no envio de dados para o servidor FTP, a aquisição e o tratamento de dados se tornaram mais práticos, refletindo em uma melhora na qualidade dos resultados. Entretanto, a maioria das manutenções e atualizações do sistema foram realizadas durante o período diurno, comprometendo a análise de desempenho da planta ao interromper momentaneamente a coleta de dados. Sendo assim, é interessante que as necessárias intervenções sejam realizadas em horários estratégicos, como no período noturno, evitando então a perda de dados.

Embora a análise de desempenho dos SFVCR de cada EPESOL tenha compreendido o período entre outubro de 2019 e setembro de 2020, as médias relativas à cada local apresentam divergências em relação à quantidade de meses que os SFVCR estavam em operação. Apesar da variação, os resultados se referem a uma mesma época do ano visto que a maioria dos dados analisados caracterizam uma visão geral do primeiro semestre de 2020, refletindo o período de verão, outono e parte do inverno. Para a análise se tornar mais relevante, seria necessária uma amostra de, no mínimo, doze meses de dados contínuos, refletindo todas as variações climáticas ao longo do ano.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho apresentou o desempenho dos SFVCR de diferentes tecnologias nas EPESOL da UTFPR. Trabalhos futuros podem avaliar o desempenho ao longo de um ano, enfatizando o comportamento de cada tecnologia de SFVCR em meses de inverno e de verão. Além disso, pode-se analisar e quantificar as perdas ocorridas em cada SFVCR para determinar qual tecnologia é mais suscetível aos fatores externos.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 10899**: energia solar fotovoltaica – terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT. **NBR 11704**: sistemas fotovoltaicos – classificação. Rio de Janeiro, 2008.

ALMEIDA, M. P. **Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. 2012. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/lst/sites/default/files/Mestrado_Marcelo_Pinho_Almeida.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2019.

ANEEL. **Perguntas e Respostas sobre a aplicação da Resolução Normativa nº 482/2012**, 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/FAQ+-V3_20170524/ab9ec474-7dfd-c98c-6753-267852784d86>. Acesso em: 06 mar. 2019.

ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA**, 2020a. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/siga>>. Acesso em: 15 out. 2020.

ANEEL. **Unidades Consumidoras com Geração distribuída**, 2020b. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao/-/asset_publisher/mJhnKli7qcJG/content/registro-de-central-geradora-de-capacidade-reduzida/655808>. Acesso em: 15 out. 2020.

BENEDITO, R. S. **Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, no Brasil, sob os Aspectos Técnico, Econômico e Regulatório**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-12082010-142848/pt-br.php>>. Acesso em: 15 mar. 2019.

BRASIL. ANEEL. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 19 abr. 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 09 ago. 2018.

BRASIL. ANEEL. Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 02 dez. 2015 Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 09 ago. 2018.

BRASIL. Ministério da Fazenda. **Conselho Nacional de Política Fazendária - CONFAZ**. 2018a. Disponível em: <<https://www.confaz.fazenda.gov.br/aceso-a-informacao/institucional/CONFAZ>>. Acesso em: 24 nov. 2018.

BRASIL. Ministério da Fazenda. Convênio ICMS 42/18, de 16 de maio de 2018. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2018b. Disponível em <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2018/CV042_18>. Acesso em: 24 nov. 2018.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2020: Relatório Final / Ano Base 2019**. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2020a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf>. Acesso em: 19 out. 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Demanda de Energia 2050**. Nota Técnica DEA 13/15. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-458/DEA%2013-15%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2018.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. Brasília: MME/EPE, 2020b. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2029>>. Acesso em: 16 jun. 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050**. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2018d. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/98561453/NT+PR+004-2018+Recursos+Energeticos+2050.pdf/700847e2-09d9-4da7-914e-65d88c6d3d83?version=1.0>>. Acesso em: 24 nov. 2018.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **IEC 61724: photovoltaic system performance monitoring - guidelines for measurement, data exchange and analysis**, Londres, 1998. Disponível em: <<ftp://ftp.ee.polyu.edu.hk/wclo/61/IEC61724%20PV%20monitoring.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2019.

CALYXO TS SOLAR GMBH. **CX-Series – CdTe thin film solar panel**, 2018. Disponível em: <<http://calyxo.com/en/cx-series.html>>. Acesso em: 23 mar. 2020.

COPEL. **Número de Consumidores**. 2019. Disponível em: <<https://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Ffacopel%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F592EEFB23C5932E70325740B00609D59>>. Acesso em: 31 ago. 2020.

CUNHA, M. A. A. **Telemetria Autônoma sem Fios**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica Industrial e Computadores) - Universidade do Minho, Azurém, 2014. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/41906/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Mois%C3%A9s%20Cunha%202014.pdf>>. Acesso em: 07 mar. 2019.

DGS. **Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects, and engineers**. 2 ed. London: Earthscan, 2008.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 3 ed. New York: John Wiley & Sons, 2013. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118671603>>. Acesso em: 04 mar. 2019.

EPIA; GREENPEACE. **Solar Generation 6**: solar photovoltaic electricity empowering the world. 2011. Disponível em:

<http://pvtrin.eu/assets/media/PDF/Publications/Other%20Publications/36.SolarGeneration6__2011.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2019.

FRAUNHOFER ISE. **Photovoltaics report**. 2020. Disponível em:

<<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2020.

GOOGLE EARTH. **Google Earth Pro**. 2019. Disponível em:

<<https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>>. Acesso em: 21 abr. 2020.

HANWHA Q CELLS. **Polycrystalline Solar Module**, 2017a. Disponível em:

<<https://www.q-cells.com/en/main/service/download/datasheets~datasheets~.html>>. Acesso em: 23 mar. 2020.

HANWHA Q CELLS. **Q.Antum Solar Module**, 2017b. Disponível em:

<https://www.q-cells.com/dam/jcr:bc0a8e73-6ef6-4e27-8992-a51364025156/Hanwha_Q_CELLS_Data_sheet_QPEAK_L-G5.0.G_355-370_2018-06_Rev02_AU.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2020.

HILGERT, D. P. **Projeto e Implantação de SFVCR com diferentes tecnologias no estado do Paraná**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

IEA-PVPS. **Analysis of long-term performance of PV systems**: different data resolution for different purposes. Report IEA-PVPS T-13-05, 2014. Disponível em:

<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=305&eID=dam_frontend_push&docID=2307>. Acesso em: 10 mar. 2019.

IEA-PVPS. **Analysis of photovoltaic systems**. Photovoltaic power systems programme. Report IEA-PVPS T-2-01, 2000. Disponível em:

<http://ptp.irb.hr/upload/mape/kuca/PVsystem_analysis2000.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2019.

INMET. **Estações Automáticas**. 2020. Disponível em:

<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em: 06 ago. 2020.

ISO. **ISO 9060**: solar energy – specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation. 2018. Disponível em:

<<https://www.iso.org/standard/67464.html>>. Acesso em: 25 mar. 2020.

ITRPV. **International Technology Roadmap for Photovoltaic**: 2019 Results.

Frankfurt am Main: VDMA Photovoltaic Equipment, 2020. Disponível em:

<<https://itrpv.vdma.org/viewer/-/v2article/render/29775594>>. Acesso em: 09 jun. 2020.

KIPP & ZONEN. **Instruction Manual**. V1610. Delft, 2016. Disponível em: <<https://www.kippzonen.com/Download/72/Manual-Pyranometers-CMP-series-English?ShowInfo=true>>. Acesso em: 25 mar. 2020.

LABENS. **EPESOL**. 2020. Fotografia.

LABSOL. **Softwares**. 2019. Disponível em: <<http://www.solar.ufrgs.br/#softwares>>. Acesso em: 21 abr. 2020.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PEREIRA, C. D.; BATISTA, J. O. **Casa eficiente: consumo e geração de energia**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, v. 2, 2010. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/livros/CasaEficiente_vol_II_WEB.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2019.

NAKABAYASHI, R. K. **Microgeração fotovoltaica no Brasil: condições atuais e perspectivas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/lfs/sites/default/files/Dissertacao_Renny_vfinal.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2019.

NASCIMENTO, R. L. **Energia Solar no Brasil: Situação e perspectivas**. Estudo Técnico. Brasília: Câmara dos Deputados, 2017. Disponível em: <http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/32259/energia_solar_limp.pdf?sequence=1>. Acesso em: 10 nov. 2018.

NEOSOLAR. **Guia prático: energia solar fotovoltaica**. Equipe Neosolar Energia, 2016. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/media/guia/Guia_Pratico_NEOSOLAR_Mai_2016.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2019.

NHS SOLAR. **Inversores On Grid**. Catálogo de produtos. 2018. Disponível em: <<https://nhssolar.com.br/wp-content/uploads/2018/09/Cat%C3%A1logo-Inversores-On-Grid-NHS-Solar.pdf>>. Acesso em: 27 mar. 2020.

NHS SOLAR. **Inversores On Grid**. Manual do usuário. 2017. Disponível em: <<https://nhssolar.com.br/wp-content/uploads/2017/08/Manual-Inversores-On-Grid-NHS-Solar.pdf>>. Acesso em: 27 mar. 2020.

NREL. **Best Research-Cell Efficiency Chart**, 2020a. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>>. Acesso em: 10 abr. 2020.

NREL. **Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart**, 2020b. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/module-efficiency.html>>. Acesso em: 10 abr. 2020.

NREL. **Photovoltaic fundamentals**. Washington: U.S. Department of Energy, 1995. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/16319.pdf>>. Acesso em: 27 fev. 2019.

NREL. **Q3/Q4 2018 Solar Industry Update**: NREL/PR-6A20-73234, 2019. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73234.pdf>>. Acesso em: 27 fev. 2019.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RUTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2 ed. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2019.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. 1 ed. Rio de Janeiro: CEPREL/CRESESB, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2019.

QUAGLIA, R. K. **Incentivo à Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos**: cenários para o setor elétrico brasileiro. 2010. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal do ABC, Santo André, 2010. Disponível em: <http://www.biblioteca.ufabc.edu.br/http://biblioteca.ufabc.edu.br/index.php?codigo_sophia=6233>. Acesso em: 10 mar. 2019.

REN21. **Renewables 2018 Global Status Report**: A comprehensive annual overview of the state of renewable energy. Paris: REN21 Secretariat, 2018. Disponível em: <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/17-8652_GSR2018_FullReport_web_final_.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2019.

REN21. **Renewables 2020 Global Status Report**. Paris: REN21 Secretariat, 2020. Disponível em: <https://y3i6c3u4.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2020.

RUSCHEL, C. S.; KRENZINGER, A. Efeito de sombreamentos no desempenho de uma usina solar fotovoltaica. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 8, n. 1, p. 18-25, jul. 2017. Disponível em: <<https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/170>>. Acesso em: 06 jul. 2020.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos**: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil. 1 ed. Florianópolis: UFSC/LABSOLAR, 2004. Disponível em: <<https://fotovoltaica.ufsc.br/sistemas/livros/livro-edificios-solares-fotovoltaicos.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2018.

SILVEIRA, C. O.; TONOLO, E. A.; KRASNIAK, L. B.; URBANETZ JUNIOR, J. Acompanhamento de desempenho e contribuição da capacidade instalada de SFVCR frente ao panorama nacional. In: Congresso Brasileiro de Automática, 22., 2018, João Pessoa. **Anais eletrônicos...** 2018. Disponível em: <<https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/PROCEEDINGS/PDF/CBA2018-1331.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2019.

SIMEPAR. **Abril/2020 com chuva abaixo da média no Estado**. 2020a. Disponível em: <<http://www.simepar.br/>>. Acesso em 10 jun. 2020.

SIMEPAR. **Chuva abaixo da média no Paraná em março/2020**. 2020b. Disponível em: <<http://www.simepar.br/>>. Acesso em 10 jun. 2020.

SIMEPAR. **Maió/2020 com muita chuva no oeste e no sudoeste do Estado**. 2020c. Disponível em: <<http://www.simepar.br/>>. Acesso em 10 jun. 2020.

SIMEPAR. **Junho/2020 com chuva acima da média na maior parte do Paraná**. 2020d. Disponível em: <<http://www.simepar.br/>>. Acesso em 06 ago. 2020.

SOLIBRO GMBH. **Solibro SL2 CIGS thin-film module**, 2017. Disponível em: <<https://solibro-solar.com/en/news-downloads/documents2/>>. Acesso em: 23 mar. 2020.

TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, E. B.; URBANETZ JUNIOR, J.; PEREIRA, S. V.; GONÇALVES, A. R.; LIMA, F. J. L.; COSTA, R. S.; ALVEZ, A. R. **Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná**. 1 ed. Curitiba: UTFPR, 2017. Disponível em: <<http://atlassolarparana.com/>>. Acesso em: 06 ago. 2020.

TIEPOLO, G. M.; CANGIOLIERI JUNIOR, O.; URBANETZ JUNIOR, J. Comparação do potencial fotovoltaico do estado do Paraná com Alemanha, Espanha e Itália – valores revisados e atualizados. XXIII International Sodebras Congress: **Revista Sodebras**: Salvador, v. 10, n. 116, p. 127 – 130, ago. 2015. Disponível em: <<http://bit.ly/2bgN2YY>>. Acesso em: 27 fev. 2019.

TONIN, F. S. **Caracterização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica na cidade de Curitiba**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

TONOLO, E. A. **Análise dos fatores de perdas nos sistemas fotovoltaicos da UTFPR Campus Curitiba**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

TONOLO, E. A.; MARIANO, J. D'A.; URBANETZ JUNIOR, J. Análise do efeito do acúmulo de sujeira nos sistemas fotovoltaicos da UTFPR – Câmpus Curitiba. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 7., 2018, Gramado. **Anais eletrônicos...** 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/183>>. Acesso em: 15 jun. 2020.

URBANETZ JUNIOR, J.; CHINVELSKI, T.; SIMÃO, C. A. F.; MAKISHI, L. M. M. Primeiro Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica Homologado pela Copel. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 5., 2014, Recife. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://labens.ct.utfpr.edu.br/wp-content/uploads/2016/06/URBANETZ-et-al-V-CBENS-2014b.pdf>>. Acesso em: 09 mar. 2019.

URBANETZ JUNIOR, J.; FUSANO, R. H.; TIEPOLO, G. M.; CASAGRANDE JUNIOR, E. F.; CANGIOLIERI JUNIOR, O. Análise do desempenho do sistema

fotovoltaico conectado à rede elétrica do Escritório Verde da UTFPR. **Revista Sodebras**, v.8, n. 88, p. 46-49, abr. 2013. Disponível em: <<http://www.sodebras.com.br/edicoes/N88.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2019.

URBANETZ JUNIOR, J. **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas**: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em: <https://fotovoltaica.ufsc.br/Teses/Tese_Jair_Urbanetz_Junior.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2019.

VIANA, T. S. **Potencial de geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos com concentrador no Brasil**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em: <https://fotovoltaica.ufsc.br/Teses/Tese_Trajano_de_Souza_Viana.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2019.

VILLALVA, M. G. **Tecnologia PERC – a nova geração de células fotovoltaicas**. 2019. Artigos Técnicos, Canal Solar. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/index.php/artigos/item/64-tecnologia-perc-a-nova-geracao-de-celulas-fotovoltaicas>>. Acesso em: 05 dez. 2019

ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S. H. F. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

YANG, R. L.; TIEPOLO, G. M.; TONOLO, E. A.; URBANETZ JUNIOR, J.; SOUZA, M. B. **Estimação da temperatura em células fotovoltaicas para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica em Curitiba**. In: Conferência Internacional de Energias Inteligentes, 5., 2018, Curitiba

		Mês de referência - Agosto/2020																														
EPESOL	Dados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
CM	m-Si	█													██	█																
	p-Si	█													██	█																
	CIGS	█													██	█																
	CdTe	█													██	█																
	SONDA	█													█	█																
CP	m-Si	█																														
	p-Si	█																														
	CIGS	█																														
	CdTe	█																														
	EPE	█																														
CT	m-Si	█																														
	p-Si	█																														
	CIGS	█																														
	CdTe	█																														
	SONDA	█																														
MD	m-Si	█																														
	p-Si	█																														
	CIGS	█																														
	CdTe	█																														
	SONDA	█																														
PB	m-Si	██																														
	p-Si	██																														
	CIGS	██																														
	CdTe	██																														
	EPE	█																														
PG	m-Si	█																														
	p-Si	█																														
	CIGS	█																														
	CdTe	█																														
	EPE	█																														

		Mês de referência - Setembro/2020																													
EPESOL	Dados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
CM	m-Si	█																	██		█										
	p-Si	█																	██		█										
	CIGS	█																	██		█										
	CdTe	█																	██		█										
	SONDA	█																	█		█										
CP	m-Si	█																													
	p-Si	█																													
	CIGS	█																													
	CdTe	█																													
	EPE	█																													
CT	m-Si	██																						█							
	p-Si	██																						█							
	CIGS	██																						█							
	CdTe	██																						█							
	SONDA	██																						█							
MD	m-Si	█																													
	p-Si	█																													
	CIGS	█																													
	CdTe	█																													
	SONDA	█																													
PB	m-Si	██																													█
	p-Si	██																													█
	CIGS	██																													█
	CdTe	██																													█
	EPE	█																													
PG	m-Si	█																													
	p-Si	█																													
	CIGS	█																													
	CdTe	█																													
	EPE	█																													

- Legenda: █ Dados disponíveis █ Dados indisponíveis █ Dados incompletos █ Dados não analisados
█ Inativo █ EMA 1 █ EMA 2 █ EPE

APÊNDICE B – Disponibilidade diária de acesso aos dados de irradiância das estações SONDA, EPE e EMA do INMET

Mês de referência - Outubro/2019																																	
EPESOL	Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
CM	SONDA A822																																
CP	EPE A842																																
CT	SONDA A807																																
MD	SONDA A846																																
PB	EPE A816																																
	A876																																
PG	EPE A819																																
	A819																																

Mês de referência - Novembro/2019																																	
EPESOL	Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
CM	SONDA A822																																
CP	EPE A842																																
CT	SONDA A807																																
MD	SONDA A846																																
	EPE A816																																
PB	A816																																
	A876																																
PG	EPE A819																																
	A819																																

Mês de referência - Dezembro/2019																																	
EPESOL	Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
CM	SONDA A822																																
CP	EPE A842																																
CT	SONDA A807																																
MD	SONDA A846																																
	EPE A816																																
PB	A816																																
	A876																																
PG	EPE A819																																
	A819																																

Mês de referência - Janeiro/2020																																	
EPESOL	Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
CM	SONDA A822																																
CP	EPE A842																																
CT	SONDA A807																																
MD	SONDA A846																																
	EPE A816																																
PB	A816																																
	A876																																
PG	EPE A819																																
	A819																																

Legenda: ■ Dados disponíveis ■ Dados indisponíveis ■ Dados não analisados ■ Inativo

		Mês de referência - Fevereiro/2020																													
EPESOL	Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
CM	SONDA A822																														
	EPE A842																														
CT	SONDA A807																														
	EPE A846																														
PB	SONDA A816																														
	EPE A876																														
PG	EPE A819																														

		Mês de referência - Março/2020																														
EPESOL	Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
CM	SONDA A822																															
	EPE A842																															
CT	SONDA A807																															
	EPE A846																															
PB	SONDA A816																															
	EPE A876																															
PG	EPE A819																															

		Mês de referência - Abril/2020																														
EPESOL	Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
CM	SONDA A822																															
	EPE A842																															
CT	SONDA A807																															
	EPE A846																															
PB	SONDA A816																															
	EPE A876																															
PG	EPE A819																															

		Mês de referência - Maio/2020																														
EPESOL	Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
CM	SONDA A822																															
	EPE A842																															
CT	SONDA A807																															
	EPE A846																															
PB	SONDA A816																															
	EPE A876																															
PG	EPE A819																															

Legenda: ■ Dados disponíveis ■ Dados indisponíveis ■ Dados não analisados ■ Inativo

Mês de referência - Junho/2020																															
EPESOL	Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
CM	SONDA A822																														
CP	EPE A842																														
CT	SONDA A807																														
MD	SONDA A846																														
PB	EPE A816																														
PB	A876																														
PG	EPE A819																														

Mês de referência - Julho/2020																																
EPESOL	Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
CM	SONDA A822																															
CP	EPE A842																															
CT	SONDA A807																															
MD	SONDA A846																															
PB	EPE A816																															
PB	A876																															
PG	EPE A819																															

Mês de referência - Agosto/2020																																
EPESOL	Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
CM	SONDA A822																															
CP	EPE A842																															
CT	SONDA A807																															
MD	SONDA A846																															
PB	EPE A816																															
PB	A876																															
PG	EPE A819																															

Mês de referência - Setembro/2020																															
EPESOL	Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
CM	SONDA A822																														
CP	EPE A842																														
CT	SONDA A807																														
MD	SONDA A846																														
PB	EPE A816																														
PB	A876																														
PG	EPE A819																														

Legenda: ■ Dados disponíveis ■ Dados indisponíveis ■ Dados não analisados ■ Inativo

APÊNDICE C – Disponibilidade diária de acesso aos dados dos sensores de temperatura

		Mês de referência - Novembro/2019																													
EPESOL	Dados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
CM	m-Si																														
	p-Si																														
	CIGS																														
	CdTe																														
CP	m-Si																														
	p-Si																														
	CIGS																														
	CdTe																														
CT	m-Si																														
	p-Si																														
	CIGS																														
	CdTe																														
MD	m-Si																														
	p-Si																														
	CIGS																														
	CdTe																														
PB	m-Si																														
	p-Si																														
	CIGS																														
	CdTe																														
PG	m-Si																														
	p-Si																														
	CIGS																														
	CdTe																														

		Mês de referência - Dezembro/2019																														
EPESOL	Dados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
CM	m-Si																															
	p-Si																															
	CIGS																															
	CdTe																															
CP	m-Si																															
	p-Si																															
	CIGS																															
	CdTe																															
CT	m-Si																															
	p-Si																															
	CIGS																															
	CdTe																															
MD	m-Si																															
	p-Si																															
	CIGS																															
	CdTe																															
PB	m-Si																															
	p-Si																															
	CIGS																															
	CdTe																															
PG	m-Si																															
	p-Si																															
	CIGS																															
	CdTe																															

Legenda: ■ Dados disponíveis ■ Dados não analisados ■ Substituição por m-Si ■ Substituição por p-Si
■ Substituição por CIGS ■ Substituição por CdTe ■ EMA1 ■ EMA2

		Mês de referência - Julho/2020																																								
EPESOL	Dados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31										
CM	m-Si	■																																								
	p-Si	■																																								
	CIGS	■																																								
	CdTe	■																																								
CP	m-Si	■																																								
	p-Si	■																																								
	CIGS	■																																								
	CdTe	■																																								
CT	m-Si	■											■	■	■	■	■	■	■																							
	p-Si	■											■	■	■	■	■	■	■																							
	CIGS	■											■	■	■	■	■	■	■																							
	CdTe	■											■	■	■	■	■	■	■																							
MD	m-Si	■																																								
	p-Si	■																																								
	CIGS	■																																								
	CdTe	■																																								
PB	m-Si	■																																								
	p-Si	■																																								
	CIGS	■																																								
	CdTe	■																																								
PG	m-Si	■																																								
	p-Si	■																																								
	CIGS	■																																								
	CdTe	■																																								

		Mês de referência - Agosto/2020																																
EPESOL	Dados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
CM	m-Si	■												■	■																			
	p-Si	■												■	■																			
	CIGS	■												■	■																			
	CdTe	■												■	■																			
CP	m-Si	■																																
	p-Si	■																																
	CIGS	■																																
	CdTe	■																																
CT	m-Si	■																				■	■	■	■									
	p-Si	■																				■	■	■	■									
	CIGS	■																				■	■	■	■									
	CdTe	■																				■	■	■	■									
MD	m-Si	■																																
	p-Si	■																																
	CIGS	■																																
	CdTe	■																																
PB	m-Si	■																																
	p-Si	■																																
	CIGS	■																																
	CdTe	■																																
PG	m-Si	■																																
	p-Si	■																																
	CIGS	■																																
	CdTe	■																																

Legenda: ■ Dados disponíveis ■ Dados não analisados ■ Substituição por m-Si ■ Substituição por p-Si
 ■ Substituição por CIGS ■ Substituição por CdTe ■ EMA1 ■ EMA2

		Mês de referência - Setembro/2020																													
EPESOL	Dados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
CM	m-Si																														
	p-Si																														
	CIGS																														
	CdTe																														
CP	m-Si																														
	p-Si																														
	CIGS																														
	CdTe																														
CT	m-Si																														
	p-Si																														
	CIGS																														
	CdTe																														
MD	m-Si																														
	p-Si																														
	CIGS																														
	CdTe																														
PB	m-Si																														
	p-Si																														
	CIGS																														
	CdTe																														
PG	m-Si																														
	p-Si																														
	CIGS																														
	CdTe																														

Legenda: ■ Dados disponíveis ■ Dados não analisados ■ Substituição por m-Si ■ Substituição por p-Si
■ Substituição por CIGS ■ Substituição por CdTe ■ EMA1 ■ EMA2