

Avaliação da produtividade de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica em função das estações do ano

Camila de Oliveira Silveira¹
Jair Urbanetz Junior¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO

O estudo do dimensionamento dos equipamentos, bem como da área que será utilizada impacta significativamente no desempenho de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica (SFVCR) ao longo do ano. Por meio de curvas de potência CA dos geradores fotovoltaicos, observou-se a influência da irradiância na produção de energia elétrica da planta em função das quatro estações do ano. Analisou-se a produtividade relativa aos nove meses de operação do SFVCR, cujos valores variaram entre 124,41 kWh/kWp.mês e 132,62 kWh/kWp.mês, dependendo da tecnologia instalada. Pode-se observar a limitação do gerador fotovoltaico de CIGS em meses de verão devido ao sobrecarregamento do inversor, bem como a limitação do gerador fotovoltaico de m-Si em meses de inverno causado pelo sombreamento nos módulos.

Palavras-chave: Produtividade, Sistema Fotovoltaico, Irradiância, Potência CA, Inversor, Sombreamento.

ABSTRACT

The study of the sizing of equipment, as well as the area to be used, significantly impacts the performance of a Grid Connected Photovoltaic System (GCPVS) throughout the year. Through the AC power curves of the photovoltaic generators, it was observed the influence of irradiance in the production of electrical energy of the plant in function of the four seasons. The productivity related to the nine months of operation of the SFVCR was analyzed, whose values varied between 124.41 kWh/kWp.month and 132.62 kWh/kWp.month, depending on the technology installed. One can observe the limitation of the CIGS photovoltaic generator in summer months due to the overload of the

inverter, as well as the limitation of the m-Si photovoltaic generator in winter months caused by shading in the modules.

Keywords: Final Yield, Photovoltaic System, Irradiance, AC Power, Inverter, Shading.

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade do recurso energético solar está relacionada com a duração do dia, determinada pelos solstícios e os equinócios, bem como com a quantidade de energia solar incidente em um ponto qualquer da superfície terrestre, na qual a irradiância pode atingir valores máximos de aproximadamente 1.000 W/m^2 no meio dia solar em condições de céu claro (PEREIRA et al., 2017).

A posição do Sol ao longo do ano pode causar sombreamento nos geradores fotovoltaicos, principalmente no início do dia ou no final da tarde, momento em que o Sol está mais baixo e facilita que o sistema seja sombreado pelo seu entorno. Além de reduzir a própria integridade do gerador, a perda de energia elétrica pode ser maior do que a porcentagem de área sombreada (ALMEIDA, 2012).

As perdas relativas à baixa irradiância também podem ser evitadas com o dimensionamento adequado dos equipamentos do SFVCR, evitando que a potência nominal do gerador seja superior à do inversor a fim de elevar a produtividade da planta.

2. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Os módulos de avaliação instalados no câmpus universitário são compostos por quatro diferentes tecnologias. A configuração dos módulos está disposta na Figura 1, na qual é possível observar os módulos de silício monocristalino (m-Si), silício policristalino (p-Si), disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe) dispostos nesta ordem, no sentido de cima para baixo.



Figura 1 – Configuração dos módulos de avaliação do SFVCR (LABENS, 2020)

A localização geográfica na qual o sistema está inserido corresponde a 25,50° sul de latitude e 49,31° oeste de longitude. A Tabela 1 apresenta algumas características de instalação, bem como parâmetros elétricos definidos pelos manuais dos fabricantes para cada modelo de módulo fotovoltaico.

Tabela 1 – Características dos módulos de avaliação (Calyxo TS Solar GmbH, 2018; Hanwha Q Cells, 2017a, 2017b; Solibro GmbH, 2017)

	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
Quantidade de módulos	14	14	12	18
Potência instalada [kWp]	5,11	4,69	1,68	1,53
Tensão de operação [V]	39,38	37,80	86,50	46,20
Ângulo de inclinação	25°	25°	25°	25°
Desvio azimutal	0°	0°	0°	0°

Enquanto os SFVCR de silício cristalino contêm dois inversores (modelo 1K5 – GSM1) para cada sistema, os de filmes finos são compostos por um inversor (modelo 3K – GSM1) cada. As especificações técnicas dos parâmetros de saída medidos pelos inversores estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações elétricas dos inversores (NHS Solar, 2018)

Fabricante	NHS	NHS
Modelo	1K5 – GSM1	3K – GSM1
Tensão de partida [V]	80	80
Potência nominal CA [VA]	1500	3000
Máxima potência CA [VA]	1500	3000
Corrente máxima CA [A]	7,5	13,5

3. METODOLOGIA

A análise desta pesquisa contemplará os resultados obtidos a partir de 01/10/2019, data a partir dos quais os dados dos SFVCR foram disponibilizados para consulta. Em função dos meses analisados serem inferiores a um ano até o término desta pesquisa, serão analisados períodos específicos com base nas estações do ano.

Este método evidencia a influência do clima no desempenho dos SFVCR. Assumindo as datas relativas aos solstícios de verão e de inverno, bem como aos equinócios de primavera e outono, identificou-se os dias que apresentaram melhores condições de análise nestas datas específicas ou próximas delas.

As condições de análise remetem aos valores de irradiância observados no dia, cuja escolha priorizou o comportamento da curva de irradiância quando apresentada de forma ideal, ou seja, cenário de um dia de céu azul, sem nuvens. A relação das datas de solstícios e equinócios e dos dias analisados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Relação das datas analisadas (Elaborado pelo autor com base em Pereira et al., 2017).

Caso	Fenômeno	Data do fenômeno	Data analisada
1	Equinócio de primavera	22/09 ou 23/09	01/10/2019
2	Solstício de verão	21/12	27/12/2019
3	Equinócio de outono	20/03 ou 21/03	26/03/2020
4	Solstício de inverno	21/06	21/06/2020

4. RESULTADOS SAZONAIS

4.1 Caso 1 – Equinócio de primavera

A curva de irradiância, bem como a curva de potência CA, ambas observadas em 01/10/2019, podem ser visualizadas na Figuras 2 e na Figura 3, respectivamente.

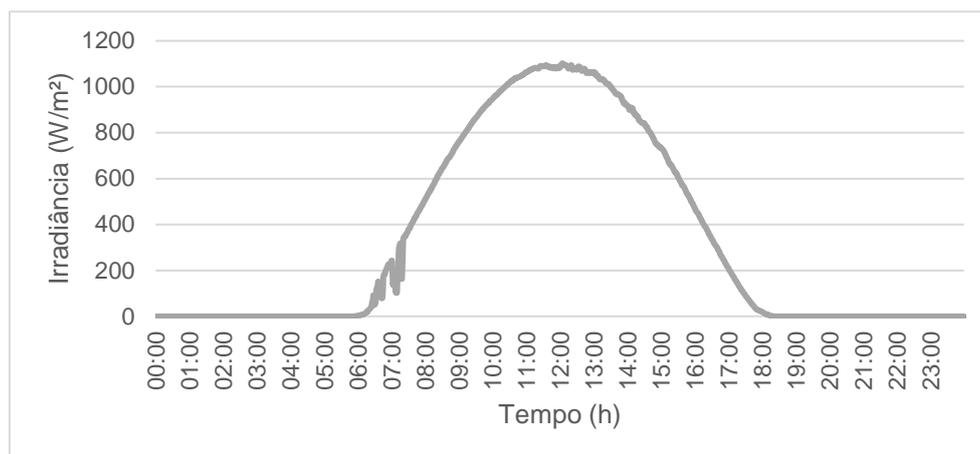


Figura 2 – Curva de irradiância no dia 01/10/2019 (Autoria própria, 2020)

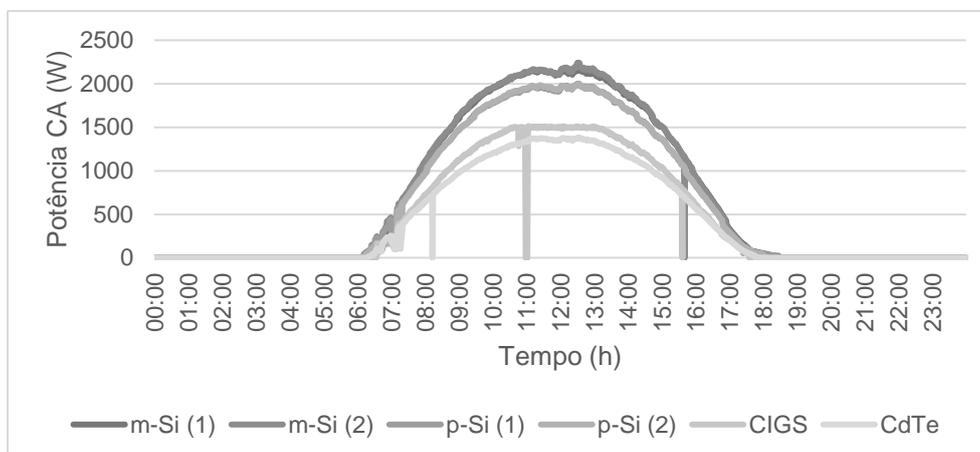


Figura 3 – Curva de potência CA no dia 01/10/2019 (Autoria própria, 2020)

O valor de irradiação global horizontal no plano inclinado no dia 01/10/2019 foi correspondente a 7982,68 Wh/m² e a máxima irradiância foi observada às 12:04h, com o valor de 1101,55 Wh/m². No intervalo entre 10:32h e 13:09h a potência de saída do inversor correspondente ao SFVCR de tecnologia CIGS é ceifada, limitando a produção de energia em 2,62%.

4.2 Caso 2 – Solstício de verão

A curva de irradiância, bem como a curva de potência CA, ambas observadas em 27/12/2019, podem ser visualizadas na Figura 4 e na Figura 5, respectivamente.

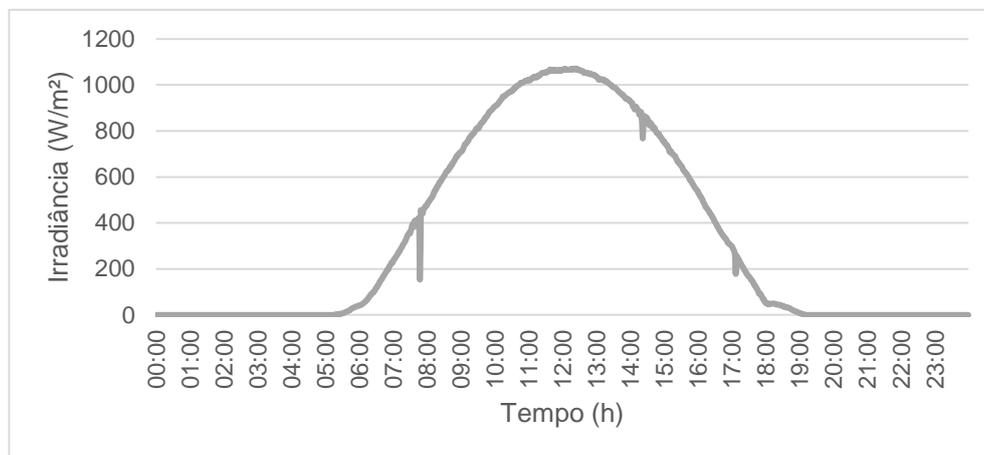


Figura 4 – Curva de irradiância no dia 27/12/2019 (Autoria própria, 2020)

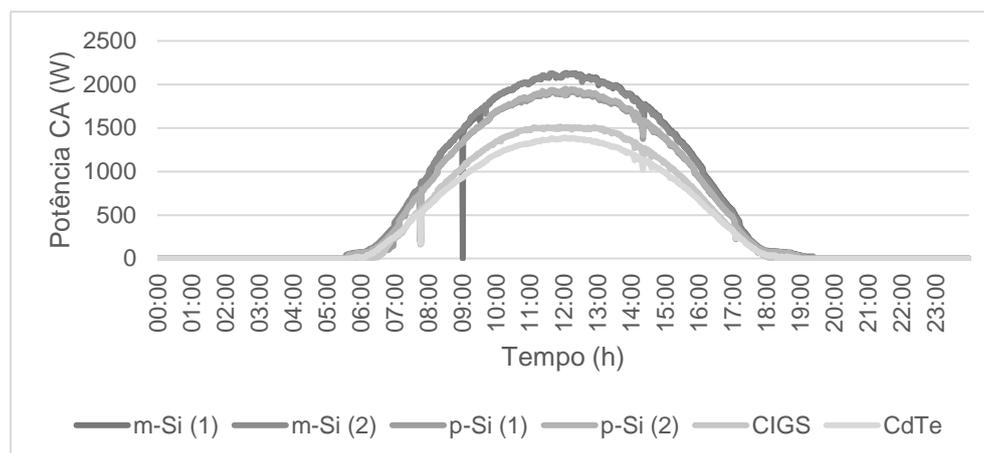


Figura 5 – Curva de potência CA no dia 27/12/2019 (Autoria própria, 2020)

O valor de irradiação global horizontal no plano inclinado no dia 27/12/2019 foi correspondente a 8076,32 Wh/m² e a máxima irradiância foi observada às 12:04h, com o valor de 1071,76 Wh/m². No intervalo entre 11:08h e 13:03h a potência de saída do

inversor correspondente ao SFVCR de tecnologia CIGS é ceifada, limitando a produção de energia em 0,80%.

4.3 Caso 3 – Equinócio de outono

A curva de irradiância, bem como a curva de potência CA, ambas observadas em 26/03/2020, podem ser visualizadas na Figuras 6 e na Figura 7, respectivamente.

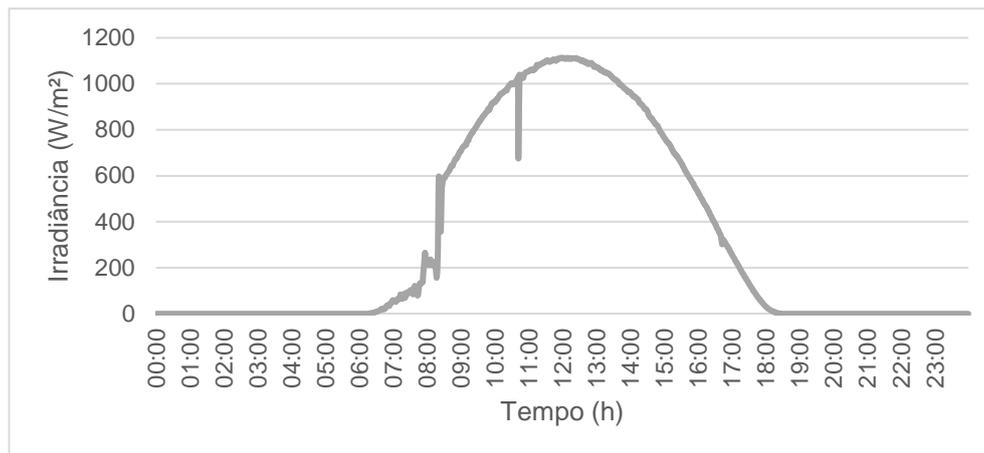


Figura 6 – Curva de irradiância no dia 26/03/2020 (Autoria própria, 2020)

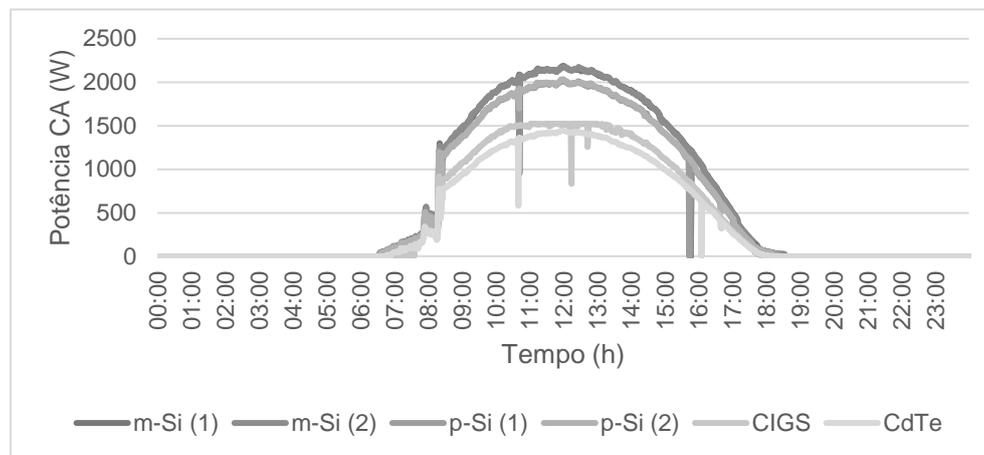


Figura 7 – Curva de potência CA no dia 26/03/2020 (Autoria própria, 2020)

O valor de irradiação global horizontal no plano inclinado no dia 26/03/2020 foi correspondente a 7680,14 Wh/m² e a máxima irradiância foi observada às 12:01h, com o valor de 1112,90 Wh/m². No intervalo entre 10:26h e 13:14h a potência de saída do inversor correspondente ao SFVCR de tecnologia CIGS é ceifada, limitando a produção de energia em 3,08%.

4.4 Caso 4 – Solstício de inverno

A curva de irradiância, bem como a curva de potência CA, ambas observadas em 21/06/2020, podem ser visualizadas na Figuras 8 e na Figura 9, respectivamente.

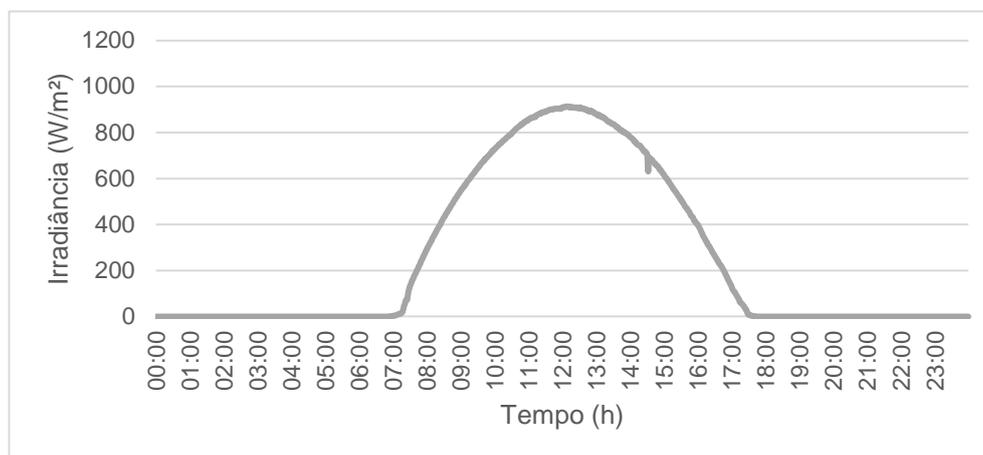


Figura 8 – Curva de irradiância no dia 21/06/2020 (Autoria própria, 2020)

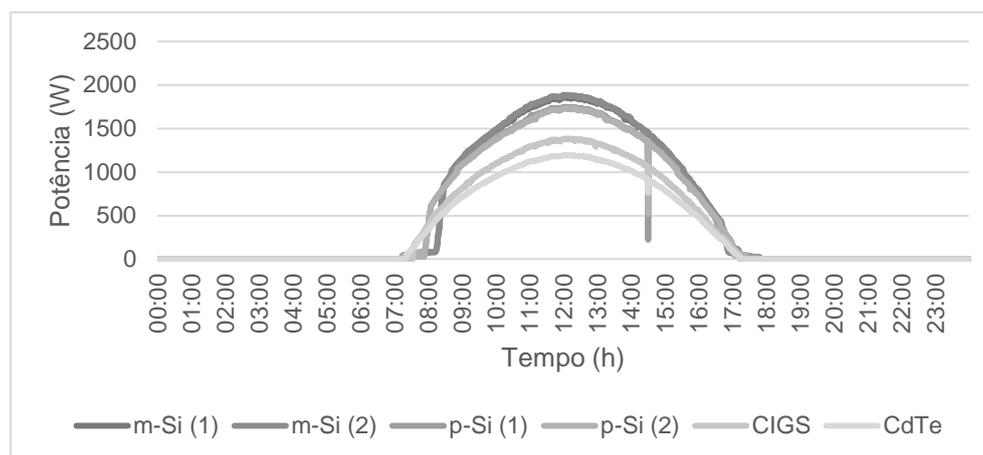


Figura 9 – Curva de potência CA no dia 21/06/2020 (Autoria própria, 2020)

O valor de irradiação global horizontal no plano inclinado no dia 21/06/2020 foi correspondente a 6124,81 Wh/m² e a máxima irradiância foi observada às 12:08h, com o valor de 914,49 Wh/m². Ao contrário das demais épocas do ano registradas nos três casos anteriores, a potência de saída do inversor correspondente ao SFVCR de tecnologia CIGS não foi ceifada e, portanto, não houve limitação da produção de energia pelo respectivo gerador fotovoltaico. Por outro lado, a curva da potência de saída dos inversores correspondentes ao SFVCR de tecnologia m-Si é limitada no início do dia, em um intervalo de 30 minutos aproximadamente. Na Figura 10 é possível observar esta particularidade com mais detalhes.

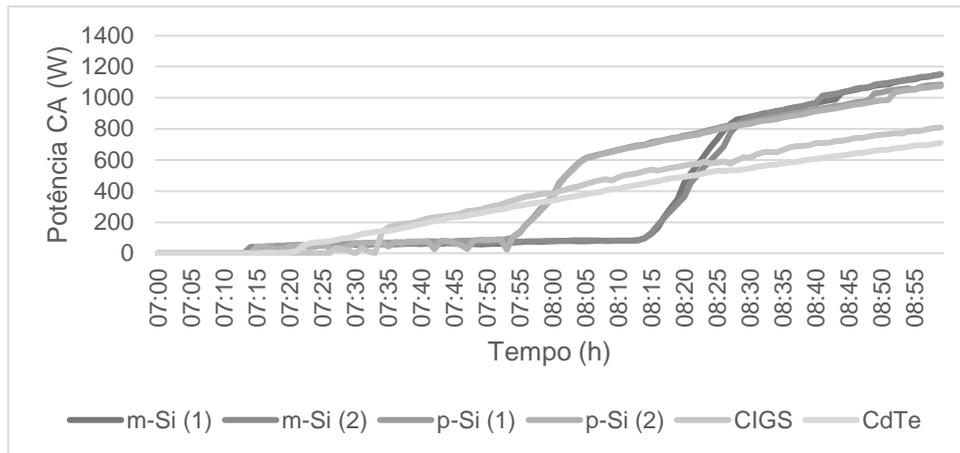


Figura 10 – Detalhe da curva de potência CA no início do dia 21/06/2020 (Autoria própria, 2020)

Os primeiros valores registrados que compõem as curvas de potência CA se iniciam de acordo com a tensão de operação característica da tecnologia do módulo fotovoltaico. Entretanto, é possível observar que as curvas “m-Si (1)” e “m-Si (2)” permanecem constantes até às 8:25h, consequência do sombreamento causado pelos módulos de p-Si. É importante ressaltar que este caso irá ocorrer apenas em meses de inverno, devido à posição do Sol que causa o sombreamento nos módulos de m-Si nesta época do ano.

5. PRODUTIVIDADE

A produtividade é um índice de mérito que estabelece a produção de energia elétrica em função de cada 1 kWp de potência nominal instalada no SFVCR. Sendo assim, é possível comparar a produção de energia dos diferentes geradores fotovoltaicos desta pesquisa, os quais possuem potências instaladas distintas.

Uma planta fotovoltaica é capaz de alcançar sua máxima produtividade quando o sistema é instalado nas condições ideais de geração, isto é, orientado ao norte geográfico e com ângulo de inclinação correspondente à latitude da localidade de instalação (TIEPOLO et al., 2017). Na Figura 11 está ilustrado o comportamento produtividade de cada tecnologia do SFVCR durante nove meses de análise.

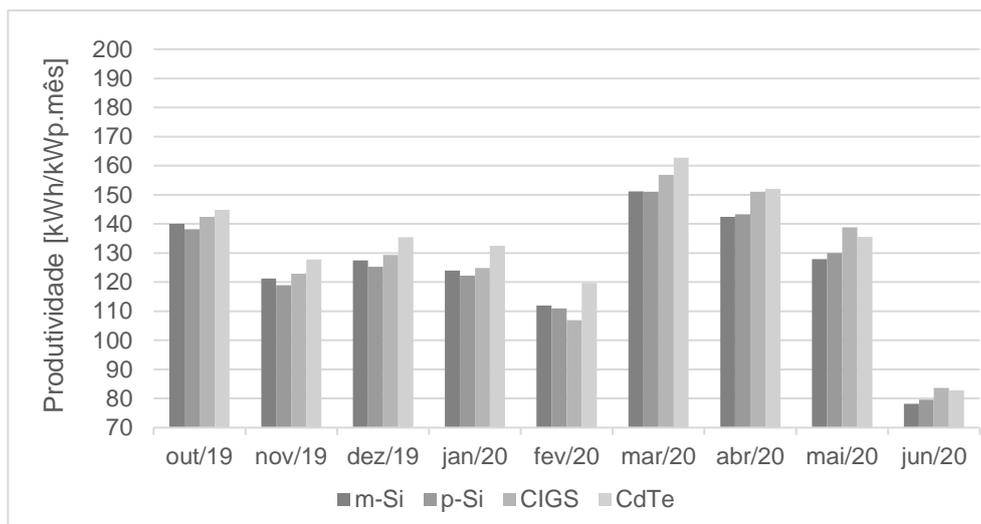


Figura 11 – Produtividade mensal entre outubro/2019 e junho/2020 (Autoria própria, 2020)

Exceto em maio e junho, o CdTe se destaca com a maior produtividade dentre as tecnologias. Nestes dois meses a produtividade de CIGS se sobressai, visto que a potência de saída do inversor deixa de ser limitada.

Conforme esperado, a produtividade dos módulos de p-Si supera os de m-Si a partir de abril, uma vez que a geração de energia é afetada pelo sombreamento discutido nesta época do ano.

As médias por tecnologia das produtividades relativas aos meses de outubro a junho foram: 124,94 kWh/kWp para m-Si, 124,41 kWh/kWp para p-Si, 128,55 kWh/kWp para CIGS e 132,62 kWh/kWp para CdTe.

As médias calculadas considerando todas as tecnologias de SFVCR, bem como as médias esperadas segundo o Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná estão apresentadas na Tabela 4, na qual também está descrita a variação percentual da produtividade calculada em relação à esperada.

Tabela 4 – Produtividade do SFVCR (Elaborado pelo autor com base em Tiepolo et al., 2017).

	Produtividade calculada	Produtividade esperada	Varição percentual
Outubro 2019	141,38	101,06	39,90%
Novembro 2019	122,72	108,60	13,00%
Dezembro 2019	129,40	115,01	12,51%
Janeiro 2020	125,91	112,84	11,58%
Fevereiro 2020	112,39	107,30	4,75%
Março 2020	155,49	110,36	40,89%
Abril 2020	147,24	98,40	49,64%
Mai 2020	133,07	90,21	47,51%
Junho 2020	81,06	81,90	-1,02%

Exceto em junho, a produtividade calculada foi de 4,75% a 49,64% superior à apresentada no Atlas, indicando que nesse período os resultados foram elevados em relação à média esperada. Segundo Tiepolo et al. (2017), o total anual esperado na localidade é de 1.213 kWh/kWp.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O planejamento e o comissionamento de um SFVCR são fundamentais para garantir a funcionalidade total da operação da planta fotovoltaica, otimizando o seu desempenho.

O SFVCR instalado nas dependências de um campus universitário foi instalado de acordo com as condições ideais de instalação, sendo que os módulos fotovoltaicos possuem ângulo de inclinação correspondente à latitude do local e o desvio azimutal é orientado ao norte geográfico.

Apesar das condições ótimas de instalação, algumas particularidades acabam limitando o sistema de alcançar a sua máxima produtividade devido a escolha do inversor e ao sombreamento causado em determinada época do ano.

Pode-se constatar que o inversor alocado sob o gerador fotovoltaico de CIGS pode limitar a produção de energia em até 3,08%, dependendo da estação do ano. Em momentos quando a irradiância é elevada, como em meses de verão por exemplo, o efeito de ceifamento da curva de potência CA é causado pelo sobrecarregamento do inversor.

Nos meses de inverno, quando não há a limitação da potência CA pelo gerador de CIGS, outro problema é detectado, desta vez para a tecnologia m-Si. O sombreamento devido à posição do Sol nesta época do ano afeta a produtividade desta tecnologia, tornando-se a pior das quatro analisadas.

Apesar da planta apresentar valores de produtividades superiores em até 49,64% em relação à média histórica esperada, existem problemas causados em determinadas épocas do ano que limitam a produtividade do SFVCR. Tais problemas poderiam ser evitados caso: a escolha do inversor de CIGS fosse superior a 1500 VA, já que a potência instalada dos módulos é de 1,68 kWp; a área de instalação do sistema fosse readequada a fim de maximizar os espaços entre as fileiras de painéis fotovoltaicos, anulando o sombreamento causado no inverno.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a 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".

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. P., "Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede", 2012. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

CALYXO TS SOLAR GMBH, "CX-Series – CdTe thin film solar panel", 2018. Disponível em: <<http://calyxo.com/en/cx-series.html>>. Acesso em: 11 jul. 2020.

HANWHA Q CELLS, "Polycrystalline Solar Module", 2017a. Disponível em: <<https://www.q-cells.com/en/main/service/download/datasheets~datasheets~.html>>. Acesso em: 11 jul. 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: 11 jul. 2020.

LABENS. "EPESOL", 2020. Fotografia.

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: 11 jul. 2020.

PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., GONÇALVES, A. R., COSTA, R. S., de LIMA, F. J. L., RÜTHER, R., de ABREU, S. L., TIEPOLO, G. M., DE SOUZA, J. G., "Atlas brasileiro de energia solar", 2017, 2 ed.

SOLIBRO GMBH, "Solibro SL2 CIGS thin-film module", 2017. Disponível em: <<https://solibro-solar.com/en/news-downloads/documents2/>>. Acesso em: 11 jul. 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", 2017, 1 ed.