

Estudo da Influência Causada pelas Diferenças Técnicas de Piranômetros na Determinação da Taxa de Desempenho de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

Camila O. Silveira*. Renata L. Yang*. Muriele B. Souza*. Gerson M. Tiepolo*. Jair Urbanetz Jr*.

*Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
(e-mails: camila.osilveira@hotmail.com; murielebester@gmail.com; tiepolo@utfpr.edu.br; urbanetz@utfpr.edu.br).

Abstract: The study of solar radiation is essential to evaluate the potential of electrical energy generation through Grid Connected Photovoltaic Systems (GCPVS) in each location. Through a radiometric sensor called pyranometer it is possible to measure the irradiance values and obtain the performance of a photovoltaic plant with the calculation of the performance ratio. In this article were evaluated two pyranometers with different technical characteristics that measure the irradiance in the inclined plane at latitude of the same location, the models CMP6 (first class) and CMP10 (secondary standard), this last one is more accurate. The sampling rate of these devices is one value per minute. The results differ from 0.26% to 2.67% in the period between December 2019 and June 2020, with standard deviations of 0.90 kW·h/m² for the CMP10 and 0.91 kW·h/m² for the CMP6. The performance of a GCPVS composed of cadmium telluride (CdTe) modules showed the same variation in the calculation of the performance ratio, whose averages were 76.78% and 76.47% depending on the equipment used. These divergences are expected due to the variation of the uncertainties existing between the sensors.

Resumo: O estudo da radiação solar é fundamental para avaliar o potencial da geração de energia elétrica por meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVCR) em determinada localidade. Por meio de um sensor radiométrico denominado piranômetro é possível medir os valores de irradiância e obter a performance de uma planta fotovoltaica com o cálculo da taxa de desempenho. Neste artigo foram avaliados dois piranômetros que possuem características técnicas distintas e medem a irradiância no plano inclinado na latitude de um mesmo local, os modelos CMP6 de primeira classe e CMP10 de padrão secundário, sendo que o último possui maior precisão. A taxa de amostragem destes dispositivos é de um valor por minuto. Os resultados apresentaram divergências que variam de 0,26% a 2,67% no período compreendido entre dezembro de 2019 e junho de 2020, com desvios padrão de 0,90 kW·h/m² para o CMP10 e de 0,91 kW·h/m² para o CMP6. O desempenho de um SFVCR composto por módulos de telureto de cádmio (CdTe) apresentou a mesma variação no cálculo da taxa de desempenho, cujas médias foram de 76,78% e 76,47% dependendo do equipamento utilizado. Essas divergências são esperadas devido a variação das incertezas existentes entre os sensores.

Keywords: Irradiation; Pyranometer; Solarimetric Station; Performance Ratio; Photovoltaic System.

Palavras-chaves: Irradiação; Piranômetro; Estação Solarimétrica; Taxa de Desempenho; Sistema Fotovoltaico.

1. INTRODUÇÃO

O sol representa uma fonte inesgotável de energia frente ao ciclo de vida do planeta Terra. Da energia irradiada pelo sol, parte dela chega à superfície terrestre e alimenta processos químicos, térmicos e biológicos (Pereira et al., 2017). O aproveitamento desta fonte pode ser realizado de diversas maneiras, dentre elas na geração de energia por meio de sistemas fotovoltaicos.

O Brasil apresenta grande potencial de aproveitamento do recurso solar para geração de energia renovável em seu vasto território, pois possui elevados índices de radiação solar (Pereira et al., 2017). A energia solar fotovoltaica vem crescendo exponencialmente na matriz elétrica nacional desde 2012, principalmente na geração distribuída (ANEEL, 2020).

Conforme Brasil (2020), até 2019 a capacidade instalada desta fonte era de 2,1 GW, e há previsão de novos investimentos em usinas solares até o ano de 2029, em que o valor planejado é de aproximadamente 10,6 GW, desconsiderando a geração descentralizada.

A radiação solar, conforme ABNT (2013), consiste na forma de transferência da energia advinda do sol, através da propagação de ondas eletromagnéticas. A taxa na qual a radiação incide em uma superfície é chamada de irradiância solar (G), normalmente medida em watt por metro quadrado (W/m²). Ao integrar a G em um intervalo de tempo específico, tem-se a irradiação solar. Quando integrada no período de uma hora, é simbolizada por I e durante um dia, por H . As unidades mais utilizadas são watt hora por metro quadrado (W·h/m²) e joule por metro quadrado (J/m²).

A radiação solar que entra na atmosfera possui duas componentes: a radiação direta, que não sofre nenhum desvio até atingir o solo e a radiação difusa, proveniente do espalhamento por moléculas, aerossóis e nuvens. Além destas componentes, a reflexão da radiação no ambiente de entorno, como edificações, solo ou água é chamada de albedo. Todas as componentes da radiação solar se encontram ilustradas na Fig. 1 (Tiepolo et al., 2017).

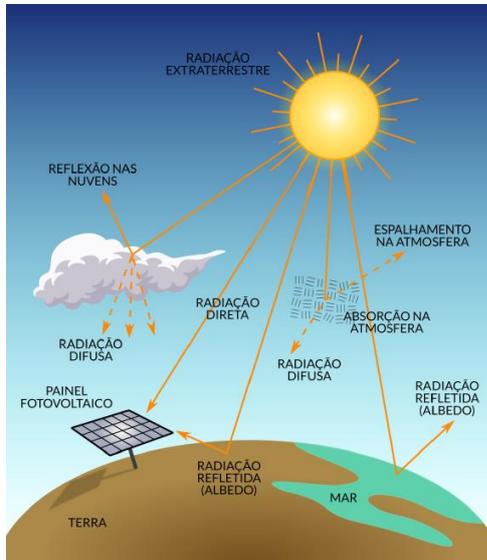


Fig. 1 Componentes da radiação solar (Tiepolo et al., 2017).

O conhecimento da irradiação solar incidente no plano dos painéis fotovoltaicos é fundamental para o correto dimensionamento do gerador fotovoltaico e a correta estimativa da quantidade de energia que pode ser gerada anualmente (Pereira et al., 2017). Existem alguns equipamentos capazes de medir os componentes da radiação solar, usualmente empregados em estações meteorológicas, solarimétricas e até em usinas solares. Eles são chamados de piranômetros e apresentam diversos tipos, com padrões distintos.

Em inúmeras publicações, os dados provenientes de piranômetros são empregados em diversas aplicações distintas, como por exemplo: determinação da irradiação difusa (Souza et al., 2019); cálculo de índices de mérito para sistemas fotovoltaicos (Silveira et al., 2018), estimativa da temperatura na célula fotovoltaica e taxa de desempenho em sistemas fotovoltaicos (Yang et al., 2019), entre outros. Nesta mesma linha de análise, há estudos em que foram comparadas as incertezas nas medições de irradiação entre um piranômetro de termopilha e um constituído por célula fotovoltaica de referência, concluindo que o piranômetro apresentou maior incerteza (Dunn, Gostein e Emery, 2012). Abye, Pearre e Swan (2018) avaliam o desempenho de sistemas fotovoltaicos centralizados e distribuídos instalados no Canadá, com dados provenientes de mais de 200 piranômetros do país, em diferentes locais. O estudo de Matsumoto et al. (2017) compara o desempenho de um SFVCR instalado no México, monitorando a irradiação com diferentes piranômetros: do tipo célula fotovoltaica e de termopilha, concluindo que este último detectou

aproximadamente 4% a mais de energia do que o outro piranômetro no período analisado.

Este estudo consiste na avaliação dos valores de irradiação medidos pelos piranômetros presentes em duas estações solarimétricas localizadas na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Câmpus Curitiba – Sede Neoville e na influência para determinação da Taxa de Desempenho do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFVCR) instalado juntamente a elas. Estas estações medem com grande precisão a radiação solar e são categorizadas como padrão Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) e Empresa de Pesquisa Energética (EPE). As estações e os módulos fotovoltaicos foram instalados através de um projeto de P&D ANEEL/COPEL-DIS/UTFPR-CT e compõem a rede de Estação de Pesquisa em Energia Solar (EPESOL) da UTFPR, monitorada pelo seu Laboratório de Energia Solar (LABENS). Assim, o objetivo desta pesquisa é calcular e avaliar a taxa de desempenho para um SFVCR a partir de dados provenientes de dois piranômetros, cada um com uma classificação distinta, além dos dados de irradiação medidos por cada um destes equipamentos. Geralmente, são avaliados os dados anuais da taxa de desempenho, entretanto, o sistema em estudo possui poucos meses de operação. Portanto, o período de análise foi realizado entre dezembro de 2019 e junho de 2020.

2. MATERIAIS

A EPESOL Curitiba abriga módulos de avaliação de diferentes tecnologias além de um SFVCR com armazenamento de energia que não será objeto de estudo do artigo. Os dados de geração de energia discutidos nos resultados são provenientes do gerador fotovoltaico destacado em verde na Fig. 2, na qual também estão ilustradas as estações SONDA (em vermelho) e EPE (em amarelo), distantes 14 metros entre si.



Fig. 2 EPESOL Curitiba.

A tecnologia de fabricação dos módulos do SFVCR em questão é de filme fino, mais precisamente de telureto de cádmio (CdTe). Este sistema é composto por 18 módulos de CdTe, com potência unitária de 85 Wp.

Em relação às estações solarimétricas, ambas abrigam equipamentos radiométricos capazes de medir componentes da

radiação solar. Estes equipamentos, definidos como piranômetros, devem ser projetados para medir a irradiância em uma superfície receptora plana resultante da incidência dos fluxos de radiação provenientes do hemisfério (International Organization for Standardization, 2018). As condições de instalação dos piranômetros são as mesmas dos módulos, ou seja, orientados ao norte geográfico com ângulo de inclinação de 25°, cujo valor corresponde à latitude da cidade de Curitiba.

Conforme Pereira et al. (2017), instrumentos de alta qualidade se instalados, operados e mantidos em conformidade com as recomendações do fabricante e procedimentos indicados pelas normatizações da WMO - World Meteorological Organization e ISO, podem possuir uma grande exatidão. A Fig. 3 mostra a variação das incertezas dos piranômetros, os quais podem ser classificados em “padrão secundário”, “primeira classe” e “segunda classe”. Piranômetros “padrão secundário” apresentam maior precisão na medição das grandezas, enquanto os de “segunda classe” possuem maior grau de incerteza nos seus dados de saída.

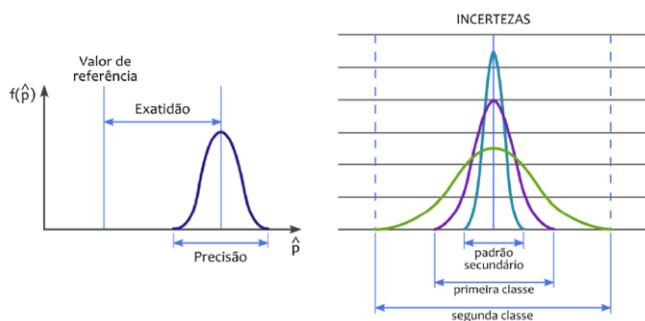


Fig. 3 Relação entre a classificação de equipamentos (Pereira et al., 2017).

Os radiômetros instalados nas estações SONDA e EPE são piranômetros de termopilha, cuja função é converter a energia térmica em energia elétrica. Esses piranômetros são compostos por um sensor, dois domos de vidro com baixo teor de ferro para o isolamento térmico do sensor, um corpo metálico e um envoltório de proteção (Pereira et al., 2017).

Os modelos CMP10 e CMP6, respectivamente presentes nas estações SONDA e EPE, são piranômetros fabricados pela Kipp & Zonen e fornecem dados de irradiância global (soma das componentes direta e difusa) no plano horizontal como no plano inclinado (soma das componentes direta, difusa e devido ao albedo). Neste estudo será considerado a medição no plano inclinado, a qual é utilizada para o cálculo da taxa de desempenho de um SFVCR.

O piranômetro CMP10 é um piranômetro de padrão secundário que, de acordo com o manual da fabricante Kipp & Zonen (2016), possui um elemento sensor de termopilha de 32 junções que apresenta resposta mais rápida, tempo de resposta menor que 1,7 s, melhor linearidade e uma faixa de medição mais ampla que o CMP 6. Tem compensação de temperatura embutida e possui dessecante interno que dura 10 anos. A Fig. 4 apresenta o piranômetro modelo CMP10 instalado na estação SONDA.



Fig. 4 Piranômetro CMP10: localizado na estação SONDA.

O CMP 6 é um piranômetro de primeira classe e, conforme o manual da fabricante Kipp & Zonen (2016), possui um elemento sensor de termopilha de 64 junções com um revestimento preto altamente absorvente e espectralmente plano para capturar a radiação recebida e convertê-la em um sinal elétrico. O vidro utilizado apresenta uma boa transmissão de radiação ultravioleta. As duas cúpulas concêntricas de alta qualidade reduzem o erro direcional e melhoram o isolamento térmico. A Fig. 5 ilustra o piranômetro CMP6 instalado na estação EPE.



Fig. 5 Piranômetro CMP6: localizado na estação EPE.

Algumas especificações técnicas de cada equipamento estão apresentadas na Tabela 1, na qual é possível perceber que a superioridade técnica do CMP10 em relação ao CMP6 apesar da faixa espectral ser a mesma para ambos (Kipp & Zonen, 2016).

Tabela 1. Especificações técnicas dos piranômetros CMP6 e CMP10.

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

Embora a construção do detector do piranômetro seja 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 (KIPP & ZONEN, 2016). 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 *datalogger* 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 aquisição dos dados é realizada *online* mediante *login* e senha de acesso ao servidor FTP pelos pesquisadores do LABENS.

O tratamento dos dados é realizado por meio da integralização diária dos valores de irradiância. O valor final é interpretado como a irradiação diária em kWh/m², sendo que a irradiação mensal é a média dos valores diários de acordo com a quantidade de dias no mês. O tratamento dos dados foi realizado na linguagem *Python* e no *software Excel*.

3. MÉTODOS

Observaram-se os dias 27/12/2019 e 27/05/2020 em Curitiba, em que o comportamento das curvas de irradiância no plano inclinado medidas pelos piranômetros CMP10 e CMP6 e ilustradas na Fig. 6a e na Fig. 7a se apresentam com baixa variabilidade, consequência de um dia de céu azul, sem nuvens. Estes dias foram escolhidos estrategicamente para comparar um dia típico de verão e outro de outono. A fim de detalhar as diferenças de medição obtidas no processo de medição dos piranômetros, a Fig 6b e a Fig 7b apresentam a diferença em módulo dos valores de irradiância dos dias determinados.

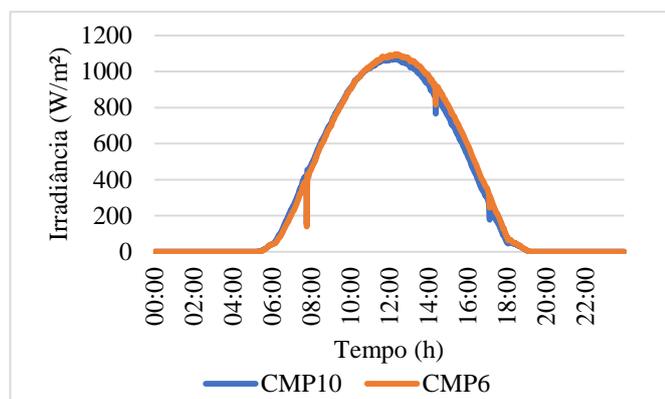


Fig. 6a Curva de irradiância no plano inclinado em Curitiba no dia 27/12/2019.

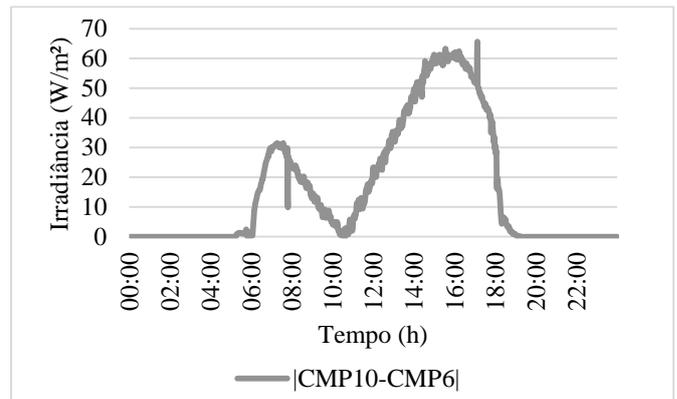


Fig. 6b Diferença de medição entre os sensores no dia 27/12/2019.

No dia 27/12/2020 é possível perceber alguns ruídos ocasionados pela presença de nuvens na região, os quais não foram investigados nesta análise. A máxima irradiância para a componente no plano inclinado foi de 1.071,76 W/m² e 1.097,99 W/m², com base nos piranômetros CMP10 e CMP6, respectivamente. A irradiação calculada foi de 8.076,32 W-h/m² por meios dos dados provenientes da estação SONDA e 8.303,88 W-h/m² com base nos dados oriundos da estação EPE. Pode-se observar dois picos em relação à diferença, em módulo, de ambos os sensores. A diferença de medição foi de 31,50 W/m² às 7:34 h e de 41,46 W/m² às 17:42h.

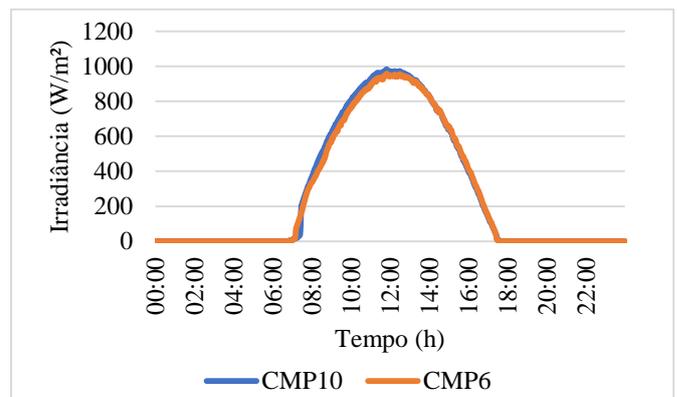


Fig. 7a Curva de irradiância no plano inclinado em Curitiba no dia 27/05/2020.

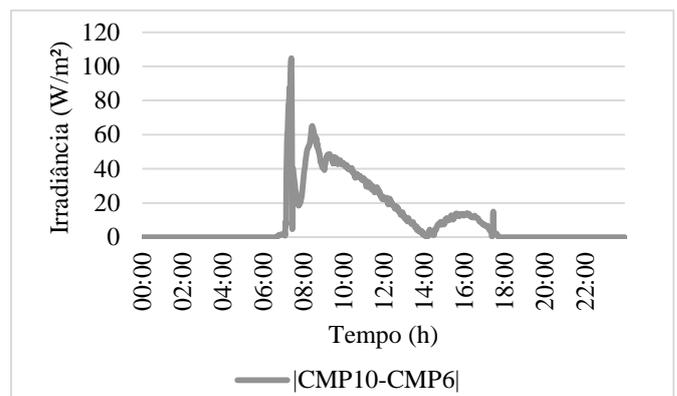


Fig. 7b Diferença de medição entre os sensores no dia 27/05/2020.

A máxima irradiância observada no dia 27/05/2020 para a componente no plano inclinado foi de 983,01 W/m² e 957,78 W/m², com base nos piranômetros CMP10 e CMP6, respectivamente. A irradiação calculada foi de 6.642,25 W·h/m² por meios dos dados provenientes da estação SONDA e 6.489,15 W·h/m² com base nos dados oriundos da estação EPE. Pode-se observar três picos em relação à diferença, em módulo, de ambos os sensores. A diferença de medição foi de 104,84 W/m² às 7:24 h, 65,15 W/m² às 8:27h e de 15,01 W/m² às 17:27h.

Na Tabela 2 e na Tabela 3 são apresentados os horários em que ocorreram as medições da máxima irradiância por ambos os piranômetros, bem como os horários dos primeiros e últimos valores medidos.

Tabela 2. Horários dos valores medidos de irradiância no dia 27/12/2019 pelos piranômetros CMP10 e CMP6

Horário	CMP10	CMP6
Máxima irradiância	12:25 h	12:21 h
Primeiro valor medido	5:13 h	5:17 h
Último valor medido	19:12 h	19:13 h

Tabela 3. Horários dos valores medidos de irradiância no dia 27/05/2020 pelos piranômetros CMP10 e CMP6

Horário	CMP10	CMP6
Máxima irradiância	11:49 h	11:49 h
Primeiro valor medido	6:41 h	6:45 h
Último valor medido	17:42 h	17:37 h

Em ambos os casos, a medição do primeiro valor medido pelo CMP10 é anterior ao do CMP6, caracterizando a diferença de sensibilidade que ocorre à medida que a radiação incide sobre o sensor de termopilha do piranômetro presente na estação SONDA. Em compensação, em um dia típico de outono o último valor medido pelo CMP10 foi posterior ao horário registrado pelo CMP6. Os valores de máxima irradiância em 27/12/2019 foram observados em um intervalo de 4 minutos entre os dois equipamentos. Em 27/05/2020 não houve diferença de horário.

Neste estudo foram contabilizados apenas os dias em que os piranômetros apresentaram dados de irradiância concomitantemente, ou seja, nos dias em que houve problemas de medição com pelo menos um dos equipamentos, ambos foram desconsiderados da análise. Ao todo, foram 193 dias analisados conforme exposto na Tabela 4. Definidas as médias diárias mensais de irradiação no plano inclinado, realizou-se uma comparação entre os valores medidos e os índices apresentados no Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná. Utilizou-se como referência em os valores do Atlas pelo fato deste apresentar um estudo de dados históricos da irradiação em todo o estado. A aquisição dos dados é realizada por meio da Ferramenta Interativa Web disponível no endereço eletrônico <<http://atlassolarparana.com/>>, no qual é possível visualizar a distribuição da irradiação solar de todas as suas componentes por meio de mapas, gráficos e tabelas.

Tabela 4. Quantidade de dias analisados em cada mês.

Mês	Contagem de dias analisados
Dez/2019	30
Jan/2020	16
Fev/2020	26
Mar/2020	30
Abr/2020	30
Mai/2020	31
Jun/2020	30

No mapa ilustrado na Fig. 8 foi adotada uma taxa de desempenho de 80% para os sistemas fotovoltaicos em termos do rendimento energético anual. O potencial de geração solar fotovoltaica é medido em kW·h de energia gerada por quilo watt pico (kWp) de potência de sistema fotovoltaico instalado.

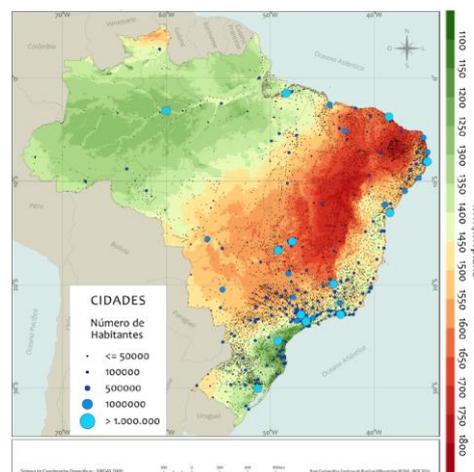


Fig. 8 Mapa do potencial de geração fotovoltaica no Brasil (Adaptado de Pereira et al., 2017).

Pode-se perceber que o Brasil apresenta um elevado potencial de geração de energia através da fonte solar fotovoltaica, principalmente na região nordeste. A região amazônica e o litoral sul constituem os locais com menores potenciais no país, devido à alta nebulosidade destas regiões. Mesmo o local brasileiro com menor índice de radiação solar, possui maior potencial de geração solar no local mais ensolarado da Alemanha, por exemplo, que é o quarto país em capacidade instalada mundial em sistemas fotovoltaicos (Pereira et al., 2017; Ren21, 2020).

4. RESULTADOS

Na Tabela 5 são apresentados os índices de irradiação média diária mensal para a componente no plano inclinado apresentados no Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná, além das médias dos valores de irradiação obtidos pelos piranômetros CMP6 e CMP10. A partir destes resultados calculou-se a variação percentual do CMP6 em relação ao CMP10 a partir de (1).

$$\text{Variação percentual} = \frac{\text{Irradiação}_{\text{CMP6}}}{\text{Irradiação}_{\text{CMP10}}} - 1 \quad (1)$$

Tabela 5. Irradiação média diária mensal com base no Atlas e nos piranômetros CMP10 e CMP6.

Irradiação no plano inclinado média diária mensal (kW·h/m ²)				
Mês	Atlas	CMP10	CMP6	Variação percentual
Dez/2019	4,94	5,21	5,35	2,67%
Jan/2020	4,85	4,34	4,45	2,65%
Fev/2020	4,93	5,02	5,12	1,88%
Mar/2020	4,75	6,14	6,18	0,59%
Abr/2020	4,37	5,96	5,94	-0,26%
Mai/2020	3,88	5,17	5,09	-1,47%
Jun/2020	3,64	3,30	3,24	-1,73%

Até o presente momento constatou-se que a média de irradiação diária mensal no plano inclinado na latitude referente à estação EPE foi maior em relação à SONDA em quatro dos sete meses analisados. No período em que predomina o outono, a irradiação calculada com base nos dados de irradiação no plano inclinado do CMP10 foi maior.

A aplicação dos histogramas ilustrados na Fig 9. e na Fig. 10 permite visualizar a frequência das faixas de irradiação diária em intervalos de 0,5 kW·h/m²·dia para cada piranômetro durante os 193 dias analisados.

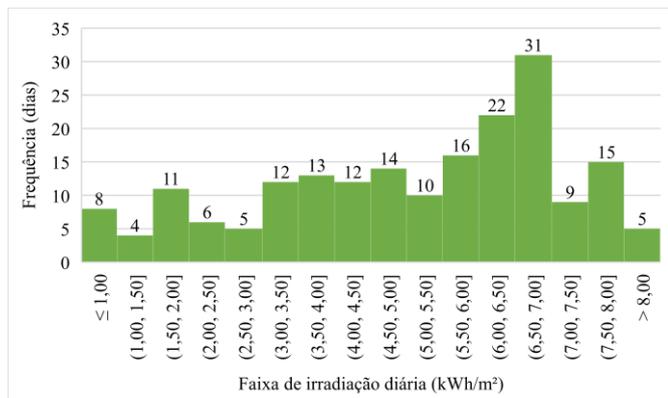


Fig. 9 Histograma de frequência de irradiação obtida pelo piranômetro CMP10.

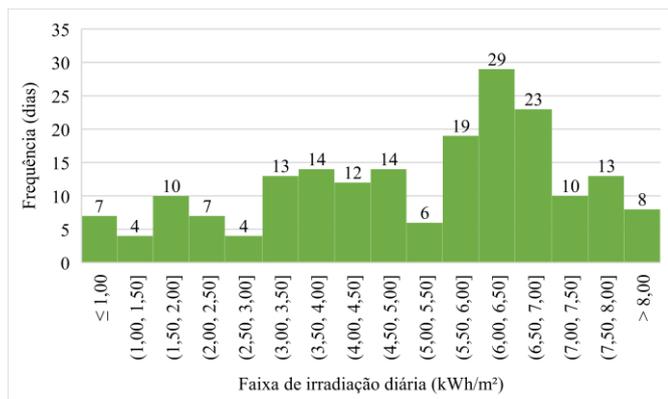


Fig. 10 Histograma de frequência de irradiação obtida pelo piranômetro CMP6.

A partir dos histogramas, percebe-se a variação de 0,41 a 8,38 kW·h/m²·dia para o piranômetro CMP10 e 0,42 a 8,45 kW·h/m²·dia para o piranômetro CMP6. A faixa mais recorrente de medições para o CMP10 foi de 6,5 kW·h/m² a 7,00 kW·h/m², com 31 amostras. Já para o CMP6 a maior frequência observada foi no intervalo de 6,00 kW·h/m² a 6,50 kW·h/m², com 29 amostras.

Foi calculado, através de (2) o desvio padrão existente que indica a dispersão dos dados com relação à média fornecida pelos piranômetros CMP10 e CMP6.

$$DP = \sqrt{\frac{\sum |x - \mu|^2}{N}} \quad (2)$$

Onde x é um valor do conjunto de dados, μ é a média do conjunto de dados e N é o número de dados na população.

Os desvios padrões encontrados no período foram de 0,90 kW·h/m² para o piranômetro CMP10 e 0,91 kW·h/m² para o CMP6. Com desvios padrões inferiores a 1 kW·h/m² em ambos os casos, percebeu-se a homogeneidade dos dados.

As variações percentuais calculadas através de (3) e (4) entre os valores medidos pelos piranômetros e os apresentados no Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná podem ser observadas na Fig. 11, referentes aos resultados da irradiação no plano inclinado.

$$\text{Variação percentual} = \frac{\text{Irradiação}_{\text{Atlas}}}{\text{Irradiação}_{\text{CMP6}}} - 1 \quad (3)$$

$$\text{Variação percentual} = \frac{\text{Irradiação}_{\text{Atlas}}}{\text{Irradiação}_{\text{CMP10}}} - 1 \quad (4)$$

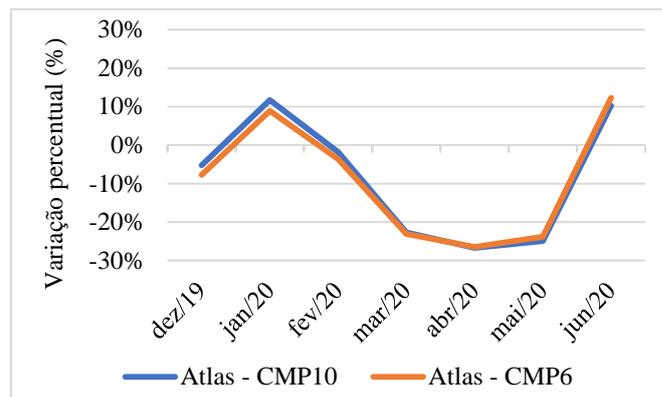


Fig. 11 Variação percentual dos índices de irradiação provenientes das estações SONDA e EPE com referência ao Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná.

O Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná utiliza um modelo físico inicialmente desenvolvido na Alemanha e adaptado para as condições climáticas brasileiras que combina a utilização da aproximação de “dois-fluxos” para obter a estimativa da irradiação solar incidente, o modelo de Transferência Radiativa BRASIL-SR (Tiepolo et al. 2017).

Deve-se levar em consideração que uma amostra de sete meses de análise é um período muito curto de estudo quando comparado ao Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná, que utilizou um histórico de dados de satélite compreendidos entre 2005 e 2015. Por este motivo, determinado mês ou ano

analisado pode não se comportar conforme os dados históricos apresentados pelo Atlas, enquanto outros períodos tendem à mesma curva. A menor variação foi observada em fevereiro, apresentando variação percentual de apenas 1,81% pelo piranômetro CMP10. A partir do outono, percebeu-se uma maior variação dos dados medidos pelos piranômetros em relação ao Atlas. As mudanças nas condições climáticas deste período devem ser consideradas.

Os diferentes valores de irradiação obtidos pelos dois piranômetros podem causar divergências nas taxas de desempenho calculadas para um SFVCR, visto que o cálculo depende do valor de irradiação do local como em (5).

$$\text{Taxa de desempenho} = \frac{\left(\frac{\text{Energia gerada}}{\text{Potência instalada}}\right)}{\text{Irradiação}} \quad (5)$$

A taxa de desempenho é um índice de mérito que representa a energia solar disponível no plano dos módulos fotovoltaicos que será convertida em energia elétrica, ou seja, representa a energia que será efetivamente disponibilizada pelo SFVCR no ponto de conexão com a rede elétrica (Benedito, 2009). Diversas perdas estão envolvidas neste processo de conversão de energia, porém não fazem parte do escopo desta pesquisa.

Vale ressaltar que os valores de geração de energia considerados para realizar o cálculo da taxa de desempenho correspondem a mesma quantidade de dias disponibilizados para efetuar a análise de irradiação, conforme mencionado anteriormente na Tabela 4.

A fim de ilustrar o exposto, foi calculada a taxa de desempenho do SFVCR instalado adjacente às duas estações solarimétricas que comportam os piranômetros CMP10 e CMP6. A Fig. 12 apresenta as taxas de desempenho do SFVCR calculadas com base na geração de energia do SFVCR de CdTe e nos valores de irradiação medidos pelos piranômetros CMP10 e CMP6. Nota-se que a taxa de desempenho é afetada sobretudo em janeiro, quando a análise se limitou a 16 dias. Em junho, embora a geração de energia seja baixa, a taxa de desempenho pode ser considerada elevada em função das menores perdas ocasionadas por temperatura nesta época do ano.

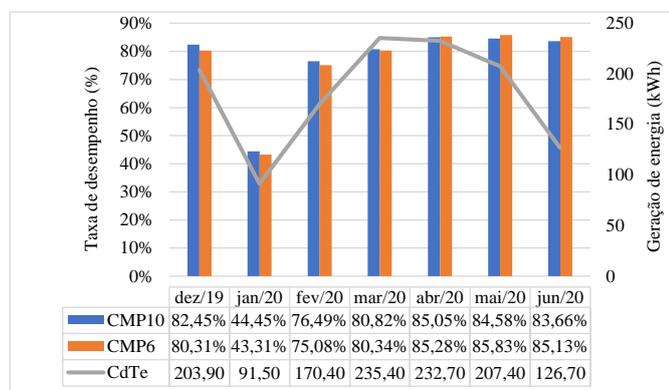


Fig. 12 Taxa de desempenho de um SFVCR calculada com base nos piranômetros CMP10 e CMP6.

Em uma análise mensal, a média da taxa de desempenho foi de 76,78%, variando de 44,45% a 85,05% quando os cálculos foram realizados com o auxílio do CMP10. Quando utilizado o CMP6, a média foi de 76,47%, variando de 43,31% a

85,83%. No primeiro caso, o maior resultado foi observado em janeiro enquanto no segundo caso, em maio.

Ao comparar as taxas de desempenho, as diferenças variam de 0,26% a 2,60%, sendo a menor variação observada em abril e a maior em dezembro.

Pode-se perceber que a partir de abril houve uma inversão de resultados, em que a taxa de desempenho calculada com os índices de irradiação provenientes da estação EPE passou a ser maior que a taxa de desempenho calculada com os índices de irradiação provenientes da estação SONDA.

Nos três últimos meses analisados, a irradiação medida pelo piranômetro CMP10 foi superior à irradiação medida pelo CMP6. Vale ressaltar que os meses de abril, maio e junho são os únicos da análise em que a estação de outono é predominante. A princípio, pode-se relacionar a influência da temperatura no funcionamento dos equipamentos, os quais apresentam resultados divergentes nesta época do ano. Para uma conclusão mais precisa, seria necessário avaliar o comportamento do gráfico ao longo do ano. Como a EPESOL entrou em operação no final de 2019, não foi possível obter resultados anterior a este período.

5. CONCLUSÕES

Em uma comparação entre os piranômetros CMP10 e CMP6, nota-se que os dados provenientes da estação EPE apresentam médias superiores de irradiação quando comparada às da estação SONDA durante o verão. Os piranômetros encontrados nas duas estações possuem parâmetros que se diferem, como a sensibilidade, o tempo de resposta e a própria construção do aparelho, impactando nos valores das variáveis medidas. O piranômetro CMP6 presente na estação EPE apresenta parâmetros com intervalos de medição mais abrangentes quando comparados aos parâmetros do CMP10, da estação SONDA. Percebe-se então que os resultados são superestimados à medida que o intervalo de medição definido no parâmetro é ampliado. Entretanto, este cenário muda a partir de abril, mês em que o CMP10 começa a registrar valores mais altos de irradiação em relação ao CMP6.

Os diferentes índices de irradiação serviram de base para avaliar a influência deste parâmetro no desempenho de um SFVCR. Pode-se perceber que até março a performance é superior quando calculada com os índices de irradiação referentes à estação SONDA. Isto pode ser justificado pelo fato dos valores de irradiação medidos pelo piranômetro CMP6 serem mais elevados em relação ao CMP10.

Além disso, cabe salientar que o piranômetro presente na estação SONDA apresenta um custo superior quando comparado ao da estação EPE, oferecendo uma maior confiabilidade e precisão na medição de acordo com o próprio manual do fabricante. Enquanto o CMP10 é indicado para a utilização em redes meteorológicas e testes de materiais fotovoltaicos bem como coletores térmicos, o CMP6 tem aplicações no controle climático de estufas e medições em redes hidrológicas.

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

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). NBR 10899. 1º Projeto de revisão. *Energia solar fotovoltaica: terminologia*. Rio de Janeiro.
- Adye, K., Pearre, N., Swan, L. (2018). Contrasting distributed and centralized photovoltaic system performance using regionally distributed pyranometers. *Solar Energy*, vol. 160, pp. 1-9.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (2020). Unidades Consumidoras com Geração Distribuída, disponível em: <https://goo.gl/Pj1MCm> (acessado em 24 julho 2020).
- Benedito, R.S. (2009). *Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório*. São Paulo, 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo.
- Brasil, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética (2020). *Plano decenal de expansão de energia 2029*. MME/EPE, Brasília.
- Dunn, L., Gostein, M. and Emery, K. (2012). Comparison of pyranometers vs. PV reference cells for evaluation of PV array performance. *38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Austin, pp. 002899-002904.
- International Organization for Standardization (2018). *ISO 9060: solar energy – specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation*, disponível em: <https://www.iso.org/standard/67464.html> (acessado em 17 junho 2020).
- Kipp & Zonen (2016). Instruction Manual, disponível em: <https://www.kippzonen.com/Download/72/Manual-Pyranometers-CMP-series-English?ShowInfo=true> (acessado em 17 junho 2020).
- Matsumoto Y., Urbano, J.A., Peña, R., Olvera, M.L.L., Pitalúa, N., Luna, M.A., Asomoza, R. (2017). *Performance comparisons of a PV system by monitoring Solar irradiance with different pyranometers*. 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Washington, pp. 632-637.
- Pereira, E.B., Martins, F.R., Gonçalves, A.R., Costa, R.S., Lima, F.J.L., Rüther, R., Abreu, S.L., Tiepolo, G.M., Pereira, S.V., Souza, J.G. (2017). *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. 2ª ed. INPE, São José dos Campos.
- REN21 (2020). *Renewables 2020 Global Status Report*. REN21 Secretariat, Paris.
- Silveira, C.O., Tonolo, E.A., Krasnhak, L.B., Urbanetz, J.Jr. (2018). Acompanhamento de desempenho e contribuição da capacidade instalada de SFVCR em Curitiba frente ao panorama nacional. *XXIII Congresso Brasileiro de Automática*. João Pessoa.
- Souza, M.B., Tonolo, É.A., Yang, R.L., Tiepolo, G.M., and Urbanetz Jr, J. (2019). Determination of Diffused Irradiation from Horizontal Global Irradiation-Study for the City of Curitiba. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, vol. 62, nº. SPE.
- Tiepolo, G.M., Pereira, E.B., Urbanetz Jr, J., Pereira, S.V., Gonçalves, A.R., Lima, F.J.L., Costa, R.S., Alves, A.R. (2017). *Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná*. 1a ed. UTFPR. Curitiba.
- Yang, R.L., Cremasco, N.P., Tiepolo, G.M., Leludak, J.A. and Urbanetz Jr, J. (2019). Estimate of Performance Ratio and Generated Energy of Grid-Connected Photovoltaic Systems in Paraná, *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, Gramado, pp. 1-6.