

# AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DE PAINÉIS SOLARES DE UMA USINA SOLAR EXPERIMENTAL OPERANDO NO CLIMA DA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL

Pedro Antonio Assad Baracat – [pedroaab@gmail.com](mailto:pedroaab@gmail.com)

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica / Instituto de Pesquisas Eldorado

Jean Marcos Andery Baracat

José Eduardo Bertuzzo

José Roberto Martins da Silva

Instituto de Pesquisas Eldorado – Diretoria de Tecnologia

Rodrigo Moreno Garcia

Harison Franca Santos

BYD Energy do Brasil – Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento

**Resumo.** Aspectos climáticos influenciam parâmetros de performance de painéis solares. Assim, o estudo desses parâmetros deve ser feito considerando a região de operação, especialmente em países com grande extensão territorial, como o Brasil. Além disso, a influência dos aspectos climáticos pode ser diferente para cada tecnologia de célula solar (monocristalina ou policristalina). Neste trabalho, foram coletados dados de uma usina solar experimental da BYD, localizada na cidade de Campinas, São Paulo, em parte dos meses de outubro de 2020, outubro de 2021 e outubro de 2022. Os painéis utilizados possuem diferentes ângulos de incidência, alturas e tecnologias de célula. A análise dos ângulos e alturas foi necessária tão somente para discernir a influência destes parâmetros, em relação aos aspectos climáticos e às tecnologias de célula. Uma metodologia de cálculo foi empregada aos dados, com o objetivo de se obter valores globais e curvas de Performance Ratio (PR) em função do tempo. Os resultados de cada período foram comparados e analisados considerando-se variáveis ambientais, como temperatura, irradiância, precipitação, umidade relativa e velocidade do vento, bem como as tecnologias de células. Por se tratar de um primeiro estudo de dados da usina mencionada, referente à períodos curtos, as conclusões foram direcionadas à influência dos parâmetros citados no PR, na geração de energia e na potência média dos períodos no presente.

**Palavras-chave:** Performance Ratio, Análise de Dados, Usina Solar Experimental

## 1. INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre eficiência de conversão de energia de painéis solares é importante para os fabricantes. A influência do clima na performance dos painéis torna necessário realizar estudos sobre a eficiência de conversão de energia em áreas de interesse (Banany, 2015). O Brasil possui grande território e potencial para a geração de energia solar. Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017), o Brasil recebe uma Irradiação Global Horizontal Média de 5.153 Wh/m<sup>2</sup>. Contudo, ainda são necessários mais estudos sobre a performance de painéis solares em climas brasileiros.

Cada tecnologia de célula (monocristalina ou policristalina) pode ser influenciada de forma diferente pelo clima, devendo ser estudada em cada região. Células de silício monocristalino são consideradas mais eficientes (Stambuk, 2017). A influência do clima também pode mudar em função das características físicas da instalação, como a altura dos painéis e o ângulo de incidência. Ainda que não seja um objetivo deste trabalho avaliar tais características, é preciso discernir sua influência, para caracterizar corretamente a influência dos parâmetros de interesse na performance dos painéis.

Com o objetivo de avaliar a performance de diferentes painéis solares no Sudeste do Brasil, foi concebida a usina solar experimental de 500 kWp da BYD, em Campinas, São Paulo, nas coordenadas 22.76797, -47.01083. Neste trabalho, foram empregados dados do Setor C, destinado ao carregamento de veículos elétricos (Busport), como ilustrado na Fig. 1.

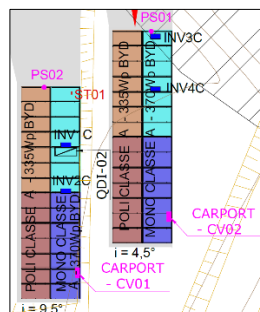


Figura 1 - Esquema do Setor C (Busport), extraído da planta da usina solar experimental da BYD

O Setor C da usina experimental possui 4 inversores UNO DM 5.0 TL Plus. Cada inversor está ligado à duas strings de painéis de classe A, com 7 módulos iguais em cada uma. A Tab. 1 mostra as principais características dos módulos do Setor C, como o modelo, tecnologia, potência de pico, ( $P_p$ ), tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) nas STC (do inglês, “*Standard Test Conditions*”, ou Condições Padrão de Teste), bem como a potência de pico total de cada inversor ( $W_p$ ).

Tabela 1 - Características dos módulos e inversores do Setor C (Busport) da usina solar experimental da BYD.

Inversor	Modelo do Módulo	Tecnologia	$P_p$ (Wp)	$V_{OC}$ STC (V)	$W_p$ (kWp)
1C	360M6K-36	Monocristalina	370	46,6	5,18
2C	335P6K-36	Policristalina	335	47,28	4,69
3C	360M6K-36	Monocristalina	370	46,6	5,18
4C	335P6K-36	Policristalina	335	47,28	4,69

Os inversores foram divididos em grupos, de acordo com a tecnologia dos painéis. Dentro do mesmo grupo, ocorrem variações dos ângulos e alturas dos painéis. Todos os painéis do Setor C estão orientados na direção leste (L). A Tab. 2 mostra os grupos, tecnologias, ângulos de inclinação ( $i$ ) e alturas ( $h$ ) dos painéis do Setor C.

Tabela 2 - Disposição física dos painéis do Setor C.

Inversor	Tecnologia	Grupo	$i$ (graus)	$h$ (m)
1C	Monocristalina	1	9,5	3,65
2C	Policristalina	2	9,5	3,65
3C	Monocristalina	1	4,5	4,3
4C	Policristalina	2	4,5	4,3

Dados do Setor C da usina, referentes a outubro de 2020, outubro de 2021 e outubro de 2022, foram colocados no Microsoft Excel para tratamento e cálculo de parâmetros como a geração de energia, a potência, o yield e o PR (do inglês, “*Performance Ratio*”), bem como suas variações com o tempo, no clima da região Sudeste do país. Além disso, foi analisada a influência da temperatura, irradiância, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação na geração de energia, na potência média e no PR. De forma geral, a cada ano houve redução do PR.

## 2. ASPECTOS TEÓRICOS

### 2.1 Influência de Parâmetros Ambientais na Geração de Energia e no PR

De acordo com Amy (2006), os principais parâmetros ambientais de influência no PR de um módulo fotovoltaico são a irradiância, a temperatura ambiente e a velocidade do vento, pois estão ligados à temperatura da célula. Quanto maior for a irradiância, maior será a corrente elétrica o que, isoladamente, causa uma maior geração de energia. O aumento da temperatura produz queda na tensão de saída das células, prejudicando a geração de energia (Banany, 2015). A variação da temperatura também produz variações de menor escala na corrente elétrica (Cantor, 2017).

O vento influencia a temperatura dos painéis pelas trocas de calor por convecção natural e forçada. Quanto maior a altura dos painéis, maior a velocidade e influência do vento (Cantor, 2017). De acordo com Skoplaki *et al.* (2008), um módulo pode sofrer redução de cerca de 1,45°C na sua temperatura, a cada m/s de velocidade do vento.

A umidade relativa também tem influência relevante na geração de energia. Ao atingir partículas de água dispersas no ar, um raio de luz sofre refração, reflexão ou difração, o que reduz a incidência de luz sobre os módulos (Cantor, 2017).

### 2.2 Formulação Analítica

Os dados coletados na usina experimental foram aplicados a uma série cálculos. A diferença de energia acumulada ( $\Delta E$ ) pode ser calculada como a diferença entre a energia acumulada final ( $E_f$ ) e a energia acumulada inicial ( $E_i$ ):

$$\Delta E = E_f - E_i \quad (1)$$

A potência de pico do sistema ( $W_p$ ) representa a máxima geração possível em condições ideais (Beckman, 2013), e é igual à soma das potências de pico de cada módulo  $j$  ( $P_p = W_{p,j}$ ):

$$W_p = \sum_j W_{p,j} \quad (2)$$

O yield ou yeld final ( $Y_f$ ) emprega os valores da diferença de energia e da potência de pico do sistema:

$$Y_f = \frac{\Delta E}{W_p} \quad (3)$$

O yield pode ser interpretado como o tempo para se obter a mesma geração de energia  $\Delta E$ , na potência de pico. O yield médio diário ( $Y_{m,d}$ ) é dado por  $Y_f$  dividido pelo número de dias  $d$ :

$$Y_{m,d} = \frac{Y_f}{d} \quad (4)$$

A energia total que incide no plano coletor por unidade de área,  $G_{total}$ , é calculada com as potências incidentes pela área ( $G_k$ ), a cada intervalo de amostragem  $k$ , de período igual a 10 minutos, ou  $T_k = T = 600$  segundos:

$$G_{total} = \sum_k G_k \quad (5)$$

A irradiância nas STC ( $G_{STC}$ ) é  $G_{STC} = 1.000 \text{ W/m}^2$ . O yield de referência ( $Y_r$ ) é a razão entre a irradiância total no plano coletor e a irradiância nas STC:

$$Y_r = \frac{G_{total}}{G_{STC}} \quad (6)$$

O Performance Ratio (PR) é calculado pela razão entre o yield final e o yield de referência (White, 2016):

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (7)$$

### 3. METODOLOGIA

As relações analíticas de cálculo do PR foram traduzidas para um formato numérico no Microsoft Excel. Os dados coletados do Setor C da usina experimental da BYD, foram empregados nessas relações numéricas.

Inicialmente, o período de coleta de dados era de 1 minuto, passando depois para 5 minutos. Apesar de tratar-se de um trabalho inicial, com volume de dados reduzido, considerou-se o aumento futuro do volume de dados e, com o objetivo de reduzir o custo computacional, dados intermediários foram excluídos, elevando o período de amostragem. Com base no trabalho de Nascimento *et al.* (2020), escolheu-se o período ( $T$ ) de 10 minutos, que foi validado pela comparação de resultados de PR, uma vez que o PR corresponde ao último parâmetro calculado, acumulando os erros dos demais.

Para a formulação do método no Microsoft Excel, assumiu-se uma disponibilidade diária de dados fixa. Porém, interrupções na aquisição de dados foram comuns. Por causa de lacunas observadas nos conjuntos de dados, foram escolhidos para análise os períodos dos dias 2 a 14 outubro de 2020, 9 a 20 de outubro de 2021 e 11 a 21 de outubro de 2022. Os três períodos escolhidos tiveram duração similar, o que possibilitou realizar comparações entre seus resultados. Os resultados do inversor 3C no mês de outubro de 2021 não foram gerados, devido a problemas técnicos na usina.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 Validação do Período de Amostragem

A Tab. 3 compara resultados de PR obtidos pelo emprego de dados com período de amostragem de 1 minuto, e os resultados obtidos por meio do emprego de dados de mesma fonte e período de amostragem de 10 minutos.

Tabela 3 - Resultados de PR do Sector C, referentes a outubro de 2020.

Período de Amostragem	PR Inv. 1C (%)	PR Inv. 2C (%)	PR Inv. 3C (%)	PR Inv. 4C (%)
1 minuto	76,67	83,47	73,25	80,58
10 minutos	76,98	83,81	73,55	80,90
Varição	0,37 %	0,41 %	0,41 %	0,40 %

Nos resultados da Tab. 3, foram usados dados referentes aos dias 2 a 14 de outubro de 2020. O aumento no período de amostragem fez todos os resultados de PR aumentarem, com variação máxima de 0,41 %, considerada aceitável.

## 4.2 Resultados Globais

A Tab. 4 mostra dos resultados de geração de energia e potência média, e a Tab. 5 mostra os resultados de PR do Setor C da usina experimental, nos dias 2 a 14 outubro de 2020, 9 a 20 de outubro de 2021 e 11 a 21 de outubro de 2022.

Tabela 4 - Geração de energia e potência média no Setor C, em outubro de 2020, outubro de 2021 e outubro de 2022.

Inversor	Outubro de 2020		Outubro de 2021		Outubro de 2022	
	Energia	Pot. Média	Energia	Pot. Média	Energia	Pot. Média
1C	276,68 kWh	1,42 kW	205,96 kWh	1,14 kW	212,75 kWh	1,29 kW
2C	272,72 kWh	1,40 kW	202,52 kWh	1,13 kW	198,25 kWh	1,20 kW
3C	267,95 kWh	1,37 kW	-	-	207,85 kWh	1,26 kW
4C	266,87 kWh	1,37 kW	200,13 kWh	1,11 kW	203,46 kWh	1,23 kW

Tabela 5 - Resultados de PR no Sector C, referentes a outubro de 2020, outubro de 2021 e outubro de 2022.

Inversor	Outubro de 2020	Outubro de 2021	Outubro de 2022
1C	76,98 %	76,73 %	69,54 %
2C	83,81 %	83,34 %	71,57 %
3C	73,55 %	-	67,58 %
4C	80,90 %	82,41 %	73,07 %

Nos períodos de outubro de 2020 e de 2022, deve-se considerar o predomínio de valores superiores de geração de energia, potência média e PR para os painéis inclinados a 9,5° e com altura de 3,65 m, em relação aos painéis inclinados a 4,5° com altura de 4,3 m. Em uma primeira análise, o aumento da altura não ocasionou aumento na geração de energia e PR, porém não isso não permite concluir que a altura possui menor influência nesses parâmetros.

De acordo com a Tab. 4, a potência média caiu entre 2020 e 2021, subindo em 2022. Houve o predomínio de quedas na geração de energia com o tempo. Isso só não ocorreu para os inversores 1C e 4C entre outubro de 2021 e 2022. Porém, os resultados de PR destes inversores caíram entre outubro de 2021 e 2022 (Tab. 5). Somente o PR do inversor 4C cresceu, entre outubro de 2020 e 2021. As quedas de PR nos demais casos podem ter como uma das causas a degradação. Porém, ela não pode explicar sozinha as quedas mais acentuadas de PR, principalmente nos casos em que houve aumento da geração de energia e potência média. Assim, outra causa possível para quedas de PR está relacionada a fatores climáticos.

A Tab. 6 mostra valores médios ou a soma de parâmetros de influência na geração de energia, potência média e PR.

Tabela 6 – Médias/somas de parâmetros ambientais por período.

Parâmetro	Outubro de 2020	Outubro de 2021	Outubro de 2022
Média de Temperatura	36,11 °C	26,19 °C	32,23 °C
Média de Irradiância	358,28 W/m <sup>2</sup>	287,91 W/m <sup>2</sup>	359,73 W/m <sup>2</sup>
Precipitação Total	1,00 mm	12,00 mm	3,00 mm
Umidade Relativa	49,16 %	68,86 %	67,93 %
Velocidade do Vento	2,52 m/s	3,06 m/s	2,44 m/s

As Figs. 2, 3 e 4 mostram as curvas de geração de energia acumulada e distribuída nos painéis do Setor C da usina experimental, em outubro de 2020, outubro de 2021 e outubro de 2022, respectivamente.

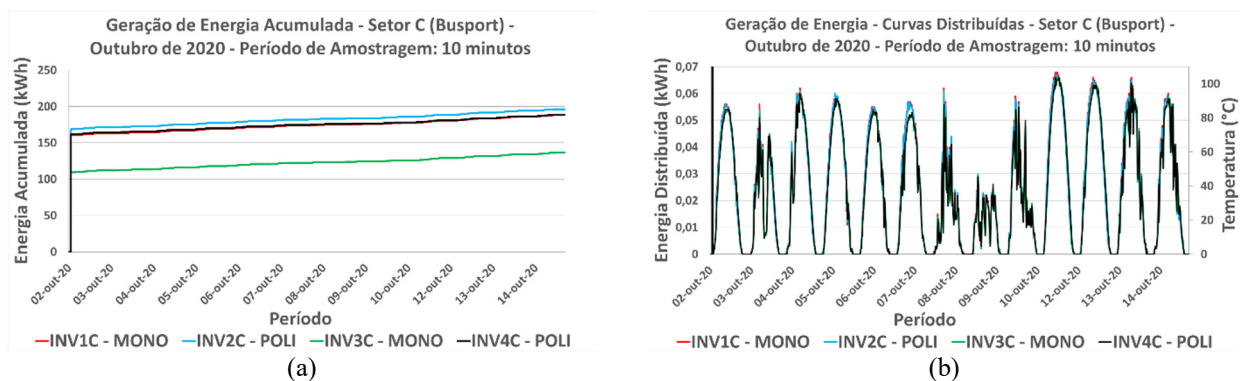


Figura 2 - Geração de energia no Setor C, em outubro de 2020: (a) Valores acumulados; (b) Valores distribuídos

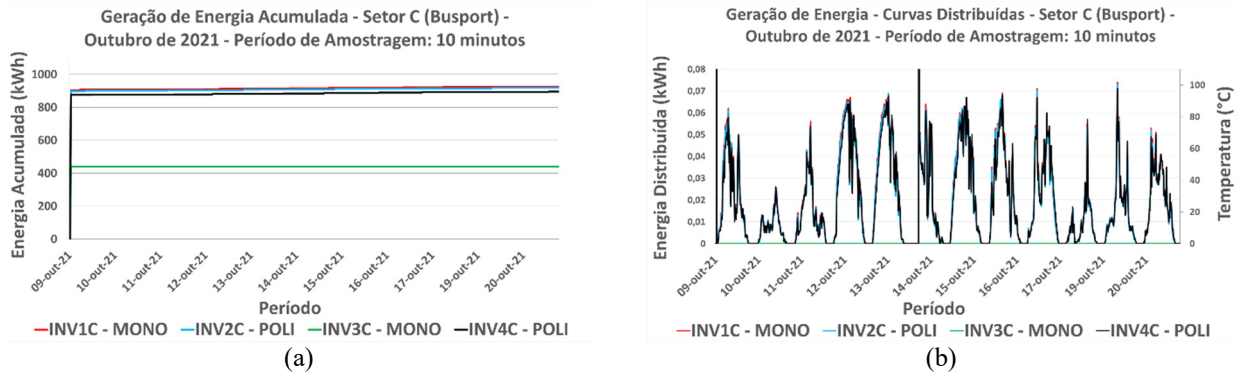


Figura 3 - Geração de energia no Setor C, em outubro de 2021: (a) Valores acumulados; (b) Valores distribuídos

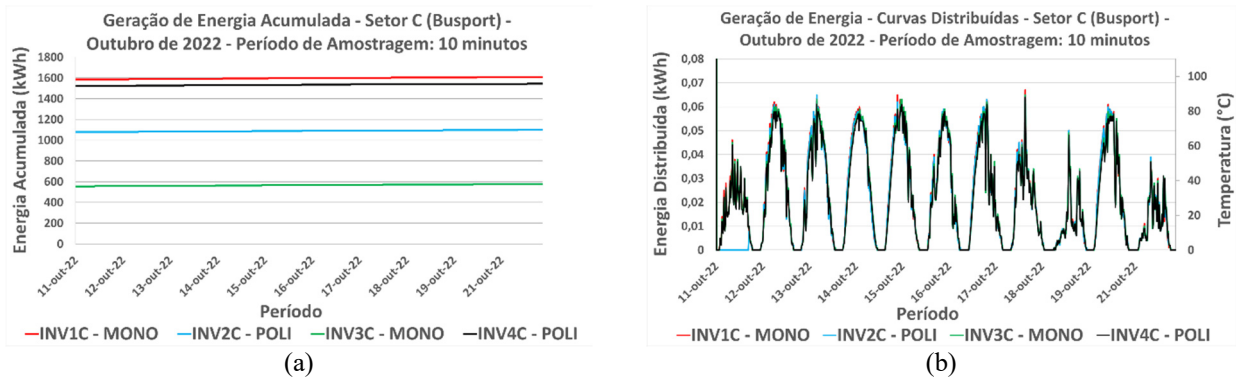


Figura 4 - Geração de energia no Setor C, em outubro de 2022: (a) Valores acumulados; (b) Valores distribuídos

### 4.3 Influência da Temperatura

As Figs. 5, 6 e 7 mostram curvas de PR e temperatura para o Setor C, em outubro de 2020, 2021 e 2022.

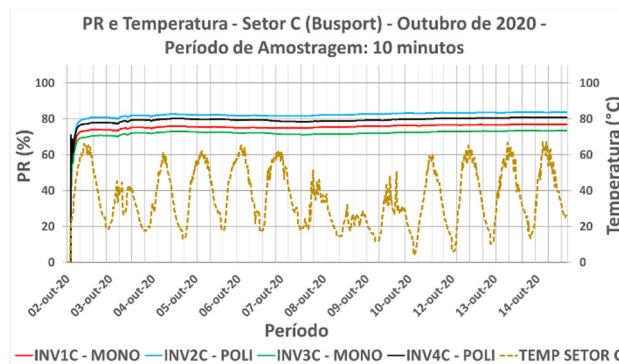


Figura 5 - Curvas de PR e temperatura do Setor C da usina solar experimental, em outubro de 2020

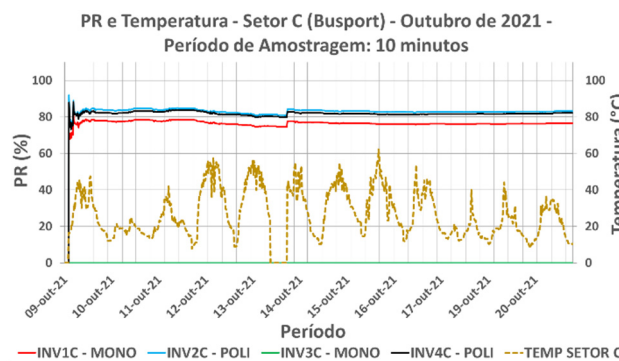


Figura 6 - Curvas de PR e temperatura do Sector C da usina solar experimental, em outubro de 2021

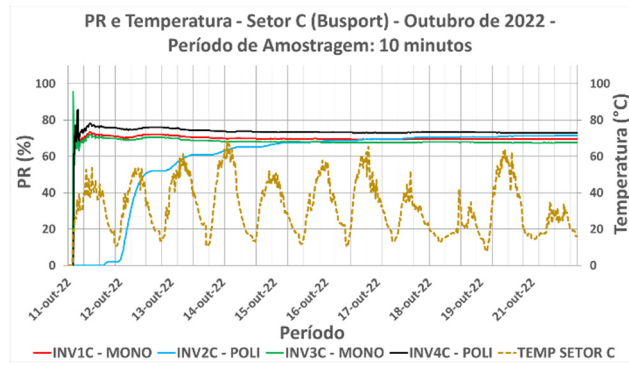


Figura 7 - Curvas de PR e temperatura do Setor C da usina solar experimental, em outubro de 2022

O aumento da temperatura pode induzir uma redução no PR, uma vez que reduz a eficiência de conversão de energia nas células (Karafil, 2016). Esta redução é, muitas vezes, sutil. Como os períodos tratados neste trabalho são curtos, o efeito da temperatura sobre o PR foi menos evidente. Ainda assim, a Fig. 6 mostra uma queda no PR entre os dias 12 e 14, que pode ser decorrência de um aumento de temperatura.

#### 4.4 Influência da Irradiância

A Fig. 8 mostra a irradiância acumulada em outubro de 2020, 2021 e 2022. As curvas de irradiância também apontam para a conclusão de que a temperatura foi uma das causas do aumento do PR em outubro de 2021. O período de amostragem foi considerado alto para uso de dados distribuídos de irradiância, por isso foram geradas curvas acumuladas.

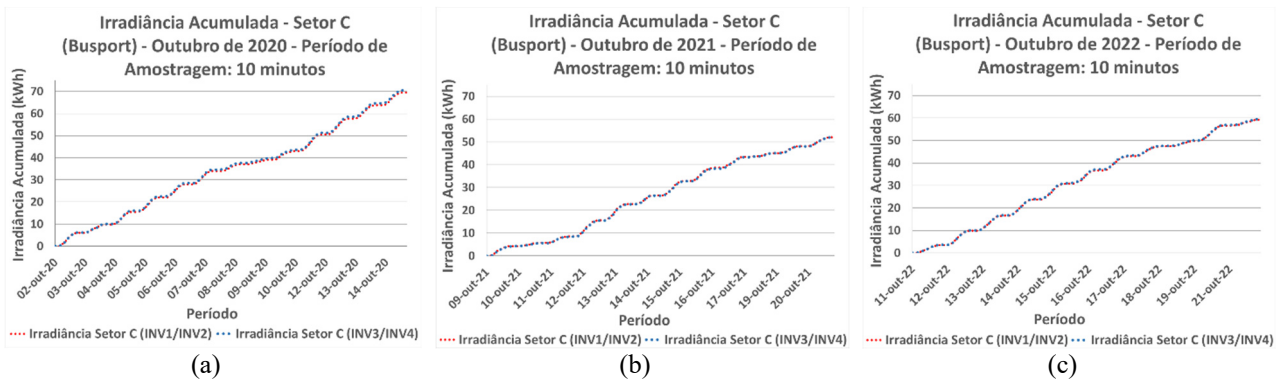


Figura 8 - Irradiância acumulada para o Setor C: (a) Outubro de 2020; (b) Outubro de 2021; (c) Outubro de 2022

Comparando as curvas de irradiância nos diferentes períodos, foi possível notar menor crescimento e menor valor final na curva de outubro de 2021. Da mesma forma, a Tab. 6 mostra que outubro de 2021 teve a menor média de irradiância. Isso pode explicar a queda na média de temperatura, o que fez crescer a média de PR. Outubro de 2022 apresentou a maior média de irradiância, mas não a maior geração de energia e potência totais, pois houve queda no PR e, conseqüentemente, na eficiência de conversão de energia.

#### 4.5 Influência da Precipitação

A Fig. 9 mostra as curvas de PR e de precipitação, que pode ter tido influência nos resultados de PR. A precipitação em outubro de 2021 foi superior às de outubro de 2020 e 2022, de acordo com a Tab. 6. Mesmo reduzindo a visibilidade, o que afeta a incidência de radiação solar nos painéis, a chuva moderada pode ter tido mais de um papel favorável no aumento do PR. A precipitação reduz a incidência de radiação solar, e esta redução tende a fazer a temperatura cair. Ao mesmo tempo, a chuva pode favorecer a queda de temperatura por meio de trocas de calor da água com os painéis.

Outra importante contribuição da precipitação para o aumento do PR é a limpeza dos painéis. Isso porque a usina experimental da BYD está localizada ao lado de uma rodovia não pavimentada. Assim, é elevada a concentração de partículas sólidas no ar, bem como sua deposição sobre os painéis.

Como sugere a Fig. 9b as chuvas de outubro de 2021 ficaram em patamares moderados ou médios, e foram bem distribuídas no tempo. Considerando o período de 2021 como um todo, a intensidade das chuvas pode não ter sido suficiente para causar prejuízos significativos à geração de energia, devido à redução da visibilidade e, conseqüentemente, da irradiação solar. Ao mesmo tempo, a boa distribuição das chuvas pode ter contribuído para a remoção de partículas sobre os painéis e a manutenção do estado de limpeza. Da mesma forma, a regularidade das chuvas pode ter facilitado a redução de temperaturas ao longo do período, tanto pela redução da irradiação, mas principalmente, pelas trocas de calor com a água, além da própria redução da temperatura ambiente.



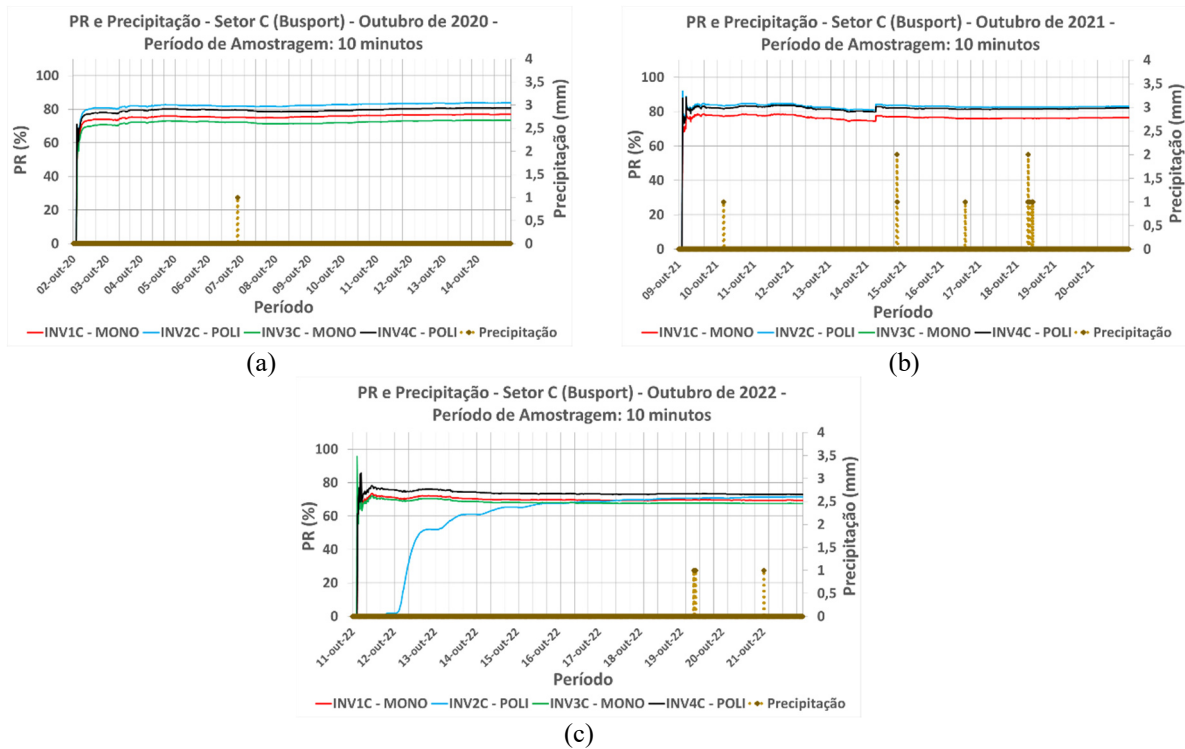


Figura 9 - Curvas de PR e precipitação para o Setor C: (a) Outubro de 2020; (b) Outubro de 2021; (c) Outubro de 2022

Apesar de ter contribuições positivas para a eficiência de conversão de energia, a precipitação não deixa de causar uma redução na incidência solar sobre os painéis, o que reduz a geração de energia (Del Pero, 2021). Tanto que foi notado o impacto das chuvas dos dias 10 e 18 de outubro de 2021, evidenciadas na Fig. 9b, sobre a geração de energia, mostrada na Fig. 3, nos mesmos períodos. Este pode ter sido o motivo para as médias dos valores de geração de energia e potência da Tab. 4, em outubro de 2021, serem as menores, mesmo com a maior eficiência de conversão de energia, observada nos valores de PR da Tab. 5. Com precipitação baixa ou moderada, a geração de energia foi mais eficiente, porém menor.

#### 4.6 Influência da Umidade Relativa

As curvas de PR e umidade relativa do Setor C são mostradas na Fig. 10 para outubro de 2020, e na Fig. 11 para outubro de 2021 e 2022. Na Fig. 10a, foi utilizado o eixo horizontal de data, que agrupa os resultados de cada dia.

Comparando o gráfico com eixo de data da Fig. 10a, com o gráfico de eixo comum da Fig. 10b, verificou-se que o gráfico de eixo comum é mais suave e realista. Porém, algumas quedas de PR ficaram mais evidentes no gráfico com eixo de data. Tais quedas ocorreram nos dias 7 e 9 de outubro de 2020, e coincidiram com o início de um crescimento na curva de umidade relativa, a partir de 6 de outubro de 2020. Como a umidade relativa tem impacto negativo na geração de energia e na potência, o que também pode reduzir o PR, as mudanças nessas curvas podem estar relacionadas.

A elevação média da umidade relativa entre os dias 10 e 11 de outubro de 2021 teve alguns de seus picos sincronizados com vales das curvas de PR dos painéis dos inversores 1C, 2C e 4C. Além disso, alguns vales da curva de umidade relativa também ocorreram junto de picos das curvas de PR. Os picos de umidade relativa dos dias 12 e 13 de outubro de 2021 ocorreram junto de quedas nas curvas de PR, que duraram até o dia 14 de outubro de 2021.

As curvas de PR pareceram oscilar com pequena defasagem da curva de umidade relativa, entre 11 e 14 de outubro de 2022, com exceção do inversor 2C. O aumento da umidade relativa pode ter causado quedas de PR, como esperado.

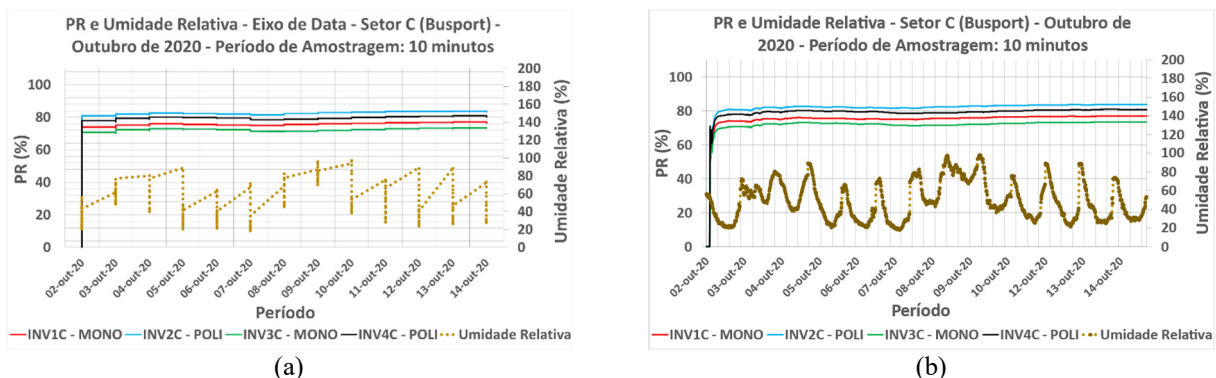


Figura 10 - Curvas de PR e umidade relativa para o Setor C, em outubro de 2020: (a) Eixo de data; (b) Eixo comum

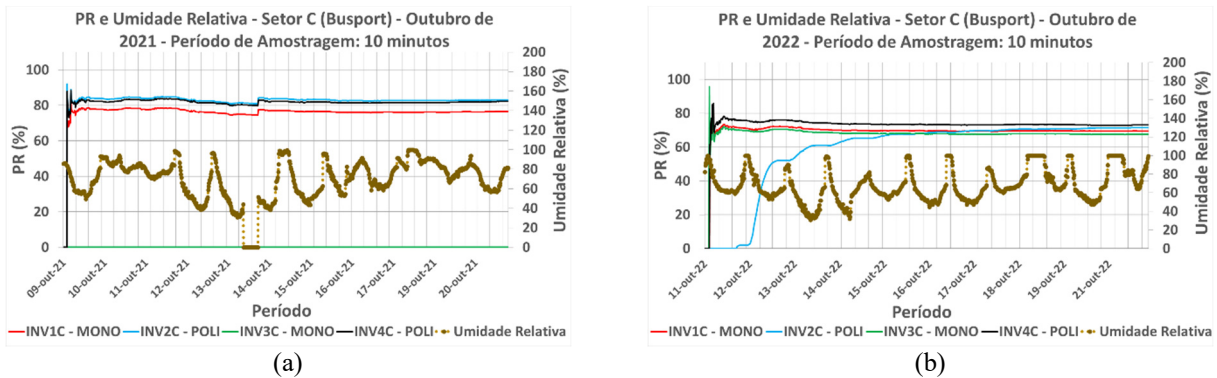


Figura 11 - Curvas de PR e umidade relativa para o Setor C: (a) Outubro de 2021; (b) Outubro de 2022

As médias dos valores de umidade relativa da Tab. 6 se mostraram coerentes com os resultados esperados. A influência da umidade relativa se deu mais sobre a geração de energia e potência que sobre o PR, ou seja, o maior valor de umidade relativa em outubro de 2021 pode ter feito a geração de energia e a potência serem as menores no mesmo período, mantendo o PR mais alto.

#### 4.7 Influência da Velocidade do Vento

As Figs. 12, 13 e 14 mostram as curvas de PR e velocidade do vento para os painéis do Setor C.

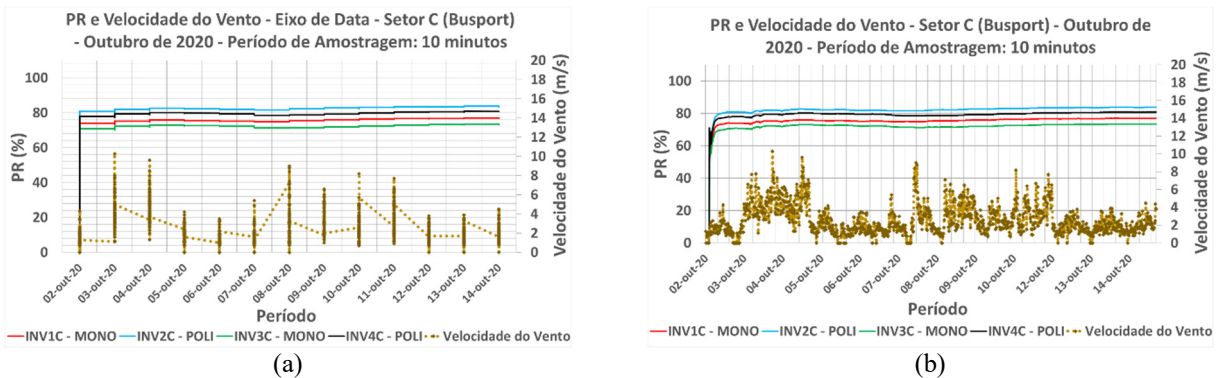


Figura 12 - Curvas de PR e velocidade do vento para o Setor C, em outubro de 2020: (a) Eixo de data; (b) Eixo comum

Na Fig. 12, a tendência de aumento na geração, potência e PR, esperada com o aumento da velocidade do vento, não pareceu ocorrer nas curvas de outubro de 2020. Alguns picos de velocidade do vento coincidiram com vales nas curvas de PR. Portanto, outros fatores podem ter tido maior influência nestes resultados. Porém, resultados relacionados à tecnologia das células sugeriram uma maior influência da velocidade do vento nos resultados.

Na Fig. 13, o centro das curvas de PR e velocidade do vento, entre 12 e 15 de outubro, pareceram mostrar mínimos globais que podem estar associados, mais evidentes no gráfico com eixo de data. Isso sugere que, em dias de ventos mais intensos, os painéis foram mais resfriados por convecção forçada, aumentando a eficiência de conversão de energia.

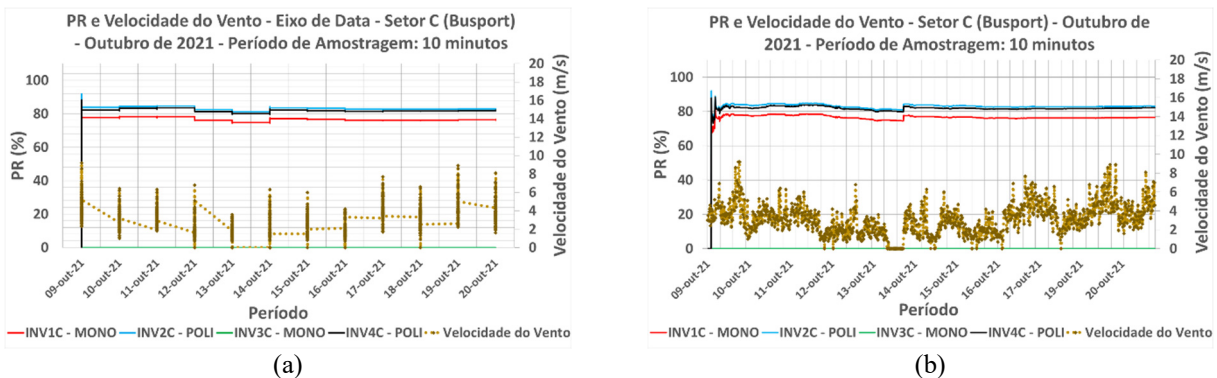


Figura 13 - Curvas de PR e velocidade do vento para o Setor C, em outubro de 2021. (a) Eixo de data; (b) Eixo comum

Os gráficos da Fig. 14 não permitiram tirar conclusões sobre a influência da velocidade do vento. Porém, as médias da Tab. 6 foram coerentes com os resultados esperados. Em 2021, houve a maior média de velocidade do vento, aumentando a eficiência de conversão de energia, refletida no PR. Por outro lado, 2022 teve a menor média de velocidade do vento e PR. A geração de energia e potência pareceram ter sofrido maior influência de outros parâmetros.



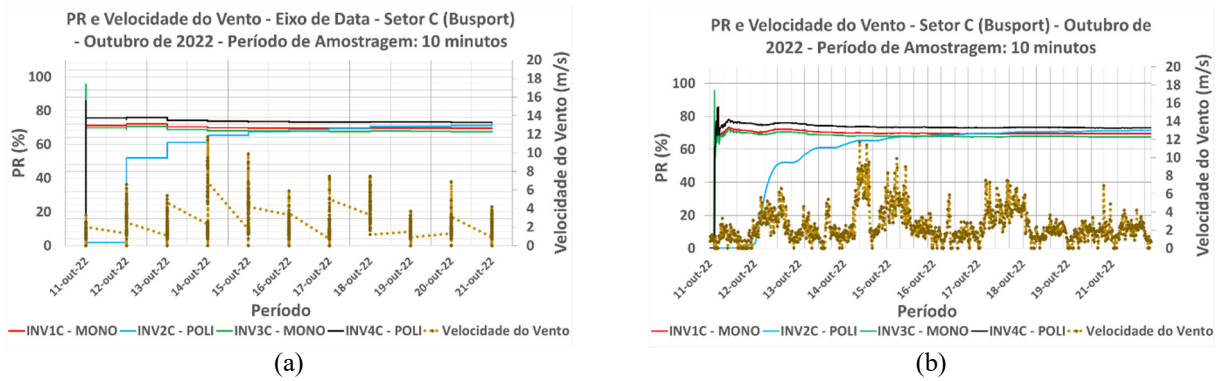


Figura 14 - Curvas de PR e velocidade do vento para o Setor C, em outubro de 2022. (a) Eixo de data; (b) Eixo comum

#### 4.8 Influência da Tecnologia da Célula Solar

A Fig. 15 mostra curvas das médias de PR por tecnologia (monocristalina ou policristalina).

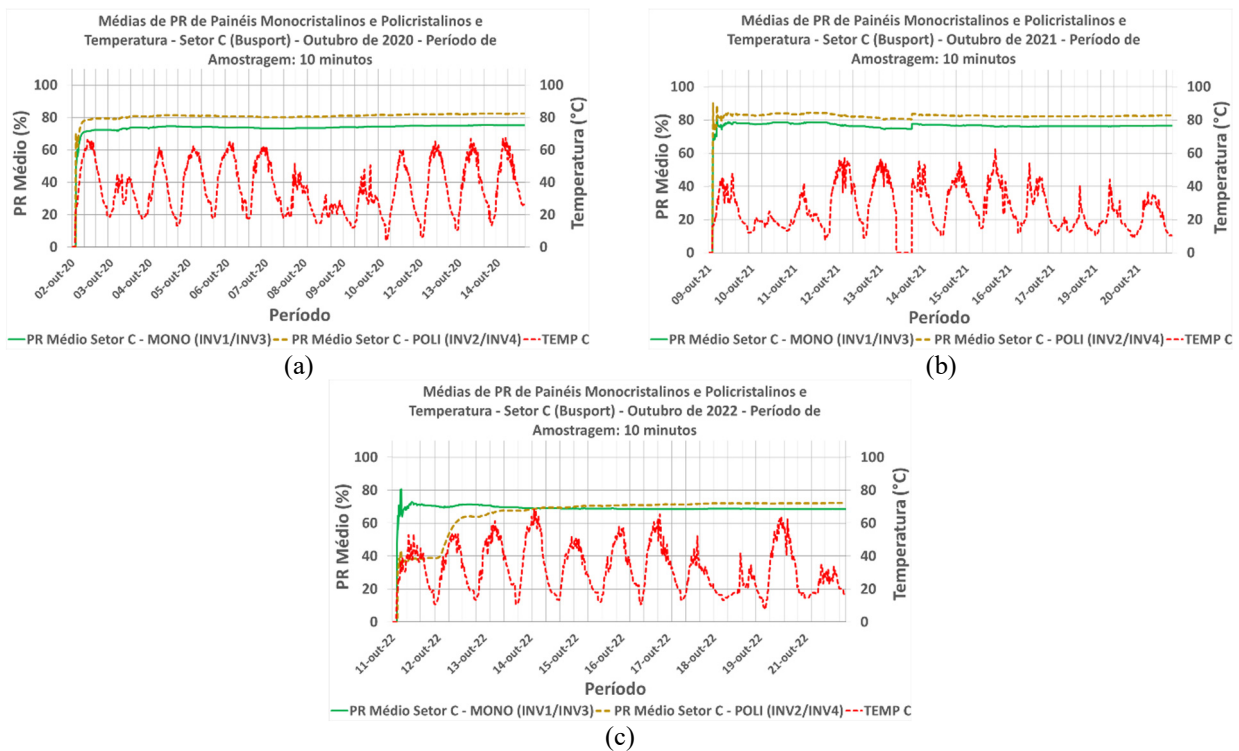


Figura 15 - Médias de PR por tipo de célula no Setor C: (a) Outubro de 2020; (b) Outubro de 2021; (c) Outubro de 2022

Ao contrário do que era esperado, em todos os períodos analisados, as curvas de PR dos painéis policristalinos foram superiores às curvas dos painéis monocristalinos. O período de outubro de 2021, mostrado na Fig. 15b, não foi considerado, devido à ausência de dados do inversor 3C (sendo a média dos painéis monocristalinos igual à média do inversor 1C). Da mesma forma, o início de outubro de 2022 não foi considerado, uma vez que a média de PR dos painéis policristalinos caiu devido a problemas no inversor 2C, o que foi normalizado após o dia 14 de outubro de 2022.

Resultados adicionais do Setor B da usina solar experimental da BYD mostraram maiores valores de PR para os painéis monocristalinos, em relação aos policristalinos. Como os painéis do Setor C estão em alturas maiores que os painéis do Setor B, a altura pode ter tido um importante papel sobre a temperatura dos painéis, o que influenciou os resultados de geração de energia e PR. Em alturas mais elevadas, os painéis ficam menos suscetíveis à influência do calor refletido pelo solo, e mais suscetíveis à troca de calor por convecção forçada, devido a velocidade de vento mais elevada.

### 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram aplicados dados de uma usina solar experimental, sob o clima do Sudeste do Brasil, para se analisar a influência da tecnologia das células solares e de fatores ambientais, como a temperatura, irradiância, precipitação, umidade relativa e velocidade do vento, na geração de energia, na potência e no PR dos painéis.

Os resultados apontaram como parâmetros de maior influência a temperatura, a irradiância e a tecnologia das células solares. A temperatura teve influência de parâmetros secundários, produzindo impacto direto nos resultados de PR. A

irradiância teve maior influência na geração de energia, bem como na temperatura. Em geral, ao contrário do que se esperava, células policristalinas apresentaram os maiores valores de PR.

Parâmetros como a precipitação e a velocidade do vento podem ter influenciado significativamente a temperatura e, indiretamente, a geração de energia, a potência e o PR. Além disso, observou-se mais formas de influência, como a limpeza dos painéis pela chuva, aumentando a geração de energia. A umidade relativa foi menos relevante nos resultados.

Este estudo contribuiu para a descrição do comportamento de células solares no clima da região Sudeste do Brasil. A metodologia foi validada, e poderá ser aplicada a conjuntos maiores de dados, permitindo verificar em mais detalhes a influência dos parâmetros aqui descritos, bem como a degradação dos painéis solares.

### **Agradecimentos**

O primeiro autor gostaria de agradecer ao Instituto de Pesquisas Eldorado, em parceria com a BYD Energy do Brasil, pela bolsa de estudos, que possibilitou a realização deste trabalho.

Os autores gostariam de agradecer a BYD Energy do Brasil pela contribuição técnica que viabilizou este trabalho.

Os autores gostariam de agradecer ao Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores (PADIS), pelo incentivo financeiro que tornou possível o projeto no qual este trabalho está inserido.

### **REFERÊNCIAS**

- Amy, D. E., 2006. Etude Du Comportement Thermique De Modules Photovoltaïques En Vue De La Prediction De Leur Production Electrique Sur Site. Tese de Doutorado, L'Universite de Provence, Provença, França.
- Banany, E. C., 2015. Outdoor Performance Analysis of a Monocrystalline Photovoltaic Module: Irradiance and Temperature Effect on Exegetic Efficiency, International Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 10(11), pp. 351-358.
- Beckman, W. A., 2013. Solar Engineering of Thermal Processes, Solar Energy Laboratory, 4th ed., University of Wisconsin-Madison, John Wiley & Sons.
- Cantor, G. A. R., 2017. Influência dos Fatores Climáticos no Desempenho de Módulos Fotovoltaicos em Regiões de Clima Tropical, Dissertação de Mestrado, UFPB, João Pessoa.
- Del Pero, C., 2021. Impact of Rain on Photovoltaic Systems, Renewable Energy, vol. 179, pp. 1803-1814.
- Karafil, A., 2016. Temperature and Solar Radiation Effects on Photovoltaic Panel Power, Journal of New Results in Science, vol. 5, pp. 48-58.
- Nascimento, L. R., Braga, M., Campos, R. A., Napolini, H. F., Rütther, R., 2020. Performance Assessment of Solar Photovoltaic Technologies Under Different Climatic Conditions in Brazil, Renewable Energy, vol. 146, pp. 1070-1082.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima, F. L., Rütther, R., Abreu, S. L., Tiepolo, G. M., Pereira, S. V., Souza, J. G., 2017. Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2ª ed., São José dos Campos: INPE.
- Scoplaki, E., Palyvos, J., 2009. On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: A Review of Efficiency/Power Correlations, Solar Energy, ed. 83, Atenas, Grécia.
- Stambuk, R. H., 2017. Influência da Temperatura de Operação no Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos, Monografia de Especialização, UTFPR, Curitiba.
- White, S., 2016. Solar Photovoltaic Basics, A Study Guide for the NABCEP Associate Exam, Routledge.

### **PERFORMANCE EVALUATION OF PV PANELS AT AN EXPERIMENTAL SOLAR POWER PLANT OPERATING IN THE CLIMATE OF THE SOUTHEAST REGION OF BRAZIL**

**Abstract.** Climatic aspects influence performance parameters of solar panels. Therefore, the study of these parameters must be carried out considering the region of operation, especially in countries with a large territorial extension, such as Brazil. Furthermore, the influence of climatic aspects may be different for each solar cell technology (monocrystalline or polycrystalline). In this work, data were collected from a BYD experimental solar power plant, located in the city of Campinas, São Paulo, in part of October 2020, October 2021 and October 2022. The panels used have different angles of incidence, heights and cell technologies. The analysis of angles and heights was necessary only to discern the influence of these parameters, in relation to climatic aspects and cell technologies. A calculation methodology was used on the data, with the aim of obtaining global values and Performance Ratio (PR) curves as a function of time. The results from each period were compared and analyzed considering environmental variables, such as temperature, irradiance, precipitation, relative humidity and wind speed, as well as cell technologies. As this is a first study of data from the mentioned solar power plant, referring to short periods, the conclusions were directed to the influence of the parameters mentioned in the PR, on energy generation and on the average power of the periods in the present.

**Keywords:** Performance Ratio, Data Analysis, Experimental Solar Power Plant