

AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DE PARÂMETROS ELÉTRICOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS COM CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO MULTICRISTALINO E MONOCRISTALINO

Taila Cristiane Policarpi – tailapolicarpi@gmail.com

Adriano Moehlecke

Izete Zanescio

Moussa Ly

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande Sul (PUCRS), Escola Politécnica,
Núcleo de Tecnologia em Energia Solar (NT-Solar)

Resumo. Módulos fotovoltaicos (FVs) são produzidos a partir de células solares, podendo essas apresentar variações nos seus parâmetros elétricos. O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados da caracterização elétrica de dois conjuntos de módulos FVs, sendo um composto por 70 módulos FVs de 325 W_p (Multi-325) com células solares de silício multicristalino e o outro de 68 módulos de 340 W_p (Mono-340), com células solares de silício monocristalino. Os módulos FVs foram caracterizados eletricamente sob condições padrão usando um simulador solar de tipo flash. Foram encontradas as funções de distribuição estatística que melhor se ajustaram aos parâmetros elétricos de cada conjunto. Observou-se que todos os módulos FVs apresentaram potência nominal acima do valor da ficha de dados. Para os módulos Multi-325, a potência média foi de 336,4 $W_p \pm 0,3\%$, 3,5 % acima do valor de folha de dados. Nos módulos Mono-340, a potência média foi de 346,5 $W_p \pm 0,6\%$, superior em 1,9 % ao valor da folha de dados. As funções Dagum e Log-Logistic mostraram ser as distribuições ótimas para modelar a distribuição da tensão de circuito aberto e a tensão no ponto de máxima potência, diferente de trabalhos anteriores em que funções Burr foram mais adequadas. Em relação a corrente elétrica no ponto de máxima potência, para os módulos Multi-325 e Mono-340 as funções de distribuição mais adequadas foram a Burr 4P e Frechat (3P), respectivamente, diferente de trabalhos anteriores em que as funções Weibull e Cauchy foram as ótimas para módulos FVs de silício multicristalino. A frequência da potência máxima foi ajustada pela distribuição Error para os módulos Multi-325 e pela Log-Logistic para os módulos Mono-340, também diferente frente a trabalhos anteriores. O estudo evidenciou que, para cada tipo de célula solar em módulos FVs e para cada parâmetro elétrico foram encontradas curvas de ajuste diferentes.

Palavras-chave: Módulos fotovoltaicos; Caracterização elétrica; Análise estatística

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

Devido as variações nas características das lâminas de silício e das diferentes etapas de fabricação das células solares, elas podem exibir variações em seus parâmetros elétricos. Por esta razão, os fabricantes selecionam e classificam as células solares de acordo com a I_{sc} dentro de uma faixa para a montagem dos módulos fotovoltaicos (FV). Quando se associam módulos FVs para montar um arranjo, os *softwares* de simulação geralmente atribuem um valor de 2 % para perdas na associação (Gasparin *et al.*, 2016). Isto significa que a potência total que pode ser obtida de um arranjo FV é menor do que a soma obtida dos módulos FVs individuais que integram o arranjo. Essa perda de potência é causada por dois mecanismos principais: resistência de elétrica e incompatibilidade (*mismatch*) por dispersão das características elétricas dos módulos, uma vez que é comum no processo de fabricação determinada variabilidade nos parâmetros das curvas I-V (Lorenzo e Zilles, 1991) (Gasparin *et al.*, 2016). Ao associar os módulos FVs em série, a corrente é limitada pelo módulo de menor corrente elétrica.

Na literatura, há alguns estudos sobre a distribuição estatística dos parâmetros elétricos de módulos fotovoltaicos fabricados com células solares de silício cristalino. Zilles e Lorenzo (1991) analisaram os parâmetros elétricos de 454 módulos, de dois modelos M75L e M40L, ambos com 33 células solares quadradas de silício monocristalino, instalados em diferentes sistemas no Instituto de Energia Solar da Universidade Politécnica de Madri. Os autores usaram o teste de Kolmogorov-Smirnov para selecionar a função estatística que melhor se adequou a frequência de ocorrência de corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), fator de forma (FF) e resistência em série (R_s). A análise estatística da distribuição de dados mostrou que V_{oc} , FF e R_s foram bem ajustados pela distribuição Normal, enquanto que o mesmo não ocorreu com a variável I_{sc} , que possuiu melhor ajuste com a função distribuição Weibull. Moreton *et al.* (2008) mediram as características elétricas de 2800 módulos FV em campo, isto é, medindo no local da instalação. O histograma da potência máxima de 2800 módulos apresentou o comportamento de uma distribuição normal, estando no intervalo de 200 a 235 W_p , com um valor médio de 219,9 W_p com um desvio padrão percentual de 2,6 %.

Gasparin e colaboradores (2016) apresentaram os resultados da análise estatística dos parâmetros elétricos de 105 módulos FVs com 60 células solares de silício multicristalino, com potência nominal de 245 W_p . Os módulos FVs foram caracterizados nas condições padrão utilizando um simulador tipo *flash* e com especificações superiores a classificação

AAA apresentada pela IEC 60904-9 (2007). Em relação a máxima potência (P_{MP}), observaram que o valor médio foi de $(249,2 \pm 1,5)$ W, ou seja, com um desvio padrão percentual da ordem de 0,4 %. Verificaram também que todos os módulos apresentaram potência maior que a nominal, principalmente pela maior corrente de curto-circuito e corrente de máxima potência (I_{MP}) medidas. Construíram histogramas com as curvas características da melhor função ajustada para a densidade de probabilidade para P_{MP} , I_{MP} , I_{SC} , V_{MP} (tensão elétrica de máxima potência), V_{OC} e FF que melhor descreveram os dados. Usaram a ferramenta *EasyFit*, da *Mathwave Technologies* (2019), que classifica diversas funções de densidade de probabilidade, juntamente com a curva de distribuição normal utilizada em trabalhos anteriores. Os autores relataram que para distribuição de valores de P_{MP} , V_{MP} e V_{OC} o melhor ajuste foi com a função Burr. Para I_{SC} , I_{MP} e FF, a distribuição de Weibull foi a que apresentou os menores índices no teste de Kolmogorov-Smirnov. Para os valores de FF, tanto a distribuição Burr quanto a Weibull se ajustaram aos dados (Gasparin *et al.*, 2016).

Moehlecke e colaboradores (2020) realizaram um trabalho que envolveu a caracterização de 84 módulos fotovoltaicos de 270 W_p com células solares de silício multicristalino antes de serem instalados em propriedade rural em Medianeira-PR. Foram comparados os resultados com os de Gasparin *et al.* (2016), sendo que foi utilizada a mesma ferramenta de análise. Os autores relataram que todos os módulos fotovoltaicos apresentaram potência nominal acima do valor de 270 W_p , estando no intervalo de 276,5 W_p a 281,6 W_p , sendo que o valor médio foi de $278,9 W_p \pm 0,3\%$. Em relação a V_{OC} , a distribuição de Burr 4P foi a que produziu melhor ajuste. Para a I_{SC} , a função distribuição de frequências ajustada foi a PERT, sendo similar a Burr. O histograma da corrente no ponto de máxima potência teve a função de Cauchy com o melhor ajuste ao histograma. Para o FF, o histograma foi melhor ajustado pela função Erro. Para o histograma das frequências de P_{MP} , a função Log Pearson III foi a que obteve o melhor ajuste considerando o método Kolmogorov-Smirnov, porém destacaram que a função Burr também poderia ser usada. Para a eficiência tanto dos módulos quanto das células, as funções Dagum e Jhonson SU foram as ajustadas, respectivamente (Moehlecke *et al.*, 2020).

Para proporcionar um estudo detalhado da inserção de sistemas fotovoltaicos em propriedades rurais no Oeste do Paraná, foi estabelecida a parceria entre a PUCRS (Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul), a Itaipu Binacional, a LAR Cooperativa Agroindustrial, a COPACOL (Cooperativa Agroindustrial Consolata), a C.VALE Cooperativa Agroindustrial, a OCEPAR (Sindicato e Organização das Cooperativas do Estado do Paraná), Programa Oeste em Desenvolvimento, Fundação Parque Tecnológico Itaipu e SEBRAE-PR (Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas do Estado do Paraná). O objetivo geral do projeto foi realizar a avaliação técnica e econômica da implantação de sistemas fotovoltaicos em propriedades rurais, avaliando os problemas de instalação e operação, as vantagens para os produtores rurais, os custos bem como outras características. Um dos objetivos específicos foi caracterizar eletricamente os módulos fotovoltaicos para os sistemas instalados e monitorar a performance destes durante três anos de operação (Moehlecke *et al.*, 2019; Moehlecke *et al.*, 2020). A Fig. 1 apresenta dois sistemas fotovoltaicos instalados no âmbito deste projeto, um em Cafelândia-PR, com módulos FVs de silício multicristalino e o outro em Assis Chateaubriand-PR, com módulos FVs de silício monocristalino (Moehlecke *et al.*, 2019).



Figura 1 - (a) Arranjo fotovoltaico instalado em propriedade rural em Cafelândia-PR, com módulos FVs de 325 W_p com células solares de silício multicristalino e em (b) Assis Chateaubriand-PR, com módulos FVs de 340 W_p com dispositivos de silício monocristalino.

O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados da caracterização elétrica de dois conjuntos de módulos fotovoltaicos com células solares de silício mono e multicristalino, encontrando as funções estatísticas que melhor representem a frequência dos parâmetros elétricos. Um conjunto de módulos FVs é composto por 70 módulos FVs de potência nominal de 325 W_p , de células solares de silício multicristalino, tendo sido instalado em um sistema FV em Cafelândia-PR. O segundo grupo foi formado por 68 módulos de 340 W_p de potência nominal, fabricado com células de silício monocristalino. Estes módulos FVs foram instalados em um sistema FV em Assis Chateaubriand-PR. Este trabalho busca também estabelecer comparações com os resultados encontrados por Moehlecke *et al.* (2020), Gasparin *et al.* (2016) e Zilles e Lorenzo (1991).

2. METODOLOGIA

Os módulos FVs de silício mono e multicristalino, de 340 W_p e 325 W_p, respectivamente, analisados neste trabalho são compostos de 72 células solares de 156 mm x 156 mm, tendo as seguintes dimensões: 1956 mm x 992 mm x 40 mm.

Os módulos fotovoltaicos foram caracterizados eletricamente sob condições padrão de ensaio (1000 W/m², espectro AM1,5G, 25 °C). O simulador solar, modelo PSS8 da empresa BERGER *Lichttechnik GmbH & Co. KG*, instalado no Laboratório de Classificação do Núcleo de Tecnologia em Energia Solar (NT-Solar), é mostrado na Fig. 2a. Este equipamento possibilita a caracterização elétrica de módulos fotovoltaicos segundo as normas do INMETRO e IEC 61215 (IEC 61215, 2005) (*International Electrotechnical Commission*). O simulador, segundo o fabricante, é classificado como A⁺A⁺A⁺, isto é, melhor que o especificado na norma IEC 60904-9, para estabilidade temporal (que é de 10 ms), uniformidade da irradiância no plano do módulo FV durante o tempo de medição e em relação ao espectro de irradiância incidente no módulo FV (espectro AM1,5G). A área máxima de teste é de 2,0 m x 1,4 m. Na Fig. 2b pode-se observar um módulo fotovoltaico de 325 W_p colocado na estrutura de fixação para medição das características elétricas. Antes da realização das medidas, o simulador foi calibrado com um módulo fotovoltaico padrão calibrado no ESTI-JRC (*European Solar Test Installation – Joint Research Centre*), da União Europeia, incidente no módulo FV.

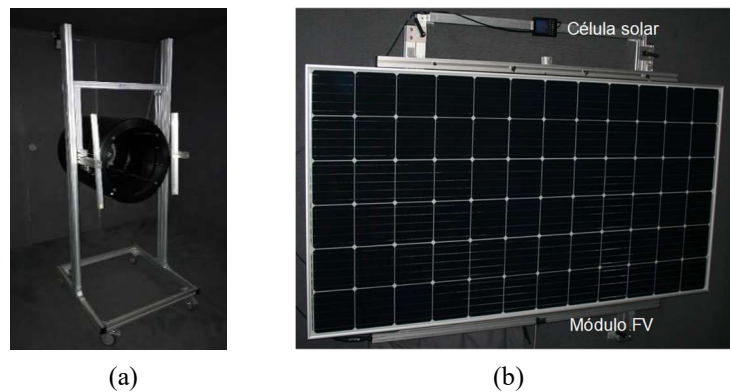


Figura 2 - (a) Fonte de irradiação do simulador solar PSS8 da empresa BERGER *Lichttechnik GmbH & Co. KG* e (b) módulo fotovoltaico de 325 W_p colocado na estrutura de fixação.

Os módulos fotovoltaicos foram caracterizados eletricamente obtendo-se a curva corrente-tensão elétrica (I-V). A partir desta curva, obtiveram-se os parâmetros elétricos: V_{OC}, I_{SC}, V_{MP}, I_{MP}, FF e P_{MP}. Após extraídos os parâmetros elétricos, realizou-se a análise de distribuições estatísticas utilizando o programa *EasyFit*, da *Mathwave Technologies*, determinando a melhor função de densidade de probabilidade que descreve a dispersão dos parâmetros. O método Kolmogorov-Smirnov foi utilizado para estabelecer a distribuição estatística que melhor se adequa aos parâmetros elétricos baseando-se em trabalhos anteriores de Zilles e Lorenzo (1991), Gasparin *et al.* (2016) e Moehlecke *et al.* (2020).

3. RESULTADOS E ANÁLISE

3.1 Parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos

A média e desvio padrão de cada parâmetro elétrico juntamente com as características elétricas que o fabricante do módulo FV apresenta na ficha de dados (*datasheet*) são mostradas na Tab. 1 para o conjunto de 70 módulos de 325 W_p com células solares de silício multicristalino. Na Tab. 2 os resultados para os 68 módulos de 340 W_p com células solares de silício monocristalino são apresentados. Também foram colocados em cada tabela os maiores e menores valores de cada parâmetro elétrico.

Para os módulos FVs de 325 W_p, a potência, I_{SC} e I_{MP} de todos os dispositivos foram maiores que os informados pelo fabricante. O desvio padrão percentual para os parâmetros elétricos ficou no intervalo de 0,13 % (para V_{OC}) a 0,53 % (para FF). A potência informada pelo fabricante foi de 325 W_p, porém a média foi de 336,4 W_p. O desvio padrão percentual da potência foi de 0,40 %. O maior valor medido para a potência chegou a 338,6 W_p e o menor foi de 334,3 W_p. Assim, todos os módulos tiveram sua potência superior ao valor fornecido pelo fabricante em um mínimo de 9,3 W.

Em relação aos parâmetros elétricos dos módulos FVs de 340 W_p, a potência, I_{SC} e I_{MP} apresentaram valores acima do informado pelo fabricante. O desvio padrão percentual para os parâmetros elétricos ficou no intervalo de 0,31 % (para I_{SC}) a 0,59 % para P_{MP}. A potência fornecida pelo fabricante foi de 340 W_p, mas a média foi de 346,5 W_p. O desvio padrão percentual da potência foi de 0,59 %. O maior valor medido para a potência chegou a 350,7 W_p e o menor a 341,6 W_p. Assim, todos os módulos tiveram sua potência superior ao valor fornecido pelo fabricante em um mínimo de 1,6 W_p, valor este dentro da incerteza da técnica utilizada.

Tabela 1 - Parâmetros elétricos dos 70 módulos de 325 W_p com 72 células solares de silício multicristalino e valores apresentados na ficha de dados do equipamento.

	V _{OC} (V)	I _{SC} (A)	FF (%)	V _{MP} (V)	I _{MP} (A)	P _{MP} (W)
Média	45,98 ± 0,06	9,44 ± 0,02	77,48 ± 0,25	37,65 ± 0,20	8,93 ± 0,04	336,4 ± 1,1
Menor valor	45,73	9,41	77,03	37,13	8,88	334,3
Maior valor	46,12	9,48	78,03	37,99	9,09	338,6
Ficha de dados	46,7	9,1	77,48	37,60	8,66	325

Tabela 2 - Parâmetros elétricos dos 68 módulos de 340 W_p com 72 células solares de silício monocristalino e valores apresentados na ficha de dados do equipamento.

	V _{OC} (V)	I _{SC} (A)	FF (%)	V _{MP} (V)	I _{MP} (A)	P _{MP} (W)
Média	46,17 ± 0,17	9,63 ± 0,03	77,89 ± 0,28	37,75 ± 0,16	9,18 ± 0,04	346,5 ± 2,06
Menor valor	45,83	9,56	77,27	37,11	9,11	341,6
Maior valor	46,50	9,70	78,54	37,98	9,26	350,7
Ficha de dados	47,1	9,24	78,12	38,70	8,79	340

3.2 Distribuições estatísticas dos parâmetros elétricos

As Figs. 3, 4, 5, 6, 7 e 8 apresentam os histogramas e função distribuição de frequências para V_{OC}, V_{MP}, I_{SC}, I_{MP}, FF e P_{MP}, respectivamente, para o conjunto de módulos de 325 W_p, comparando com as funções distribuição aplicadas por Moehlecke e colaboradores (2020) e Gasparin e colaboradores (2016).

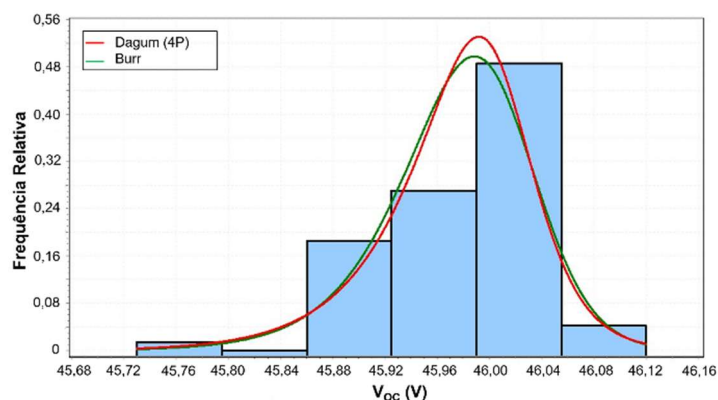


Figura 3 - Histograma e função de densidade de probabilidade para a V_{OC} dos módulos de 325 W_p. A linha vermelha é a função mais bem ajustada aos dados do histograma e a linha verde é a função distribuição de trabalho anterior (Gasparin *et al.*, 2016).

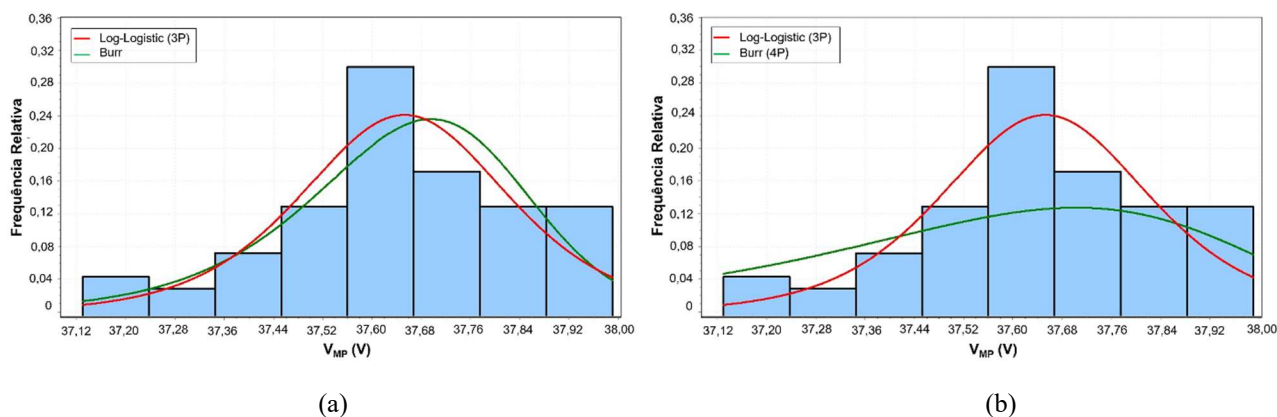


Figura 4 - Histograma e função de densidade de probabilidade para a V_{MP} dos módulos de 325 W_p com (a) melhor curva de ajuste (verde) para Gasparin *et al.* (2016) e (b) melhor curva de ajuste (verde) usada por Moehlecke e colaboradores (2020).

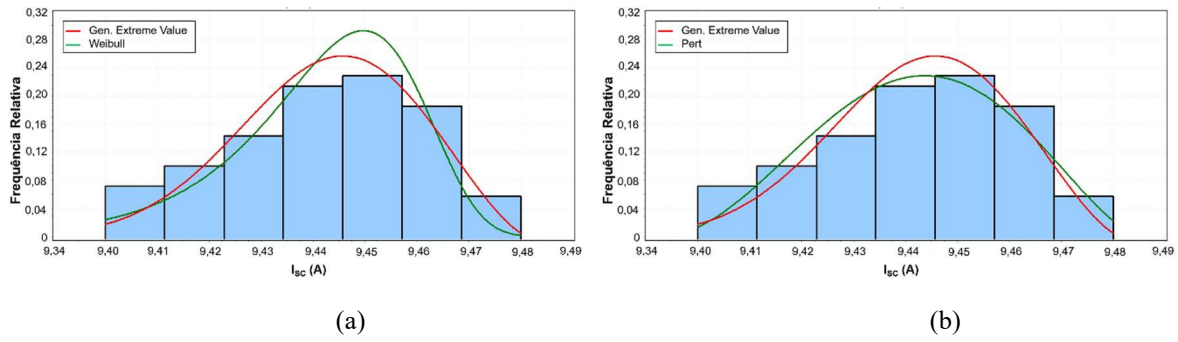


Figura 5 - Histograma e função de densidade de probabilidade para a I_{sc} dos módulos de 325 W_p com (a) melhor curva de ajuste (verde) para Gasparin e colaboradores (2016) e (b) melhor curva de ajuste (verde) para Moehlecke e colaboradores (2020).

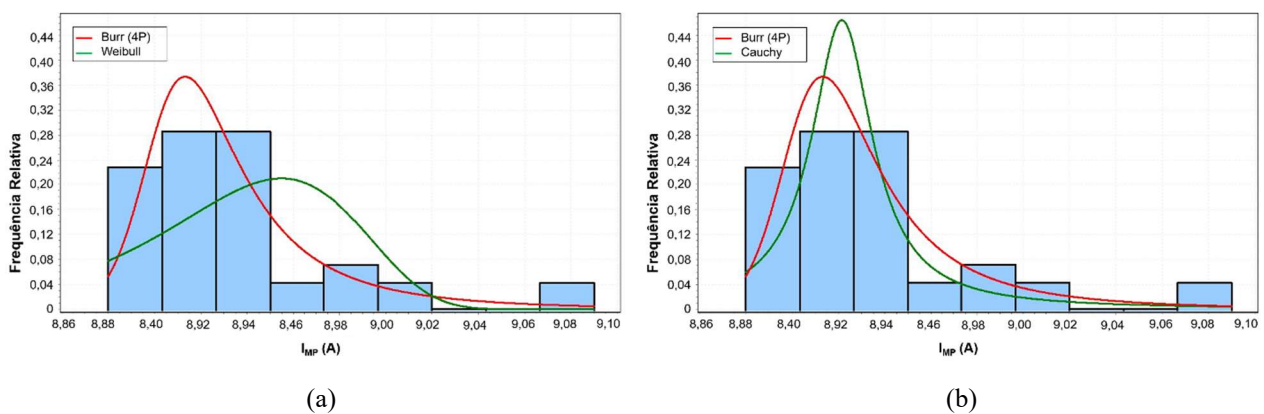


Figura 6 - Histograma e função de densidade de probabilidade para a I_{MP} dos módulos de 325 W_p com (a) melhor curva de ajuste (verde) para Gasparin e colaboradores (2016) e (b) melhor curva de ajuste (verde) para Moehlecke e colaboradores (2020).

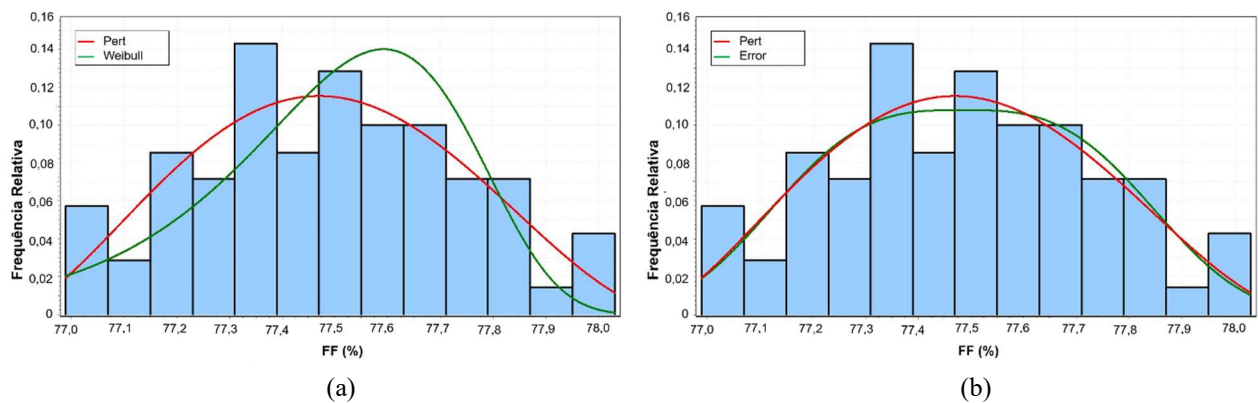


Figura 7 - Histograma e função de densidade de probabilidade para o FF dos módulos de 325 W_p com (a) melhor curva de ajuste (verde) usada em Gasparin *et al.* (2016) e (b) melhor curva de ajuste (verde) para Moehlecke *et al.* (2020).

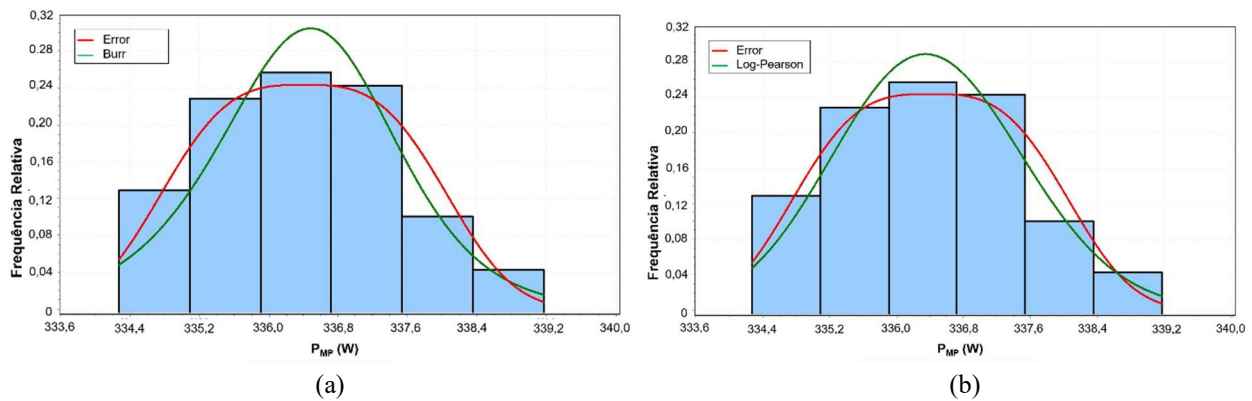


Figura 8 - Histograma e função de densidade de probabilidade para a P_{MP} dos módulos de 325 W_p com (a) melhor curva de ajuste (verde) para Gasparin *et al.* (2016) e (b) melhor curva de ajuste (verde) para Moehlecke *et al.* (2020).

Em relação a tensão de circuito aberto, a função distribuição Dagum (4P) foi a que teve melhor ajuste dos dados, sendo que a função Burr utilizada por Gasparin e colaboradores (2016) também se mostrou adequada. Já a função distribuição Burr (4P) utilizada por Moehlecke *et al.* (2020) não foi satisfatória. Para o parâmetro V_{MP} , a função com melhor ajuste foi a Log-Logistic (4P). A função Burr utilizada por Gasparin *et al.* (2016) também se mostrou adequada, enquanto a curva Burr (4P) utilizada por Moehlecke e colaboradores (2020) se ajustou apenas para menores frequências. A corrente de curto-circuito teve como melhor ajuste a função distribuição Generalized Extreme Value. A função de distribuição Weibull utilizada por Gasparin e colaboradores (2016) se mostrou adequada para maiores frequências. A função usada por Moehlecke e colaboradores (2020) foi a Pert que também se mostrou adequada para a I_{SC} . Para a corrente na máxima potência, a função distribuição Burr (4P) foi a que melhor se ajustou aos dados. A função Weibull utilizada por Gasparin e colaboradores (2016) não teve um ajuste satisfatório. A função Cauchy utilizada por Moehlecke e colaboradores (2020) se mostrou adequada para maiores frequências de I_{MP} . A função distribuição Pert foi a que teve melhor ajuste para o FF. A função ajustada para Gasparin e colaboradores (2016) foi a Weibull que não se mostrou simétrica para os dados obtidos. A função de distribuição utilizada por Moehlecke *et al.* (2020) para o FF foi a função Error, mas para os resultados dos módulos de 325 W_p , a função Pert foi a mais bem ajustada ao histograma. A função de distribuição da potência com melhor ajuste foi a Error e ambas as funções utilizadas por Gasparin e colaboradores (2016) e Moehlecke e colaboradores (2020), Burr e Log-Pearson 3, respectivamente, também se mostraram adequadas.

As Figs. 9, 10, 11, 12, 13 e 14 apresentam os histogramas e funções distribuição de frequências dos parâmetros elétricos do sistema com módulos FVs de 340 W_p . Além disso, é apresentada a curva da função encontrada por Gasparin e colaboradores (2016) e por Moehlecke e colaboradores (2020) para os dados dos módulos FVs analisados neste artigo.

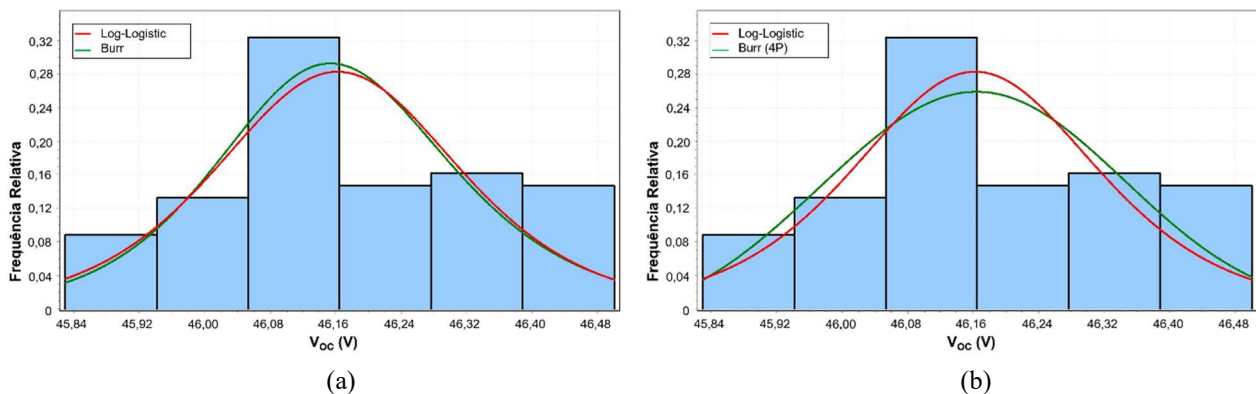


Figura 9 - Histograma e função de densidade de probabilidade para a V_{OC} dos módulos de 340 W_p com (a) melhor curva de ajuste para Gasparin *et al.* (2016) e (b) melhor curva de ajuste para Moehlecke *et al.* (2020). A linha vermelha é a função mais bem ajustada aos dados do histograma e a linha verde é a função distribuição de trabalho anterior.

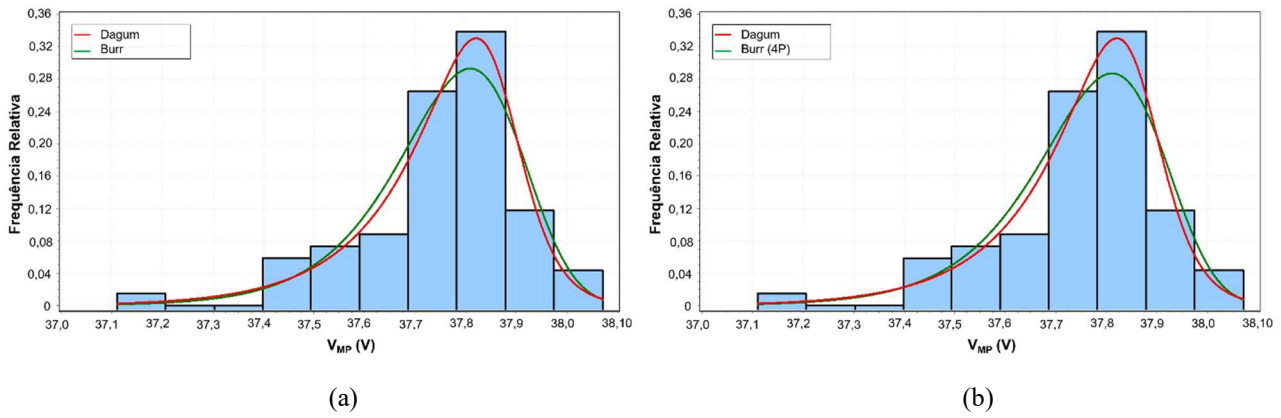


Figura 10 - Histograma e função de densidade de probabilidade para a V_{MP} dos módulos de 340 W_p com (a) melhor curva de ajuste (verde) para Gasparin e colaboradores (2016) e (b) melhor curva de ajuste (verde) para Moehlecke e colaboradores (2020).

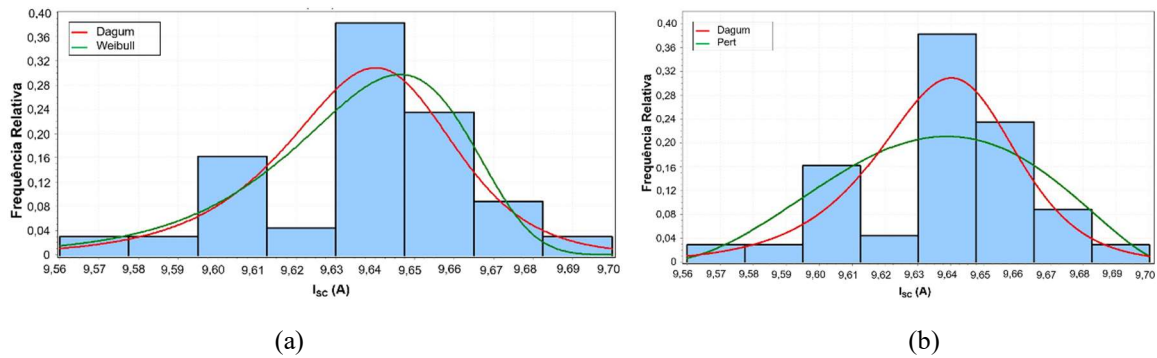


Figura 11 - Histograma e função de densidade de probabilidade para a I_{SC} dos módulos de 340 W_p com (a) melhor curva de ajuste (verde) para Gasparin e colaboradores (2016) e (b) melhor curva de ajuste para Moehlecke e colaboradores (2020).

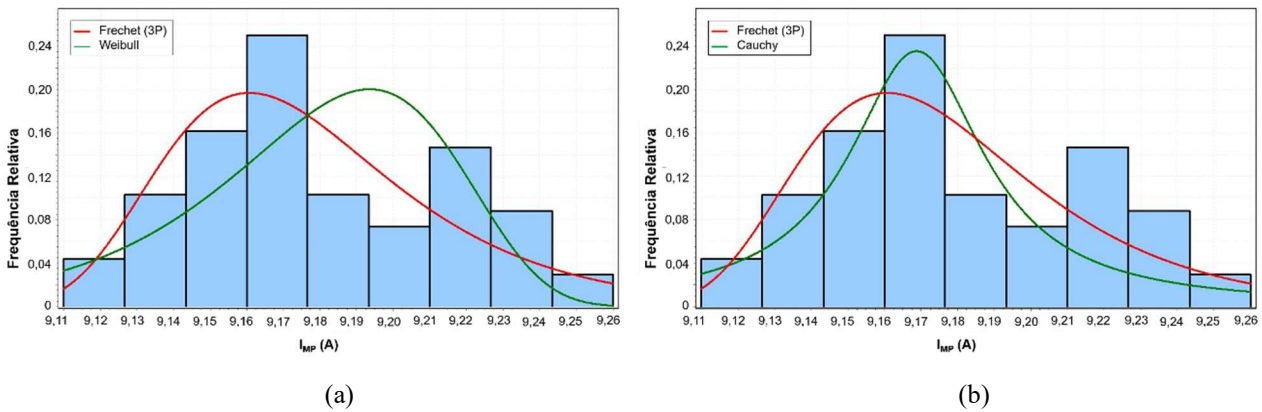


Figura 12 - Histograma e função de densidade de probabilidade para a I_{MP} dos módulos de 340 W_p com (a) melhor curva de ajuste para Gasparin e colaboradores (2016) e (b) melhor curva de ajuste para Moehlecke e colaboradores (2020).

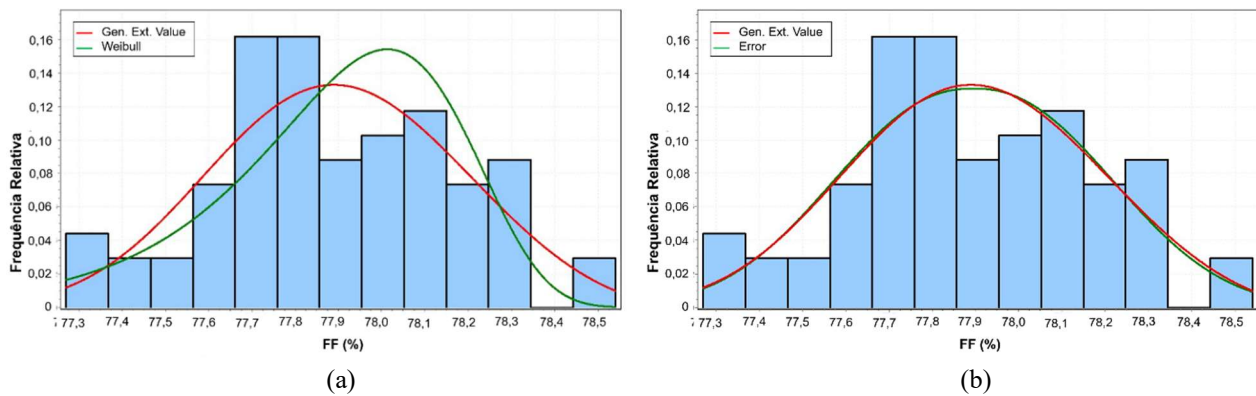


Figura 13 - Histograma e função de densidade de probabilidade para o FF dos módulos de 340 W_p com (a) melhor curva de ajuste (verde) para Gasparin e colaboradores (2016) e (b) melhor curva de ajuste (verde) para Moehlecke e colaboradores (2020).

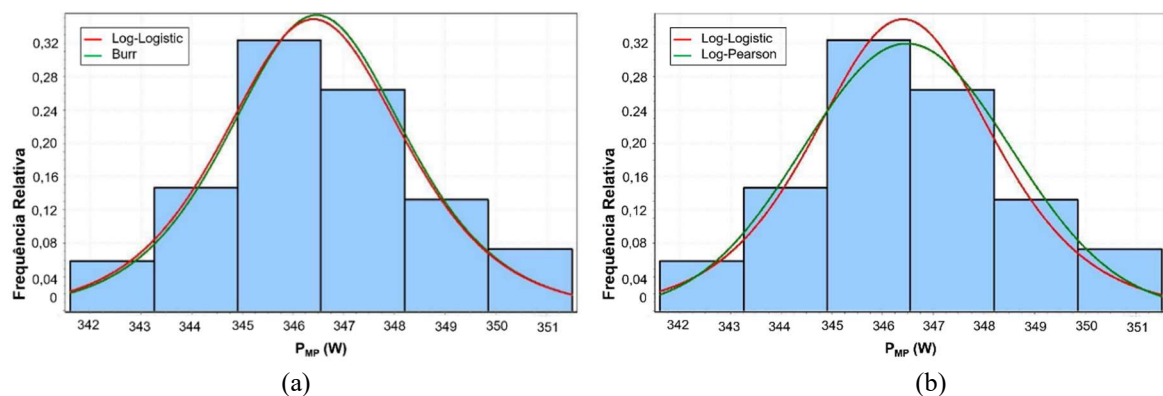


Figura 14 - Histograma e função de densidade de probabilidade para a P_{MP} dos módulos de 340 W_p com (a) melhor curva de ajuste (verde) para Gasparin *et al.* (2016) e (b) melhor curva de ajuste (verde) para Moehlecke *et al.* (2020).

Em relação a tensão de circuito aberto, cujo histograma é mostrado na Fig. 9, a função distribuição Log-Logistic foi a que teve melhor ajuste dos dados. A função distribuição Burr (4P) utilizada por Gasparin e colaboradores (2016) e a função Burr utilizada por Moehlecke e colaboradores (2020) foram simétricas a curva da função distribuição Log-Logistic, ambas se mostrando adequadas para descrever a V_{OC} . Para a V_{MP} , a função com melhor ajuste foi a Dagum. Em trabalhos anteriores a função distribuição Burr e a variante Burr (4P) foram as mais adequadas. Para a I_{SC} a função que melhor se ajustou aos dados do histograma foi a Dagum, sendo que a função Weibull utilizada por Gasparin e colaboradores (2016) também se mostrou adequada. Para a corrente elétrica no ponto de máxima potência a função distribuição Frechet (3P) foi a que melhor se ajustou aos dados. A função Weibull utilizada por Gasparin e colaboradores (2016) não teve um ajuste satisfatório, já que ficou deslocado para maiores valores de I_{MP} . A função Cauchy, utilizada por Moehlecke e colaboradores (2020) também se mostrou a adequada para descrever a análise estatística dos dados de I_{MP} . A função distribuição Generalized Extreme Value foi a que melhor se ajustou a frequência de FF. A função ajustada para Gasparin e colaboradores (2016) foi a Weibull, onde a curva se acentuou em maiores valores para FF, enquanto a curva utilizada por Moehlecke e colaboradores (2020) foi a função Error. Para a função distribuição da potência a função com melhor ajuste foi a Log-Logistic e ambas as funções utilizadas por Gasparin e colaboradores (2016) e Moehlecke e colaboradores (2020), Burr e Log-Pearson 3, respectivamente, também se mostraram adequadas. Tanto a função Log-logistic utilizada na potência, como a função Johnson SU utilizada por Moehlecke e colaboradores (2020) são simétricas a função Person 6 (4P) e adequadas para os dados analisados. A Tab. 3 resume as funções estatísticas apresentadas na literatura para os parâmetros elétricos de módulos FVs de silício cristalino bem como os resultados deste trabalho.

Tabela 3 - Resumo das funções de distribuição estatísticas utilizadas para ajustar os parâmetros elétricos dos módulos FVs de 325 W_p e 340 W_p comparando com as funções distribuição utilizada por Gasparin *et al.* (2016) e Moehlecke *et al.* (2020).

Parâmetro	Gasparin <i>et al.</i> (2016) Multi – 245 W	Moehlecke <i>et al.</i> (2020) Multi – 270 W	Multi – 325 W	Mono – 340 W
V _{OC}	<i>Burr</i>	<i>Burr (4P)</i>	<i>Dagum</i>	<i>Log-Logistic</i>
I _{SC}	<i>Weibull</i>	<i>Pert</i>	<i>General Extreme Value</i>	<i>Dagum</i>
FF	<i>Weibull</i>	<i>Error</i>	<i>Pert</i>	<i>General Extreme Value</i>
I _{MP}	<i>Weibull</i>	<i>Cauchy</i>	<i>Burr (4P)</i>	<i>Frechat (3P)</i>
V _{MP}	<i>Burr</i>	<i>Burr (4P)</i>	<i>Log-Logistic</i>	<i>Dagum</i>
P _{MP}	<i>Burr</i>	<i>Log-Person</i>	<i>Error</i>	<i>Log-Logistic</i>

4. CONCLUSÕES

Foram caracterizados eletricamente sob condições padrão 70 módulos FVs de 325 W_p, com células solares de silício multicristalino e 68 módulos de 340 W_p, fabricados com células solares de silício monocristalino. A caracterização elétrica dos módulos FVs antes da instalação nos sistemas fotovoltaicos mostrou que as potências medidas superaram as potências nominais. Para os módulos FVs de 325 W_p e 340 W_p, a potência média foi de 336,4 W e 346,5 W, respectivamente. Em resumo, da ordem de 3,5% a 2,0 % acima do valor nominal. Nenhum módulo FV apresentou potência abaixo do valor apresentado na folha de dados do fabricante.

Em relação a análise da distribuição estatística dos parâmetros elétricos com base no teste de Kolmogorov-Smirnov, várias funções foram consideradas para modelar os parâmetros elétricos. De acordo com os resultados deste teste, as funções Dagum e Log-Logistic mostraram ser as distribuições mais adequadas para modelar parâmetros elétricos específicos como a V_{OC} e V_{MP}. As distribuições Burr (para I_{MP}) e Pert (FF) também foram utilizadas para modelar parâmetros elétricos de módulos FVs de 325 W_p. As distribuições Burr (4P) e Frechat (3P) foram as mais adequadas aos histogramas de I_{MP} de módulos FVs de 325 W_p e 340 W_p, respectivamente. A função General Extreme Value foi a mais adequada para a distribuição de I_{SC} e de FF para os módulos FVs de 325 W_p e 340 W_p, respectivamente. Para os módulos FVs de 325 W_p, a função de distribuição estatística que melhor se ajustou ao histograma de valores de P_{MP} foi a Error e para para os módulos de 340 W_p foi a função Log-Logistic. Estas funções foram diferentes das ótimas apresentadas por Gasparin *et al.* (2016), que utilizou a Burr bem como da utilizada por Moehlecke *et al.* (2020). Destaca-se que neste último trabalho foram analisados módulos fotovoltaicos de 270 W_p (com 60 células solares) com a mesma tecnologia de fabricação e células solares e do mesmo fabricante dos módulos de 325 W_p (com 72 células solares) estudados neste trabalho. Este estudo evidencia que, para cada tecnologia de células solares usadas em módulos fotovoltaicos, a função de distribuição estatística que melhor se ajustou foi diferente para cada parâmetro elétrico.

Agradecimentos

Os autores agradecem à ITAIPU BINACIONAL, LAR, C.VALE, COPACOL, SEBRAE/PR e OCEPAR pela subvenção do projeto de P&D, Convênio n° 4500040746, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) e à Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

REFERÊNCIAS

- Gasparin, F.P., Bühler, A.J., Rampinelli, G.A., Krenzinger, A., 2016. Statistical analysis of I-V curve parameters from photovoltaic modules. *Solar Energy*, vol. 13, pp. 30-38.
- IEC 60904-9, 2007. International Electrotechnical Commission. Photovoltaic Devices – Part 9: Solar simulator performance requirements.
- IEC 61215, 2005. International Electrotechnical Commission. Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval; Edition 2.0.
- Mathwave Technologies, 2019. EasyFit. Disponível em: <http://www.mathwave.com/easyfit-distribution-fitting.html>
- Moehlecke, A., Araujo, N.D., Osorio, E.A.A., Ramanauskas, L.F.C., Zanescio, I., Osório, V.C., Grid connected PV systems in dairy and poultry farms in Brazil: evaluation of different installation approaches. *Proceedings of the Solar World Congress*, 2019, Santiago, pp. 1-9.

- Moehlecke, A, Zanesco, I., Kochenborger, A.S., Ly, M., Ramanauskas, L.F.C, Araujo, N.D., Crestani, T., Gonçalves, V.A., Osório, E.A.A., Aquino, J., Osório, V.C, Biazetto, F., Salvador, V.F., Accorsi, A.T., Lopes, B.K., 2020. Avaliação da distribuição estatística de parâmetros elétricos de módulos fotovoltaicos de silício multicristalino. In: VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, n. 8, 2020, Fortaleza. Congresso. Fortaleza: 2020. pp. 1-10.
- Moreton, R., Lorenzo, E., Martinez-Moreno, F., 2008. Field performance of PV modules quality control process. Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Valência, Espanha, pp. 2875-2877.
- Zilles, R., Lorenzo, E., 1991. Statistical analysis of current voltage characteristics of PV modules. International Journal of Solar Energy, vol. 9, n. 4, pp. 233-239.

STATISTICAL EVALUATION OF ELECTRICAL PARAMETERS OF PHOTOVOLTAIC MODULES WITH MULTICRYSTALLINE AND MONOCRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS

Abstract. Photovoltaic (PV) modules are manufactured from solar cells, which may exhibit variations in their electrical parameters. The aim of this study is to present the results of the electrical characterization of two sets of PV modules, one consisting of 70 PV modules of 325 W_p (Multi-325) with multicrystalline silicon solar cells and the other comprising 68 modules of 340 W_p (Mono-340) with monocrystalline silicon solar cells. Statistical distribution functions that best fit the electrical parameters of each set of PV modules were obtained. It was observed that all PV modules exhibited a nominal power exceeding the datasheet value. For the Multi-325 modules, the average power was $336.4 W_p \pm 0.3\%$, which is 3.5% above the datasheet value. In the case of Mono-340 modules, the average power was $346.5 W_p \pm 0.6\%$, representing a 1.9% increase over the datasheet value. Regarding statistical analysis, the Dagum and Log-Logistic functions were found to be the optimal distributions for modeling the open-circuit voltage and maximum power point voltage distribution, in contrast to previous studies where Burr functions were more suitable. Concerning the electrical current at the maximum power, for the Multi-325 and Mono-340 PV modules, the most appropriate distribution functions were Burr 4P and Frechat (3P), respectively, differing from previous research where Weibull and Cauchy functions were optimal for multicrystalline silicon PV modules. The maximum power frequency was adjusted by the Error distribution for Multi-325 modules and by the Log-Logistic distribution for Mono-340 modules, also different from previous work. The study showed that, for each type of solar cell in PV modules and for each electrical parameter, different optimum distribution functions were found.

Keywords: Photovoltaic modules; Electrical characterization; Statistical analysis.