

AValiação DA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DE PARÂMETROS ELÉTRICOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO MULTICRISTALINO

Adriano Moehlecke (PUCRS) - moehleck@pucrs.br

Izete Zanesco (PUCRS) - izete@pucrs.br

Augusto dos Santos Kochenborger (PUCRS) - augustokochen@gmail.com

Moussa ly ly (PUCRS) - moussa.ly@pucrs.br

Luiza Ferreira da Costa Ramanauskas (PUCRS) - ramanauskas.luiza@gmail.com

Nadine Demacena de Araujo (Instituição - a informar) - araujo.ndd@gmail.com

Thais Crestani (PUCRS) - realthaiscrestani@gmail.com

VANESSA ALVES GONÇALVES (PUCRS) - vanessaalvesgonc@gmail.com

Edson Alexandre Arévalo Osorio (PUCRS) - edson.osorio@outlook.com

Jéssica de Aquino (PUCRS) - jessicaaquino.rs@gmail.com

Vanessa da Conceição Osório (Instituição - a informar) - vanessa.osorio@pucrs.br

Fábio André Biazetto (PUCRS) - fabio.biazetto@outlook.com

Vítor Freire e Salvador (Instituição - a informar) - vitor.salvador@acad.pucrs.br

Arthur Torcati Accorsi (Instituição - a informar) - arthur.accorsi@edu.pucrs.br

Bruno Krever Lopes (pucrs) - bruno.lopes00@edu.pucrs.br

Resumo:

A indústria de células solares e de módulos fotovoltaicos vem evoluindo nas últimas décadas com maior controle de processos e automação, reduzindo a dispersão nos parâmetros elétricos medidos sob condições padrão. A maioria dos módulos fotovoltaicos com células solares de silício multi ou monocristalino para uso em sistemas conectados à rede elétrica apresentam a potência nominal com tolerância positiva. O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados da caracterização elétrica de 84 módulos de 270 Wp com células solares de silício multicristalino e a análise estatística de seus parâmetros elétricos, comparando com resultados anteriormente publicados. Os módulos fotovoltaicos foram caracterizados eletricamente usando um simulador solar de tipo flash, classe AAA. Pela ficha de dados do módulo comercializado, a potência é de 270 Wp + 3 %. Observou-se que todos os módulos fotovoltaicos apresentaram potência nominal acima do valor de 270 Wp, estando no intervalo de 276,5 Wp a 281,6 Wp, sendo que o valor médio foi de 278,9 Wp ± 0,3%. Em relação a análise estatística, constatou-se que as distribuições de frequências de Burr ou a variante Burr 4P podem ser usadas para a VOC e a VMP, também previamente aplicada em trabalhos anteriores que trataram da análise estatística de parâmetros elétricos de módulos fotovoltaicos. A função distribuição mais adequada para a ISC mostrou ser a PERT e para a IMP foi a Cauchy, diferente de trabalhos anteriores que ajustaram os histogramas com curvas de distribuição de frequências Burr e Weibull, respectivamente. A distribuição de frequências de IMP é assimétrica, com 87% dos valores para correntes mais altas. O histograma de frequências para o FF foi ajustado com a função Erro. A frequência de medidas de potência máxima foi ajustada pela distribuição de Log-Pearson III, mas com pequenas diferenças gráficas com a distribuição de Burr usada em trabalhos anteriores.

Palavras-chave: *Módulos fotovoltaicos, caracterização elétrica, análise estatística.*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Tecnologias e ensaios de módulos fotovoltaicos*

AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DE PARÂMETROS ELÉTRICOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO MULTICRISTALINO

Adriano Moehlecke – moehleck@puccrs.br
Izete Zanesco – izete@puccrs.br
Augusto dos Santos Kochenborger – augustokochen@gmail.com
Moussa Ly – moussa.ly@puccrs.br
Luiza Ferreira da Costa Ramanauskas – ramanauskas.luiza@gmail.com
Nadine Demacena de Araujo – araujo.ndd@gmail.com
Thais Crestani – realthaiscrestani@gmail.com
Vanessa Alves Gonçalves – vanessaalvesgonc@gmail.com
Edson Alexandre Arévalo Osorio – edson.osorio@outlook.com
Jéssica de Aquino – jessicaaquino.rs@gmail.com
Vanessa da Conceição Osório – vanessa.osorio@puccrs.br
Fábio Biazetto – fabio.biazetto@acad.puccrs.br
Vitor Freire E Salvador – vitor.salvador@acad.puccrs.br
Arthur Torcati Accorsi – arthur.accorsi@edu.puccrs.br
Bruno Krever Lopes – bruno.krever@acad.puccrs.br

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

Resumo. A indústria de células solares e de módulos fotovoltaicos (FV) vem evoluindo nas últimas décadas com maior controle de processos e automação, reduzindo a dispersão nos parâmetros elétricos medidos sob condições padrão. A maioria dos módulos fotovoltaicos com células solares de silício multi ou monocristalino para uso em sistemas conectados à rede elétrica apresentam a potência nominal com tolerância positiva. O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados da caracterização elétrica de 84 módulos FVs de 270 W_p com células solares de silício multicristalino e a análise estatística de seus parâmetros elétricos, comparando com resultados anteriormente publicados. Os módulos fotovoltaicos foram caracterizados eletricamente usando um simulador solar de tipo flash, classe AAA. Pela ficha de dados do módulo comercializado, a potência é de 270 $W_p + 3\%$. Observou-se 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 análise estatística, constatou-se que as distribuições de frequências de Burr ou a variante Burr 4P podem ser usadas para a V_{OC} e a V_{MP} , também previamente aplicada em trabalhos anteriores que trataram da análise estatística de parâmetros elétricos de módulos fotovoltaicos. A função distribuição mais adequada para a I_{SC} mostrou ser a PERT e para a I_{MP} foi a Cauchy, diferente de trabalhos anteriores que ajustaram os histogramas com curvas de distribuição de frequências Burr e Weibull, respectivamente. A distribuição de frequências de I_{MP} é assimétrica, com 87% dos valores para correntes elétricas mais altas. O histograma de frequências para o fator de forma foi ajustado com a função Erro. A frequência de medidas de potência máxima foi ajustada pela distribuição de Log-Pearson III, mas com pequenas diferenças gráficas com a distribuição de Burr usada em trabalhos anteriores.

Palavras-chave: Módulos fotovoltaicos, caracterização elétrica, análise estatística.

1. INTRODUÇÃO

O mercado brasileiro para sistemas fotovoltaicos vem crescendo a taxas elevadas nos últimos anos. A geração distribuída com o sistema de compensação de energia, regulamentada em 2012, atingiu taxas de crescimento da ordem de 3 a 4 vezes ao ano, principalmente em sistemas de pequeno porte para residências e de médio porte para prédios comerciais em áreas urbanas (Faria Jr. *et al.*, 2017; Moehlecke e Zanesco, 2018). Até novembro de 2019, a potência instalada no Brasil em sistemas fotovoltaicos era de 4,1 GW, sendo que destes, 1,8 GW (44 %) eram de sistemas de geração distribuída (ANEEL^{a,b}, 2019).

Para serem comercializados no Brasil, os módulos devem ser etiquetados pelo INMETRO (Instituto Brasileiro de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial), conforme portaria nº 004 de 2011. Em 2002, o INMETRO implantou o grupo de trabalho de sistemas fotovoltaicos para estabelecer as normas para etiquetagem dos componentes de sistemas fotovoltaicos, como parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), a partir de um acordo entre o

INMETRO e a ABEER (Associação Brasileira de Empresas de Energias Renováveis e Eficiência Energética) (Galdino *et al.*, 2005). O grupo de trabalho é constituído por representantes de órgãos governamentais, universidades, empresas e associações. Inicialmente a etiquetagem foi focada em módulos fotovoltaicos de células solares de silício cristalino, inversores, controladores de carga e baterias para sistemas fotovoltaicos autônomos. Em relação aos módulos fotovoltaicos, um dos mais importantes testes implementados é a medição da curva da corrente elétrica em função da tensão aplicada (curva I-V) em condições padrão de medição (STC, *Standard Test Conditions*), conforme a norma IEC 61215, *International Electrotechnical Commission* (IEC 61215, 2005). As condições padrão para medição são: irradiância de 1000 W/m², espectro solar AM 1,5G e temperatura de operação de 25 °C. Os principais parâmetros elétricos obtidos a partir da curva I-V são: potência máxima (P_{MP}), tensão de circuito aberto (V_{OC}), tensão no ponto de máxima potência (V_{MP}), corrente de curto-circuito (I_{SC}), corrente no ponto de máxima potência (I_{MP}), fator de forma (FF) e eficiência de conversão de energia solar em elétrica ($\eta_{MÓD}$).

No estudo realizado por Araujo^a *et al.* (2018), quando se analisaram as características elétricas dos módulos fotovoltaicos etiquetados pelo INMETRO e comercializados no Brasil, constatou-se que 74 % dos módulos fotovoltaicos (FV) foram produzidos com células solares de silício multicristalino (Si-mc) e 26 % foram fabricados com células de Si monocristalino. Dos módulos fotovoltaicos com células solares de Si monocristalino Cz (Czochralski), 70 % apresentaram potência no intervalo de 200 W a 350 W enquanto que a potência foi de 225 W a 325 W para 80 % dos dispositivos com Si-mc. Para as duas tecnologias de células solares, a eficiência da maioria dos módulos FV foi de 14 % e 18 %. Da mesma forma, para a maior parte dos módulos fotovoltaicos, a corrente elétrica de curto-circuito foi de 8 A a 10 A. Aproximadamente 82 % dos módulos com células de Si-Cz apresentaram V_{OC} entre 35 V e 50 V e, para 99 % dos dispositivos com células solares de Si-mc, a V_{OC} foi de 20 V a 50 V (Araujo^a *et al.*, 2018)

Os módulos fotovoltaicos de silício cristalino, embora fabricados com o mesmo tipo de célula solar, apresentam variações em suas características elétricas devido a que os processos de fabricação das células solares, que apresentam variações de dispositivo para dispositivo ou de lote para lote. Por exemplo, difusões de fósforo para produzir o emissor de células solares n⁺pp⁺ podem apresentar menor homogeneidade entre as 200 lâminas processadas em um lote, acarretando em diferenças nas características elétricas das células solares. Estas são classificadas segundo as características elétricas e, desta forma, são produzidos módulos FVs com diferentes potências. Como se pode observar pela análise de diferentes fabricantes de módulos FVs, há diversas potências de módulos FVs para a mesma tecnologia de fabricação, com variações da ordem de 5 W entre eles, resultado da classificação das células solares antes da montagem dos módulos FVs. Enquanto nos anos de 1990 e 2000 os módulos FVs eram comercializados com tolerância na potência nominal de $\pm 10\%$ e depois de $\pm 5\%$, atualmente a maioria apresenta tolerância positiva da ordem de $+3\%$ da potência nominal comercializada. Isto se deve ao desenvolvimento a que alcançou a indústria de células e módulos fotovoltaicos, com alto grau de controle de cada etapa do processo de fabricação e da automação nas linhas de produção, sendo classificadas todas as células solares e os módulos FVs com simuladores solares tipo *flash*.

Em relação a distribuição estatística dos parâmetros elétricos de módulos FVs, Zilles e Lorenzo (1991), realizaram um estudo com módulos FVs que usavam células de silício multicristalino (BP340) e monocristalino tipo Cz (M75L, M40L e ISO90). Três módulos eram formados por 36 ou 33 células conectadas em série, configuração típica para aplicação em sistemas isolados da rede elétrica. Um continha 72 células fotovoltaicas (ISO 90), mas também com uma associação em paralelo para obter tensões de circuito aberto da ordem de 21 V. Foram obtidas as características elétricas sob condições padrão (irradiância de 1000 W/m², espectro AM 1,5G e temperatura de operação de 25 °C) de 235 módulos fotovoltaicos BP340, 242 M75L, 212 M40L e 103 IS90. Em relação a potência máxima, observaram que o desvio padrão percentual foi da ordem 2 % a 3 %. Pelos resultados de desvio padrão de I_{SC}, que foram da mesma ordem, atribuíram a este parâmetro a maior importância na variabilidade da potência máxima. Foi observado que a distribuição estatística da tensão de circuito aberto e fator de forma foi melhor ajustada com uma distribuição normal. Para o caso da I_{SC}, a distribuição de Weibull foi a que obteve o melhor ajuste considerando o teste de Kolmogorov-Smirnov. Os autores não relataram diferenças entre as distribuições estatísticas dos parâmetros elétricos dos diferentes módulos fotovoltaicos analisados, mesmo sendo de fabricantes diferentes e de células solares com silício mono e multicristalino. Moreton *et al.* (2008) mediram as características elétricas de 2800 módulos FV em campo, isto é, medindo no local da instalação. Caracterizaram da ordem de 150 a 200 módulos por dia de janeiro a abril de 2008. 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 219,87 W_p com um desvio padrão percentual de 2,57 %. Moreton e colaboradores (2008) também compararam os valores medidos em simulador com as medidas realizadas em campo e constataram que a P_{MP} média era praticamente a mesma, mas o desvio padrão percentual das medidas em campo foi maior que o obtido em medidas com simuladores com *flash*, devido as condições de campo e as correções de irradiância e temperatura. Gasparin *et al.* (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 e comercializados no Brasil. As características nominais dos módulos FVs foram: P_{MP} = 245,0 (-0~+5W), I_{MP} = 8,11 A, V_{MP} = 30,2 V, I_{SC} = 8,63 A, V_{OC} = 37,8 V e FF = 75 %. Os módulos FVs foram caracterizados nas condições padrão utilizando um simulador tipo *flash* (tempo de duração de 10 ms) e com especificações superiores a classificação AAA apresentada pela IEC 60904-9 (2007). Em relação a P_{MP}, observaram que o valor médio foi de (249,18 \pm 1,51) W, ou seja, com um desvio padrão percentual da ordem de 0,4 %. Verificaram também que todos os módulos medidos apresentaram potência maior que a nominal, principalmente pela maior I_{SC} e I_{MP} medidas. A corrente elétrica média dos 105 módulos FVs foi da ordem de 4 % acima do valor nominal e a tensões elétricas (V_{OC} e V_{MP}) foram entre 1 % e 2 % menores. O fator de forma médio foi da ordem de 1,7 % menor que o nominal. Em relação as distribuições estatísticas, constataram

que a distribuição de Burr é a que melhor se ajustou aos valores de P_{MP} , V_{MP} e V_{OC} . Por outro lado, a dispersão dos valores de I_{SC} , I_{MP} e FF foram ajustadas pela distribuição de Weibull com menores índices no teste de Kolmogorov-Smirnov. Os autores comentaram que uma seleção dos módulos FVs em fileiras baseados em valores de I_{MP} (para conexão em série) teriam relativamente pequenos ganhos de potência tendo em vista que os fabricantes estão medindo as características elétricas de todos os módulos FVs pós-produção e realizando uma seleção por potência nominal (Gasparin *et al.*, 2016).

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 é 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 é caracterizar eletricamente os módulos fotovoltaicos para os sistemas implantados e monitorar a performance destes durante três anos de operação.

O objetivo geral deste trabalho é apresentar os resultados da caracterização elétrica de 84 módulos FVs de 270 W_p com células solares de silício multicristalino e a distribuição estatística de seus parâmetros elétricos, comparando com resultados anteriores da análise estatística referente a módulos FVs comercializados no Brasil. Estes módulos FVs foram instalados em uma propriedade rural em Medianeira, Paraná, sobre um galpão, inclinados de 18° (Araújo^b *et al.*, 2018), formando um sistema fotovoltaico de 20 kW_p , conectado à rede em abril de 2018. A Fig. 1 mostra o arranjo FV formado com os módulos fotovoltaicos.



Figura 1 - (a) Arranjo fotovoltaico instalado na propriedade rural em Medianeira-PR e (b) detalhe da instalação dos módulos fotovoltaicos, com inclinação de 8° sobre um telhado inclinado de 10° para atingir o ângulo de 18° para a maior produtividade anual para a região de Medianeira, PR (Araujo^b *et al.*, 2018; Moehlecke *et al.* 2019)

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a implantação de um sistema fotovoltaico de 20 kW , foram adquiridos 84 módulos fotovoltaicos de 270 W_p , com 60 células solares de silício multicristalino de 156 mm x 156 mm (com quatro barras coletoras, *busbars*). Os módulos FVs tem as seguintes dimensões: 1,650 m x 0,992 m, 0,040 m. Além da identificação pelo código de barras, enumeraram-se os módulos de A1 ao A84.

Todos os módulos FVs passaram por inspeção visual antes da caracterização elétrica para identificação de possíveis defeitos visíveis a olho nu, sendo gerado um relatório de defeitos de metalização, de filme antirreflexo, de riscos no vidro entre outros.

Os módulos FVs foram caracterizados sob condições padrão utilizando um simulador solar, modelo PSS8 da empresa BERGER Lichttechnik GmbH & Co. KG, instalado no Laboratório de Classificação do NT-Solar. Este equipamento possibilita a caracterização elétrica de módulos fotovoltaicos segundo as normas do INMETRO e IEC. Na Fig. 2 pode-se observar o sistema de irradiação do simulador e um módulo fotovoltaico de 270 W_p colocado na estrutura de fixação para realização da medida de suas 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. O simulador, segundo o fabricante, é classificado com A⁺A⁺A⁺, isto é, melhor que o especificado na norma IEC 60904-9, para estabilidade temporal durante o tempo de medição (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 do *flash*, comparado ao espectro AM1,5G. A área máxima de teste é de 2,0 m x 1,4 m.

Para que os módulos estivessem na temperatura padrão de 25 °C, a sala onde estava a caixa com os módulos e onde se fazia a limpeza e análise visual foi mantida em temperatura próxima de $(25,0 \pm 0,5)$ °C. Depois da instalação do módulo na estrutura de fixação, aguardava-se até que a temperatura do módulo fosse de $(25,0 \pm 0,1)$ °C.

Os módulos fotovoltaicos foram caracterizados eletricamente obtendo-se a curva I-V. A partir desta curva, obtiveram-se os parâmetros elétricos: V_{OC} , I_{SC} , V_{MP} , I_{MP} , P_{MP} , FF e $\eta_{MÓD}$. Sabendo-se a área do módulo e das células solares, estima-se a eficiência de conversão de energia das células solares ($\eta_{CÉL}$). Esta é a eficiência da célula solar encapsulada, considerando a reflexão no vidro e as múltiplas reflexões.

Com os parâmetros elétricos medidos, se realizou uma análise de distribuições estatísticas utilizando o programa Easy Fit, da Mathwave Technologies (2019), que classifica as funções estatísticas segundo seu ajuste aos dados experimentais. Utilizou-se o método de Kolmogorov-Smirnov para estabelecer a distribuição estatística que melhor se adequou aos parâmetros elétricos, método usado em trabalhos anteriores sobre a distribuição relativa de frequências de parâmetros de módulos fotovoltaicos (Zilles e Lorenzo, 1991; Gasparin *et al.*, 2016), embora o programa Easy Fit permita utilizar outros métodos.

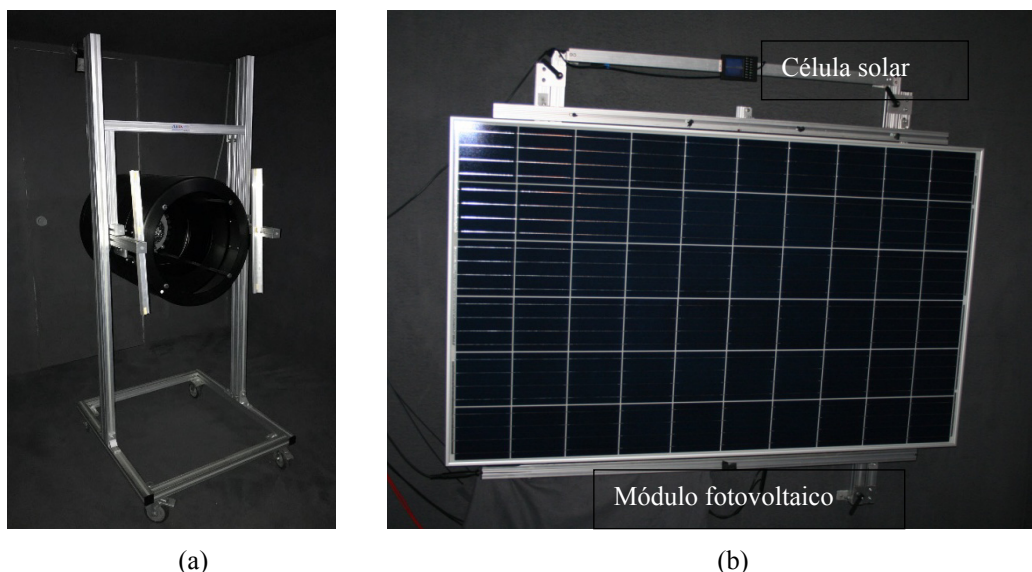


Figura 2 - (a) Unidade de irradiação (*flash*) do simulador solar PSS8 da empresa BERGER Lichttechnik GmbH & Co. KG e (b) módulo fotovoltaico de 270 W_p colocado na estrutura de fixação para medição da curva característica de corrente elétrica em função da tensão elétrica (I-V). Na parte acima do módulo, há uma célula solar padrão para medir a irradiância incidente.

3. RESULTADOS E ANÁLISE

A média e desvio padrão de cada parâmetro elétrico dos 84 módulos, nomeados com número A1 até A84, foi calculada e os valores estão na Tab. 1 juntamente com as características elétricas que o fabricante do módulo apresenta na ficha de dados (*datasheet*). Também foram colocados na Tab. 1 os maiores e menores valores de cada parâmetro elétrico. Para a potência máxima, o desvio padrão percentual é de somente $\pm 0,3$ %. Para a corrente no ponto de máxima potência, parâmetro que pode ser usado para classificar módulos FVs em uma mesma fileira com módulos conectados em série, o desvio padrão percentual foi de 0,5 %. O intervalo de variação de corrente foi de somente 0,22 A, o que destaca a não necessidade de uma classificação para obtenção de maiores potências em arranjos fotovoltaicos. Gasparin *et al.* (2016) também observaram esta baixa variação da I_{MP} em módulos FVs de 244 W_p e simularam diversas situações de conexão dos módulos em série, selecionando uma fileira com módulos FVs conectados em série com os maiores valores de I_{MP} e conectando os módulos sem qualquer seleção. Observaram que a seleção dos módulos fotovoltaicos pela I_{MP} resultou em um aumento de 0,28 % na potência do painel (*string*) em relação a uma instalação em série dos módulos de forma aleatória (sem seleção por I_{MP}).

Os módulos de 270 W_p, segundo o fabricante, podem ter potência no intervalo de 270 W_p a 278,1 W_p, pois admite uma variação de + 3 % na potência. Pelo valor de potência apresentado na Tab. 1, observa-se que o valor médio está acima deste intervalo e inclusive há módulos que atingiram a potência próxima de 282 W_p (4,4 % maior que o valor de catálogo). Nenhum módulo apresentou potência menor que 276,5 W_p. Destaca-se a alta eficiência estimada das células solares no módulo FV, superior a 19 %, mesmo usando lâminas de silício multicristalino.

Foram produzidos os histogramas para cada parâmetro elétrico e foi usado o programa Easy Fit para obter a função de distribuição de probabilidade adequada. Cabe observar que a função que melhor se ajustou aos dados experimentais não depende da largura da barra escolhida, ou seja, da variação de cada parâmetro. Escolheu-se uma largura de tal forma a ser similar ao desvio padrão da média apresentado na Tab. 1.

Tabela 1 - Parâmetros elétricos dos 84 módulos fotovoltaicos e valores apresentados na ficha de dados do equipamento. O desvio padrão foi calculado considerando uma distribuição normal de frequências.

	V _{OC} (V)	I _{SC} (A)	FF (%)	V _{MP} (V)	I _{MP} (A)	P _{MP} (W)	η _{MÓD} (%)	η _{CEL} (%)
Média	38,21	9,53	76,58	30,61	9,11	278,9	17,04	19,10
Desvio padrão	0,05	0,02	0,22	0,19	0,05	0,9	0,06	0,07
Menor valor	38,09	9,50	75,96	30,30	8,95	276,5	16,9	18,9
Maior valor	38,34	9,57	77,10	31,22	9,17	281,6	17,2	19,2
Ficha de dados	38,8	9,09	76,55	31,7	8,52	270	16,5	-

As Figs. 3, 4, 5, 6 e 7 apresentam os histogramas e funções distribuição de frequências para tensão elétrica, corrente elétrica, fator de forma, potência máxima e eficiência do módulo e da célula fotovoltaica, respectivamente. Além da função que melhor se ajustou ao histograma, colocou-se na figura funções utilizadas em trabalhos anteriores com módulos FVs de 245 W_p. Na Tab. 2 resumem-se as funções de distribuição de frequências e os parâmetros ajustados com o programa Easy Fit para os histogramas.

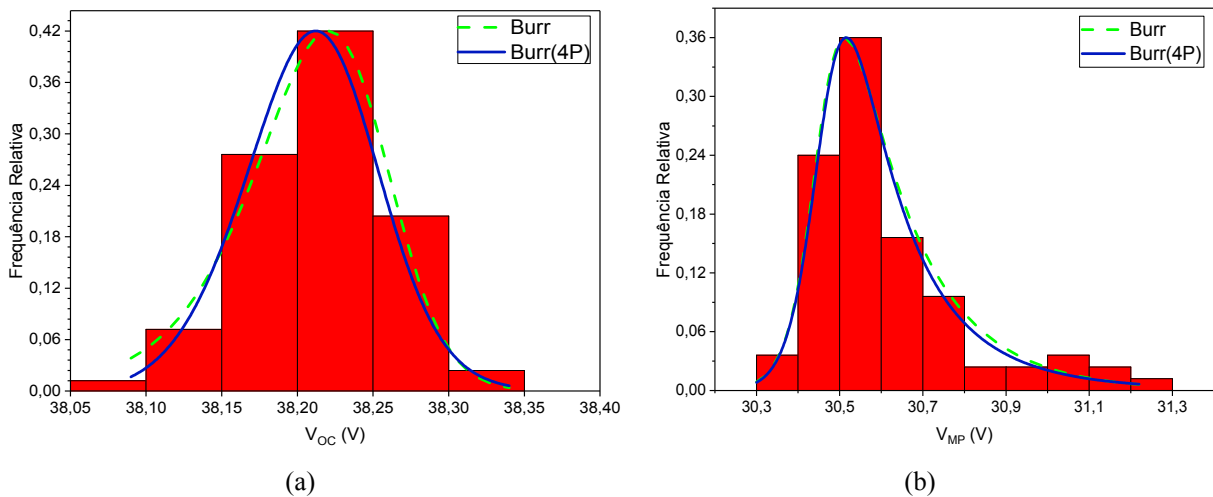


Figura 3 – Histograma e funções de densidade de probabilidade para (a) V_{OC} e (b) V_{MP}. A linha azul é a função melhor ajustada aos dados do histograma e a linha verde é usando a distribuição usada em trabalhos anteriores.

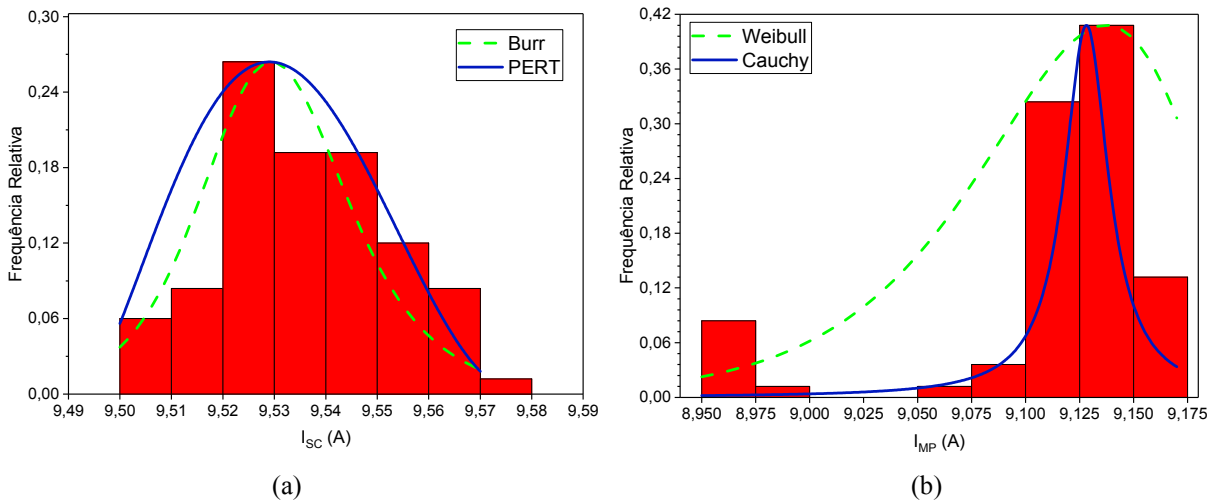


Figura 4 – Histograma e funções de densidade de probabilidade para (a) I_{SC} e (b) I_{MP}.

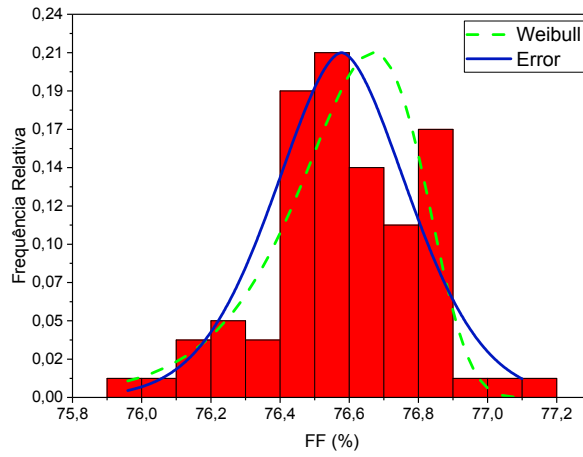


Figura 5 – Histograma e funções de densidade de probabilidade para FF.

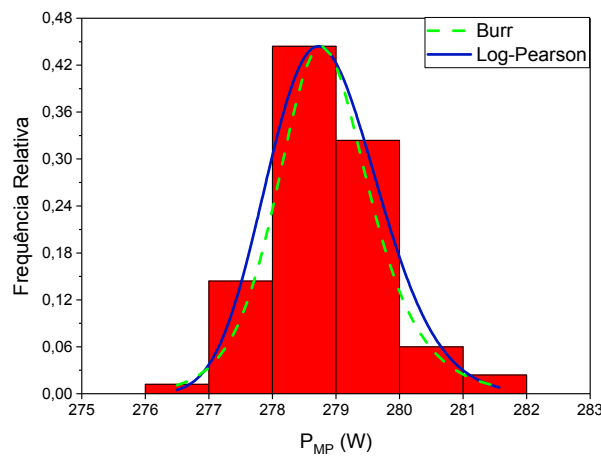
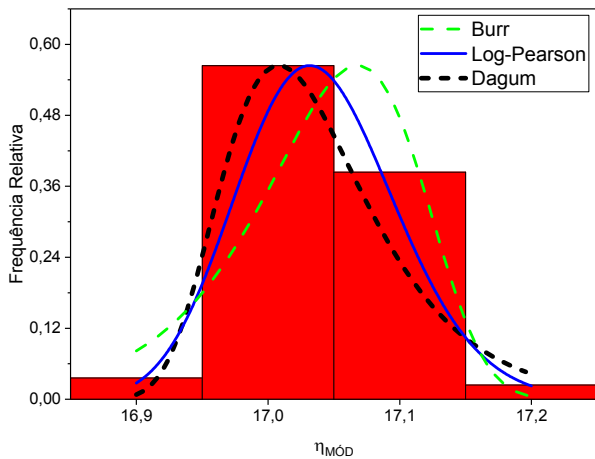
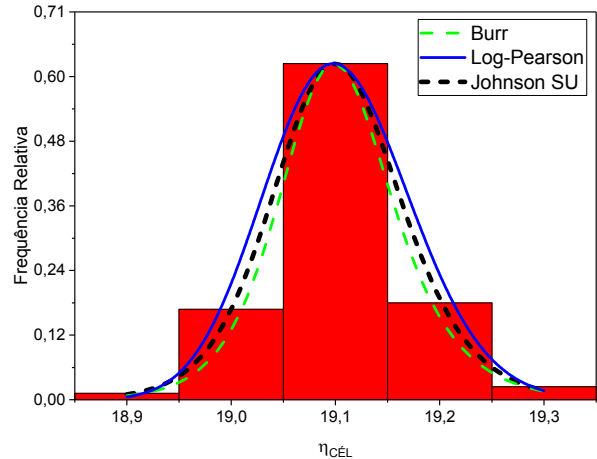


Figura 6 – Histograma e funções de densidade de probabilidade para a potência máxima dos módulos fotovoltaicos.



(a)



(b)

Figura 7 – Histograma e funções de densidade de probabilidade para (a) eficiência dos módulos fotovoltaicos e (b) das células solares. A distribuição Dagum é que apresentou o melhor resultado no teste de Kolmogorov-Smirnov; Log-Pearson é a função melhor ajustada para o histograma de P_{MP} e Burr foi a utilizada em trabalhos anteriores.

Em relação a tensão de circuito aberto, cujo histograma é mostrado na Fig. 3a, observou-se uma distribuição simétrica em torno do valor máximo de V_{OC} , similar as encontradas por Gasparin *et al.* (2016) e Zilles e Lorenzo (1991). A distribuição de Burr 4P foi que produziu o melhor ajuste com o histograma. Para o caso da V_{MP} (Fig. 3b), embora a distribuição de frequências de melhor ajuste seja a mesma usada por Gasparin *et al.* (2016), constatou-se que a distribuição não é simétrica, tendo-se uma maior frequência entre 30,5 e 30,6 V (da ordem de 36 % dos módulos FVs).

Tabela 2 - Funções de distribuição de frequências ajustadas para os histogramas de cada parâmetro elétrico e da eficiência dos módulos FVs e das células solares de silício multicristalino.

Parâmetro	Função distribuição de frequências	Valores ajustados para cada função distribuição
V_{OC}	Burr 4P: $f(x) = \frac{\alpha k \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1}}{\beta \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right)^{k+1}}$	$k = 4,3$; $\alpha = 6,2$ $\beta = 0,29$; $\gamma = 38,0$
V_{MP}	Burr 4P: $f(x) = \frac{\alpha k \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1}}{\beta \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right)^{k+1}}$	$k=0,3$; $\alpha=28,0$ $\beta=1,1$; $\gamma=29,0$
I_{SC}	PERT $f(x) = \frac{1}{B(\alpha_1, \alpha_2)} \frac{(x-a)^{\alpha_1-1} (b-x)^{\alpha_2-1}}{(b-a)^{\alpha_1+\alpha_2-1}}$ $\alpha_1 = \frac{4m+b-5a}{b-a}$ $\alpha_2 = \frac{5b-a-4m}{b-a}$	$m = 9,5$; $a = 9,5$; $b = 9,6$
I_{MP}	Cauchy $f(x) = \left(\pi \sigma \left(1 + \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 \right) \right)^{-1}$	$\sigma = 0,01$; $\mu = 9,1$
FF	Erro $f(x) = c_1 \sigma^{-1} \exp(- c_0 z ^k)$ $c_0 = \left(\frac{\Gamma(3/k)}{\Gamma(1/k)} \right)^{1/2}$ $c_1 = \frac{k c_0}{2\Gamma(1/k)} \quad z \equiv \frac{x-\mu}{\sigma}$	$k = 1,7$; $\sigma = 0,22$ $\mu = 77,0$
P_{MP}	Log-Pearson III $f(x) = \frac{1}{x \beta \Gamma(\alpha)} \left(\frac{\ln(x) - \gamma}{\beta} \right)^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{\ln(x) - \gamma}{\beta} \right)$	$\alpha = 44,0$ $\beta = 4,8 \times 10^{-4}$; $\gamma = 5,6$
$\eta_{MÓD}$	Dagum $f(x) = \frac{\alpha k \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha k-1}}{\beta \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right)^{k+1}}$	$k = 88,0$; $\alpha = 3,2 \times 10^2$ $\beta = 17$; $\gamma = 0$
$\eta_{CÉL}$	Johnson SU $f(x) = \frac{\delta}{\lambda \sqrt{2\pi} \sqrt{z^2+1}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\gamma + \delta \ln(z + \sqrt{z^2+1}) \right)^2 \right)$ $z \equiv \frac{x-\xi}{\lambda}$	$\gamma = -0,27$; $\delta = 2,4$ $\lambda = 0,15$; $\xi = 19,0$

Para a I_{SC} , a função distribuição de frequências ajustada foi a PERT, sendo similar a Burr, utilizada por Gasparin *et al.* (2016), conforme mostra a Fig. 4.a. O histograma da corrente elétrica no ponto de máxima potência mostra um elevado percentual de módulos fotovoltaicos com corrente acima de 9,1 A, sendo de aproximadamente 86 %, como se pode constatar da Fig. 4.b. Tanto Zilles e Lorenzo (1991) como Gasparin *et al.* (2016) utilizaram a função de Weibull, mas no caso dos módulos fotovoltaicos analisados neste trabalho, a função de Cauchy foi a que melhor se ajustou ao histograma. Esta distribuição pode estar relacionada a forma como os módulos FVs são classificados na fábrica, utilizando a potência e a corrente elétrica no ponto de máxima potência. Para o fator de forma, a distribuição Normal e a Weibull foram as usadas nos trabalhos anteriores e neste caso o histograma foi melhor ajustado pela função Erro, concordando com a superposição da função sobre o histograma na Fig. 5. O histograma das frequências de potência máxima é mostrado na Fig. 6 e embora a função Log-Pearson III foi a que obteve o melhor ajuste considerando o método de Kolmogorov-Smirnov, a função de Burr, utilizada nos trabalhos anteriores também poderia ser usada, conforme mostram as curvas de densidade de frequências.

As barras dos histogramas da eficiência dos módulos e das células solares (eficiência estimada) não representam intervalos, mas sim valores específicos por apresentarem somente quatro e cinco valores, respectivamente, conforme mostra a Fig. 7. As funções ajustadas foram a de Dagum e Johnson SU para $\eta_{MÓD}$ e $\eta_{CÉL}$, respectivamente. Na Fig. 7 também foram colocadas as funções distribuições de Burr e Log-Pearson, utilizadas para a potência máxima. Observa-se que para a $\eta_{CÉL}$ a concordância gráfica é grande entre as distribuições, mas no caso de $\eta_{MÓD}$, a Dagum se ajusta ao pico de frequências. Cabe comentar que estas diferenças entre as funções para o histograma de $\eta_{MÓD}$ pode ser devida a que foram usados somente quatro valores de eficiência, com uma casa decimal.

Embora a seleção dos módulos FVs para os painéis (*strings*) não produza aumentos significativos na potência do arranjo, como os módulos foram medidos antes da instalação, selecionaram-se os módulos tendo em vista a I_{MP} . Foram instalados 19 módulos em série formando quatro painéis FVs, que foram conectados em paralelo aos pares para conexão nos dois seguidores de máxima potência do inversor de 20 kW utilizado. A instalação dos quatro painéis (*strings*) seguiu a ordem decrescente de corrente elétrica no ponto de máxima potência e cada painel tem uma I_{MP} prevista de: Painel 1, $I_{MP} = 9,14$ A; Painel 2, $I_{MP} = 9,13$ A; Painel 3, $I_{MP} = 9,11$ A; Painel 4, $I_{MP} = 8,95$ A. A planta de situação, isto é, como os módulos fotovoltaicos foram distribuídos sobre o telhado do galpão da propriedade rural para formar o arranjo fotovoltaico, está esquematizada na Fig. 8. Além dos 76 módulos FVs instalados no arranjo, foram utilizados oito para testes. Dos módulos de teste, quatro foram instalados no mesmo plano do arranjo FV e quatro foram mantidos em condições de circuito aberto e sem irradiação solar, em depósito no NT-Solar/PUCRS. Estes módulos fotovoltaicos de teste serão caracterizados eletricamente após 12 meses e comparados seus parâmetros elétricos.

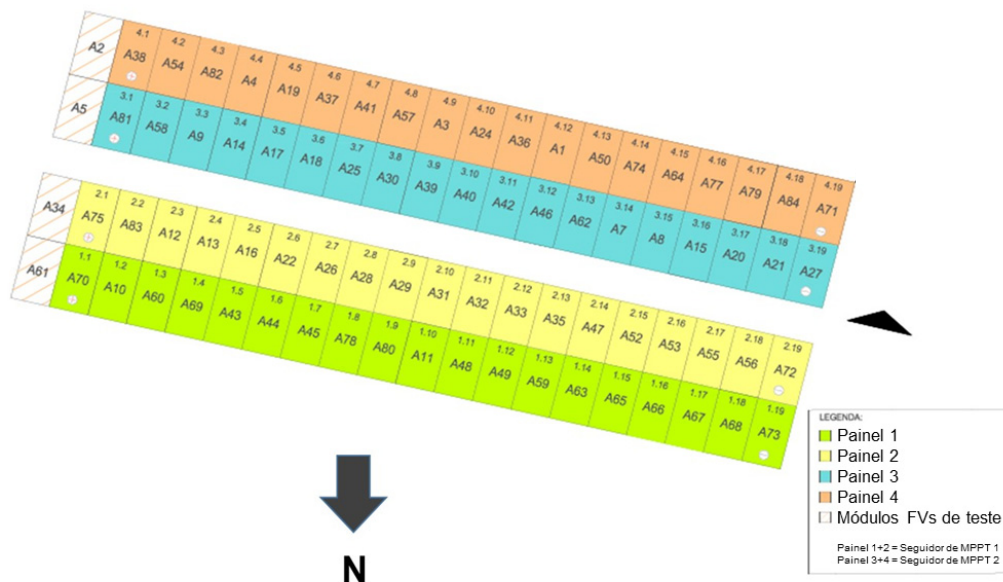


Figura 8 - Distribuição dos módulos fotovoltaicos formando quatro painéis FVs (*strings*) sendo que a seleção foi baseada na I_{MP} de cada módulo. Cada cor identifica um painel com os módulos conectados em série. A associação em paralelo dos painéis 1 e 2 foi conectada a um dos seguidores de máxima potência (MPPT 1) do inversor e a associação em paralelo dos painéis 3 e 4 foi conectada no outro MPPT.

4. CONCLUSÕES

Foram caracterizados eletricamente sob condições padrão 84 módulos fotovoltaicos de 270 W_p , do mesmo fabricante e modelo, comercializados no Brasil. Realizou-se uma análise estatística dos parâmetros elétricos destes

módulos fotovoltaicos e se compararam os resultados com aqueles apresentados por outros autores, que também analisaram dispositivos de silício multicristalino.

Pela ficha de dados do módulo comercializado, a potência é de $270 W_p + 3\%$ e observou-se 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 $278,9 W_p \pm 0,3 \%$. A eficiência média dos módulos fotovoltaicos foi de $(17,04 \pm 0,06) \%$ (classificados como A segundo o INMETRO). Pode-se destacar a alta eficiência estimada das células solares no módulo FV, superior a 19% , mesmo usando lâminas de silício multicristalino.

Em relação a análise estatística, constatou-se que as distribuições de frequências de Burr ou a variante Burr 4P podem ser usadas para tensões elétricas V_{OC} e V_{MP} , também previamente aplicada em trabalhos anteriores que trataram da análise estatística de parâmetros elétricos de módulos fotovoltaicos de Si-mc. Para a I_{SC} , a distribuição mais adequada mostrou ser a PERT e para a I_{MP} foi a Cauchy, diferente de trabalhos anteriores que ajustaram os histogramas com curvas de distribuição de frequências de Burr e Weibull, respectivamente. A distribuição de I_{MP} é assimétrica, com 87% dos valores para correntes elétricas acima de $9,1 A$, sendo que o intervalo de variação deste parâmetro foi de $8,95$ a $9,17 A$. O histograma de frequências para o FF foi ajustado com a função de Weibull em trabalhos anteriores, mas neste caso, a função Error foi a que se mostrou mais adequada. A frequência de medidas de potência máxima foi ajustada pela distribuição de Log-Pearson, mas com pequenas diferenças gráficas com a distribuição de Burr usada em trabalhos anteriores. As eficiências dos módulos fotovoltaicos e das células solares apresentaram distribuições Dagum e Johnson SU, respectivamente, sendo que a eficiência estimada de célula apresenta uma distribuição quase simétrica.

Agradecimentos

Os autores agradecem à ITAIPU BINACIONAL, LAR, C.VALE, COPACOL, SEBRAE/PR e OCEPAR pela subvenção do projeto de P&D intitulado “Implantação de Unidades de Geração Distribuída de Energia Elétrica a Partir de Sistemas Fotovoltaicos em Propriedades Rurais”, 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

- ANEEL^a - Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 02/12/2019.
- ANEEL^b - Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZjM4NmM0OWYtN2IwZS00YjViLTl1IMjItN2E5MzBkN2ZlMzVkIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 02/12/2019.
- Araújo^a, G.P., Ramanauskas, L.F.C., Zanesco, I., Moehlecke, A., 2018. Comparação e análise de módulos fotovoltaicos com células de silício cristalino. Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, p. 1-8, Gramado.
- Araujo^b, N.D., Osorio, E.A.A., Ramanauskas, L.F.C. Moehlecke, A., Zanesco, I., 2018. Sistemas fotovoltaicos em propriedades rurais associadas à cooperativas no oeste do Paraná - Brasil. XLI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente, 2018, Córdoba, Argentina, ASADES, 2018. v. 6. p. 03.63-03.72.
- Faria Jr, H., Trigoso, F.B.M., Cavalcanti, J.A.M., 2017. Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil: Challenges and prospects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 75, pp. 469-475.
- Galdino, M. A., Lima, J. H., Novgorodcev, A., Zilles, R., Zanesco, I., Moehlecke, A., Krenzinger, A., Orlando, A. F., 2005. The Brazilian programme for labelling photovoltaic systems, Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, vol. 1, pp. 3199-3202, Barcelona.
- 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., Zanesco, I., 2018. Situación actual de sistemas fotovoltaicos para generación distribuída en Brasil. Energías Renovables y Medio Ambiente, vol. 41, pp. 79-85.
- Moehlecke, A., Araujo, N.D., Osorio, E.A.A., Ramanauskas, L.F.C., Zanesco, I., Osório, V.C., Grid connected PV systems in dairy and poultry farms in Brazil: evaluation of different installation approaches. Proceedings of the Solar Word Congress, 2019, Santiago, pp. 1-9.
- 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.

EVALUATION OF THE STATISTICAL DISTRIBUTION OF ELECTRICAL PARAMETERS OF MULTICRYSTALLINE SILICON PHOTOVOLTAIC MODULES

Abstract: *The solar cell and photovoltaic (PV) module industry was improved in the last decades with higher process control and automation, reducing the dispersion of the electrical parameters measured under standard conditions. Most photovoltaic modules with multi or monocrystalline solar cells applied to grid-connected systems has nominal powers with positive tolerance. The aim of this work is to present the results of the electrical characterization of 84 multicristalline silicon PV modules of 270 W_p and the statistical analysis of their electrical parameters, comparing to those reported in previously published papers. Photovoltaic modules were electrically characterized using a solar simulator (flash-type), class AAA. By the data sheet of the PV module, the power is 270 $W_p + 3\%$. All the photovoltaic modules presented nominal power higher than 270 W_p , being in the range of 276.5 W_p to 281.6 W_p , and the average value was 278.9 $W_p \pm 0.3\%$. Regarding statistical analysis, the Burr frequency distribution or the Burr 4P variant can be used for V_{OC} and V_{MP} , also applied in previous studies that dealt with statistical analysis of electrical parameters of photovoltaic modules. The most appropriate distribution function for I_{SC} was PERT and for I_{MP} was Cauchy, different from previous works that adjusted histograms with Burr and Weibull frequency distribution curves, respectively. The distribution of I_{MP} frequencies is asymmetric, with 87 % of the values with higher electrical currents. The frequency histogram for FF was fitted with the Error function. The frequency of the maximum power measurements was adjusted by the Log-Pearson III distribution, but with small graphical differences with the Burr distribution used in previous works.*

Key words: *Photovoltaic modules, electrical characterization, statistical analysis.*