

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO INDOOR DE CÉLULAS DE REFERÊNCIA PARA MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

A. P. Rosso¹, G. A. Rampinelli².

Núcleo Tecnológico de Energia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade
Universidade Federal de Santa Catarina - Rua Pedro João Pereira, nº 150, Mato Alto - Araranguá - SC
Tel. (48) 3721-6944 e-mail: possamairosso@yahoo.com.br

Recibido 09/08/18, aceptado 24/09/18

RESUMO: A medição da constante solar era estimada no solo terrestre, a partir de medições, após a radiação solar ser inserida na atmosfera. Hoje, com o uso de satélites e foguetes, a constante solar é medida antes de ser inserida na atmosfera e apresenta um valor de $G_{SC} = 1367 \text{ Wm}^{-2}$ com um desvio padrão de $1,7 \text{ Wm}^{-2}$. A medição da radiação solar é importante para o desenvolvimento de projetos que visam à captação e a conversão da energia solar em outros tipos de energia. A partir do conhecimento dessas medidas, pode-se viabilizar a instalação de sistemas fotovoltaicos em uma determinada região, garantindo o máximo aproveitamento do recurso ao longo de todo o ano. Um dos instrumentos mais utilizados para medição da radiação solar são os piranômetros. Estes equipamentos medem a radiação solar global (direta e difusa), e existem dois principais tipos de piranômetros: piranômetro termoeletrico e piranômetro fotovoltaico. Os piranômetros do tipo fotovoltaico são comumente utilizados para medição da radiação solar. A vantagem dos piranômetros fotovoltaicos são o seu baixo custo, a resposta espectral idêntica a de um módulo fotovoltaico convencional de célula de c-Si e o tempo de resposta praticamente instantâneo, na ordem de $10\mu\text{s}$, e linear com a irradiância solar. Este artigo apresenta os ensaios elétricos dos protótipos de células de referência desenvolvidas no Laboratório de Pesquisa Aplicada (LPA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Os protótipos desenvolvidos passaram pelo processo de laminação para encapsulamento das células que compõem o medidor de radiação solar. Em ensaios com simulador solar foram obtidas as curvas I-V. A repetibilidade do processo de construção dos protótipos e da medição do simulador *indoor* foram analisadas.

Palavras-chave: Radiação solar, células de referência, piranômetro fotovoltaico, resposta espectral, curvas I-V.

1. INTRODUÇÃO

Antes do surgimento de foguetes e naves espaciais, a constante solar era estimada no solo, a partir de medições, após a radiação solar ser inserida na atmosfera, com uma parte absorvida e outra parte espalhada por componentes da atmosfera. As primeiras extrapolações das medidas terrestres foram realizadas no topo de montanhas e foram baseadas em estimativas de transições atmosféricas em vários locais do espectro solar. A partir do uso das aeronaves foram realizadas medições da radiação direta, antes de entrar na atmosfera terrestre e foram executadas com uma variedade de instrumentos contendo nove programas experimentais e resultando em um valor de $G_{SC} = 1353 \text{ Wm}^{-2}$, com um erro de $E = \pm 1,5 \%$ (Duffie, 2006). O valor recomendado pela Organização Meteorológica Mundial foi obtido do valor médio de oito medidas da constante solar, realizadas entre 1969 e 1980. Este valor é $G_{SC} = 1367 \text{ Wm}^{-2}$ com um desvio padrão de $1,7 \text{ Wm}^{-2}$ (Duffie, 2006; Macagnan, 2010).

A medição da radiação solar é importante para o desenvolvimento de projetos que visam a captação e a conversão da energia solar em outros tipos de energia. A partir do conhecimento dessas medidas, pode-se viabilizar a instalação de sistemas fotovoltaicos em uma determinada região, garantindo o máximo aproveitamento do recurso ao longo de todo o ano, onde as variações da intensidade da

radiação solar sofrem significativas alterações. Desta forma, a informação sobre o recurso solar é a variável de maior importância no desenvolvimento de um projeto de sistema de aproveitamento da energia solar. Para que se torne viável financeiramente um projeto fotovoltaico, em média, a radiação solar exigida é de no mínimo 3 a 4 kWh/(m².dia) (Pinho, 2014; Pereira *et al*, 2017).

Os instrumentos mais utilizados para medição da radiação solar são os piranômetros. Estes equipamentos medem a radiação solar global (direta e difusa), e existem dois principais tipos de piranômetros: piranômetro termoeletrico e piranômetro fotovoltaico. Os piranômetros do tipo fotovoltaico são compostos por uma célula fotovoltaica de pequenas dimensões. À vantagem dos piranômetros fotovoltaicos são o seu baixo custo, a resposta espectral idêntica à de um módulo fotovoltaico convencional de célula de c-Si e o tempo de resposta praticamente instantâneo, na ordem de 10µs, e linear com a irradiância solar (Pinho e Galdino, 2014; Bharadwaj e John, 2014).

Este artigo apresenta as etapas de desenvolvimento de 6 protótipos de células de referência para medição da radiação solar, compostos por 1 célula fotovoltaica de Si-mono ou de Si-poli. O trabalho apresenta os resultados de caracterização elétrica dos protótipos e a repetibilidade do método construtivo e a repetibilidade na medição do simulador solar.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento dos protótipos e no processo indoor de caracterização elétrica. Esses protótipos foram desenvolvidos em um processo semiprofissional, fazendo uso de equipamentos e componentes disponíveis no Laboratório de Pesquisa Aplicada (LPA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

2.1 Construção dos protótipos

Para a obtenção dos protótipos, foi utilizado o polímero *tedlar* como material base, o polímero EVA para o encapsulamento da célula fotovoltaica e o vidro como material de cobertura, sendo que foram utilizadas uma célula de silício cristalino. Para o desenvolvimento dos protótipos, primeiramente é usado uma caneta de fluxo nos terminais da célula como pode ser observado na Fig. 1a. Posteriormente para o processo de metalização da célula foi integrado uma fita de estanho (1,8 mm) nas células de silício cristalino utilizando uma estação de solda por indução, conforme apresentado na Fig. 1b.

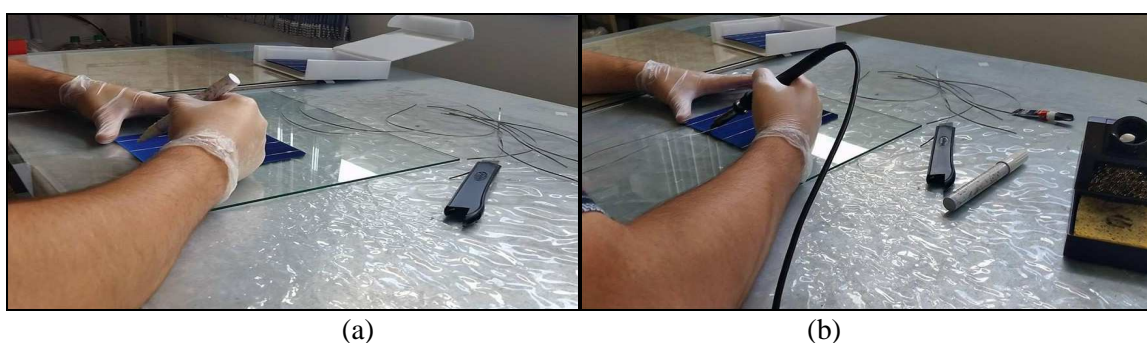


Figura 1: Fluxo de solda nos terminais da célula (a) e integração da fita de estanho (1,8 mm) na célula fotovoltaica (b).

Em seguida, foi realizado a montagem dos encapsulantes da célula de referência, como pode ser observado na Fig 2. Foi utilizado cortes de *tedlar* para isolar as ligações da célula.

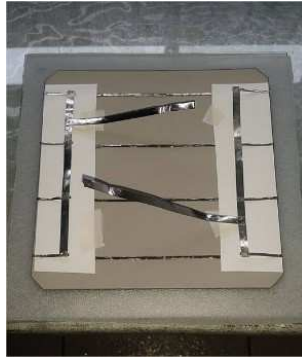


Figura 2: Estrutura da célula de referência.

As células desenvolvidas passaram pelo processo de laminação para encapsulamento da célula fotovoltaica. Para a laminação foi utilizado uma laminadora da marca *Astro* conforme apresentado na Fig. 3.



Figura 3: Laminadora Astro.

No processo de laminação são alcançadas temperaturas entre 120 °C e 150 °C, quando o EVA se torna líquido e as eventuais bolhas de ar geradas são eliminadas (Pinho e Galdino, 2014). No processo de laminação das células, a pressão é reduzida a 650 mmHg e a temperatura atinge 132 °C.

Eventuais defeitos que podem aparecer na fabricação de módulos fotovoltaicos devem ser considerados. Módulos fotovoltaicos com as bordas das células fotovoltaicas em contato é um defeito de fabricação consideravelmente inaceitável, indicando uma péssima qualidade do dispositivo, podendo resultar em modificação imprevisível da curva característica I-V. Outro defeito que pode aparecer são de células quebradas ou rachadas indicando que o dispositivo é de baixa qualidade, justificando, portanto, a sua reprovação. As células com problemas de metalização é outro defeito inaceitável, reduzindo a eficiência das células, por aumentar a resistência em série, limitando assim, o desempenho do módulo (Galdino; Silva, 2014).

A estrutura das células de referência está apresentada na Tab. 1. Após a conclusão do processo de laminação, foram desenvolvidos 6 protótipos de células de referência, as células não apresentaram nenhum eventual defeito apresentado acima e nenhuma formação de bolhas conforme como pode ser observado na Fig. 4.

Protótipos	Estrutura	Célula FV
PROT 1	Vidro/EVA/Tedlar	mono-Si
PROT 2	Vidro/EVA/Tedlar	mono-Si
PROT 3	Vidro/EVA/Tedlar	mono-Si
PROT 4	Vidro/EVA/Tedlar	poli-Si
PROT 5	Vidro/EVA/Tedlar	poli-Si
PROT 6	Vidro/EVA/Tedlar	poli-Si

Tabela 1: Estruturas das células de referência.



Figura 4: Protótipos de células de referência, PROT 1 (1), PROT 2 (2), PROT 3 (3), PROT 4 (4), PROT 5 (5) e PROT 6 (6).

2.2 Caracterização elétrica

O ensaio mais completo e utilizado para analisar, estimar e qualificar uma célula, módulo ou sistemas fotovoltaicos é através do traçado de sua curva característica $I-V$. Em vista disso, muitos sistemas de instrumentação foram desenvolvidos para tal finalidade, sendo que os laboratórios ou departamentos de pesquisa possui uma instrumentação melhor que se adequa à realização dos ensaios (Gasparin, 2009).

O módulo fotovoltaico é submetido às condições padrões de ensaio, uma fonte de tensão variável realiza uma varredura entre uma tensão negativa em relação aos terminais do módulo, até ultrapassar a tensão de circuito aberto do módulo com a corrente ficando negativamente. Durante esta varredura são registrados pares de dados de tensão e corrente, permitindo o traçado de uma curva característica (Pinho e Galdino, 2014). A Fig. 5 apresenta a curva característica $I-V$ e a curva de potência $P-V$ de um módulo.

Ao avaliar o desempenho de uma célula, módulo ou de um sistema fotovoltaico é extremamente importante que as medições sejam efetuadas em condições operacionais do módulo ou do sistema fotovoltaico (Pinho e Galdino, 2014; Garcia, 2015). O desempenho de células e módulos fotovoltaicos normalmente é associado às condições de teste padrão (Standart Test Conditions –STC), ou seja, nível de irradiância de 1000 W/m^2 ou também conhecido como 1 sol, distribuição espectral correspondente a AM1,5 e temperatura de célula de 25°C . Estas condições de irradiância representam as condições de operação de um dia de céu claro, entretanto, a temperatura em operação frequentemente resulta em

temperaturas próximas a 50 °C. A diferença entre essas temperaturas proporciona também uma diferença entre a potência entregue pelo módulo fotovoltaico e a potência nominal (Macêdo, 2006).

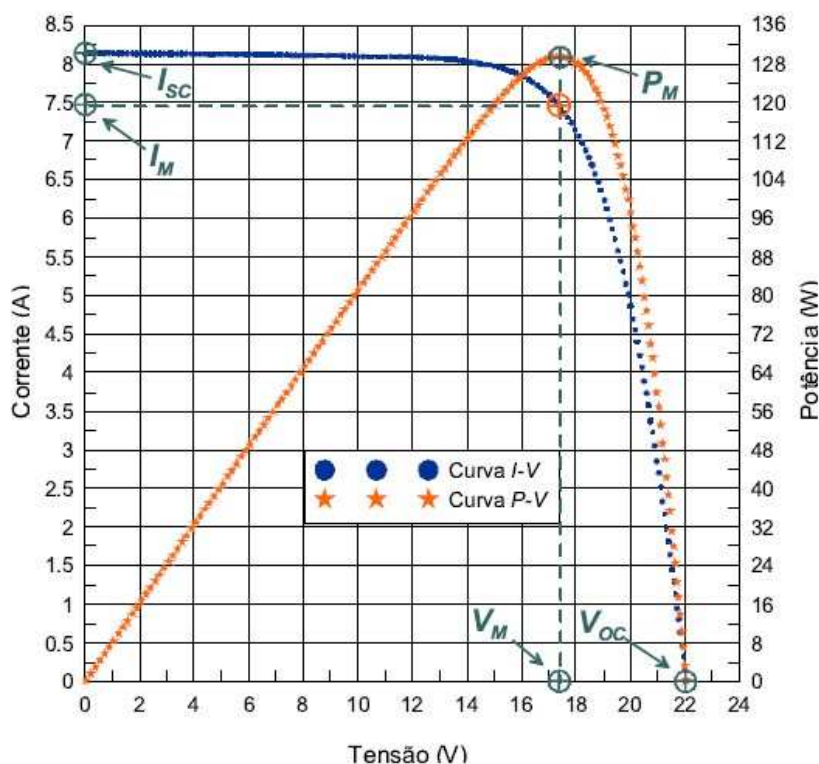


Figura 5: Curva característica I-V e curva de potência P-V de um módulo m-Si (36 células) com 130 W de potência e 12 V de tensão nominal (Bühler, 2011).

A caracterização de módulos fotovoltaicos em simuladores solares *indoor* vem se tornando mais comum do que a caracterização em ambiente *outdoor*. Uma vantagem do uso de simuladores solares *indoor* é que o equipamento é independente do clima e do tempo meteorológico, podendo realizar simulações a qualquer momento do dia. Para as empresas produtoras de módulos fotovoltaicos os simuladores solares *indoor* são muito importantes para a certificação do produto final (Carrilo *et al*, 2017). A caracterização das células de referência foi realizada através de um simulador solar (*indoor*). A simulação consiste em verificar os aspectos técnicos e parâmetros das curvas I-V. Os testes foram realizados no laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

O simulador solar é um equipamento que conta com lâmpadas especiais para emular as propriedades da radiação solar durante o ensaio da determinação da curva característica de dispositivos fotovoltaicos. A corrente e tensão do módulo que está sendo testado, além da irradiância e da temperatura da célula são medidos e registrados através de um aparelho eletrônico específico (Dalmagro, Krenzinger, 2013). A Fig. 6 apresenta os três tipos básicos de simuladores solares que são diferenciados de acordo com a tecnologia utilizada para a geração de luz.

No simulador solar o sistema de medição é composto por uma carga eletrônica e um conjunto de conversores analógico/digital que realizam a aquisição de variáveis. Os conversores recebem os sinais analógicos dos canais de entrada e transferem para o computador os respectivos valores digitais desses canais. Quando o flash é disparado a carga eletrônica faz a varredura de tensão e o sistema de aquisição mede simultaneamente os valores de corrente, tensão, irradiância e temperatura, podendo determinar a curva I-V de módulos fotovoltaicos e também seu ponto de máxima potência (Mocelin, 2014). As medições dos resultados de ensaios realizados no simulador solar são controladas por um microcomputador conectado à carga eletrônica. Por meio do software de operação do simulador é possível transferir a curva característica medida para as condições padrão de teste (Mocelin, 2014).

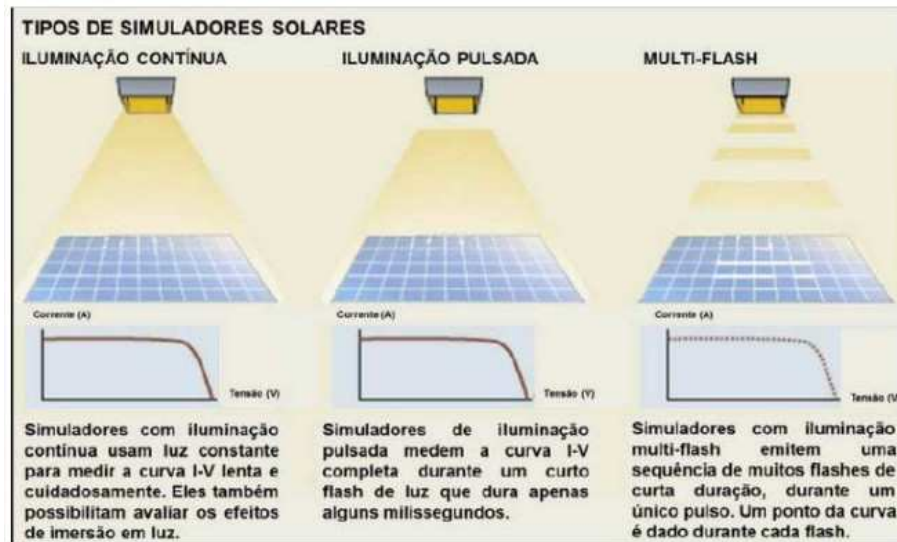


Figura 6: Exemplos de simuladores solares (Dalmagro, Krenzinger, 2013).

O simulador é composto de paredes escuras de material com baixa refletância nos comprimentos de onda de interesse. Nesta câmara fica o suporte para o encaixe dos módulos, onde se encontra a célula de referência e o módulo sob teste, a uma distância específica da lâmpada de xenônio geradora do flash (Fig. 7).



Figura 7: Vista interna do simulador com o protótipo para as medições.

Foram realizados ensaios no simulador solar com os seis protótipos desenvolvidos, tendo como intuito, a análise de características elétricas das células de referência como: fator de forma, ponto de máxima potência, corrente de curto circuito, tensão de circuito aberto e curva I-V. O processo de repetibilidade construtiva dos dispositivos e a repetibilidade de medição do simulador solar também são analisados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas características I-V dos protótipos foram obtidas através de um simulador solar (*indoor*) em condições padrão, com irradiância de 1000 W/m^2 , temperatura de célula de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e AM1,5. Os testes foram realizados no Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). As curvas I-V dos protótipos PROT 1, PROT 2, PROT 3, PROT 4, PROT 5 e PROT 6 são apresentadas nas Figs. 8 e 9. Para uma produção seriada de células de referência é importante verificar a dispersão dos parâmetros elétricos dos dispositivos. A identidade dos parâmetros elétricos verificados a partir da determinação da Curva I-V dos protótipos desenvolvidos indica alto grau de repetibilidade no processo construtivo.

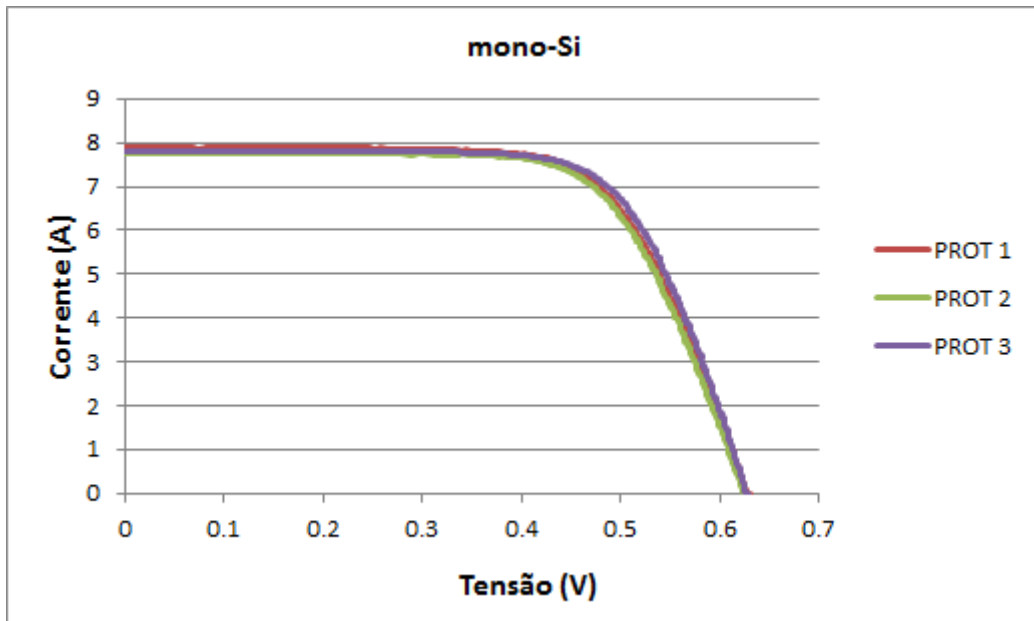


Figura 8: Curvas I-V dos PROT 1, PROT 2 e PROT 3, $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_{\text{célula}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ e AM1,5

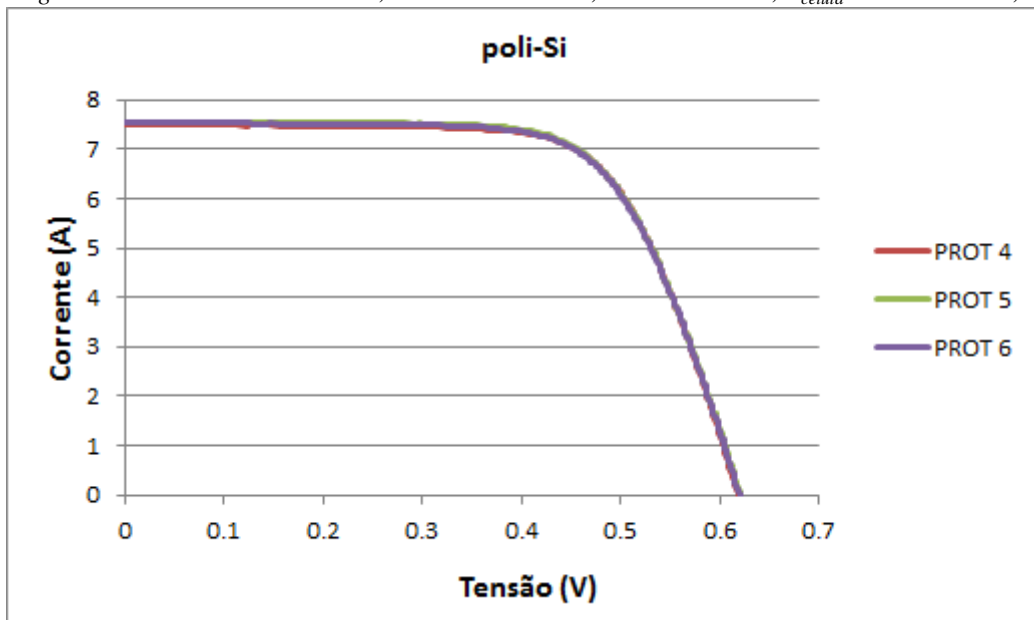


Figura 9: Curvas I-V dos PROT 4, PROT 5 e PROT 6, $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_{\text{célula}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ e AM1,5.

Para cada protótipo foram realizadas seis medidas para determinação da curva I-V. A partir desta amostra, é possível avaliar a repetibilidade de medição do simulador solar e, por consequência, aferir o processo de caracterização ou calibração dos protótipos. A irradiância solar pode ser estimada a partir de uma correlação direta com a medida de corrente de curto circuito (I_{SC}) do protótipo, após o processo de calibração do dispositivo. A partir da amostra, foi obtida a média (\bar{X}), o desvio padrão (S) e o erro padrão (E_p) com níveis de confiança de 90 %, 95% e 98 % para cada protótipo. Os valores destes parâmetros estão apresentados na Tab. 1.

	I_{SC} (1000 W/m ²)					
	PROT 1	PROT 2	PROT 3	PROT 4	PROT 5	PROT 6
\bar{x}	7.8913	7.7717	7.8262	7.495985	7.570568	7.536656
S	0.003893	0.00399	0.007325	0.003493	0.004698	0.00293
E_p (90%)	0.003202	0.003282	0.006984	0.002873	0.003864	0.002794
E_p (95%)	0.004086	0,004188	0.009094	0,003666	0.004931	0,003637
E_p (98%)	0.005348	0.005481	0.012274	0.004798	0.006454	0.004909

Tabela 1: Médias, desvios padrão e erros padrão das I_{SC} das seis medições de cada protótipo.

Observando a Tab. 1 percebe-se que os valores de S são pequenos, na ordem de 0,038 a 0,093 %. Os E_p com nível de confiança de 90 % estão entre 0,038 e 0,089 %. Utilizando um nível de confiança de 95 % os E_p variam de 0,048 a 0,117 %, e para um nível de confiança de 98 % variam entre 0,064 e 0,157 %. Estes valores de E_p mostra uma confiabilidade alta nas medições no simulador pelo método *indoor*. Através dessas três médias das I_{SC} de cada tecnologia, foi calculado uma nova média, desvio padrão médio e o erro padrão (E_p) com níveis de confiança de 90 %, 95% e 98 % para cada tecnologia, sendo que os resultados estão apresentados na Tab. 2.

	I_{SC} (1000 W/m ²)	
	mon-Si	pol-Si
\bar{x}	7.829733	7.534403
S	0.059895	0.037343
E_p (90%)	0.100974	0.062955
E_p (95%)	0.148709	0.092772
E_p (98%)	0.240852	0.150165

Tabela 2: \bar{x} , S e E_p (90, 95 e 98%) das I_{SC} de cada tecnologia.

Analisando a Tab. 2, pode-se identificar que o S da média da I_{SC} de cada tecnologia é de 0,7649 % para o mon-Si e 0,4956 % para pol-Si. Esses valores de S são relativamente pequenos e mostra uma boa repetibilidade na construção dos protótipos. O E_p com os níveis de confiabilidade de 90, 95 e 98 % foram determinados, chegando em valores de 1,289 a 3,070 % para mon-Si e de 0,835 a 1,993 % para pol-Si.

O parâmetro elétrico que representa a qualidade de um módulo fotovoltaico é chamado de fator de forma (FF). Foi realizado a mesma análise da I_{SC} para o FF . Foi calculado a \bar{x} , S e E_p com níveis de confiança de 90 %, 95% e 98 % para cada protótipo, apresentado na Tab. 3.

	FF					
	PROT 1	PROT 2	PROT 3	PROT 4	PROT 5	PROT 6
\bar{x}	68,00	68,60	69,92	69,62	68,27	68,34
S	0,089443	0,260768	0,258843	0,785917	0,081649	0,194935
E_p (90%)	0,073577	0,214513	0,246796	0,646511	0,067166	0,185863
E_p (95%)	0,093879	0,273703	0,321345	0,824904	0,085700	0,242006
E_p (98%)	0,122872	0,358231	0,433746	1,079658	0,112166	0,326655

Tabela 3: Médias, desvios padrão e erros padrão dos FF das seis medições de cada protótipo.

Observando a Tab. 3 percebe-se que os valores de S são pequenos, na ordem de 0,081649 a 0,785917 %. Os E_p com nível de confiança de 90 % estão entre 0,067166 e 0,646511 %. Utilizando um nível de confiança de 95 % os E_p variam de 0,085700 a 0,824904 %, e para um nível de confiança de 98 %

variam entre 0,112166 e 1,079658 %. Estes valores de E_p mostra uma confiabilidade alta no processo construtivo das células de referência, mantendo um fator de forma próximo de um protótipo comparado com outro.

Através das três médias dos FF de cada tecnologia foi novamente calculado uma nova média, desvio padrão e o erro padrão (E_p) com níveis de confiança de 90 %, 95% e 98 % para cada tecnologia, os resultados estão apresentados na Tab. 4.

	FF	
	mon-Si	pol-Si
\bar{x}	68,84	68,74
S	0.982	0.760
E_p (90%)	1,655	1,281
E_p (95%)	2,439	1,888
E_p (98%)	3,948	3,056

Tabela 4: Médias, desvios padrão e erros padrão dos FF de cada tecnologia.

A média foi de 68,84 % para mono-Si e 68,74 % para poli-Si. O desvio padrão médio foi de 0,982 para mono-Si e 0,760 para poli-Si. Podemos observar novamente que o valor do desvio padrão é relativamente pequeno entre as duas tecnologias. Pode-se concluir que o desenvolvimento das células de referência foi eficaz e repetitivo. Os valores de FF permaneceram perto dos 70 %, valor ideal para um módulo obter o certificado de boa qualidade.

CONCLUSÃO

A utilização de medidores de irradiância em plantas fotovoltaicas é de grande importância para a confiabilidade do sistema, trazendo uma medição da irradiação mais efetiva considerando as variações espaciais que ocorre na área da usina fotovoltaica. Este trabalho apresentou a descrição do processo de desenvolvimento de protótipos de células de referência. Para a construção dos protótipos, foram usados equipamentos do Laboratório de Pesquisa Aplicada (LPA) da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Os ensaios elétricos dos protótipos foram realizados no simulador solar (*indoor*) do Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. As curvas I-V atingiram valores satisfatórios e esperados levando em consideração o método de construção dos protótipos. O desvio padrão é relativamente pequeno levando em consideração as duas tecnologias, mostrando que o desenvolvimento das células de referencia foram repetitivas e de maneira eficaz.

REFERENCIAS

- Bülher, A. J. (2011). Estudo de técnicas de determinação experimental e pós processamento de curvas características de módulos fotovoltaicos, Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre.
- Bharadwaj, P.; John, V. (2014). Design, Fabrication and Evaluation of Solar Irradiation Meter. IEEE International Conference on Power Electronics, drives and energy systems systems (Pedes).
- Carrillo, J. M. *et al.* (2017). Uncertainties on the outdoor characterization of PV modules and the calibration of Reference modules. *Solar Energy*. 155 (2017) 880-892.
- Dalmagro, P. S. e Krenzinger, A. (2013). Análise de Simuladores Solares para Ensaio de Módulos Fotovoltaicos, In: salãoufrgs, sic - XXV salão de iniciação científica da ufrgs, Porto Alegre.

- Duffie J. A. e Beckman W. A. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 3ª edição, pp. 926. Wiley Interscience, New York.
- Galdino, A. M. e Silva, C. P. (2014). Subsídios para identificação visual de problemas em células e módulos fotovoltaicos. *Revista Brasileira de Energia Solar*, Volume V, Número 2, pp. 159-170.
- García, M.; Marroyo, L.; Lorenzo, E.; Marcos, J.; Pérez, M. (2015). Solar irradiation and PV module temperature dispersion at a large-scale PV plant. *Progress in Photovoltaics*, Vol. 23, pp. 1381-1389.
- Gasparin, F. P. (2009). Desenvolvimento de um traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos. Porto Alegre: Dissertação de Mestrado.
- Macagnan, M. H. (2010). Introdução a Radiação Solar. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Unisinos, São Leopoldo.
- Macêdo, W. N. (2006). Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede, Tese de Doutorado, USP, São Paulo.
- Mocelin, A. R. (2014). Qualificação profissional e capacitação laboratorial em sistemas fotovoltaicos, Tese de Doutorado, USP, São Paulo.
- Pereira, E. B. *et al.* (2017). Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2ª edição, pp. 88. São José dos Campos.
- Pinho, J. T., Galdino, M. A. (2014). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro.

ABSTRACT

The measurement of solar radiation is important for the development of systems for converting solar energy into other types of energy. The instrument used to measure solar radiation is the pyranometer. These devices measure global solar radiation and can be of two types: thermoelectric pyranometer and photovoltaic pyranometer. Photovoltaic pyranometers are commonly used to measure solar radiation. The advantage of photovoltaic pyranometers is their low cost, the identical spectral response of a photovoltaic module and the response time practically instantaneous, in the order of 10 μ s, and linear with solar irradiance. This article presents the electrical assays of reference cell prototypes developed at the Applied Research Laboratory (LPA) of the Federal University of Santa Catarina (UFSC). The developed prototypes underwent the lamination process to encapsulate the cells. The I-V curves were obtained in indoor trials. The repeatability of the construction of the prototypes and the measurement of the indoor simulator were analyzed.

Keywords: Solar radiation, reference cells, photovoltaic pyranometer, spectral response, I-V curves.