

DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS DE MÓDULOS DE REFERÊNCIA PARA MEDIÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR

André Possamai Rosso – possamairosso@yahoo.com.br

Marcelo Cristiano Ludke – marcelo_ludke@hotmail.com

Pâmela Crotti – pamelacrotti@gmail.com

Giuliano Arns Rampinelli – giuliano.rampinelli@ufsc.br

Roderval Marcelino – roderval.marcelino@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde

Resumo A radiação solar é uma inesgotável fonte energética e pode ser aproveitada em sistemas de conversão de energia térmica e elétrica. Existem muitas maneiras de obtenção de dados de irradiância e uma delas é a medição a partir de um módulo de referência. As vantagens do módulo de referência são o reduzido custo de construção e operação e a resposta espectral idêntica ao módulo fotovoltaico. Este artigo apresenta os ensaios elétricos dos protótipos de módulos de referência desenvolvidos 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 indoor com simulador solar foram obtidas as curvas I-V, curvas PV e correlações de eficiência, fator de forma, máxima potência, corrente de curto circuito, resistência série e paralelo em função da irradiância. Os protótipos apresentaram fator de forma acima de 70 % e as eficiências dos protótipos são da ordem de 12 e 13 %. A corrente de curto circuito e a potência máxima têm correlação linear com a irradiância.

Palavras-chave: Radiação solar, Módulo de referência; Curvas I-V e P-V.

1. INTRODUÇÃO

A radiação solar é uma inesgotável fonte energética e pode ser aproveitada em sistemas de conversão de energia térmica e elétrica. A radiação solar incidente sobre uma superfície receptora é constituída por uma componente direta e por uma componente difusa. A radiação direta é aquela que atravessa diretamente a atmosfera terrestre sem sofrer espalhamento enquanto a radiação difusa é aquela proveniente de todas as direções e que atinge a superfície após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre (Pinho e Galdino, 2014).

Os instrumentos para a medição da radiação solar comercialmente disponíveis são conhecidos como: o piranômetro e o pireliômetro, o primeiro para medições de radiação global e o segundo para medidas da componente direta da radiação solar. Os piranômetros do tipo fotovoltaico são compostos por uma célula fotovoltaica de pequenas dimensões e apresentam como vantagem o menor custo e como desvantagem o fornecimento de medidas com menor precisão, outra vantagem é o tempo de resposta praticamente instantâneo na ordem de 10 μ s e linear com a irradiância (Pinho e Galdino, 2014; Bharadwaj e John, 2014).

Este artigo apresenta as etapas de desenvolvimento de protótipos de módulos de referência compostos por 4 células fotovoltaicas de Si-mono para medição da radiação solar. O trabalho apresenta os resultados de caracterização elétrica dos protótipos de módulos de referência.

2. MÓDULO DE REFERÊNCIA

A medição precisa das células solares é essencial, tanto para melhorar a tecnologia dos módulos fotovoltaicos como para prever o desempenho em operação. A fonte mais cara de uma configuração de medição de células solares, e também a principal fonte de erro é a fonte de luz. A luz solar natural é em muitos aspectos muito superior a um simulador solar para medição precisa de células solares. Sob condições atmosféricas corretas seu espectro é uma excelente combinação com os espectros padrões, isso elimina a necessidade de uma célula de referência com uma resposta espectral correspondente à célula de teste (Keogh e Blakers, 2004).

Em plantas fotovoltaicas de grande porte a dispersão espacial das condições operacionais da planta podem afetar a representatividade dos valores medidos de um único ponto e, portanto, os resultados do desempenho. Essas variações dos valores de irradiação provavelmente não são apenas causadas pelo movimento das nuvens, mas também por outros fenômenos da nuvem, como por exemplo, o sombreamento de apenas uma zona limitada dentro do campo fotovoltaico (García *et al.*, 2014).

Por esses motivos é possível verificar a necessidade de uma planta fotovoltaica possuir vários medidores de irradiância espalhados por toda sua extensão, para que a medição da irradiação seja representativa em toda área da planta.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção faz referência aos métodos utilizados no desenvolvimento dos protótipos dos medidores de irradiação e na caracterização elétrica. Esses protótipos foram desenvolvidos em um processo semiprofissional, fazendo uso de equipamentos e componentes disponíveis no Laboratório de Pesquisa Aplicada da Universidade Federal de Santa Catarina.

3.1 Construção dos protótipos

Para a obtenção do protótipo Fig. 1 foi utilizado o polímero *tedlar* como material base, o polímero EVA para o encapsulamento das células fotovoltaica e o vidro como material de cobertura, sendo que foram utilizadas quatro células de silício cristalino.

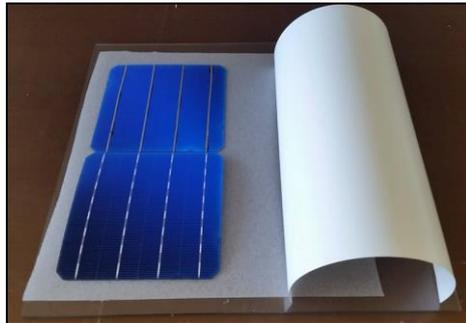


Figura 1 – Componentes do protótipo (Fonte: do autor).

Para o desenvolvimento dos protótipos, primeiramente é usado uma caneta de fluxo nos terminais da célula como pode ser observado na Fig. 2a. Posteriormente para o processo de metalização da célula foi integrado uma fita de estanho (1,8 mm) nas células de silício monocristalino utilizando uma estação de solda por indução, conforme apresentado na Fig. 2b.



Figura 2 – Fluxo de solda nos terminais da célula (a) e integração da fita de estanho (1,8 mm) na célula fotovoltaica (b). (Fonte: do autor).

Em seguida, foi realizada a conexão em série das células fotovoltaica formando uma *string* de células fotovoltaicas em série, como pode ser observado na Fig. 3. Foi utilizado cortes de tedla para isolar as ligações das células.



Figura 3 – Conexão em série das células fotovoltaica (fonte: do autor).

As quatro células foram conectadas uma na outra pelo terminal positivo (cátodo) ao terminal negativo (ânodo), obtendo-se a tensão e corrente total conforme a Eq. (1). Após a conclusão da *string* de células, as mesmas foram integradas ao vidro e EVA.

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (1)$$

O protótipo desenvolvido passou pelo processo de laminação para encapsulamento das células. Para a laminação foi utilizado uma laminadora da marca *Astro* conforme apresentada na Fig. 4.



Figura 4 – Laminadora *Astro* (Fonte: do autor).

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 dos protótipos, a pressão é reduzida a 650 mmHg e a temperatura atingiu 132 °C como pode ser observado na Fig. 5.

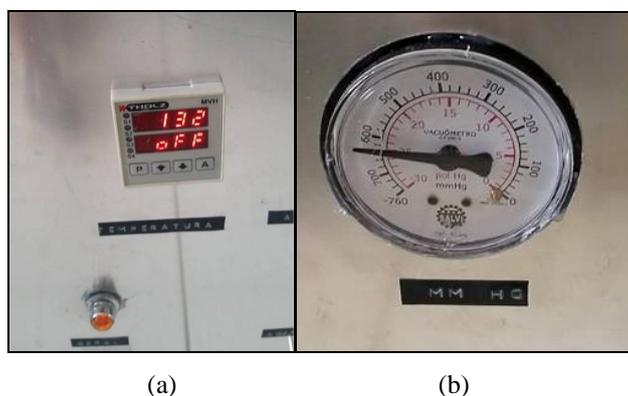


Figura 5 – Temperatura final (a) e pressão final (b) do processo de laminação (Fonte: do autor).

As estruturas dos três protótipos estão apresentadas na Tab. 1. Após a conclusão do processo de laminação, os protótipos desenvolvidos Prot 1 (a), Prot 2 (b), Prot 3 (c), não apresentaram nenhuma formação de bolhas conforme como pode ser observado na Fig. 6.

Tabela 1 – Estrutura dos três protótipos de módulos de referência.

PROTÓTIPOS	ESTRUTURA	CÉLULA FV	Nº DE CÉLULAS
Prot 1	Vidro/EVA/Tedlar	Mono	4
Prot 2	Vidro/EVA/Tedlar	Mono	4
Prot 3	Vidro/EVA/Tedlar	Mono	4



(a)

(b)

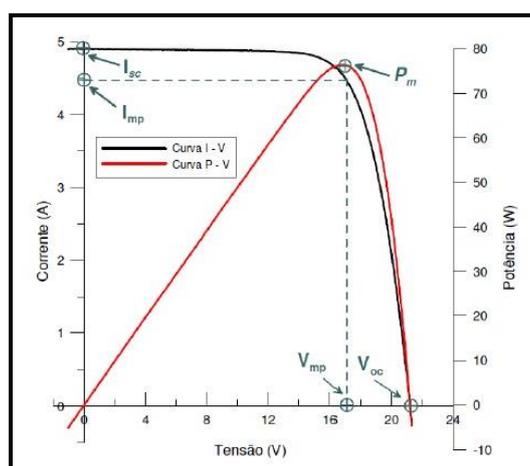
(c)

Figura 6 – Protótipos para medição da irradiação solar, Prot 1 (a), Prot 2 (b) e Prot 3 (c) (fonte: do autor).

3.2 Caracterização elétrica

Um dos ensaios mais completos para analisar, estimar e qualificar um 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. 7 apresenta a curva característica $I-V$ e a curva de potência $P-V$ de um módulo (Gasparin, 2009).

Figura 7 – Curva característica $I-V$ e curva de potência $P-V$ de um módulo (Gasparin, 2009).

Ao avaliar o desempenho de um 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 irradiação 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 irradiação

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).

A caracterização dos módulos fotovoltaicos foi realizada através de um simulador solar (*indoor*). A simulação consiste em verificar os aspectos técnicos e parâmetros das curvas I-V incluindo a variação de irradiância. 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. 8 apresenta os três tipos básicos de simuladores solares que são diferenciados de acordo com a tecnologia utilizada para a geração de luz.

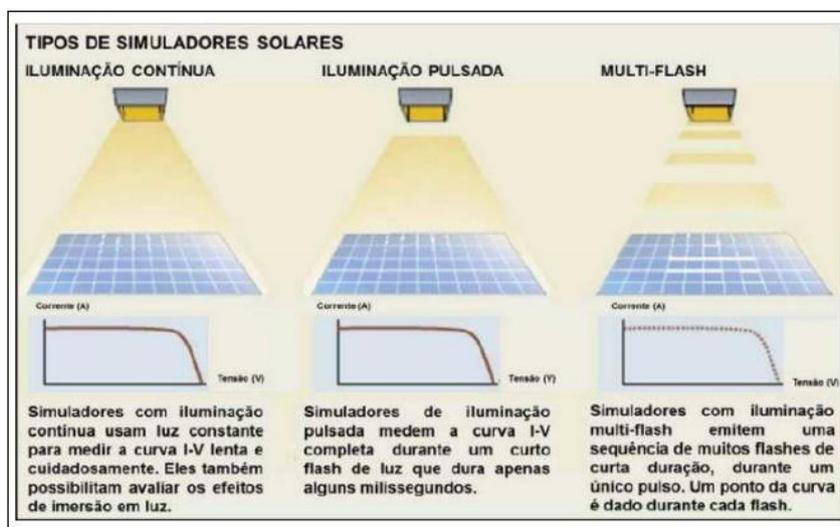


Figura 8 – Exemplos de simuladores solares (Dalmagro, Krenzinger, 2013).

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).

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. 9).



Figura 9 – Vista interna do simulador com o protótipo para as medições (fonte: do autor).

Foram realizados ensaios no simulador solar com os três protótipos de mesma tecnologia, tendo como intuito a análise de características elétricas dos módulos como: fator de forma, ponto de máxima potência, corrente de curto circuito, tensão de circuito aberto, resistência em série, resistência em paralelo e curva I-V.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os parâmetros elétricos e de desempenho dos protótipos em diferentes irradiâncias determinados a partir dos ensaios de caracterização são apresentados nas Tab. 2 (Prot 1), Tab. 3 (Prot 2) e Tab. 4 (Prot 3). Os parâmetros elétricos e de desempenho dos protótipos desenvolvidos foram determinados em cinco diferentes irradiâncias. Para uma produção seriada de módulos de referência é importante verificar a dispersão dos parâmetros elétricos e de desempenho dos mesmos. A partir da amostra de três protótipos de módulos de referência desenvolvidos verifica-se que o desvio médio e o desvio padrão do parâmetro eficiência variam, entre 0,05 e 0,16 e entre 0,06 e 0,21, respectivamente, considerando todos os níveis de irradiância. O desvio médio e o desvio padrão do parâmetro fator de forma, variam, respectivamente, entre 0,42 e 1,15 e entre 0,55 e 1,58 enquanto que para o parâmetro de potência máxima, o desvio médio e o desvio padrão, variam entre 0,011 e 0,18 e entre 0,014 e 0,24. A variação percentual entre os níveis de irradiância e os valores da corrente de curto circuito são inferiores a 5 %. Estes resultados evidenciam a repetibilidade do processo de desenvolvimento dos protótipos de módulos de referência.

Tabela 2 - Características elétricas e desempenho do Prot 1 sob a influência de diferentes irradiância. Fonte: do autor.

Irradiância [W/m ²]	Eficiência [%]	FF [%]	R _s [Ω]	R _p [Ω]	P _m [W]	V _{oc} [V]	V _{mp} [V]	I _{sc} [A]	I _{mp} [A]
100	12,48	77,2	0,205	275,89	1,443	2,253	1,890	0,8303	0,7638
300	12,62	77,4	0,091	161,30	4,378	2,377	1,970	2,3801	2,2229
500	12,78	76,2	0,067	191,24	7,388	2,438	1,986	3,9765	3,7194
700	12,87	74,6	0,057	104,74	10,416	2,479	1,981	5,6287	5,2583
1000	12,48	72,5	0,049	144,46	14,438	2,519	1,958	7,9099	7,3742

Tabela 3 - Características elétricas e desempenho do Prot 2 sob a influência de diferentes irradiância. Fonte: do autor.

Irradiância [W/m ²]	Eficiência [%]	FF [%]	R _s [Ω]	R _p [Ω]	P _m [W]	V _{oc} [V]	V _{mp} [V]	I _{sc} [A]	I _{mp} [A]
100	12,28	75,7	0,214	325,34	1,420	2,252	1,876	0,8332	0,7571
300	12,50	76,5	0,094	202,55	4,338	2,379	1,963	2,3821	2,2092
500	12,66	75,4	0,070	215,41	7,323	2,441	1,978	3,9804	3,7012
700	12,75	73,8	0,059	98,33	10,323	2,483	1,971	5,6355	5,2369
1000	12,35	71,5	0,052	60,78	14,286	2,524	1,945	7,9219	7,3449

Tabela 4 - Características elétricas e desempenho do Prot 3 sob a influência de diferentes irradiância. Fonte: do autor.

Irradiância [W/m ²]	Eficiência [%]	FF [%]	R _s [Ω]	R _p [Ω]	P _m [W]	V _{oc} [V]	V _{mp} [V]	I _{sc} [A]	I _{mp} [A]
100	12,26	76,4	0,206	544,73	1,418	2,240	1,869	0,8281	0,7585
300	12,53	77,5	0,084	204,96	4,347	2,369	1,969	2,3689	2,2074
500	12,81	77,0	0,059	258,26	7,408	2,430	2,002	3,9600	3,6997
700	13,01	76,0	0,048	167,17	10,533	2,472	2,012	5,6020	5,2362
1000	12,77	74,6	0,041	136,14	14,764	2,513	2,006	7,8716	7,3603

Observando a Tab. 2 nota-se que a eficiência do Prot 1 varia entre 12,48 a 12,87 %. Em relação a outro parâmetro de desempenho, o fator de forma do módulo, é observável através da Tab. 2, que este parâmetro diminui seu percentual com o aumento da irradiância, possuindo seu maior valor de 77,4 % com 300 W/m². O menor fator de forma obtido foi de 72,5 % com a irradiância de 1000 W/m². O valor de 14,438 W foi obtido como potência nominal na condição de 1000 W/m². As resistências série e paralelo foram diminuindo conforme o aumento da irradiância. Para o módulo fotovoltaico quando maior for à resistência em paralelo, menor é a corrente de fuga gerada no circuito, e maior será o fator de forma.

Na Tab. 3 observa-se que o fator de forma do Prot 2 também diminui seu percentual com o aumento de irradiância, apresentando seu maior valor de 76,5 % com 300 W/m². O menor fator de forma obtido foi de 71,5 % com a irradiância de 1000 W/m². Através da Tab. 3 nota-se que a eficiência do Prot 2 teve uma variação, entre 12,28 a 12,75 %. A maior

eficiência foi de 12,75 % com irradiância de 700 W/m². O valor de 14,286 W foi obtido com a potência nominal na condição de 1000 W/m².

Conforme a Tab. 4 pode-se observar que o fator de forma do Prot 3 apresenta seu maior valor de 77,5 % com 300 W/m². O menor fator de forma obtido foi de 76 % com a irradiância de 700 W/m². A eficiência do Prot 3 teve uma variação, chegando em uma eficiência máxima de 13,01 % com irradiância de 700 W/m². O valor de 14,764 W foi obtido com a potência nominal na condição de 1000 W/m².

As curvas características I-V dos protótipos foram obtidas através de um simulador solar (*indoor*). Os testes foram realizados no Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). As curvas IV e as curvas PV dos protótipos Prot 1, Prot 2 e Prot 3 são apresentadas na Fig. 10.

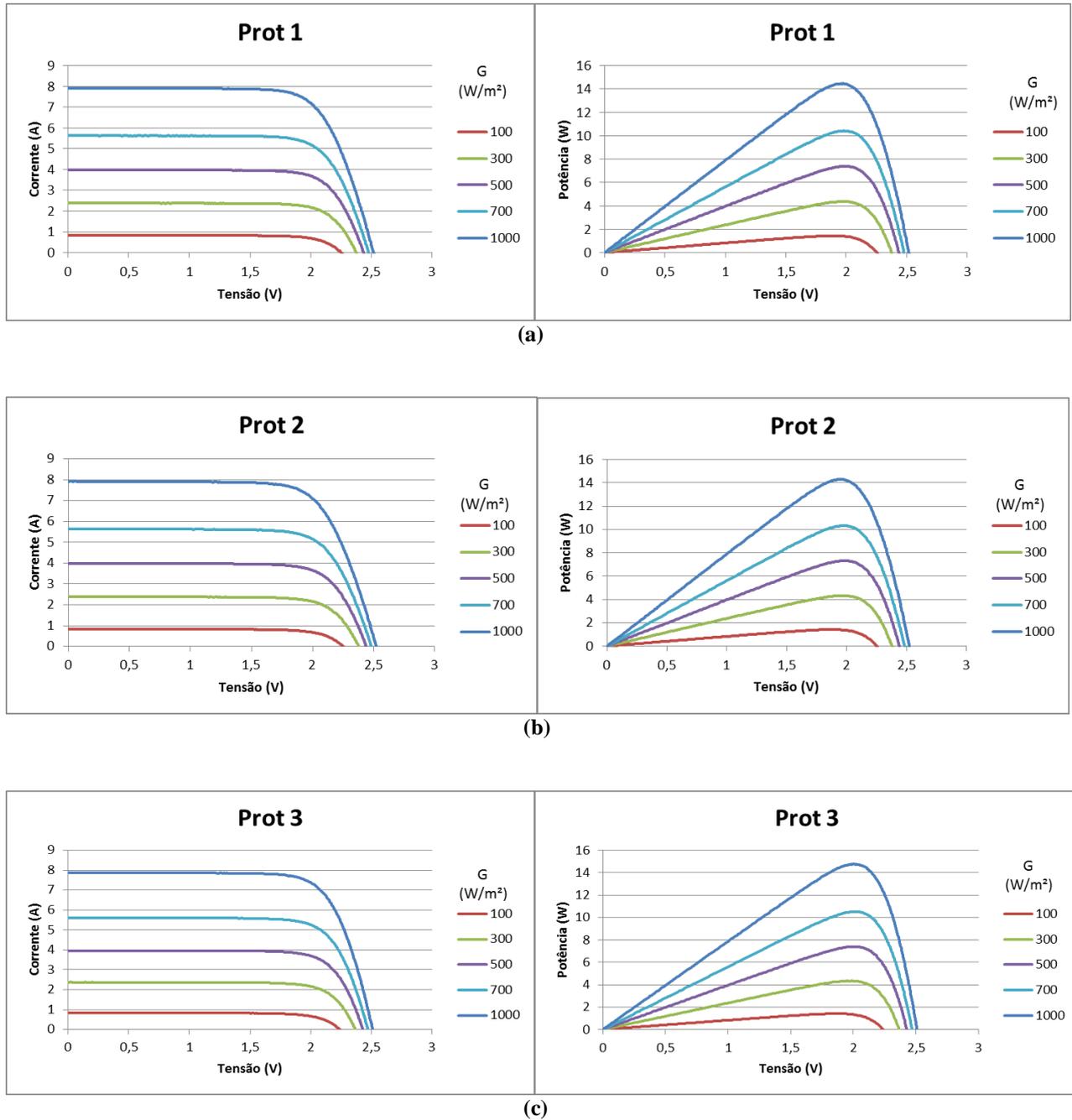


Figura 10 – Curvas I-V e curvas P-V dos Prot 1 (a), Prot 2 (b) e Prot 3 (c) em diferentes níveis de irradiância (Fonte: do autor).

Outros parâmetros elétricos foram analisados em relação ao aumento da irradiância. A Fig. 11 mostra a linearidade da I_{SC} em relação ao aumento da irradiância para os Prot 1, Prot 2 e Prot 3.

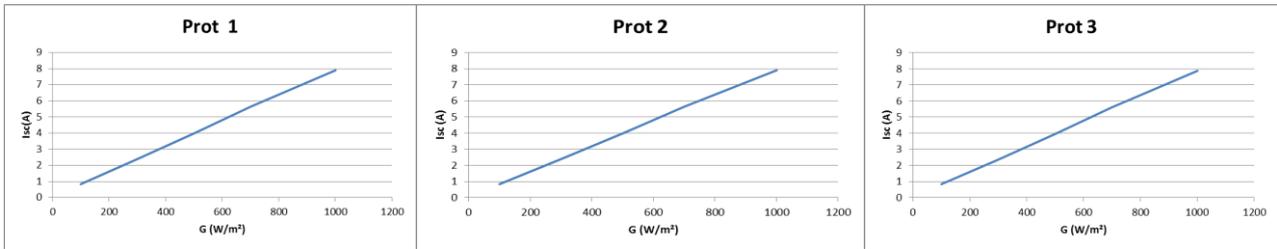


Figura 11 – Relação da I_{SC} com a variação de irradiância do Prot 1, Prot 2 e Prot 3 (Fonte: do autor).

A Fig. 12 apresenta o comportamento do fator de forma dos protótipos desenvolvidos em função da irradiância. A redução do fator de forma com o aumento da irradiância é causada devido alguma resistência série dos protótipos.

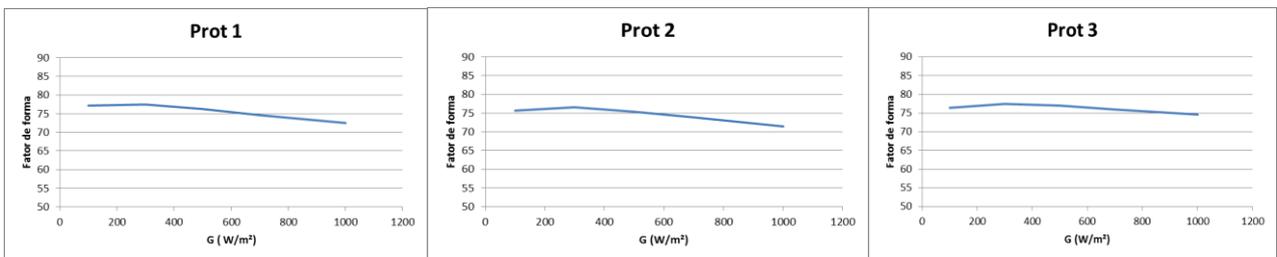


Figura 12 – Variação de FF com o aumento da irradiância do Prot 1, Prot 2 e Prot 3 (Fonte: do autor).

Observa-se na Fig. 13 que o comportamento da eficiência dos protótipos desenvolvidos em função da irradiância não variou muito em função do aumento da irradiância. O Prot 3 foi o protótipo que atingiu a menor eficiência de 12,26 % em 100 W/m^2 , esse mesmo protótipo também obteve a maior eficiência, chegando em 13,01 % com irradiância de 700 W/m^2 .

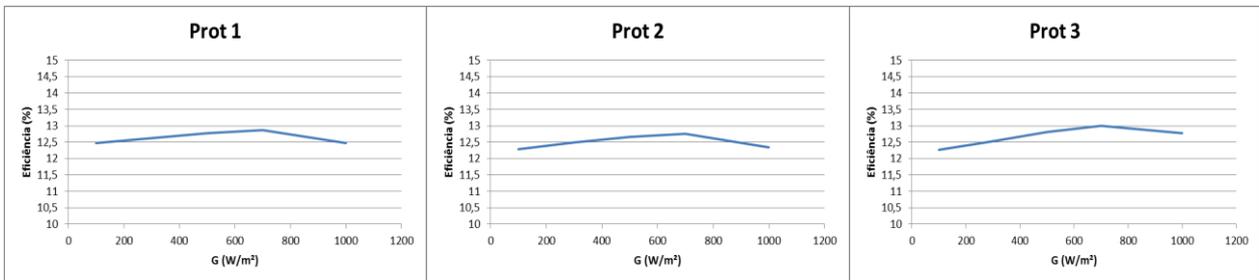


Figura 13 – Variação de eficiência com o aumento da irradiância do Prot 1, Prot 2 e Prot 3 (Fonte: do autor).

Conforme já apresentado, a Fig. 14 mostra a correlação entre a potência máxima dos protótipos e a irradiância.

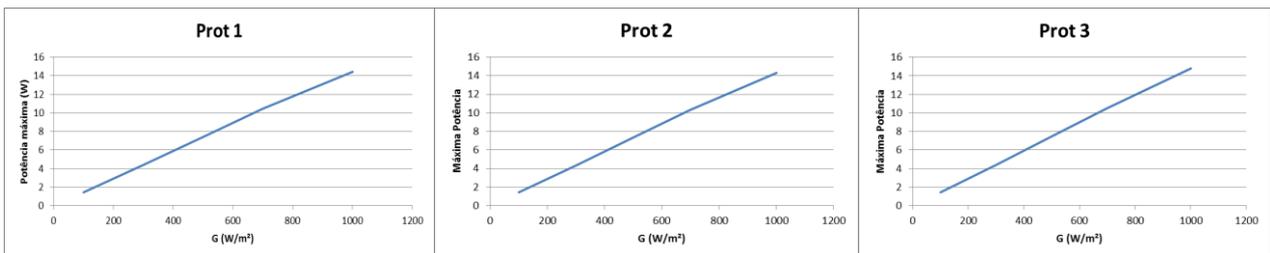


Figura 14 – Variação da $P_{MÁX}$ com o aumento da irradiância do Prot 1, Prot 2 e Prot 3 (Fonte: do autor).

A variação da resistência série conforme o aumento da irradiância está apresentado na Fig. 15. Para um módulo fotovoltaico quanto menor for a R_S maior será seu fator de forma e seu ponto de máxima potência.

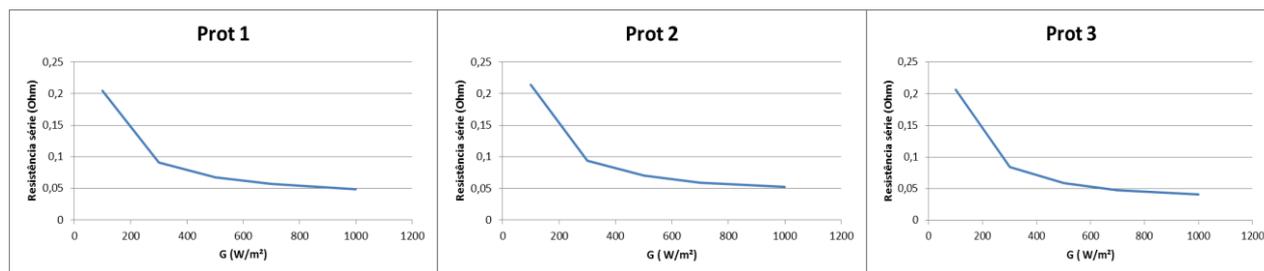


Figura 15 – Variação da R_S com o aumento da irradiância do Prot 1, Prot 2 e Prot 3 (Fonte: do autor).

A variação da resistência paralela conforme o aumento da irradiância está apresentado na Fig. 16. Conforme maior a resistência paralelo maior o bloqueio das correntes de fuga, melhorando a qualidade do módulo fotovoltaico.

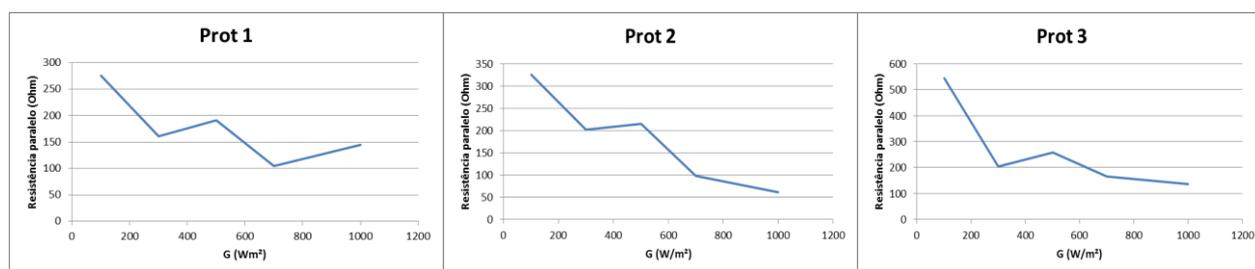


Figura 16 – Variação da R_P com o aumento da irradiância do Prot 1, Prot 2 e Prot 3 (Fonte: do autor).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A inserção dos 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 módulos 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 e PV e as correlações de fator de forma, eficiência, resistência série e paralelo, máxima potência e corrente de curto circuito em função da irradiância atingiram valores satisfatórios e esperados levando em consideração o método de construção dos protótipos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à BAESA Energética Barra Grande S.A, à ENERCAN Campos Novos Energia S.A. e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro, e ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade (PPGES) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Agradecimentos também ao Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela disponibilização de infraestrutura para realização dos ensaios.

Referências

- 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).
- Dalmagro, P. S.; Krenzinger, A., 2013. Análise de Simuladores Solares para Ensaio de Módulos Fotovoltaicos, In: salão ufrgs, sic - XXV salão de iniciação científica da ufrgs, Porto Alegre.

- 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, Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre.
- Pinho, J. T., Galdino, M. A., 2014. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro.
- Macêdo, W. N., 2006. Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede, Tese de Doutorado, Programa Pós-graduação em Energia, USP, São Paulo.
- Mocelin, A. R., 2014. Qualificação profissional e capacitação laboratorial em sistemas fotovoltaicos, Tese de Doutorado, Programa Pós-graduação em Energia, USP, São Paulo.

DEVELOPMENT OF PROTOTYPES OF REFERENCE MODULES FOR SOLAR RADIATION MEASUREMENT

Abstract. *Solar radiation is a renewable source and can be used in thermal and electrical energy conversion systems. There are many ways to obtain irradiance data and one of them is the measurement with a reference module. The advantages of the reference module are the low cost and the identical spectral response. This paper presents the electrical tests of prototype of reference modules developed at the Applied Research Laboratory at Federal University of Santa Catarina (UFSC). The developed prototypes were laminated to encapsulate the cells that compose the solar radiation meter. In indoor tests with solar simulator, the I-V and PV curves were obtained. Correlations of efficiency, fill factor, maximum power, short circuit current, series and shunt resistance were also determined. The prototypes presented a fill factor of approximately 75% and efficiencies of the order 13%. The short-circuit current has linear correlation with the irradiance.*

Key words: *Solar radiation, Reference module; I-V and P-V curves.*