

CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE PROTÓTIPOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS EM REVESTIMENTOS CERÂMICOS

André Possamai Rosso¹, Marcelo Cristiano Ludke², Giuliano Arns Rampinelli³,
Roderval Marcelino⁴, Vilson Gruber⁵

¹Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC/Campus Araranguá/possamairosso@yahoo.com.br

²Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC/Campus Araranguá/Marcelo_Ludke@hotmail.com

³Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC/Campus Araranguá/giuliano.rampinelli@ufsc.br

⁴Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC/Campus Araranguá/roderval.marcelino@ufsc.br

⁵Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC/Campus Araranguá/vilson.gruber@ufsc.br

Resumo: A energia solar fotovoltaica é uma das soluções viáveis e competitivas no que diz respeito ao uso de energias renováveis. A geração distribuída com sistemas fotovoltaicos possui características peculiares que permitem uma integração harmoniosa aos edifícios. Atualmente, existem normativas e incentivos para esta aplicação, tornando o setor atraente para os investimentos. Em um sistema fotovoltaico, o módulo é um dos principais equipamentos, e tem a responsabilidade de converter energia solar em energia elétrica. Muitos edifícios têm fachadas ventiladas como um elemento de conforto térmico e arquitetônico, mas também podem ser usados como um local para a instalação de módulos fotovoltaicos. As fachadas ventiladas são constituídas de revestimento cerâmico ou vidro. Este artigo apresenta ferramentas para a construção de protótipos de módulos fotovoltaicos, integrados em revestimento cerâmico, aplicados em fachada ventilada. Este componente é instalado em uma planta piloto bioclimática na cidade de Araranguá - SC na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Após o desenvolvimento dos protótipos e sua instalação na fachada ventilada da planta piloto bioclimática, foram realizados testes de exposição à radiação solar e medidas para o levantamento da curva I-V.

Palavras-Chave: Energia solar, módulos fotovoltaicos, geração distribuída, fachada ventilada, curva I-V.

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um insumo para o desenvolvimento econômico sustentável da sociedade contemporânea. Os sistemas fotovoltaicos de geração distribuída apresentam maturidade tecnológica, confiabilidade, competitividade econômica e podem contribuir para atender a demanda crescente e gradativa de energia e descarbonizar a matriz elétrica.

A eficiência energética e a geração distribuída com sistemas fotovoltaicos são estratégias fundamentais no projeto de edificações sustentáveis. A redução do consumo de energia nas edificações pode ser obtida através de ações de eficiência energética e da geração de energia junto à edificação, utilizando os sistemas fotovoltaicos como material de construção, para assim reduzir ainda mais os impactos econômicos e ambientais inerentes ao consumo de energia elétrica (RÜTHER, 2012). Em um sistema fotovoltaico, os módulos são os componentes que produzem energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico que ocorre nas células solares. Consequentemente, o módulo fotovoltaico é um dos principais dispositivos em relação à confiabilidade do sistema. Para que um sistema fotovoltaico produza energia elétrica com confiabilidade necessária, o projeto, a instalação e a manutenção devem ser otimizados (ZANESCO, et al., 2014).

A geração de energia elétrica conectada à rede de distribuição pode se dar através de sistemas fotovoltaicos integrados à rede de distribuição de energia elétrica, utilizando um inversor que controla a injeção de energia elétrica na rede, mantendo critérios de qualidade e segurança (PINHO e GALDINO, 2014). A indústria fotovoltaica vem desenvolvendo uma série de produtos dirigidos à aplicação ao entorno construído, tendo recentemente lançados comercialmente módulos fotovoltaicos de vidro sem moldura, que podem ser instalados diretamente como material de revestimento de telhados ou fachadas (RÜTHER, 2004). Algumas edificações apresentam tipos de fachadas que podem ser usadas para proteção, e essas fachadas podem ser aproveitadas para a instalação de sistemas fotovoltaicos.

Um dos ensaios mais completos para determinar as características elétricas de um módulo fotovoltaico é o traçado de sua curva característica I-V. O módulo 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 negativa. Durante esta varredura são registrados pares de dados de tensão e corrente, permitindo o traçado de uma curva característica (PINHO e GALDINO, 2014).

Para levantar a curva característica I-V de uma célula, um módulo ou um arranjo fotovoltaico, é necessário algum dispositivo que polarize estes conversores, enquanto iluminados, nos diversos pontos da curva; e um equipamento para medir, em conjunto, os valores de corrente e tensão (pares I-V). Também é necessário saber informações sobre a irradiância incidente e a temperatura operacional do dispositivo que está sendo caracterizado (OLIVEIRA, 2015).

Este artigo apresenta resultados de ensaios de exposição à radiação solar e caracterização elétrica dos protótipos de módulos fotovoltaicos desenvolvidos em revestimentos cerâmicos para uma fachada ventilada, instalada em uma planta piloto com arquitetura bioclimática de nível A em eficiência energética, construída na cidade de Araranguá – SC.

2 METODOLOGIA

Os módulos fotovoltaicos foram desenvolvidos em um processo artesanal, fazendo uso de equipamentos e componentes disponíveis no Laboratório de Pesquisa Aplicada da Universidade Federal de Santa Catarina. Para a produção seriada dos

módulos fotovoltaicos em revestimento cerâmico se faz necessário à inclusão de uma linha industrial composta por equipamentos específicos de alta tecnologia.

Os protótipos desenvolvidos com diferentes métodos de materiais encapsulantes estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 01 – Estruturas dos protótipos dos módulos fotovoltaicos.

Protótipos	Estrutura do módulo	Tipo de célula
Prot 1	Semi flexível	Monocristalina
Prot 2	Vidro/EVA	Monocristalina
Prot 3	Vidro/Silicone	Policristalina
Prot 4	Resina PU/Catalisador/EVA	Monocristalina

Fonte: do Autor

A irradiação solar incidente em uma área superficial depende do ângulo de inclinação e do ângulo de azimute da superfície. Estes ângulos devem ser otimizados para garantir o máximo recurso solar disponível e, conseqüentemente, a máxima geração de energia elétrica a partir do sistema fotovoltaico. Entretanto, por motivos diversos, em algumas situações não é possível otimizar estes ângulos e, portanto, um estudo sobre a variação do recurso solar em função dos ângulos de inclinação e azimute se faz necessário.

Os módulos fotovoltaicos anexados na fachada ventilada estão em uma inclinação de 90° posicionados para o norte, perdendo aproximadamente 50 % da irradiação solar média diária anual. Mesmo com essas perdas é vantajosa a instalação dos módulos fotovoltaicos para a geração de energia elétrica na fachada ventilada. As medidas foram realizadas registrando simultaneamente os valores de corrente, tensão, irradiância incidente e temperatura do módulo. Para a medição da tensão e corrente foi utilizado uma fonte programável de carga eletrônica DC de alta precisão da série IT8812B, conforme apresentado na Figura 1 fabricado pelo Copyright @ITECH Electronic Co.,ltd.

Figura 01 - Fonte programável de carga eletrônica DC.



Para realizar essa translação da curva I-V é necessário realizar a determinação dos coeficientes térmicos α e β , já que estes estão diretamente ligados com a variação da potência de um módulo. Sendo assim, α e β correspondem a uma importante informação sobre o desempenho do módulo que nas condições reais de operação que se encontram em condições distintas da condição padrão.

Eq. (1) que é a corrente de curto-circuito ajustada, permite calcular um novo valor de corrente de curto-circuito. Na Eq. (2) se ajustou a tensão de circuito aberto e fornece o novo valor de tensão de circuito aberto. Fica claro que é necessária a determinação dos coeficientes térmicos α e β , além de um coeficiente δ para que as equações sejam aplicadas.

$$I_{SC2} = \frac{I_{SC1}}{[1 + \alpha(T_1 - T_2)]} \quad (1)$$

$$V_{OC2} = \frac{V_{OC1}}{[1 + \beta(T_1 - T_2)][1 + \delta(\ln \frac{E_2}{E_1})]} \quad (2)$$

Nas Eq. (1) e (2), tem-se com sub índice 1 corresponde a condição de medida da curva I-V, e os termos com sub índice 2 correspondem a condição para a qual se pretende transladar. O termo δ é obtido a partir da inclinação da curva V_{OC} versus $\ln(G)$. Para a elaboração desta curva é necessário a determinação de diversas curvas com a mesma temperatura para a qual se deseja transladar, porém com diferentes irradiâncias. A corrente e tensão são transladadas por meio de uma interpolação simples. A Eq. (3) corresponde a translação da corrente intermediária e a Eq. (4) a translação da tensão intermediária.

$$I_2 = I_1 \left(\frac{I_{SC2}}{I_{SC1}} \right) \quad (3)$$

$$V_2 = V_1 \left(\frac{V_{OC2}}{V_{OC1}} \right) \quad (4)$$

Um dos fatores que podem alterar a eficiência da célula e do módulo fotovoltaico se dá através da formação de resistências série (PRIEB, 2002). A resistência série se origina na resistência do próprio material semiconductor, no contato metálico e na

junção metal-semicondutor. As resistências em série tem influência importante na curva I-V da célula, contribuindo para reduzir o Fator de Forma (FF), e sua eficiência (η). A Resistência em série contribui para reduzir a I_{sc} e o FF, mas não afeta a V_{oc} (PINHO e GALDINO, 2014)..

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro teste realizado foi o de exposição à radiação solar. Esse teste consiste em expor o protótipo desenvolvido à radiação solar (banho de sol). Foi realizada uma avaliação de inspeção visual dos protótipos obtidos. Estes protótipos foram anexados à fachada ventilada da planta piloto sendo submetidos à exposição ao sol, chuva e intempéries. Após um mês de instalação dos protótipos, foram obtidos os resultados que estão apresentados na Tabela 2.

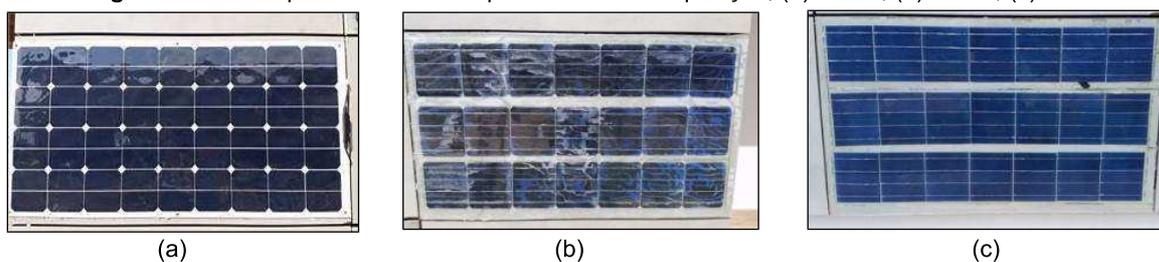
Tabela 02 – Avaliação de inspeção visual.

Protótipos	Avaliação Inspeção visual
Prot 1	Aprovado
Prot 2	Aprovado
Prot 3	Aprovado
Prot 4	Reprovado

Fonte: do Autor

Os protótipos Prot 1, Prot 2 e Prot 3, permaneceram inalterados após um mês de exposição, como ilustra a Figura 2.

Figura 02 - Protótipos fotovoltaicos após um mês de exposição, (a) Prot 1, (b) Prot 2, (c) Prot 3.



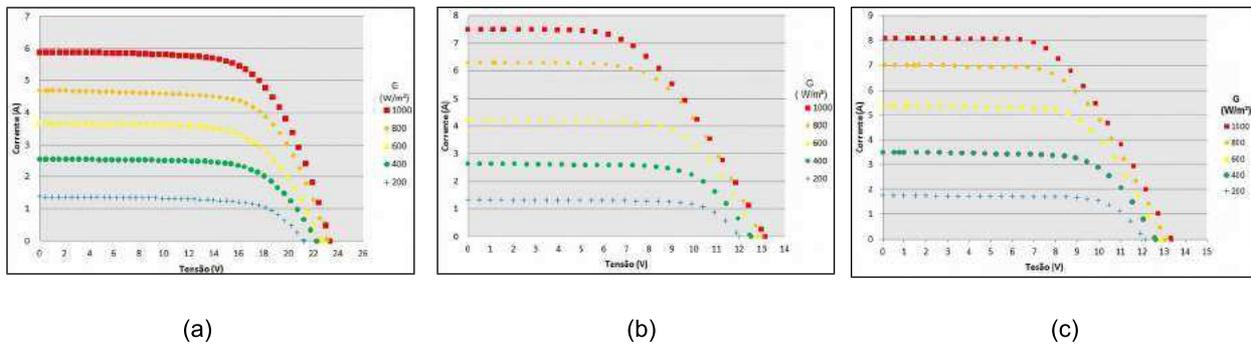
Fonte: do Autor

O protótipo Prot 4, após um mês de exposição, apresentou a formação de bolhas no módulo. Algumas destas bolhas chegaram a estourar, deixando as células fotovoltaicas expostas às intempéries, conforme apresentado na Figura 3. Este módulo fotovoltaico foi reprovado pelo teste de inspeção visual, sendo descartado da obtenção das curvas I-V.

Figura 03 - Prot 4 anexado na fachada após um período de um mês.

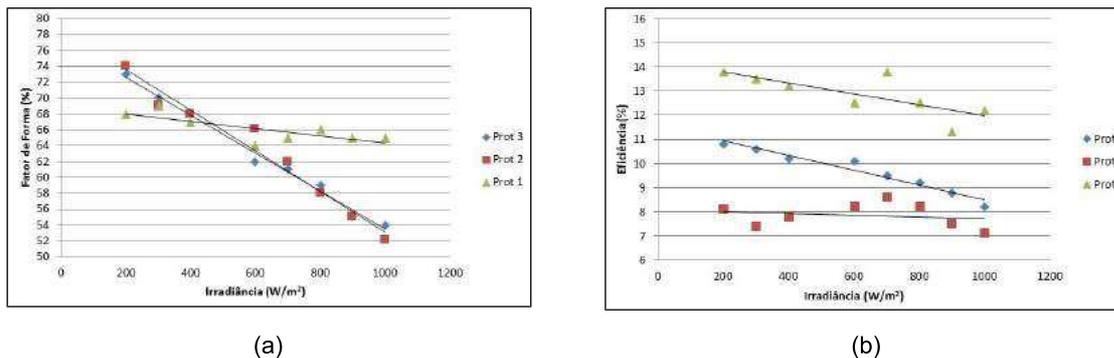
Fonte: do Autor

As curvas recorrentes dos resultados das medições serão apresentadas nas condições padrões (STD), isto é, irradiância a 1000 W/m^2 e temperatura de célula de 25°C e $\text{AM} = 1,5$. Para o Prot 1 (a), Prot 2 (b) e Prot 3 (c), as curvas I-V obtidas estão apresentadas na Figura 4.

Figura 04 - Curva I-V para os Prot 1, Prot 2 e Prot 3.

Fonte: do Autor

Pode-se perceber nas curvas características para o Prot 2 e Prot 3, que a inclinação da curva I-V do ponto de circuito aberto até o “joelho” da curva é mais acentuada, portanto sua resistência série é elevada. A resistência em série alta se deu devido ao seu método construtivo, como foi usado strings de células ímpares. Para completar a ligação dos terminais foi necessária adicionar uma barra de ligação, esta, que devido a efeito Joule. A Figura 5 apresenta o comportamento do fator de forma dos protótipos desenvolvidos em função da irradiância (a) e o comportamento da eficiência dos protótipos desenvolvidos em função da irradiância (b).

Figura 05 - Variação do Fator de Forma (FF) e Eficiência (n) com a Irradiância.

Fonte: do Autor

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tecnologia de energia solar fotovoltaica apresenta maturidade tecnológica e confiabilidade de desempenho. Além disso, a geração distribuída com sistemas fotovoltaicos atualmente têm viabilidade econômica e competitividade em um cenário favorável e promissor para sua difusão e popularização no mercado brasileiro.

Este trabalho apresentou a descrição do processo de desenvolvimento de protótipos de módulos fotovoltaicos integrados em revestimento cerâmico. Para a construção dos protótipos, foram testados e utilizados diversos materiais para encapsulamento das células fotovoltaicas. Os protótipos foram integrados em uma fachada ventilada que está instalada em uma planta piloto bioclimática na cidade de Araranguá – SC, no campus da Universidade Federal de Santa Catarina.

A fachada ventilada atua como elemento arquitetônico e de conforto térmico, apresentando também a capacidade de geração de energia elétrica a partir dos protótipos desenvolvidos e apresentados neste trabalho. Testes iniciais de exposição à radiação solar e de desempenho elétrico foram realizados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o auxílio financeiro das empresas BAESA Energética Barra Grande SA e ENERCAN Campos Novos SA e à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

REFERÊNCIAS

ZANESCO, I.; GARCIA, B. S.; MOEHLECKE, A.; VALDIVIA, B. H.; LIMA, W. N. Análise da degradação de módulos fotovoltaicos fabricados com diferentes células solares.

Revista Brasileira de Energia Solar, Volume V, Número 2, Dezembro de 2014 p. 101-108.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014. (Brasil) (Org.).

PRIEB, C. W. M. **Desenvolvimento de um sistema de ensaio de módulos fotovoltaicos**. 2002. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UFRGS, Porto Alegre, 2002.

RÜTHER, R. *et al.* Geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas: compromissos entre forma e função. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (CBENS), 4., 2012, São Paulo. **Anais...** . São Paulo: Cbens, 2012. p. 1 - 8.

RÜTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos: O potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**, 2004. 113 p. (Editora UFSC).

OLIVEIRA, S. F. **Desenvolvimento de Traçador de Curvas I-V Portátil para Arranjos Fotovoltaicos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFRGS, Porto Alegre, 2015.