

CARACTERIZAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAÍCOS ORGÂNICOS (P3HT:PCBM) COM RADIAÇÃO SOLAR

O. Cardozo¹, H. A. Carvalho², R. M. Oliveira³, O. C. Vilela⁴, N. Fraidenraich⁵, R. Vilaça⁶, D. Bagnis⁷,
A. Lima⁸

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares (PROTEN) Centro de Energias
Renováveis (CER)

Departamento de Energia Nuclear – UFPE, Avenida Prof. Luiz Freire, 1000, Recife, Pernambuco.

Tel. +55 (81) 2126-7971 – Fax +55 (81) 2126-8000 e-mail: protenufpe@gmail.com

Recibido 08/08/16, aceptado 07/10/16

RESUMEN: Los principales parámetros que influyen en la eficiencia de módulo solar orgánico de capa activa P3HT:PCBM, se analizan en este trabajo en condiciones reales de la radiación solar. Los experimentos se llevaron a cabo en la Universidad Federal de Pernambuco en Recife, Pernambuco, Brasil. Por medio del análisis de los resultados se puede observar el comportamiento de los parámetros eléctricos de un módulo orgánico en función de la irradiación y, por tanto, entender cómo funcionaría un sistema que utiliza la electricidad generada a partir de paneles orgánicos.

Palabras clave: fotovoltaico, módulos orgánicos, caracterización.

INTRODUÇÃO

Os primeiros estudos de dispositivos fotovoltaicos, incluindo células com corantes orgânicos, surgiram na década de 50. Nos anos 80 foram investigadas as primeiras células fotovoltaicas poliméricas. No entanto, estes dispositivos demonstravam eficiências bem abaixo de 0,1%. Em 1986, o físico-químico Tang (1986) propôs a inserção de doadores e aceitadores de elétrons juntos em uma célula possibilitando aumentar a eficiência para 1% (Spanggaard e Krebs, 2004).

Segundo Luo et al. (2016), as células fotovoltaicas orgânicas (OPVs - *Organic Photovoltaics*), são candidatas promissoras para a obtenção de energia acessível e renovável, apresentando nos últimos anos um rápido aumento da eficiência de conversão de energia, acima de 10%. Ainda, são previstas quedas consideráveis no custo do Wp produzido, de forma a tornar esses dispositivos competitivos com materiais fotovoltaicos de tecnologias similares - filmes finos (Gambhir et al., 2016).

Embora as CSO's apresentem baixo impacto ambiental durante o processo de fabricação e operação (Scharber, 2013), a estabilidade ainda apresenta-se como uma limitação da tecnologia (Kim et al., 2016).

A grande maioria dos estudos sobre o comportamento das CSO's apresentam resultados de ensaios realizados com células de tamanhos milimétricos e em ambientes totalmente controlados (indoor), com fontes de luz artificiais (lasers, simuladores solares) e durante breves períodos de tempo (Lin et

¹ Mestrando PROTEN

² Mestrando PROTEN

³ Técnico PROTEN

⁴ Docente Colaborador PROTEN

⁵ Docente Visitante PROTEN

⁶ CSEM Brasil

⁷ CSEM Brasil

⁸ CSEM Brasil

al., 2012, Katz et al., 2011 e Green et al., 2016). Na prática, os módulos que utilizam as CSO's operam em condições reais de radiação, temperatura e espectro solar (outdoor).

Este trabalho tem como objetivo analisar um módulo fotovoltaico orgânico em condições reais de operação, ou seja, em ambiente externo, exposto ao sol sem nenhum tipo de controle climático, determinando seu comportamento operacional nos parâmetros seguintes: eficiência (η), corrente de curto circuito (I_{CC}), tensão de circuito aberto (V_{OC}) e fator de forma (FF). Com isso, será possível avaliar seu comportamento efetivo. Modelos do comportamento de células orgânicas (Giebink et al., 2010) guardam, em certas condições, semelhança com os modelos que descrevem o funcionamento de células inorgânicas (modelo de Shockley).

Para a realização deste estudo, foi utilizado um módulo de célula orgânica de 10 cm x 10 cm, com área ativa de 72 cm², fornecido pelo Centro de Inovações CSEM Brasil, por meio de um Convênio entre CSEM e o Centro de Energias Renováveis da UFPE. O Convênio compreende a realização de ensaios na área de testes do GRUPO FAE – UFPE.

METODOLOGIA

O procedimento metodológico deste trabalho consiste, em uma primeira fase, na obtenção de curvas características de um módulo OPV em diferentes condições de irradiância e temperatura. Os parâmetros característicos do módulo são definidos com base nas curvas características e analisados de forma a determinar seu comportamento operacional nas condições outdoor.

Arquitetura das células

As células presentes no módulo utilizado nos ensaios têm sua camada ativa formada por uma heterojunção de volume (bulk heterojunção), composta por um polímero (P3HT) e um fulereno (PCBM), estrutura típica, como por exemplo Katz et. al (2016). Sua arquitetura está representada na *Figura 1*.

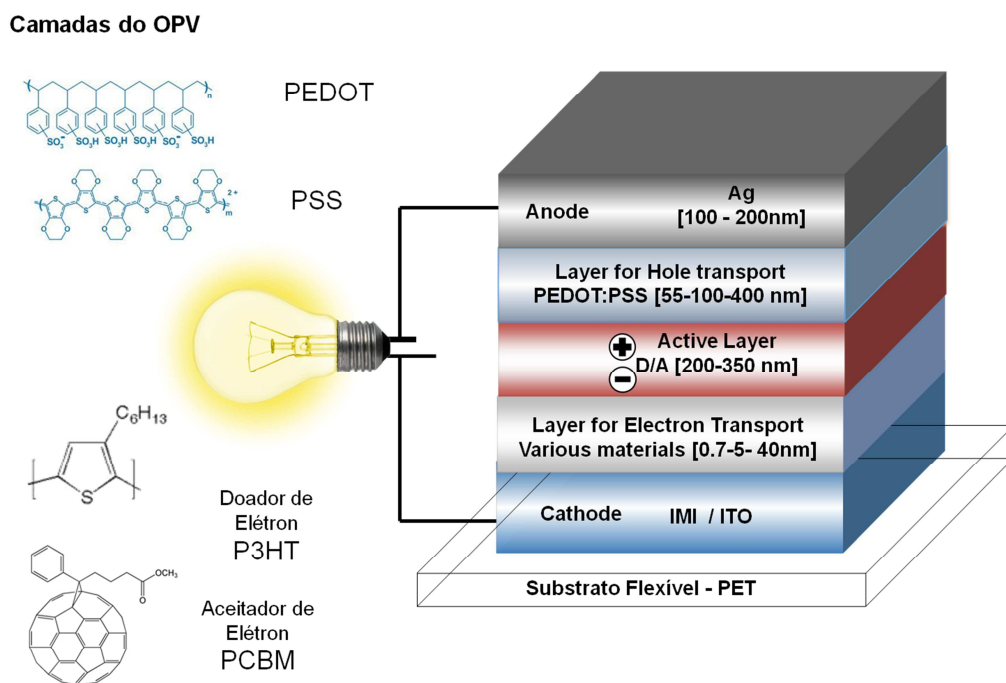


Figura 1: Arquitetura das células que integram o módulo ensaiado.

Fonte: CSEM Brasil

Características do módulo

Os parâmetros físicos e elétricos do módulo estudado, nas condições padrão (1000 W/m², 25°C, AM 1,5), são apresentados na Tabela 1.

Parâmetro	Valor	Unidade
V_{oc}	3,31	Volts
I_{cc}	0,076	Amp
P_{max}	0,140	Watts
V_{mp}	2,27	Volts
I_{mp}	0,061	Amp
I_{col}	1000	W/m ²
T	25,0	°C
FF	55	%
η	1,95	%

Tabela 1: Parâmetros nas condições padrão

Os ensaios outdoor foram realizados no período de 26/04/2016 a 21/06/2016 em Recife, Nordeste brasileiro, onde a latitude chega a aproximadamente oito graus negativos e a longitude 34 graus negativos. Todos os testes foram feitos entre 09:00 e 16:00 horas e em dias de céu relativamente claro. Dentre todos os experimentos, foram escolhidas 24 curvas características que apresentaram pouca variação da radiação e temperatura no processo de obtenção dos dados.

Ensaio e Instrumentação

Com área ativa de 72 cm², o módulo utilizado, mostrado na Figura 2, é formado por 6 células solares orgânicas conectadas em série. Os dados foram coletados através de um datalogger *Campbell CR 10X*. Para gerar as curvas características os módulos foram acoplados à uma estrutura de suporte e expostos ao sol em uma área livre de sombreamento.

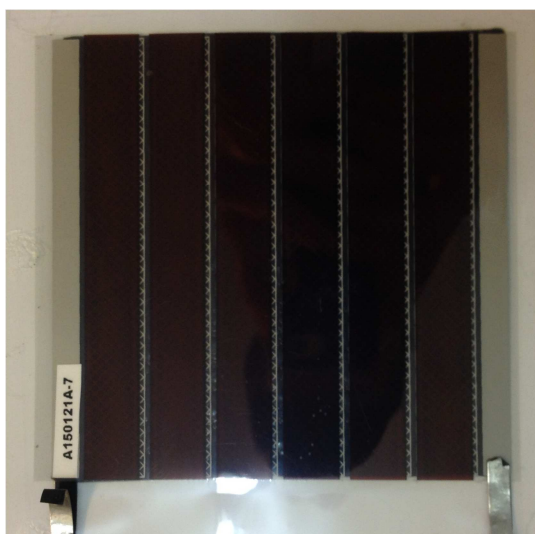


Figura 2: Módulo Fotovoltaico Orgânico. Fonte: Autor

O módulo foi conectado a uma carga eletrônica variável *Kepeco BOP 36-12M*, tornando possível a variação da carga, para gerar a curva característica. Um piranômetro fotovoltaico foi conectado ao data logger e colocado sempre na mesma altura do módulo, evitando as sombras, além de três sensores de temperatura *LM35*, que fizeram contato com a face inferior do dispositivo. As medidas de todos os sensores foram colhidas simultaneamente.

As curvas características foram geradas a partir da corrente em função da tensão no dispositivo, e utilizadas para analisar o desempenho do módulo em seus parâmetros principais, que são:

- I_{CC} – Corrente de curto circuito
- V_{OC} – Tensão de circuito aberto

- FF – Fator de forma
- η – Eficiência

Com os dados de I_{CC} e V_{OC} obtidos no processo de caracterização, foi possível calcular FF através da Equação 1.

$$FF = \frac{V_{MP} \times I_{MP}}{V_{OC} \times I_{CC}} \quad (1)$$

Onde:

V_{MP} – tensão na máxima potência (V);
 I_{MP} – corrente na máxima potência (A).
 V_{OC} – tensão de circuito aberto (V);
 I_{CC} – corrente de curto circuito (A).

Utilizando os dados de potência máxima, foi possível calcular a eficiência do módulo pela Equação 2:

$$\eta = \frac{V_{MP} \times I_{MP}}{A \times I_{coll}} \quad (2)$$

Onde:

A – área efetiva (m^2);
 I_{coll} – intensidade de radiação (W/m^2).

RESULTADOS

Um exemplo de curva característica obtida em Recife ($\lambda = -8$), no dia 27/04/2016 às 12:32h (horário local) para irradiância de $993 W/m^2$ e temperatura de célula de $45,5^\circ C$ é mostrado na Fig. 3.

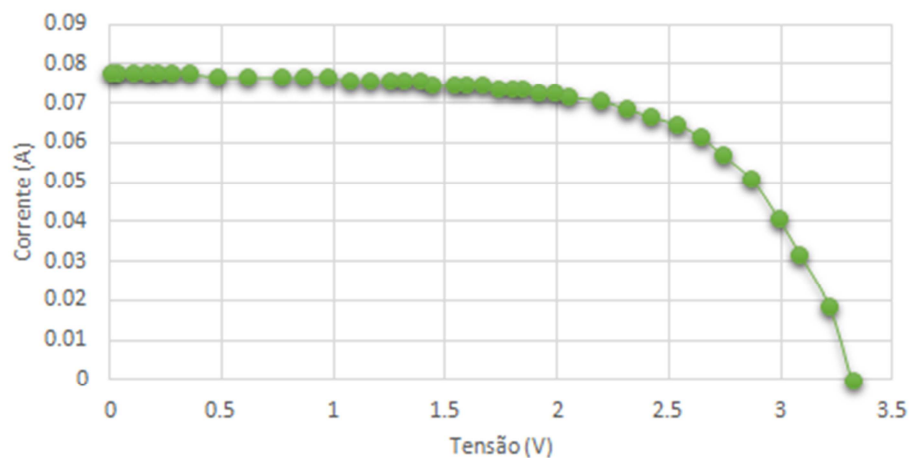


Figura 3. Curva característica de um módulo orgânico obtido em condições outdoor.

Para as condições específicas de operação, obtém-se na curva mostrada na Fig. 3, os valores de 3,32 V para V_{oc} , 0,078 para I_{cc} , 2,531V e 0,065 A para V_{mp} e I_{mp} . O fator de forma (FF) e a eficiência (η) calculados são de 63,6 e 2,3%, respectivamente. Com os resultados de todas as medidas (total 24), foram traçadas as tendências de diferentes parâmetros, para análise do comportamento em função da irradiância.

A Fig. 4 mostra a relação entre a corrente de curto-circuito e a radiação solar incidente para uma faixa de irradiância variando entre $450 W/m^2$ e $1270 W/m^2$.

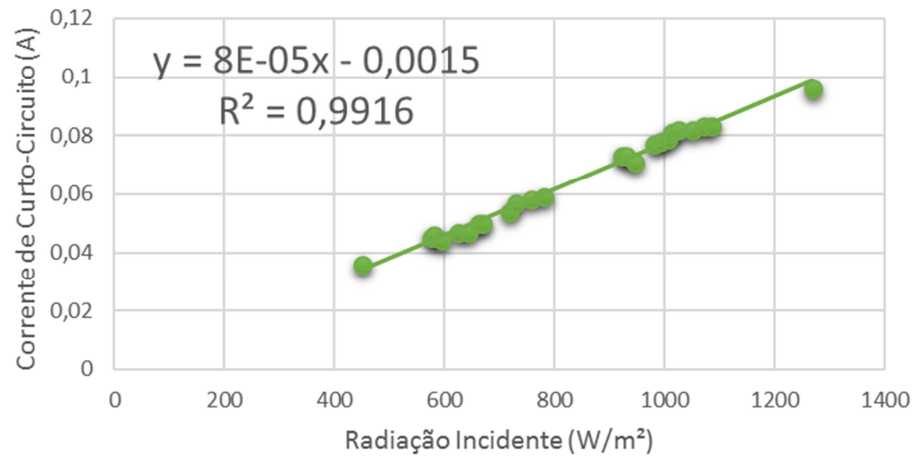


Figura 4. Relação entre a corrente de curto-circuito e a radiação solar incidente para uma faixa de irradiância variando entre 450 W/m² e 1270 W/m².

Pode ser observado na Fig.4 que a corrente de curto-circuito apresenta uma relação linear com a radiação incidente na faixa medida. Esse comportamento é similar ao das células e os módulos inorgânicos de Silício. Isso ocorre pois a corrente de curto-circuito, que é a corrente máxima que o módulo pode gerar em determinadas condições de operação, é proporcional à quantidade de fótons absorvidos. Manor et. al. (2011) mostram que para valores elevados de irradiância (sistemas com concentração) esse comportamento deixa de ser linear devido à intensificação das taxas de recombinação. O valor de R² (coeficiente de determinação) da curva de tendência mostrada na Fig. 4 é superior a 0,99, mostrando a adequação do modelo linear ao comportamento observado, no intervalo de irradiância incidente.

A Fig. 5 (a), mostra a variação da tensão de circuito aberto (V_{oc}) em função da radiação solar incidente obtida experimentalmente (a) e, a título de comparação, as curvas apresentadas por Elumalai e Uddin (2010) (b).

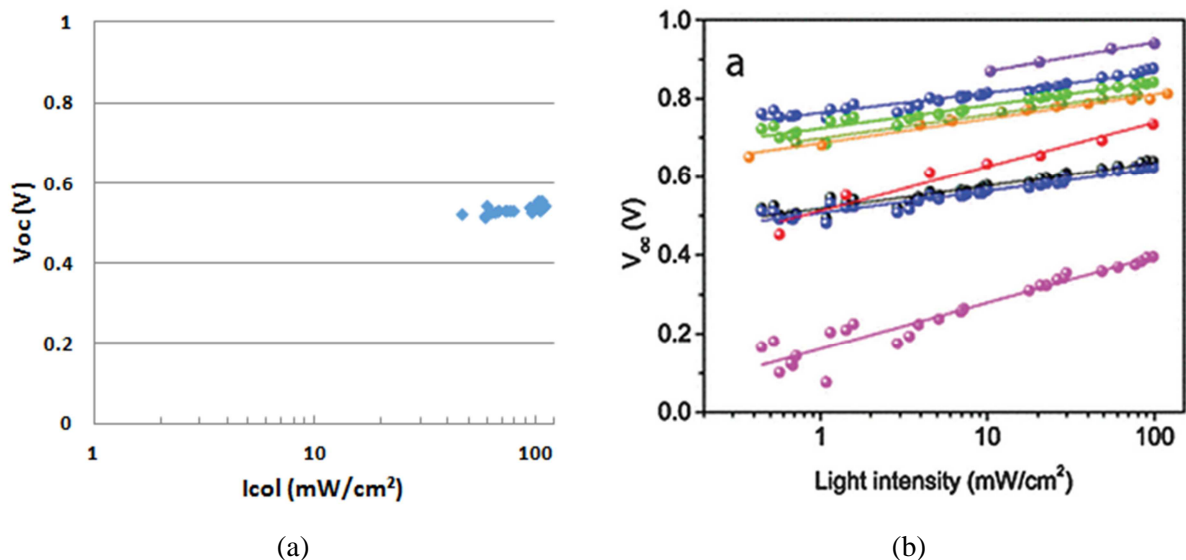


Figura 5. (a) mostra a variação da tensão de circuito aberto, para uma célula, (V_{oc}), em função da radiação solar incidente obtida experimentalmente. (b) a linha preta representa a variação de (V_{oc}) em função da radiação solar incidente. Fonte: Adaptado de (Elumalai e Uddin, 2010).

Verifica-se que os valores experimentais mostrados na Fig. 5 (a), embora estejam em uma região mais restrita de valores de I_{col} (entre 452 W/m² a 1269 W/m²), encontram-se na mesma faixa de valores representados pela linha preta na Fig. 5 (b) (Elumalai e Uddin, 2010), apresentando comportamento similar.

De acordo com Elumalai e Uddin (2010), a tensão de circuito aberto de um módulo orgânico, de arquitetura semelhante à utilizada nesse experimento, varia de maneira linear com a temperatura, como mostra a Fig. 6:

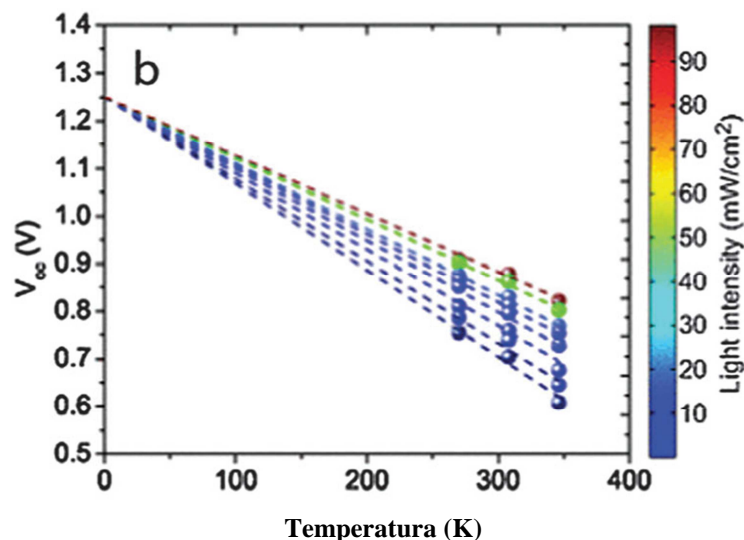


Figura 6. Tensão de circuito aberto de um módulo orgânico em função da temperatura.
Fonte: (Elumalai e Uddin, 2010)

A tensão de circuito aberto depende da energia do gap HOMO-LUMO cujas bordas se dispersam (difundem) e aproximam com a temperatura, reduzindo conseqüentemente Voc (Elumalai e Uddin, 2010). A Fig.6 mostra este comportamento. As temperaturas observadas durante as medidas realizadas neste trabalho se encontram na região dos 300 K e sugerem pequenas variações de Voc.

De acordo com (Coutinho et. al.,2015) a variação nos principais parâmetros de uma célula orgânica de arquitetura similar à aqui estudada, em relação à temperatura, acontece como representado na Fig. 8:

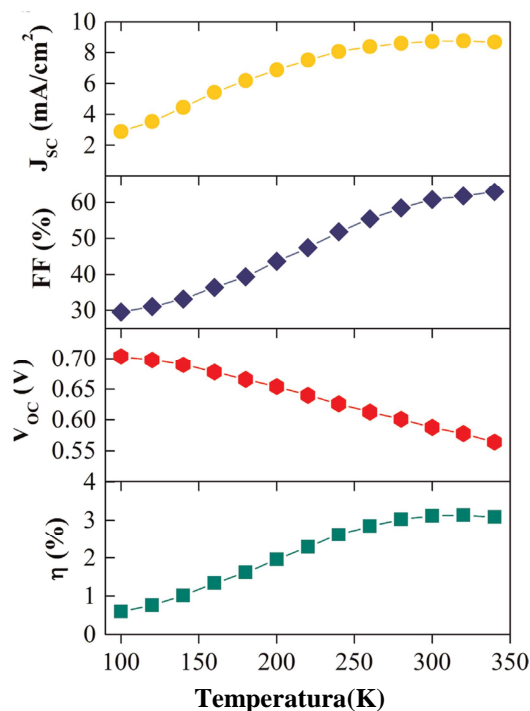


Figura 7. Variação nos principais parâmetros de uma célula orgânica em função da temperatura.
Fonte: Coutinho et. al.,2015

O intervalo de temperatura que tivemos entre as medidas foi entre 38,8°C e 52,8°C (311,8K e 325,8K), estando assim localizado na região de melhor eficiência, de acordo com (Coutinho et. al., 2015).

A Fig. 8 mostra a variação do valor de potência máxima para diferentes valores de radiação incidente.

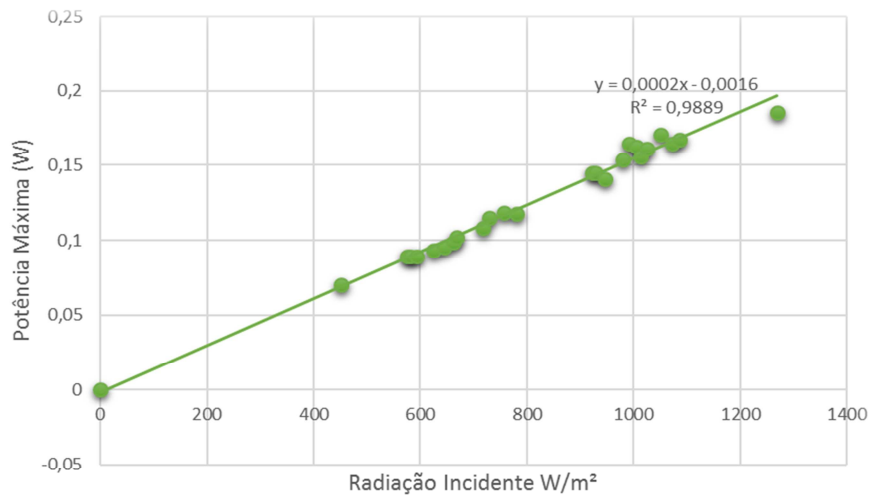


Figura 8. Variação do valor de potência máxima para diferentes valores de irradiância.

A potência máxima é resultado da Equação 3:

$$P_{\text{máx}} = V_{\text{mp}} \times I_{\text{mp}} \quad (3)$$

Onde V_{mp} e I_{mp} representam a tensão e corrente no ponto de máxima potência.

Observa-se um comportamento linear da potência máxima em relação à radiação incidente, com coeficiente de determinação superior a 0,98.

I_{mp} aumenta de maneira praticamente linear em função da radiação incidente, já V_{mp} não apresenta grandes variações. Conhecer a máxima potência do dispositivo é importante para o dimensionamento de produtos que virão a utilizar a tecnologia fotovoltaica orgânica.

A eficiência de um módulo fotovoltaico é calculada conforme mencionado na seção Metodologia (Equação 2). Na Figura 7 mostra-se a eficiência estimada por meio dos resultados dos ensaios, em função da radiação incidente. O comportamento linear da potência máxima com a radiação incidente (Fig. 8) sugere valores constantes da eficiência como se observa, ainda que com pequenas flutuações, na Fig. (9)

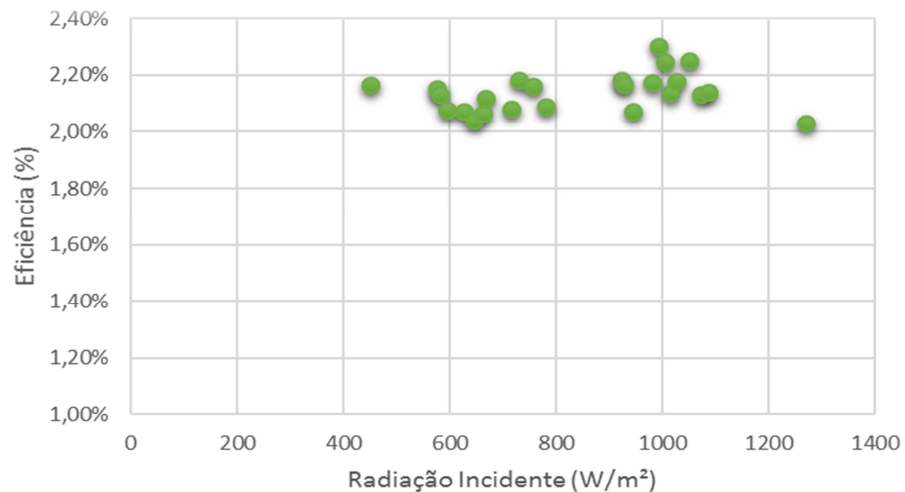


Figura 9. Variação da eficiência em relação à irradiância.

A dispersão dos valores de eficiência obtidos, encontra-se entre 2,00 % e 2,3 %. Diferentes temperaturas e ângulos de incidência, durante a realização das medidas (estes últimos afetam a transmitância e eficiência ótica do modulo fotovoltaico) podem ser identificados como causas possíveis dessa dispersão. Também pode-se perceber que os três pontos de maior eficiência se encontram na região próxima aos 1000W/m² além de uma possível tendência de queda, para valores acima de 1200 W/m², (maior número de dados serão obtidos no futuro).

As temperaturas e radiação referentes a cada teste estão representadas na Tabela 2.

Radiação	Temperatura	Radiação	Temperatura
452	38,9	922	46,8
576	46,1	929	48,2
582	45,8	946	52,8
594	40,2	981	43,6
626	42,1	993	45,5
645	40,9	1006	42,3
663	40,1	1014	45,8
668,5	40,10	1026	38,8
717,0	40,70	1052	44,4
730,0	42,00	1072	43,9
758,0	39,00	1086	42,8
781	46,3	1269	45,2

Tabela 2: Valores de radiação e temperatura para os testes.

Pode-se observar a tendência de aumento de temperatura com irradiância, ainda que com variações muito grandes, na Fig. 10. O coeficiente de variação é relativamente pequeno e as flutuações dependem basicamente das condições de ventilação do mesmo.

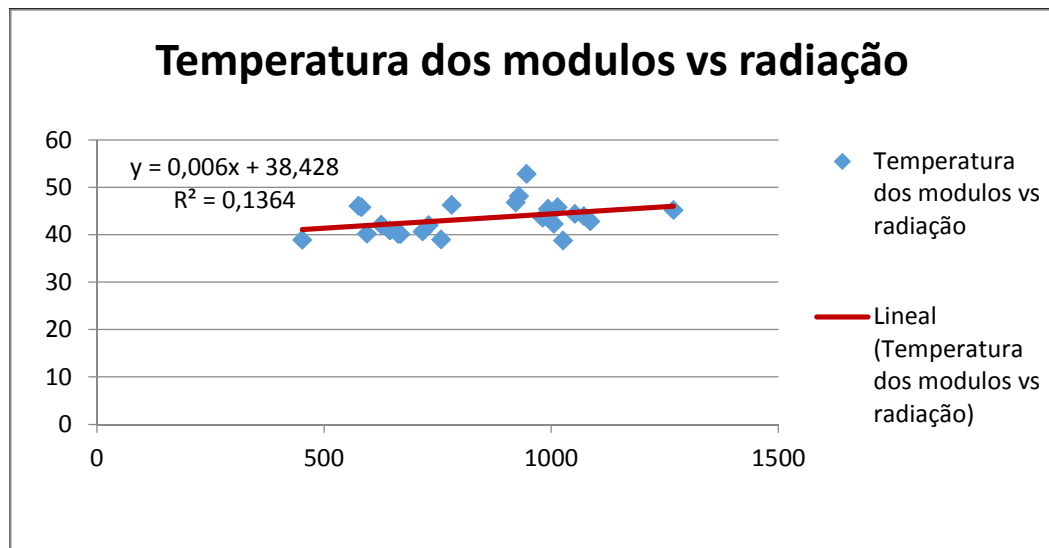


Figura 10: Comportamento da temperatura do módulo em função da radiação incidente.

CONCLUSÕES

É possível perceber que os valores obtidos para os parâmetros, a partir dos experimentos feitos em condições reais, estão de acordo com os fornecidos pelo fabricante, apresentando não entando, eficiência superior na maior parte dos experimentos.

Observa-se comportamento linear de I_{cc} e P_{max} com a irradiância. A eficiência da célula é aproximadamente constante no intervalo observado. Fatores como o ângulo de incidência dos raios solares podem ser responsáveis pelas variações da eficiência observadas. A tensão de circuito aberto aumenta levemente com a irradiância, como previsto.

É importante verificar qual é exatamente o efeito da temperatura e da radiação sobre os parâmetros analisados, bem como na vida útil do módulo, para poder prever como um sistema de módulos orgânicos irá gerar energia em diferentes condições ambientais. Possibilita-se assim fazer escolhas no que se refere ao melhor uso desta tecnologia.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à SUDENE pelo apoio financeiro ao projeto via TED 04/2015.

REFERÊNCIAS

- Coutinho D. et al. (2015). Influence of charge carriers mobility and lifetime on the performance of bulk hetero junction organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*.
- Elumalai N. K. e Uddin A. (2015). Open circuit voltage of organic solar cells: an in-depth review. *Energy Environ. Sci.* 391-410.
- Gambhir A. et al. (2016). The future costs of OPV – A bottom-up model of material and manufacturing costs with uncertainty analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*.
- Giebink N. et al. (2010). Ideal diode equation for organic heterojunctions. I. Derivation and application *Physical Review B*.
- Green M. A. (2016). Solar cell efficiency tables (version 47). *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 24: 3–11.

Katz E. A. et al. (2016). Light intensity dependence of External Quantum Efficiency of fresh and degraded organic photovoltaics. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 273-280.

Katz E. A. et al. (2011). Origin of size effect on efficiency of organic photovoltaics. *J. Appl. Phys.* 074508.

Kim S. H. et al. (2015). A study for degradation of flexible organic photovoltaic modules via damp-heat test: By accessing individual layers of the module. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 187-193.

Lin H.-w. et al. (2012). Highly efficient bifacial transparent organic solar cells with power conversion efficiency greater than 3% and transparency of 50%. *Organic Electronics*. 1722-1728.

Luo G. et al. (2016). Recent Advances in Organic Photovoltaics: Device Structure and Optical Engineering Optimization on the Nanoscale. *Small*. 1547-1571.

Manor A. et al. (2011). Origin of size effect on efficiency of organic photovoltaics. *Journal of Applied Physics*.

Scharber M. e Sariciftci N. (2013). Efficiency of bulk-heterojunction organic solar cells. *Progress in Polymer Science*.

Spanggaard H. e Krebs F. C. (2004). A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 125-146.

ABSTRACT

The main parameters that influence the efficiency of organic solar module active layer P3HT:PCBM, are analyzed in this work in real conditions of solar radiation. The experiments were conducted at the Federal University of Pernambuco in Recife, Pernambuco, Brazil. Through analysis of the results, it is possible to observe the behavior of the electrical parameters of an organic module depending on the irradiance and thus, better understand how it would work in a system using electricity generated from organic panels.

Keywords: solar energy, technology, organic.