

# CARACTERIZAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS ORGÂNICOS COMERCIAIS

Janis Joplim Bezerra Galdino – janisgaldino@gmail.com

Olga de Castro Vilela – ocv.olga@gmail.com

Naum Fraidenraich – naumfraiden2@gmail.com

Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Energias Renováveis, Departamento de Energia Nuclear

Rodrigo Vilaça – rodrigo.vilaca@csembrasil.com.br

Centro Suíço de Eletrônica e Microeletrônica, CSEM-Brasil

**Resumo.** Os módulos fotovoltaicos orgânicos (OPV) vem apresentando um crescente desenvolvimento devido ao seu potencial de baixo custo e a possibilidade de aplicações comerciais que oferecem por serem leves, semitransparentes e flexíveis. O método de fabricação roll-to-roll possibilita a fabricação em larga escala e com um menor consumo de energia em relação às tecnologias fotovoltaicas convencionais. Porém, para que as células OPV se popularizem no mercado fotovoltaico, é preciso melhorar a eficiência e o tempo de vida dos módulos OPV. Atualmente, a eficiência de um módulo comercial está em torno de 2 a 6 %. Neste trabalho, diferentes tipos de módulos comerciais OPV foram analisados de acordo com o material que compõe a camada ativa e o tamanho da célula fotovoltaica. Os dois materiais estudados foram o P3HT:PCBM e um outro polímero, que por motivos de sigilo industrial, é referido no texto como molécula azul. Curvas características foram obtidas para avaliar os módulos OPV e o comportamento de um dos módulos funcionando continuamente por dois dias em tensão fixa foi analisado. Foi observado que a molécula azul apresenta um melhor desempenho que a de P3HT:PCBM, com melhores eficiências e melhor processamento em grandes dimensões. Além disso, foi constatado que o tamanho das células influencia fortemente na sua performance. O módulo de P3HT:PCBM com a maior célula foi o que obteve o pior desempenho (eficiência em torno de 1,75% para 1000 W/m<sup>2</sup>), por possuir uma quantidade maior de erros relacionados à não uniformidade no processo de fabricação. Adicionalmente, o módulo de molécula azul de menor célula apresenta a maior eficiência (aproximadamente 4% para 100 W/m<sup>2</sup>). Nos ensaios de tensão fixa, observou-se que a eficiência do módulo analisado se manteve em um valor alto (em comparação com as eficiências nos testes de curva características outdoor e indoor) ao longo de sua operação.

**Palavras-chave:** Módulos Fotovoltaicos Orgânicos, Curvas Características, Operação Outdoor.

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da energia solar fotovoltaica está relacionado com a busca por uma matriz energética com mais participação de fontes renováveis e por um menor impacto ambiental na geração de energia. A tecnologia fotovoltaica de maior destaque atualmente são os módulos de silício cristalino, fabricados comercialmente em módulos rígidos com eficiência em torno de 15% (Luque e Hegedus, 2003). Contudo, as limitações de preço e eficiência ainda são um entrave para aumentar a participação da energia fotovoltaica na matriz energética, fazendo com que muitas pesquisas para encontrar novos materiais e processos sejam desenvolvidas. A célula solar orgânica (OPV, *Organic Photovoltaic*) é uma tecnologia emergente que vem ganhando destaque devido ao seu potencial de baixo custo e sua aplicabilidade. O método de impressão *roll-to-roll*, empregado na fabricação de células OPV, permite produzir módulos em grande escala e em diferentes tamanhos sem a necessidade de condições muito restritivas (altas temperaturas e ambiente extremamente limpo), como as utilizadas em tecnologias fotovoltaicas convencionais (Brian e Mark, 2003). Além disso, as células orgânicas podem ser compostas por materiais flexíveis, leves e semitransparentes, aumentando suas aplicações em diferentes áreas comerciais. Entretanto, para a tecnologia OPV se difundir no mercado da energia fotovoltaica, alguns obstáculos ainda precisam ser solucionados. Aumentar o tempo de vida dos módulos e alcançar valores de eficiência competitivos são as principais dificuldades no desenvolvimento de células orgânicas. A eficiência da tecnologia OPV vem crescendo significativamente, apresentando um dos maiores avanços dentre as tecnologias fotovoltaicas nos últimos anos, e atingiu o valor máximo de aproximadamente 12% em escala laboratorial (NREL, 2014). Porém, para módulos comerciais, encontram-se eficiências bem menores, da ordem de 2 a 6% (Scharber e Sariciftci, 2013)

O principal componente da célula OPV é a camada ativa, responsável pelo efeito fotovoltaico. Geralmente, ela é formada por uma mistura de dois materiais, um com baixa e outro com alta afinidade de elétrons e a energia do *gap* está relacionada com a diferença energética dos orbitais moleculares desses compostos (Spanggaard e Krebs, 2004). Os polímeros mais utilizados para formar a camada ativa são o poli(3-hexiltiofeno) (P3HT) como material doador de elétrons (baixa afinidade) e o éster metílico do ácido [6,6]-fenil-C<sub>61</sub>-butírico (PCBM) como o aceitador de elétrons (alta afinidade). Além da camada ativa, a célula OPV também é formada por uma camada de transporte de elétrons (ETL, *Electron Transport Layer*), uma camada de transporte de lacunas (HTL, *Hole Transport Layer*) e eletrodos. Todos esses materiais

são depositados, através do processo de impressão, em um substrato plástico e toda a estrutura é envolvida por um filme de barreira para proteger a integridade física do módulo OPV (Rand e Richter, 2014).

O presente trabalho irá apresentar a caracterização elétrica através de obtenção de curvas características em condições de laboratório (*indoor*) e naturais de irradiância, temperatura e umidade (*outdoor*) de diferentes tipos de módulos OPV comerciais. Ainda, a operação contínua em condições *outdoor* de um dos módulos será analisada. Os testes *indoor* permitem comparar o desempenho dos módulos entre si, já que eles estão submetidos às mesmas condições. Enquanto que os experimentos *outdoor* têm como objetivo avaliar a performance em condições reais de funcionamento. Por ser uma tecnologia emergente, muitos materiais e métodos de processamento são estudados e novos tipos de células orgânicas são desenvolvidas. Por isso, é importante caracterizá-las e conhecer bem o seu comportamento em operação para buscar soluções em eficiência e tempo de vida.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Características dos módulos orgânicos

Os módulos OPV foram fabricados pelo Centro Suíço de Eletrônica e Microeletrônica (CSEM-Brasil) em Belo Horizonte, Minas Gerais. Eles foram fornecidos ao CER-UFPE para pesquisa no contexto do projeto “Estudo das características de geração de células e módulos orgânicos fabricados no Brasil”, financiado pela Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE).

Foram utilizados quatro tipos de módulos, diferenciados pelos materiais que compõe a camada ativa e por suas dimensões. Em dois deles, o P3HT:PCBM é a mistura da camada ativa. Nos outros dois, por motivos de sigilo industrial, não há informações sobre o polímero que constitui suas camadas ativas, sendo referido no presente texto como “molécula azul” devido à sua coloração. A Tabela 1 apresenta as características que diferenciam os módulos (materiais e dimensões).

Tabela 1 - Características que diferenciam os módulos OPV analisados.

MÓDULO	CAMADA ATIVA	DIMENSÕES	ÁREA ATIVA
Tipo1	P3HT:PCBM	10x10 cm	72 cm <sup>2</sup>
Tipo 2	P3HT:PCBM	10x40 cm	288 cm <sup>2</sup>
Tipo 3	Molécula Azul	4x8 cm	21,6 cm <sup>2</sup>
Tipo 4	Molécula Azul	45x180 cm	6273,2 cm <sup>2</sup>

O CSEM-Brasil, através de sua empresa *spin-off*, a SUNEW, utiliza o método de impressão *roll-to-roll* para confeccionar os módulos com fins comerciais. Os quatro módulos possuem estrutura invertida e são constituídos por prata (Ag) como ânodo; uma mistura de óxido de índio-estanho (ITO) com prata (IMI) como cátodo, funcionando como o eletrodo transparente; o polímero poli(3,4-etilenodioxitiofeno):poli(estireno sulfonado) (PEDOT:PSS) como a camada de transporte de lacunas. Também por motivos de sigilo industrial, não há informações sobre o material da camada de transporte de elétrons.

Os módulos Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3 são formados por 6 células OPV em série, enquanto que o Tipo 4 possui 420 células em um arranjo de 14 fileiras (*strings*) em paralelo, contendo cada uma 30 células em série. Os tamanhos das células são diferentes para todos os módulos. A maior célula é a do módulo Tipo 2 com 48 cm<sup>2</sup>, seguido pelos Tipo 4 (14,9 cm<sup>2</sup>), Tipo 1 (12 cm<sup>2</sup>) e, por fim, Tipo 3, com célula de área 3,6 cm<sup>2</sup>. As Figuras 1 e 2 mostram os módulos OPV Tipo 1 (P3HT:PCBM) e Tipo 3 (molécula azul), respectivamente.

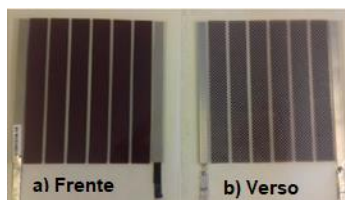


Figura 1 - Módulo OPV Tipo 1 (P3HT:PCBM) a) frente; b) verso.

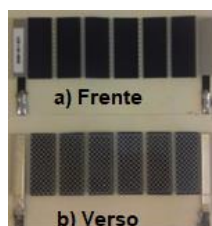


Figura 2 - Módulo OPV Tipo 3 (molécula azul) a) frente; b) verso.

## 2.2 Caracterização dos ensaios

Foram realizados dois tipos de experimentos: obtenção de curvas características (curvas IV) e funcionamento contínuo em tensão fixa. Os ensaios de curva IV foram realizados em condições *indoor* (laboratório) e *outdoor* (condições naturais de operação) para todos os módulos de modo a analisar a diferença no desempenho deles a partir dos seus parâmetros elétricos (tensão de circuito aberto -  $V_{oc}$ , corrente de curto circuito -  $I_{cc}$ , potência máxima -  $P_{max}$ , tensão de máxima potência -  $V_{mp}$ , corrente de máxima potência -  $I_{mp}$ , fator de forma - FF, e eficiência -  $\eta$ ). O módulo Tipo 1 foi utilizado para o experimento de operação em tensão fixa para observar seu comportamento ao longo de alguns dias.

Para os testes *indoor*, utilizou-se o simulador solar WACOM WXS-155S-10 com lâmpada de xenônio. Esse equipamento garante uma irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> incidindo na altura onde o módulo é posicionado. A temperatura do módulo durante o experimento se mantém em torno de 37 °C. As curvas características dos módulos Tipo 1 e Tipo 3 (menores dimensões) foram traçadas por um multímetro com fonte de alimentação integrada *SourceMeter* Keithley modelo 2401. Para os módulos Tipo 2 e Tipo 4, o traçador de curvas *PROVA 200 PV module analyzer*, de maior alcance em termos de voltagem e corrente, foi utilizado.

Nas instalações da área de testes do Grupo de Fontes Alternativas de Energia (Grupo FAE – UFPE), foram realizados os testes *outdoor* para curvas IV e de operação em tensão fixa entre os meses de abril e outubro de 2017. A área de teste fica localizada na cidade de Recife-PE, Nordeste brasileiro, com latitude de 08° 03' 14" sul e longitude de 34° 52' 52" oeste. Para os testes *outdoor*, os módulos Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3 foram colocados em molduras de material de PVC, fixadas em uma estrutura de ferro para facilitar o manuseio. As variáveis tensão, corrente, irradiância e temperatura dos módulos foram medidas através de um circuito conectado ao sistema de aquisição de dados Campbell. A fonte de tensão KEPCO foi utilizada para variar a voltagem do módulo para a obtenção das curvas IV e para manter o módulo Tipo 1 em tensão fixa. A irradiância foi medida no mesmo plano em que estavam os módulos com um piranômetro do tipo Li-cor. Um sensor do tipo circuito integrado (LM-35) foi fixado no verso dos módulos para medir a temperatura ao longo dos experimentos.

O módulo Tipo 4, devido ao seu tamanho, foi posicionado em uma estrutura de madeira para a realização dos testes. Além disso, por alcançar tensões elevadas (em torno de 20 V), as curvas IV para esse módulo foram obtidas com o traçador de curvas *Solmetric PV Analyzer* e as variáveis ambientais (irradiância e temperatura) foram medidas utilizando sensores específicos acoplados no próprio traçador.

Por não dispor de uma carga com um seguidor de máxima potência (MPPT) que funcione para uma potência muito baixa, como as fornecidas pelos módulos OPV desse estudo, Cardozo (2017) propôs fixar a tensão de operação no valor médio das voltagens de máxima potência ( $V_{mp}$ ) retiradas das curvas características do módulo para diferentes condições ambientais. Para o módulo Tipo 1, a  $V_{mp}$  média está em torno de 2,5 V e esse foi o valor de tensão fixado para a operação contínua. O módulo Tipo 1 operou continuamente entre os dias 15 e 17 de maio de 2017, sendo monitorados os parâmetros elétricos (potência, eficiência, corrente) e ambientais (temperatura e irradiância) com uma frequência de 1 minuto.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Curvas características

#### 3.1.1 Ensaios *indoor*

A Tabela 2 mostra os parâmetros elétricos dos quatro tipos de módulos extraídos das curvas características dos ensaios *indoor*.

Tabela 2 – Parâmetros elétricos extraídos das curvas características dos ensaios *indoor* para os quatro tipos de módulos.

PARÂMETROS	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 4
$V_{oc}$ (V)	3,291	3,16	5,007	22,3±0,3
$I_{cc}$ (mA)	78,70	351	36,726	1,71x10 <sup>3</sup>
$P_{max}$ (mW)	144,7	5,2x10 <sup>2</sup>	90,6	1,48x10 <sup>4</sup>
$V_{mp}$ (V)	2,217	1,80	3.344	13,5
$I_{mp}$ (mA)	65,29	287	27,09	1,10x10 <sup>3</sup>
FF (%)	55,9	46	49,3	38
$\eta$ (%)	2,010	1,79	4,194	2,37

A Figura 3 mostra as curvas características e os gráficos do comportamento da potência com a tensão para os quatro tipos de módulos nos ensaios *indoor*.

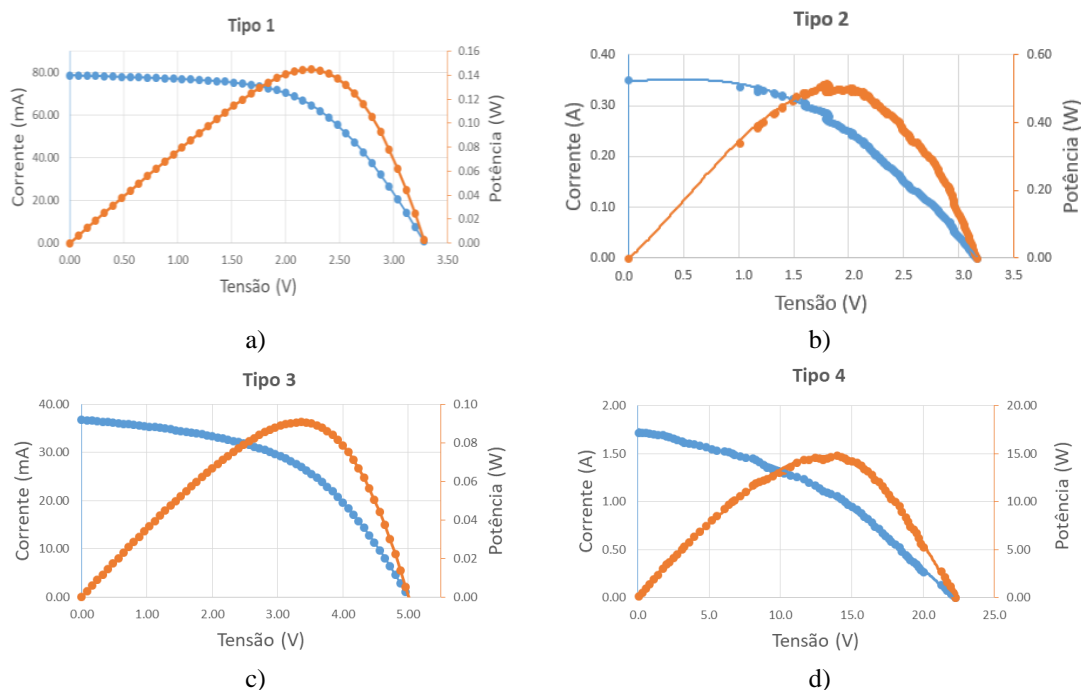


Figura 3 – Curvas características e gráficos do comportamento da potência com a tensão dos ensaios *indoor* para os módulos a) Tipo 1; b) Tipo 2; c) Tipo 3; e d) Tipo 4.

Através dos resultados dos ensaios *indoor*, foram realizados dois tipos de comparação: 1) módulos com o mesmo material de camada ativa, porém de diferentes tamanhos, no intuito de analisar o efeito do aumento da área ativa na eficiência; 2) diferentes materiais de camada ativa com vistas a avaliar a performance geral dos módulos.

#### Comparação entre diferentes tamanhos

Por meio da Tabela 2, pode-se comparar o desempenho entre os diferentes tamanhos dos módulos de mesmo material. Observa-se uma queda significativa nos valores de eficiência e de fator de forma quando há um incremento de área. Para os módulos de P3HT:PCBM (Tipo 1 e Tipo 2), um aumento de 3 vezes na área ocasionou uma diminuição em 10,4% na eficiência e 16,9% no fator de forma. No caso dos módulos de molécula azul (Tipo 3 e Tipo 4), as diferenças em área são bem mais expressivas, da ordem de 290 vezes, com o módulo Tipo 3 medindo 21,6 cm<sup>2</sup> e o Tipo 4 medindo 6249,6 cm<sup>2</sup> (Tabela 1). A eficiência reduziu cerca de 52%, quando se compara o módulo Tipo 4 com o Tipo 3, e o fator de forma diminuiu aproximadamente 23% com o aumento da área. Isso sugere que o desempenho do módulo é afetado quando há um acréscimo no seu tamanho.

A influência das dimensões das células OPV foi analisada por Krebs *et al.* (2010). Nesse estudo, foi mostrado que o aumento do comprimento da célula OPV traz como consequência um maior número de defeitos e erros de impressão durante a sua fabricação no processo *roll-to-roll*. Portanto, células menores tendem a possuir um melhor desempenho. Isso é verificado também nos resultados das curvas características, onde o módulo com a maior célula (Tipo 2 com 48 cm<sup>2</sup>) possui a menor eficiência (1,79 %).

#### Comparação entre diferentes materiais

Apesar de possuírem tamanhos distintos, é possível notar um desempenho superior dos módulos de molécula azul em relação aos de P3HT:PCBM. Observa-se na Tabela 2 que as eficiências dos módulos Tipo 3 e Tipo 4 são significativamente mais elevadas que as do Tipo 1 e Tipo 2. Não há informações suficientes sobre o material que compõe a camada ativa dos módulos de molécula azul para uma discussão mais aprofundada sobre o assunto. Porém, a melhor performance da molécula azul pode estar associada à sua curva de absorção, à menor taxa de recombinação de portadores nesse material e/ou ao processo de deposição durante a sua fabricação.

Um outro parâmetro que permite comparar os diferentes materiais é a taxa de diminuição da eficiência com o aumento da área ativa ( $\Delta\eta/\Delta A$ ). Considerando os valores das Tabelas 1 e 2, o material P3HT:PCBM apresenta um valor de  $\Delta\eta/\Delta A$  de -3,5%, enquanto que, para a molécula azul, obteve-se um valor bem menor, -0,2%. Isso mostra que a molécula azul, além de possuir melhor desempenho, apresentou um comportamento superior no processo de fabricação em grandes dimensões, com menos uniformidades.

Vale ressaltar que o valor de eficiência de 2,37%, alcançado por um módulo OPV de grandes dimensões, como é o caso do Tipo 4 (45x180 cm) é bastante significativo, mostrando uma evolução para produção de módulos OPV em grandes dimensões e em escala (velocidade de produção de 2m/min).

### 3.1.2 Ensaios *outdoor*

Os 4 tipos de módulos foram expostos em condições naturais de iluminação para a obtenção de curvas características e, por isso, vários valores de irradiância e temperatura foram atingidos. Os ensaios *outdoor* permitiram analisar o comportamento dos módulos OPV para uma faixa de irradiância de 200 W/m<sup>2</sup> a 1000 W/m<sup>2</sup>. Os valores de eficiência para o módulo Tipo 1, encontram-se entre 2,3% e 2,7%; para o módulo Tipo 2 os valores de eficiência variam entre 1,5% e 2,2%, apresentando grande dispersão na região de baixa irradiância; para o módulo Tipo 3 os valores de eficiência apresentam-se entre 3,8% e 4,5%, com uma grande concentração de pontos na faixa de 4%. As eficiências do módulo Tipo 4 variaram entre 2,2% e 2,7%, com maior dispersão que os demais módulos. Portanto, verifica-se também nos ensaios *outdoor* que o módulo Tipo 2 (célula com maior área) apresenta o pior desempenho. As maiores eficiências obtidas nos ensaios *outdoor* foram para o módulo Tipo 3 (de molécula azul), de menores dimensões de células e de área ativa (21,6 cm<sup>2</sup>). O módulo Tipo 4, de maior dimensão (6249,6 cm<sup>2</sup>), apresentou eficiências semelhantes ao módulo Tipo 1 (P3HT:PCBM), de dimensões bem menores (área ativa de 72 cm<sup>2</sup>), confirmando que a molécula azul possui um desempenho melhor que a de P3HT:PCBM.

Com o objetivo de fazer um paralelo com os ensaios *indoor*, são apresentadas aqui somente as curvas características dos ensaios *outdoor* para irradiância próximas de 1000 W/m<sup>2</sup>.

A Tabela 3 mostra os parâmetros elétricos dos quatro tipos de módulos extraídos das curvas características dos ensaios *outdoor* a uma irradiância de aproximadamente 1000 W/m<sup>2</sup>.

Tabela 3 – Parâmetros elétricos extraídos das curvas características dos ensaios *outdoor* para os quatro tipos de módulos.

PARÂMETROS	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 4
V <sub>oc</sub> (V)	3,396	3,16	5,015	24,2
I <sub>cc</sub> (mA)	81,0	293	32,00	1,30x10 <sup>3</sup>
P <sub>max</sub> (mW)	172,05	508	86,16	14,23x10 <sup>3</sup>
V <sub>mp</sub> (V)	2,446	2,13	3,745	17,3
I <sub>mp</sub> (mA)	70,34	237	23,01	8,2x10 <sup>2</sup>
FF (%)	62,55	52	53,7	45
η (%)	2,390	1,75	3,97	2,28
T (°C)	48,7	49	43,6	60

A Figura 4 mostra as curvas características dos ensaios *outdoor* para os quatro tipos de módulos com uma irradiância incidente de aproximadamente 1000 W/m<sup>2</sup> e diferentes temperaturas.

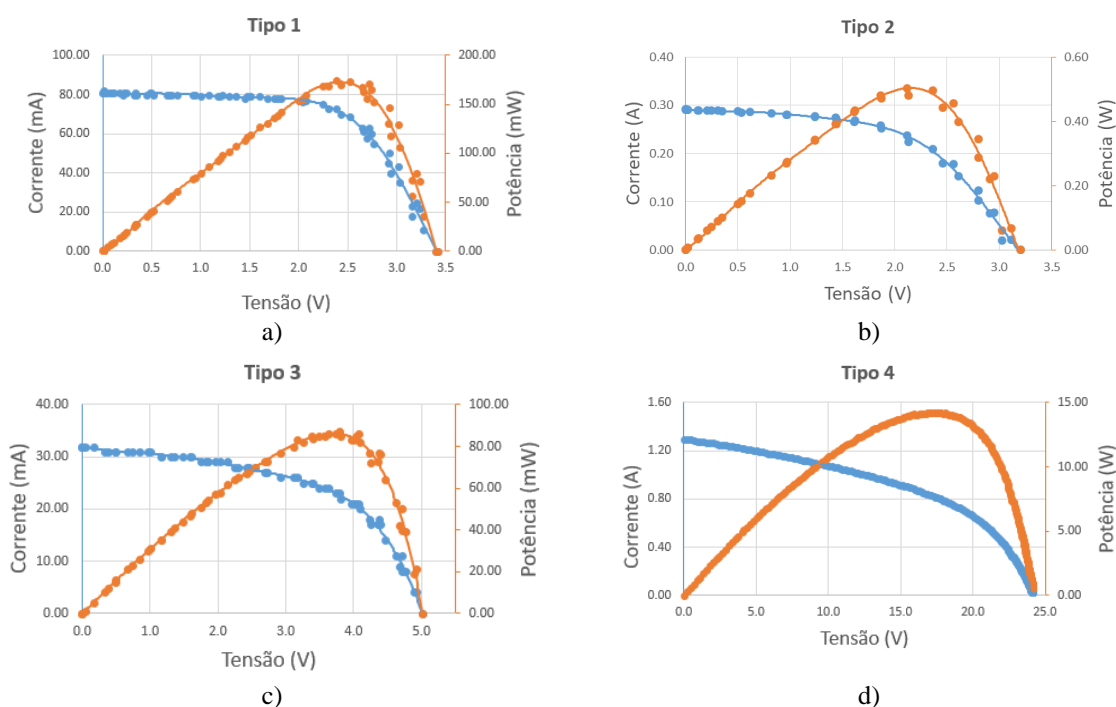


Figura 4 – Curvas características dos ensaios *outdoor* a aproximadamente 1000 W/m<sup>2</sup> para os módulos a) Tipo 1 a 48,7°C; b) Tipo 2 a 49 °C; c) Tipo 3 a 43,6 °C; e d) Tipo 4 a 60 °C.

Ao comparar as Tabelas 2 e 3, pode-se observar uma diferença nos desempenhos de todos os módulos nas condições *outdoor* e *indoor*. Há muitos fatores que podem ser atribuídos a esse efeito, alguns com impacto positivo e outros negativos. Um deles é a temperatura, que foi distinta para as duas condições, e o seu aumento tende a reduzir o desempenho dos módulos (Katz *et al.*, 2001; Chirvase *et al.*, 2003; Coutinho *et al.*, 2015). Outro fator que contribui para a redução na eficiência é o processo de degradação dos módulos, em que a exposição à umidade, ao oxigênio e à luz ultravioleta (UV) provoca a oxidação dos componentes metálicos e reações indesejadas entre as camadas das células OPV (Jørgensen *et al.*, 2008; Nikiforov *et al.*, 2013). Além disso, o espectro do simulador solar, apesar de representar bem o espectro solar AM 1.5, apresenta diferenças em relação à radiação solar natural ao qual os módulos foram submetidos nos ensaios *outdoor*. Portanto, mesmo comparando os resultados com irradiância (espectro integrado) próximas, pode haver diferenças nas intensidades de energia na região de comprimento de onda de melhor absorção do módulo. Outro efeito que afeta o desempenho de módulos OPV é o fato de eles precisarem de um tempo de exposição à radiação solar, principalmente na faixa de ultravioleta, para atingir estabilidade sempre que permanecer um período sem iluminação. Esse fenômeno é conhecido como *light soaking* e é atribuído à camada de transporte de elétrons (geralmente formada por um óxido metálico) e ao ITO. Alguns pesquisadores alegam que a condutividade da camada de transporte de elétrons aumenta com a exposição à luz UV (Chen *et al.*, 2014). Outros afirmam que o *light soaking* está relacionado com a diminuição da barreira energética da interface ETL/ITO quando há iluminação (Xu *et al.*, 2016). Pode-se notar que, para o módulo Tipo 1, os efeitos positivos prevaleceram e ele obteve um melhor desempenho *outdoor* ( $\eta = 2,390\%$ ) do que *indoor* ( $\eta = 2,010\%$ ).

### 3.2 Operação contínua em tensão fixa

Os resultados dos ensaios contínuos em tensão fixa do módulo Tipo 1 são apresentados por meio das curvas de corrente e potência geradas em função da irradiância incidente e comparados com os valores nos pontos de máxima potência ( $P_{mp}$ ) obtidos nos ensaios *outdoor* de curvas características, mostrados na Figura 5.

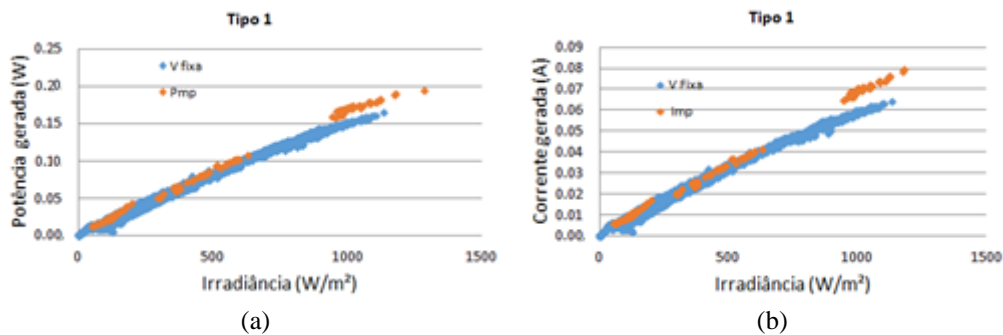


Figura 5 - Potência (a) e corrente (b) geradas com tensão fixa em ensaios contínuos. Comparação com valores no ponto de máxima potência dos ensaios *outdoor* de curva característica.

Observa-se, na Figura 5, que a tensão fixa de 2,5 V corresponde praticamente à região de máxima potência para irradiâncias de até 700 W/m<sup>2</sup>. Acima desse valor, há um deslocamento com relação aos pontos de máxima potência e os valores dos parâmetros estão abaixo do que poderiam ser alcançados com o uso de um MPPT. Isso implica que, para irradiâncias acima de 700 W/m<sup>2</sup>, o valor de  $V_{mp}$  para o módulo Tipo 1 é inferior a 2,5 V. A corrente apresenta um deslocamento mais acentuado (Figura 5-b) devido à forte inclinação da curva característica na região de tensões próximas a  $V_{oc}$ , em que uma pequena diferença de tensão provoca uma grande variação na corrente. Quando se opera numa tensão fixa abaixo de  $V_{mp}$ , esse deslocamento é mais suave pois, nesse caso, os valores de corrente estão próximos ao valor de  $I_{cc}$ .

A Figura 6 mostra os comportamentos da irradiância, da potência gerada e da eficiência ao longo de 2 dias de medição com características diferentes no que se refere à irradiância incidente (16/05/2017 e 17/05/2017).

Pode-se notar na Figura 6 que o dia 16/05/2017 apresenta menores flutuações na irradiância solar quando comparado ao dia 17/05/2017. No dia 16/05, a radiação diária incidente no módulo foi da ordem de 6098 Wh/m<sup>2</sup>; a energia diária gerada foi de 0,98 Wh, o que resulta em uma eficiência média diária de 2,24 %. Para o dia 17/05, a radiação solar diária foi bem menor, da ordem de 4788 Wh/m<sup>2</sup>, com energia diária gerada de 0,77 Wh e eficiência média diária de 2,26%. Para ambos os dias, a eficiência média diária apresenta um valor próximo ao obtido por curvas características e se mantém acima de 2% ao longo de toda a operação. É interessante notar que uma diferença acima de 20% na energia solar diária produz apenas uma diferença da ordem de 1% na eficiência, mesmo estando o módulo operando em tensão fixa, sem seguidor de máxima potência.



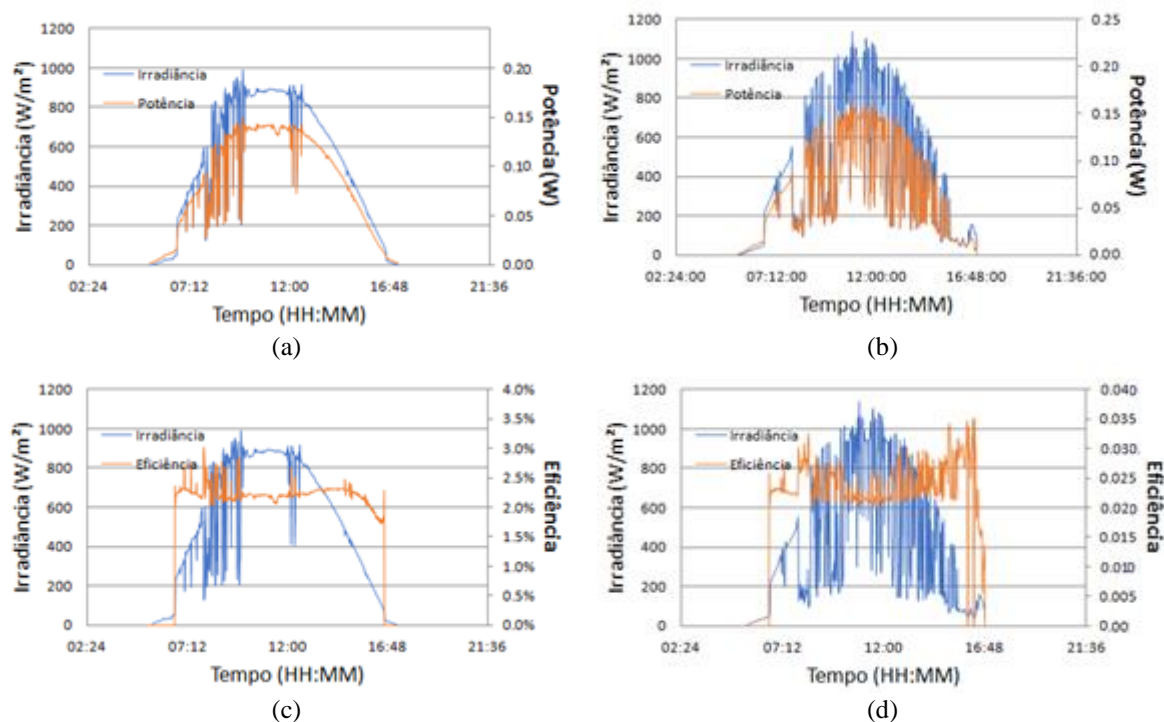


Figura 6 - Comportamento da potência e da eficiência ao longo de dois dias com diferentes características. (a) e (c) dia 16/05/2017; (b) e (d) dia 17/05/2017.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste relatório, foram apresentados os resultados dos experimentos realizados com 4 tipos de módulos OPV de diferentes tecnologias (P3HT:PCBM e molécula azul) e tamanhos para ensaios *indoor* e *outdoor*. A molécula azul apresentou eficiências mais altas com os valores em torno de 4% para o módulo de menor tamanho (21,6 cm<sup>2</sup>). O módulo com o pior desempenho foi o do Tipo 2 (P3HT:PCBM), com eficiências próximas de 1,7%. Comparando os tamanhos dos módulos, notou-se que, para o mesmo material da camada ativa, o aumento da área ativa provoca uma diminuição na eficiência e fator de forma devido a erros de não uniformidade de impressão na fabricação pelo método roll-to-roll.

O valor de eficiência 2,3% obtido para um módulo de comprimento 180x45 cm (Tipo 4 – molécula azul) é bastante significativo para a produção em grande escala de módulos OPV comerciais. A taxa de -0,2% de diminuição de eficiência com o aumento de área para o módulo de molécula azul indica que foi possível obter uma boa escalabilidade na sua produção.

Além da obtenção de curvas características, foram realizados testes com o módulo Tipo 1 operando em tensão fixa durante dois dias. Os resultados desse experimento mostraram que o módulo Tipo 1 operou com eficiência acima de 2% ao longo dos dias, mostrando um bom funcionamento em diferentes níveis de irradiância, característica importante para módulos fotovoltaicos, apesar do valor de tensão de 2,5 V fixado para a sua operação ser menor do que o  $V_{mp}$  real para irradiância acima de 700 W/m<sup>2</sup>.

#### Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq e a SUDENE pelo suporte financeiro.

#### REFERÊNCIAS

- Brian, A. G., Mark, C. H., 2003. Comparing organic to inorganic photovoltaic cells: theory, experiment, and simulation. *Journal of Applied Physics*, vol.93, n. 16, pp 3605-3614.
- Cardozo, O. D. F., 2017. Caracterização de parâmetros físicos e elétricos de módulos solares orgânicos em condições reais de radiação solar. Dissertação de mestrado, Programa de Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco.
- Chen, D., Zhang, C., Wang, Z., Zhang, J., Tang, S., Wei, W., Sun, L., Hao, Y., 2014. High efficient ITO free inverted organic solar cells based on ultrathin Ca modified azo cathode and their light soaking issue. *Organic Electronics*, vol. 15, n. 11, pp. 3006-3015.

- Chirvase, D., Chiguvare, Z., Knipper, M., Parisi, J., Dyakonov, V., Hummelen, J., 2003. Temperature dependent characteristics of poly (3 hexylthiophene)-fullerene based heterojunction organic solar cells. *Journal of Applied Physics*, vol. 93, n. 6, pp. 3376-3383.
- Coutinho, D., Faria, G. C., Balogh, D. T., Faria, R. M., 2015. Influence of charge carriers mobility and lifetime on the performance of bulk hetero junction organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 143, pp. 503-509.
- Jørgensen, M., Norrman, K., Krebs, F. C., 2008. Stability/degradation of polymer solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 92, n. 7, pp. 686-714.
- Katz, E., Faiman, D., Tuladhar, S., Kroon, J., Wienk, M., Fromherz, T., Padinger, F., Brabec, C., Sariciftci, N., 2001. Temperature dependence for the photovoltaic device parameters of polymer-fullerene solar cells under operating conditions. *Journal of Applied Physics*, vol. 90, n. 10, pp. 5343-5350.
- Krebs, F., Tromholt, T., Jørgensen, M., 2010. Upscaling of polymer solar cell fabrication using full roll-to-roll processing. *Nanoscale*, vol. 2, n. 6, pp. 873-886.
- Luque, A., Hegedus, S., 2003. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley and Sons, pp 11-14.
- National Renewable Energy Laboratory - NREL, 2014.
- Nikiforov, M., Strzalka, J., Darling, S., 2013. Delineation of the effects of water and oxygen on the degradation of organic photovoltaic devices. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 110, pp. 36-42.
- Rand, B., Richter, H., 2014. *Organic Solar Cells: Fundamentals, Devices, and Upscaling*. Taylor and Francis Group, pp. 3-49.
- Scharber, M. C., Sariciftci, N. S., 2013. Efficiency of bulk-heterojunction organic solar cells. *Progress in Polymer Science*, vol. 38, n. 12, pp. 1929-1940.
- Spanggaard, H., Krebs, F. C., 2004. A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 83, pp. 125-146.
- Xu, W., Xia, R., Ye, T., Zhao, L., Kan, Z., Mei, Y., Yan, C., Zhang, Z.-W., Lai, W.-Y., Keivanidis, P., Huang, W., 2016. Understanding the Light Soaking Effects in Inverted Organic Solar Cells Functionalized with Conjugated Macroelectrolyte Electron-Collecting Interlayers. *Advanced Science*, vol.3, n. 2.

## CHARACTERIZATION OF COMMERCIAL ORGANIC PHOTOVOLTAIC MODULES

**Abstract.** *Organic photovoltaic (OPV) modules are showing a growing development due to their low cost potential and their properties of low weight, transparency and flexibility, which offers new possibilities for commercial applications. The roll-to-roll manufacturing method enables large-scale manufacturing with lower energy consumption in comparison with conventional photovoltaic technologies. However, in order to expand into the photovoltaic market, it is necessary to improve the efficiency and the lifetime of the OPV modules. Currently, the efficiency of a commercial module is around 2 to 6%. In this work, different types of OPV commercial modules were analyzed according to the material that composes the active layer and the size of the photovoltaic cell. The two materials studied were P3HT: PCBM and a polymer, which is referred as blue molecule in the text, for reasons of industrial secrecy. Solar characteristics curves were obtained to evaluate the OPV modules and the behavior of one of the modules in continuous operation at fixed voltage was analyzed. The blue molecule presented a better performance than the modules of P3HT: PCBM, showing better efficiencies and a better large-dimension processing. Furthermore, it was found that the cell size has a strong influence in its performance. The P3HT: PCBM module with the largest cell was the one that obtained the worst performance (efficiency around 1.75% for 1000 W / m<sup>2</sup>), due to a bigger number of errors related to non-uniformity in the manufacturing process. In addition, the blue molecule module with the smaller cell exhibits the highest efficiency (approximately 4% for 100 W / m<sup>2</sup>). In the fixed-voltage tests, it was observed that the efficiency of the module remained at a high value (compared to efficiencies in outdoor and indoor characteristic curve tests) throughout its operation.*

**Key words:** *Organic Photovoltaic Modules, Solar Characteristic Curves, Outdoor Operation.*