DISPOSITIVO FOTOVOLTAICO ORGÂNICO: TOPOLOGIA INVERTIDA

Elvo Calixto Burini Junior – elvo@iee.usp.br
Adnei Melges de Andrade – adnei@usp.br
Universidade de São Paulo, Instituto de Eletrotécnica e Energia, Divisão Científica de Energia e Ambiente
Emerson Roberto Santos – emmowalker@yahoo.com.br
Telma Nagano de Moura – telmanm2@yahoo.com.br
Universidade de São Paulo, EPUSP, Depto. Engenharia de Materiais e Metalurgia, Lab. Eng. de Macromoléculas

Resumo. *Um trabalho experimental contendo alteração na topologia utilizada para montar dispositivo fotovoltaico orgânico (OPV), realizado no Brasil e que ocorreu durante atividade destinada ao treinamento de recursos humanos está apresentado. A montagem e a característica elétrica de célula fotovoltaica orgânica invertida (IOPV) que utiliza eletrodo positivo metálico obtido por evaporação sob vácuo estão apresentadas. O dispositivo invertido foi montado por via úmida, com base na técnica denominada de Spin coating. No lado do eletrodo transparente foi formada uma camada de Óxido de Zinco, sobre o Óxido de Índio-Estanho (ITO), utilizado em substituição ao [poli (3,4-etilenodioxitiofeno) poli (styrenesulfonate)] (PEDOT:PSS) que tem sido utilizado na topologia convencional de OPVs. O PEDOT:PSS tem sido utilizado em solução muito ácida (pH tão baixo como 2), sendo que a partir da substituição desse elemento vida útil mais longa para as células solares orgânicas é esperada. A remoção dessa barreira poderá trazer escala para a produção seriada e reduzir o custo do dispositivo OPV substancialmente. A melhor amostra de célula solar orgânica invertida montada que utiliza ZnO junto ao eletrodo negativo transparente, e em cuja camada ativa foi utilizado o compósito P3HT:PCBM (poly(3-hexylthiophene - P3HT; phenyl-C61-butyric acid methyl Ester - PCBM), quando sob radiação solar simulada (fonte incandescente) forneceu energia elétrica na potência de 10 mW para a carga sob cerca de 0,9 V. Os dispositivos (IOPV) montados quando submetidos a radiação solar simulada apresentaram característica elétrica, amostrada nos terminais, com valor médio para a tensão de circuito aberto na faixa de (0,25 ± 0,05) V e corrente de curto circuito média de (0,31 ± 0,08) mA.*

Palavras-chave: *Energia solar, Dispositivo Fotovoltaico Orgânico Invertido, ZnO.*

1. INTRODUÇÃO

A célula fotovoltaica pode ter base em material inorgânico, orgânico ou híbrido e possui a propriedade de gerar energia elétrica a partir da radiação eletromagnética incidente, geralmente de origem solar. É dispositivo com disponibilidade comercial relativamente recente. Os dispositivos denominados orgânicos são aqueles que estão emergindo, em grande parte devido a avanços recentes ocorridos na química orgânica sintética que têm possibilitado sínteses de uma grande quantidade de certas moléculas, as quais possuem funcionalidade eletrônica importante. A publicação sobre "célula solar orgânica mais distante na linha do tempo e que pode ser coligida já possui mais de 50 anos (Kearns *et al*., 1958). Os registros disponíveis e mais antigos sobre a eficiência de dispositivo fotovoltaico inorgânico estão creditados à RCA (material: Si:H amorfo) e a Matsushita (CdTe) e estão no ano de 1976 (Nardes, 2011). Para célula montada com material orgânico, o valor mais antigo coligido da literatura para a eficiência está creditado à Universidade de Linz no ano 2001, e a eficiência máxima de célula com base orgânica (em laboratório) estava fixado em patamar de 8 % (Nardes, 2011). Outra referência atual que fixa a eficiência de conversão apresenta valor de 1,7 %, e neste caso estão referidos avanços para o aproveitamento de conversão também na banda infravermelha solar e a instalação dos dispositivos em meio ou suporte transparente, como em janelas (Lunt e Bulovic, 2011). Exclusivamente com lastro na eficiência de conversão fotovoltaica dos dispositivos não resta qualquer dúvida que numa decisão para direcionar investimentos na produção, em larga escala, deverão ser considerados os dispositivos inorgânicos. Ainda que, atualmente, vários agentes e empresas já sinalizam como promissora a tecnologia fotovoltaica com base orgânica. Alguns esforços já estão em desenvolvimento no Brasil, os quais estão direcionados para melhor estruturar a cadeia produtiva objetivando que a tecnologia fotovoltaica convencional (inorgânica, base Si) seja utilizada para a conexão dos painéis a rede elétrica (geração distribuída).

Este trabalho considera um método não convencional para a montagem de dispositivo fotovoltaico orgânico (sigla do inglês: OPV) ou célula solar orgânica (Burini Jr. *et al*., 2011a,b). Ele foi iniciado durante atividade realizada para a capacitação de recursos humanos (Shaheen, 2011). Num dispositivo fotovoltaico orgânico (OPV) que possui topologia clássica (convencional ou normal), a última camada depositada é um metal, geralmente por aquecimento e evaporação sob vácuo, o Alumínio, costuma ser opaca à passagem da luz (> 100 nm) e ter a função de eletrodo ou pólo negativo.

No processo denominado de metalização existe a necessidade do dispositivo ficar confinado em ambiente sob vácuo. Isso dificulta um aumento de escala no processamento, requer equipamentos especializados e é intensivo energeticamente. A eliminação dessa etapa tem sido um alvo constante na busca pela maior eficiência em células solares orgânicas. O dispositivo fotovoltaico orgânico é denominado invertido (IOPV) pelo motivo de possuir o eletrodo transparente, por onde a luz solar é admitida, com a função de eletrodo ou pólo negativo, eficiência comparável ao da configuração convencional e maior estabilidade sob condição de atmosfera ambiente normal, ou seja, na presença de Oxigênio. Nesse caso o eletrodo opaco pode ser obtido tanto pela evaporação de um metal como a Prata (Ag), sob vácuo, quanto por método de impressão onde a Ag é o principal componente da tinta a ser utilizada. Para esse trabalho foi planejada a montagem de dispositivo com topografia denominada convencional e invertida. Isso para realizar uma comparação de desempenho entre essas topografias, e em ambos os casos, o eletrodo opaco foi elaborado por evaporação térmica sob vácuo. Uma linha de montagem para fabricar dispositivos fotovoltaicos orgânicos poderá fazer uso de processo denominado R2R (*Roll to roll*), no qual existe um cilindro rotativo ou um conjunto de cilindros, similarmente ao processo de impressão gráfica, num sistema aberto e sem vácuo. Quando a montagem do dispositivo é feita sem utilização de vácuo, a técnica de deposição por spray para o PEDOT:PSS pode ser utilizada. A partir dessa técnica poderá ser obtido dispositivo OPV cuja janela para a entrada da luz possui transmitância na ordem de 60 % (Peh *et al*., 2011). Uma alternativa que permite a substituição de PEDOT:PSS, que traz aumento na eficiência fotovoltaica e na função trabalho já foi obtida pela associação de Cloro ao ITO, Cl-ITO (Sun *et al*., 2012).

A utilização do compósito P3HT:PCBM (poly(3-hexylthiophene - P3HT; phenyl-C61-butyric acid methyl Ester - PCBM) para a formação da camada ativa do dispositivo finalizado pelo processo convencional, eletrodo (Alumínio) evaporado termicamente e quando sob irradiação equivalente a um Sol pode resultar em dispositivo com eficiência ou rendimento de conversão da ordem de 3 %, valor que é comparável aos 2,5 % já relatado para o caso de dispositivo fotovoltaico orgânico invertido que utiliza ZnO e ITO (Hu *et al*., 2011). Um processo denominado de nanolaminação, o qual combina camadas de Óxido de Alumínio e Óxido de Zinco alternativamente, também já foi utilizado para substituir o PEDOT:PSS, e no caso em dispositivos IOPVs (Kippelen *et al*., 2012).

Para apresentar ao leitor uma visão geral dos tipos de dispositivos fotovoltaicos disponíveis e posicionar o dispositivo OPV nesse cenário uma classificação para os tipos mais representativos das células solares é apresentada na Fig. 1, versão elaborada a partir de material coligido da literatura (Jabbour, 2008),.

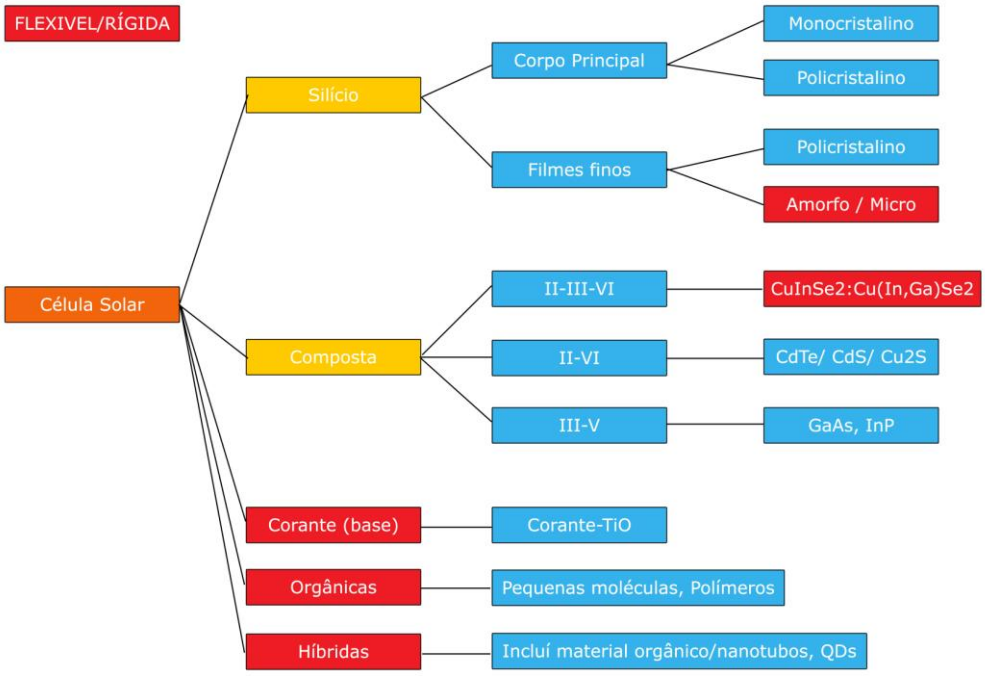

Figura 1. Uma classificação para os tipos mais representativos das células solares.

O substrato do dispositivo fotovoltaico (PV) pode ser rígido ou flexível (utilizando plástico, como o PET). Os dispositivos PV com eficiência de conversão mais eleva, atualmente, estão baseados em Silício. A célula solar denominada orgânica é uma realidade comercial, ao menos nos EUA, onde existe relato sobre a eficiência de conversão fotovoltaica (em laboratório) já ter superado 8 % (Nardes, 2011). A possibilidade de produzir células com base na eletrônica orgânica, em processo aberto, ou seja, sob o ar atmosférico e em larga escala tem motivado diversos interesses e ações. No Brasil, temos informação do estabelecimento de uma empresa sediada na Suíça, que pretende colocar dispositivos OPVs no mercado num prazo não superior a dois anos.

1.1 Topologia de dispositivo OPV: normal e invertida

A topologia de dispositivo fotovoltaico orgânico denominada invertida (IOPV), que pode ser encontrada na literatura, ela foi praticada durante treinamento realizado no Brasil (Shaheen, 2011) e está considerada nesse trabalho. A etapa final do dispositivo PV montado teve suporte de ambiente sob vácuo para realizar a deposição do eletrodo opaco, que foi obtido a partir de metal evaporado termicamente. O dispositivo OPV invertido foi projetado com o eletrodo opaco (metálico, pólo positivo) a partir da evaporação de Prata (AgO / Ag) e o dispositivo com topologia normal foi projetado com o eletrodo metálico a partir de Alumínio. Em ambos a camada ativa foi depositada a partir da mesma solução de material polimérico (compósito) e utilizando a técnica de espalhamento axial (*Spin coating*). O dispositivo com topologia normal foi previsto como elemento de referência e para balizar a análise da técnica introduzida (Shaheen, 2011). A investigação que foi iniciada a partir da topologia invertida possui meta sobre o desenvolvimento de um protocolo para montar os dispositivos OPV sob ar atmosférico, ou seja, sem a necessidade da utilização de câmara de evaporação, equipamento de custo e manutenção elevados. Um processo de laminação poderá ser incorporado, no futuro, para facilitar a incorporação do eletrodo metálico. Isso poderá agregar maior escala ao procedimento de montagem e consequente redução no custo do dispositivo (Bailey *et al*., 2011).

2. METODOLOGIA

Ambos os dispositivos (topologia convencional e invertida) foram montados a partir de substrato em vidro que foi recebido já contendo uma camada de ITO depositada. Para a limpeza de superfície foi utilizado protocolo de via úmida convencional, o qual foi seguido por tratamento com plasma de Oxigênio. A camada ativa foi montada a partir da mesma solução e pela técnica de recobrimento por espalhamento radial (*Spin coating*). No caso do dispositivo tipo convencional primeiro foi depositada a solução de PEDOT:PSS, depois a camada ativa, tendo sido o processo finalizado pela deposição de metal (Alumínio) evaporado termicamente.

Na Fig. 2 está apresentada, esquematicamente, a topologia invertida utilizada na montagem do dispositivo (IOPV) do experimento realizado.

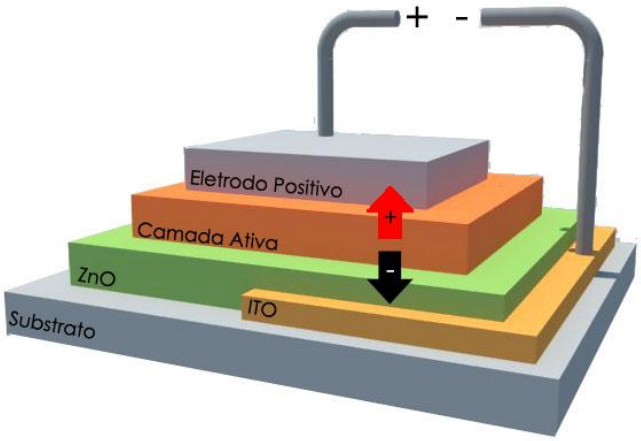

Figura 2. A topologia invertida do dispositivo fotovoltaico orgânico montado.

No caso do dispositivo com topologia invertida, após procedimento de limpeza acima citado, primeiro foi depositada uma solução preparada com base em Silicato de Zinco (138 mg), 2-metoxietanol (1 mL), e monoetanolamina (45 µL; sob agitação durante 30 minutos, a 60 ºC). Os parâmetros para a dispersão (após filtragem em malha de 0,2 µm) e a formação do filme fino foram: rotação 2000 rpm e período de 60 segundos. Nas regiões destinadas aos contatos elétricos o material depositado foi removido pela utilização de Acetato de nitrila. A conversão do filme depositado em camada de Óxido de Zinco (ZnO) foi obtida por processo de recozimento (em placa pré-aquecida, *hotplate*) durante 10 minutos, a 300 ºC. Após aguardar alguns minutos e verificar a ocorrência do resfriamento, cada placa foi submetida a processo de lavagem, primeiro em água deionizada durante cerca de 10 segundos, em seguida com Acetona, e depois Etanol. Isto para remover quaisquer material orgânico restante sobre a superfície do ZnO. Depois disso houve a secagem das amostras, durante mais alguns minutos, em placa quente a 200 ºC, sendo a camada ativa depositada em seguida. Um filme fino de PEDOT:PSS foi depositado sobre a camada ativa (como elemento auxiliar na montagem do eletrodo opaco). O processo foi finalizado pela deposição de metal (Ag) evaporado termicamente.

Seis substratos de vidro (com quatro dispositivos OPV em cada uma) foram montados sobre filme de Óxido de Índio-Estanho (ITO) previamente depositado em uma face da lamina de vidro. Em dois substratos foram montados dispositivos com topologia convencional, cujas superfícies do ITO foram previamente limpas durante 40 segundos em reator com plasma de O_2.

O compósito poli (3-hexylthiophene) (P3HT) - [6,6] fenil C61 butírico metil éster (PCBM), na relação 1:1 (solvente utilizado: diclorobenzeno), foi utilizado para compor a camada ativa de ambas as topologias de dispositivos, cuja área ativa foi projetada em 9 mm^2, para que após concluído o processo de metalização fosse obtida resistência série com valor reduzido. O PEDOT: PSS foi depositado sobre a camada ativa de duas placas de vidro (oito dispositivos em topologia invertida) com o objetivo de auxiliar ou acelerar o processo de oxidação na interface Ag - compósito (P3HT:PCBM). A caracterização eletro-óptico foi o procedimento que finalizou o experimento.

3. RESULTADOS

Este trabalho considerou topologia não convencional para montar dispositivo fotovoltaico com base na eletrônica orgânica (OPV), ele foi realizado durante atividade destinada ao treinamento de recursos humanos no Brasil (iniciado em 10/Jun./2011). O dispositivo OPV invertido foi montado tendo o contato elétrico opacos em Prata depositada termicamente em ambiente sob o vácuo. Quatro dispositivos foram instalados num simulador solar (AM 1.5), após ter sido terminada a metalização. Eles não apresentaram resposta significativa. Os OPVs foram mantidos em condições ambientais normais da sala e foi aguardado um período de alguns dias antes de realizar uma nova caracterização. Na segunda etapa os dispositivos foram caracterizados a partir de um simulador solar com fonte incandescente e o valor médio calculado para a amostra. O pior resultado obtido para a caracterização elétrica não foi considerado para compor o intervalo de confiança ou faixa para a média. A amostra excluída do conjunto de dados apresentou valor para a tensão de circuito aberto em 0,17 V e a corrente de curto-circuito de 0,14 mA. A energia elétrica, potencialmente, gerada para suprir uma carga foi calculada e está apresentada. Os quatro dispositivos OPV montados com topologia normal ou convencional, onde o filme de ITO sobre o vidro recebeu o PEDOT:PSS para funcionar como camada transportadora de cargas positivas, e a camada ativa similar àquela dos IOPVs, por motivo de ter apresentado desempenho fotovoltaico insatisfatório não foram considerados neste trabalho para fins de comparação. Na Fig. 3 é apresentada uma lâmina de vidro (2,54 cm^2) que contém quatro dispositivos montados com topologia/arquitetura de célula invertida (IOPVs), quando estava sendo irradiada por simulador solar de um Sol (AM 1.5, 100 mW/cm^2).

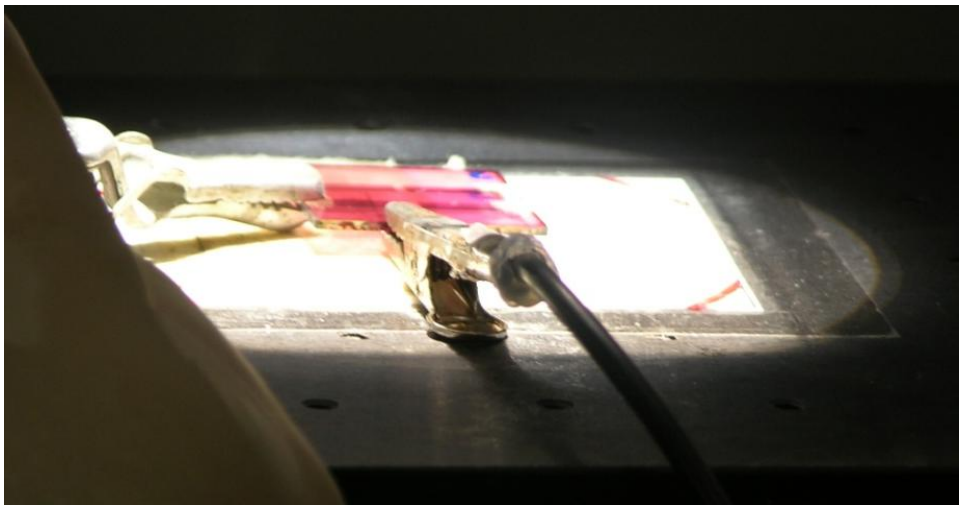

Figura. 3. Lâmina (parte avermelhada, ao centro) contendo os IOPVs montados sob irradiação em simulador solar durante procedimento inicial para caracterização elétrica, data: 22/Jun./2011.

Na Fig. 3 temos uma das células conectada a circuito externo (por garras tipo "jacaré") que simulava carga objetivando a caracterização elétrica inicial (procedimento realizado no Depto de Química/USP, em 22/Jun./2011).

Uma hipótese levantada para explicar o não funcionamento dos dispositivos IOPVs, após terminado o processo de metalização é devido não ser imediata a oxidação da Prata (AgO), formada na interface entre a camada ativa (compósito: P3HT - PCBM) e o eletrodo positivo e opaco. Esse processo de oxidação foi citado com elemento importante para a otimização do desempenho do dispositivo invertido (Shaheen, 2011).

Na segunda etapa, depois de certo período (em Julho), os dispositivos foram novamente submetidos ao processo de caracterização elétrica, pela utilização de simulador solar com base em fonte incandescente. Na Fig. 4 está apresentado o resultado elétrico (tensão e corrente), plotado, a partir de duas das planilhas de características amostradas (data de realização: 07/Julho/2011; local: EPUSP, GEM, sala C 1-57), tanto para a condição de irradiação com o iluminante incandescente (underlight), quanto na ausência dele, no "escuro" (dark).

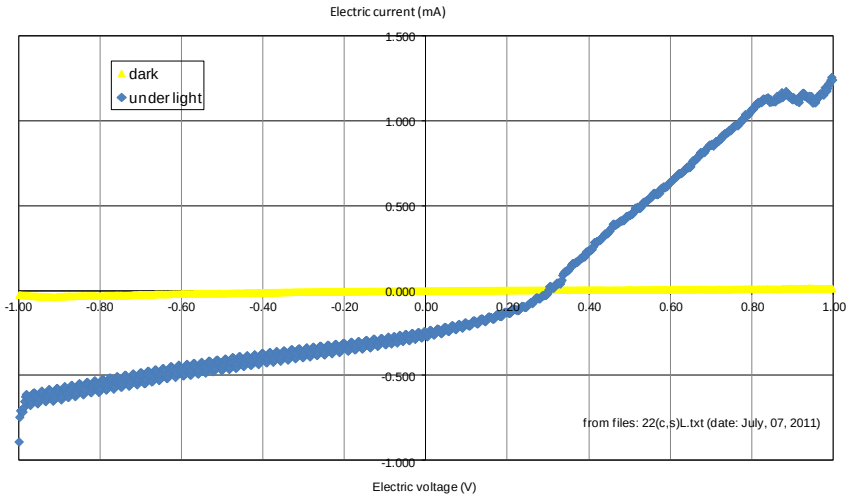

Figura 4. Característica elétrica de tensão e corrente nos terminais de uma célula IOPV montada no Brasil, quando iluminada (●) e sem iluminação (♦) solar simulada (incandescente), data: Julho/2011.

A caracterização elétrica de um grupo de dispositivos invertidos (IOPV) montados, quando sob radiação solar simulada (fonte incandescente), foi amostrada e apresentou valor médio (e intervalo de confiança bilateral, nível 95%, conforme ABNT, NB 1188, 1988) para a tensão de circuito aberto na faixa de (0,25 ± 0,05) V e corrente de curto-circuito média de (0,31 ± 0,08) mA.

A potência para a geração de energia elétrica, estimada como possível de ser obtida a partir de um dispositivo IOPV, para suprir uma carga hipotética foi calculada e está plotada, em função da tensão nos terminais da célula, na Fig. 5, para as duas condições do iluminante simulado.

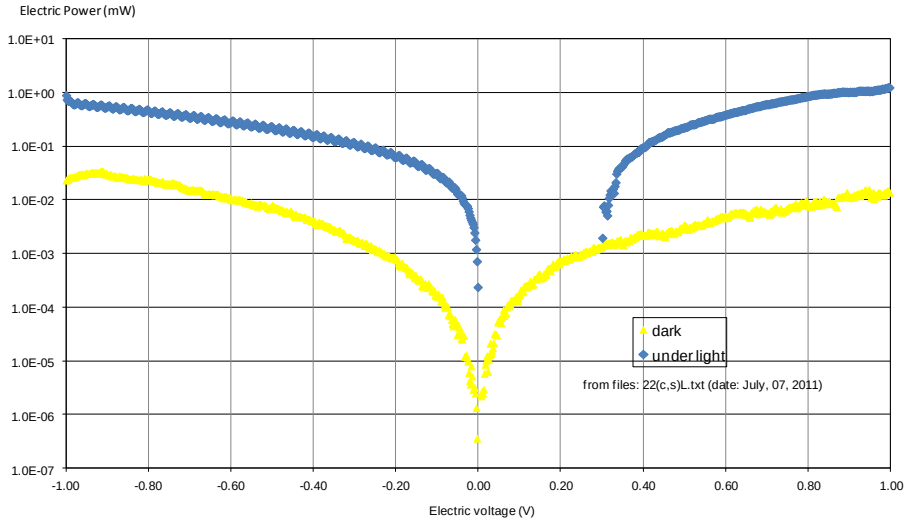

Figura 5. Característica de potência elétrica calculada para suprir carga hipotética, a partir de uma célula IOPV montada quando iluminada (●) e sem iluminação (♦) solar simulada (incandescente), data: Julho/2012.

Ainda que a energia elétrica que foi calculada como possível de ser gerada a partir do dispositivo IOPV montado, enquanto fica submetido à irradiação reduzida, em relação ao referencial ou simulador solar recomendado (AM 1.5, 100 mW/cm^2) é possível verificar uma separação entre as curvas (condição: claro e escuro). Isto demonstra o funcionamento do dispositivo montado na topologia de célula fotovoltaica invertida. E outro ponto importante, esse resultado indica que a janela de entrada de luz, por transmissão no dispositivo, não foi comprometida completamente pelo ZnO.

Fica sugerida a continuidade do trabalho aqui apresentado, seja pela viabilidade demonstrada a partir do dispositivo em topologia invertida; pela utilização de substrato tipo flexível, outro tipo de Óxido condutivo transparente (TCO) e compósito. Também para a realização de caracterização espectral do dispositivo e o desenvolvimento de um novo processamento, sem a necessidade de utilizar compartimento sob vácuo, em atividade experimental que considere a laminação no processo de montagem do dispositivo IOPV.

4. CONCLUSÕES

A tecnologia para a geração de eletricidade tendo como fonte primária à energia solar e base denominada orgânica (ou compostos orgânicos) foi considerada a partir de dispositivo fotovoltaico orgânico montado durante atividade experimental no âmbito de treinamento voltado a formação de recursos humanos em Engenharia e Energia. O foco principal esteve na utilização de Óxido de Zinco em substituição ao PDOT:PSS junto ao eletrodo transparente à luz. A comparação entre dispositivo montado com a estrutura denominada convencional, onde o Alumínio é o eletrodo negativo e a estrutura denominada invertida onde o elemento metálico, a Prata, também depositado sob vácuo e que possui a função de eletrodo positivo não foi realizada, quantitativamente, devido à ausência de resposta dos quatro dispositivos com topologia normal. A caracterização dos dispositivos IOPV montados foi realizada tanto depois de deixar a câmara metalizadora e sob simulador solar típico (AM 1.5, 100 mW/cm^2), quanto após ter sido transcorrido um período de tempo mais amplo, quando foi verificado que o dispositivo OPV invertido, contendo filme de Prata no eletrodo opaco, ZnO e o compósito P3HT:PCBM na camada ativa passou a funcionar como uma célula IOPV. Com a modificação introduzida no lado do eletrodo transparente, que passou a ter a função de o pólo negativo e sem a utilização de PEDOT:PSS uma maior durabilidade e menor custo são esperados para as células IOPVs.

Agradecimentos

Ao Depto Química da Universidade de São Paulo - USP pela utilização do simulador solar;, ao Grupo de Eletrônica Molecular – GEM/LME/EPUSP, e em particular ao Prof. Shaheen, pela cooperação e guia ao longo do treinamento, tanto na sala de aula quanto na parte experimental que precedeu as etapas de metalização. O trabalho teve suporte financeiro da FAPESP (2009/05589-7) e CAPES (a partir do projeto binacional n.023/09).

REFERÊNCIAS

ABNT, NB 1188, 1988. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Interpretação estatística de resultados de ensaio - Estimação da média - Intervalo de confiança (NBR11153), Rio de Janeiro, Brasil.

Bailey, A. *et al*., 2011. Air-processed organic photovoltaic devices fabricated with hot press lamination. Organic Electronics, v.12, p.108–112.

Burini Junior *et al*., 2011a. Dispositivo Fotovoltaico para Energia Solar: Orgânico ou Inorgânico. Anais do 9th LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, Argentina, p.65.

Burini Junior *et al*., 2011b. Organic Photovoltaic Devices: ZnO instead PDOT/PSS. Pôster apresentado no X Encontro da Sociedade Brasileira de Pesquisa em Materiais, Gramado, RS, Brasil, 2011.

Hu, Z., Zhang, J., Liu, Y., Hao, Z., Zhang, X., Zhao, Y., 2011. Influence of ZnO interlayer on the performance of invertedorganicphotovoltaicdevice, Solar Energy Materials and Solar Cells, v.95, n.8, p.2126–2130.

Jabbour, G. E., 2008. Flexible (Rigid) Solar Cells. Arizona State University (Apresentação em Powerpoint, 20p.).

Kearns, D., Calvin, M., 1958. Photovoltaic Effect and Photoconductivity in Laminated Organic Systems. J. Chem. Phys., v.9, .4, p.950-951.

Kippelen, B., Brédas, J-L., Tech, G., Berry, J., 2012 Nanolaminate Electrodes for OPVs. EFRC CISSEM, US Department of Energy.

Lunt, R. R., Bulovic, V., 2011. Transparent, near-infrared organic photovoltaic solar cells for window and energy-scavenging applications. Appl. Phys. Lett. 98, 113305.

Nardes, A. M., 2011. Converting Light to Electricity using Polymers. National Renewable Energy Laboratory, Golden CO, (powerpoint), EPUSP, São Paulo, 11/Mar.

Peh, R. J., Lu, Y., Zhao, F., Lee, C-L. K., Kwan, W. L., 2011. Vacuum-free processed transparent inverted organic solar cells with spray-coated PEDOT:PSS anode, Solar Energy Materials and Solar Cells, v.95, n.12, p.3579-3584.

Shaheen, S. E., 2011. Mini-course on Organic Photovoltaics. University of São Paulo, EPUSP, 7-10, June, São Paulo, Brasil.

Sun, K., Ouyang, J., 2012. Polymer solar cells using chlorinated indium tin oxide electrodes with high work function as the anode, Solar Energy Materials and Solar Cells, v.96, p.238-243.

ORGANIC PHOTOVOLTAIC DEVICE: INVERTED TOPOLOGY

Abstract. *An experimental study conducted in Brazil, containing changes in the topology used to mount the Organic Photovoltaic (OPV) device, that occurred during activities intended for the training of human resources is presented. The electrical characteristic from the assembly inverted organic photovoltaic cell (IOPV), which uses the positive electrode obtained by metallic evaporation under vacuum are provided. The inverted device assembled was based on the wet technique known as spin coating. On the transparent electrode side, the Zinc oxide layer was formed on the Indium tin oxide (ITO), instead of [poly (3,4-ethylenedioxythiophene) poly (styrenesulfonate)] (PEDOT:PSS) which has been used in the conventional OPVs topology. The PEDOT:PSS has been used at very acidic solution (pH as low as 2),*

and longer service life for the organic solar cells is expected from the replacement of this element. Removing the useful life barrier will bring scale to mass production and reduce the cost of OPV device substantially. The best sample of IOPV mounted that uses ZnO with the transparent negative electrode, and whose active layer used the composite P3HT: MBCP (poly (3-hexylthiophene - P3HT;-phenyl C61-butyric acid methyl Ester - MBCP) when under simulated solar radiation (incandescent source) provided electricity at the power of 10 mW under load at the voltage of 0.9 V. The IOPV devices assembled and when subjected to simulated solar radiation, showed electrical characteristic, sampled at the terminals, with an average value for the open circuit voltage in the range of (0.25 ± 0.05) V and for the short circuit current (0.31 ± 0.08) mA.

***Key words**:* Solar energy, Inverted Organic Photovoltaic Device, ZnO.