

ESTUDO DE CÉLULAS SOLARES ORGÂNICAS DE HETEROJUNÇÃO FLEXÍVEIS EM PROCESSO DE DEGRADAÇÃO ACELERADA UTILIZANDO ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA

Gerson Santos (IEE-USP) - gerson1077@usp.br

Givaldo dos Reis (IEE-USP) - greis@iee.usp.br

Roberto Zilles (IEE-USP) - zilles@iee.usp.br

Diego Bagnis (CSEM Brasil) - diego.bagnis@csembrasil.com.br

Gabriela De Amorim Soares (CSEM Brasil) - gabriela.amorim@csembrasil.com.br

Resumo:

O presente trabalho teve por foco o estudo de Células Solares Orgânicas (CSO) de Heterojunção Flexíveis com configuração Invertida submetidas ao processo de degradação acelerada com caracterização elétrica em corrente contínua e alternada. As amostras foram fabricadas no Centro Suíço de Microeletrônica do Brasil (CSEM), localizado em Minas Gerais, Brasil. Para o estudo das amostras em condição curvada, utilizou-se uma base curva de vidro, a qual foi alocada em câmara climática para processo de degradação acelerada com parâmetros de 85 graus Celsius e 85% de umidade relativa do ar, cujos parâmetros foram definidos com base nas normas IEC 61215 e 61646 por 1000 horas (ou até que as amostras apresentassem eficiência menor que 1%). Para fins de comparação utilizou-se dois grupos de amostras, isto é, um grupo com eletrodo metálico com padrão de linhas paralelo e outro com padrão de linhas cruzado. Para avaliar o decaimento de eficiência ao longo do tempo, as amostras foram caracterizadas em simulador solar padrão A+A+A+ extraíndo-se parâmetros como a tensão de circuito aberto (Voc), corrente de curto-circuito (Isc), fator de forma (FF), eficiência de conversão energética (PCE), bem como as resistências série e paralela. Além disso, houve caracterização em corrente alternada, fazendo-se uso da técnica de Espectroscopia de Impedância (EI ou do inglês, Impedance Spectroscopy - IS), permitindo uma análise inicial dos modelos elétricos equivalentes e consequente análise da variação dos valores dos seus elementos frente o processo de degradação acelerada.

Palavras-chave: *Célula Solar Orgânica, Caracterização elétrica, Espectroscopia de Impedância.*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Materiais e Tecnologias de células para Conversão Fotovoltaica*

ESTUDO DE CÉLULAS SOLARES ORGÂNICAS DE HETEROJUNÇÃO FLEXÍVEIS EM PROCESSO DE DEGRADAÇÃO ACELERADA UTILIZANDO ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA

Gerson Santos – gerson1077@usp.br

Givaldo Reis – greis@iee.usp.br

Roberto Zilles – zilles@usp.br

Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, São Paulo, SP

Diego Bagnis – diego.bagnis@csembrasil.com.br

Gabriela Amorim – gabriela.amorim@csembrasil.com.br

Centro Suíço de Microeletrônica do Brasil, Belo Horizonte, MG

Resumo. O presente trabalho teve por foco o estudo de Células Solares Orgânicas (CSO) de Heterojunção Flexíveis com configuração Invertida submetidas ao processo de degradação acelerada com caracterização elétrica em corrente contínua e alternada. As amostras foram fabricadas no Centro Suíço de Microeletrônica do Brasil (CSEM), localizado em Minas Gerais, Brasil. Para o estudo das amostras em condição curvada, utilizou-se uma base curva de vidro, a qual foi alocada em câmara climática para processo de degradação acelerada com parâmetros de 85°C e 85% de umidade relativa do ar, cujos parâmetros foram definidos com base nas normas IEC 61215 e 61646 por 1000 horas (ou até que as amostras apresentassem eficiência menor que 1%). Para fins de comparação utilizou-se dois grupos de amostras, isto é, um grupo com eletrodo metálico com padrão de linhas paralelo e outro com padrão de linhas cruzado. Para avaliar o decaimento de eficiência ao longo do tempo, as amostras foram caracterizadas em simulador solar padrão A+A+A+ extraíndo-se parâmetros como a tensão de circuito aberto (Voc), corrente de curto-circuito (Isc), fator de forma (FF), eficiência de conversão energética (PCE), bem como as resistências série e paralela. Além disso, houve caracterização em corrente alternada, fazendo-se uso da técnica de Espectroscopia de Impedância (EI ou do inglês, Impedance Spectroscopy – IS), permitindo uma análise inicial dos modelos elétricos equivalentes e consequente análise da variação dos valores dos seus elementos frente o processo de degradação acelerada.

Palavras-chave: Célula Solar Orgânica, Caracterização elétrica, Espectroscopia de Impedância.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas que empregam energia renovável estão em destaque atualmente, pois fontes de energia tradicionais, oriundas de materiais fósseis, como petróleo e carvão (Jacobson (2009) são cada vez mais escassos e altamente poluentes. Especificamente, dentre as várias fontes de energia renovável, a geração de energia utilizando irradiação solar, Saidur *et al.* (2011), possui elevado potencial no Brasil, uma vez que o país possui condições climáticas e geográficas propícias e destacadas perante ao cenário mundial, como reportado por Rütther *et al.* (2008). Neste contexto, para o setor de energia solar, verifica-se a necessidade de desenvolvimento nesta área, envolvendo tanto dispositivos já consagrados em sistemas fotovoltaicos, baseados em silício Green *et al.* (1989) como também dispositivos com tecnologia considerada de fronteira Santos *et al.* (2018), como é o caso dos dispositivos fotovoltaicos baseados em materiais orgânicos/poliméricos Travis *et al.* (2006). Os materiais semicondutores orgânicos foram estudados inicialmente por Shirakawa e seus colaboradores no final da década de 70; com o prêmio Nobel de Química em 2000 direcionado a este pesquisador e seus colaboradores, houve grande interesse por parte da comunidade científica e industrial para a aplicação destes materiais de modo análogo ao silício, tanto em dispositivos optoeletrônicos como fotovoltaicos, Kovac *et al.* (2003).

Considerando as células solares orgânicas (do inglês, *Organic Solar Cells*, OSCs), duas tecnologias são mais proeminentes, a Células Solares Orgânica Sensibilizadas por Corantes (*Dye Cells*) e as de Heterojunção (Obotowo *et al.*, 2016). Neste trabalho, foram estudadas as OSCs de Heterojunção Flexíveis (Kuwabara *et al.*, 2010) com configuração Invertida, as quais foram produzidas no Centro Suíço de Microeletrônica (CSEM) do Brasil (<http://csembrasil.com.br/>) (Santos *et al.*, 2016). O estudo de degradação acelerada foi realizado alocando-se as amostras em uma câmara climática com ajustes de temperatura e umidade relativa, baseando-se nas normas IEC 61215 e 61646, com a amostra curvada sobre uma base de vidro (utilizou-se uma base de vidro devido a baixa condutividade térmica, pois a temperatura contribui para maior degradação das amostras). O estudo com as amostras em condição plana foi realizado previamente e os dados não serão apresentados no presente trabalho (Santos *et al.*, 2016).

Para avaliar o decréscimo da eficiência ao longo do tempo, a caracterização elétrica em corrente contínua foi efetuada em um simulador solar. Paralelamente realizou-se caracterização em corrente alternada, utilizando-se a técnica de Espectroscopia de Impedância (EI ou do inglês, *Impedance Spectroscopy* – IS) com o intuito de complementar a compreensão sobre o processo de degradação da amostra ao longo do tempo via modelos elétricos equivalentes, que

normalmente proporcional circuitos do tipo RC, cujos valores dos elementos variam no tempo com o processo de degradação acelerada.

2. METODOLOGIA

2.1 Processo de fabricação das Células Solares Orgânicas de Heterojunção Flexíveis com configuração Invertida

Considerando-se uma produção em larga escala, as Células Orgânicas de Heterojunção Flexíveis produzidas na configuração Invertida, enquadram-se como melhor escolha, pois segundo a literatura é a configuração que mostra-se menos susceptível a degradação, conforme reportado por Lattane (2014). Especificamente, as amostras produzidas para este trabalho, foram feitas a partir de um substrato flexível formado por óxido de índio estanho (ITO)/Metal/ITO (IMI) e já reportado por Brabec *et al.* (2014). Seguido do IMI, formou-se os filmes finos de óxido de zinco (ZnO) para transporte de elétrons, o filme ativo composto pelo material o poli(3-exiltiofeno-2,5-dil) regioregular (P3HT) em conjunto com o fulereno modificado, o 6,6-fenil-C60-ácido butírico-metil éster (PCBM) e também o bisaducto indeno-C60 (IBCA), respectivamente. Após a formação do filme fino ativo é formado o filme fino para transporte de lacunas o Polietileno-Dioxitiofeno dopado com Poliestireno Sulfonado (PEDOT:PSS). Por fim, um filme fino de prata é formado para definir o eletrodo metálico (Bagnis *et al.*, 2016). Os filmes finos ativo e transportador de lacunas são formados pela técnica *roll-to-roll* Krebs (2012), enquanto que o filme fino metálico é impresso pela técnica de *screen printing* (Choi *et al.*, 2015). O encapsulamento do dispositivo, é formado por uma estrutura multicamadas de filmes de barreira constituídos pelo politereftalato de etileno (PET), conforme método já apresentado na literatura por Brabec *et al.* (2008). As Figs. 1a e 1b, apresentam o registro fotográfico da CSO de Heterojunção Flexível com configuração Invertida com indicação de polaridade de seus terminais e suas dimensões. Além disso, são destacadas nas figuras a formação do eletrodo metálicos no formato de linhas cruzadas (Fig. 1a) e linhas paralelas (Fig. 1b), respectivamente. Na Figura 1c são apresentadas as estruturas químicas dos materiais utilizados no filme fino ativo, o P3HT em conjunto com o fulereno modificado, o PCBM, e também o IBCA, respectivamente. No caso específico do módulo solar orgânico apresentado nas Figs. 1a e 1b, a área de cada célula solar é de 3,6 cm² e cada módulo conta com 6 células, totalizando uma área ativa de 21,6 cm².

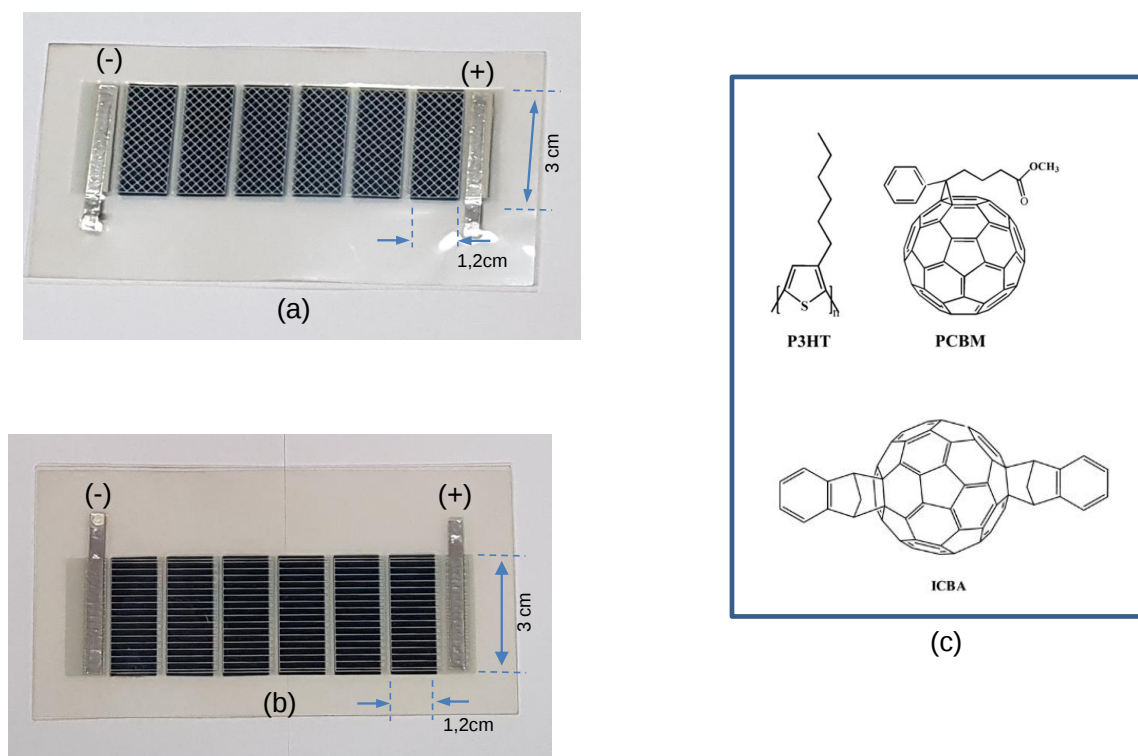


Figura 1 – a) e b) Células Solares Orgânicas de Heterojunção Flexíveis com configuração Invertida, com contatos elétricos metálicos com padrão de linhas cruzadas e paralelas, respectivamente. c) Estruturas químicas para o P3HT, PCBM e do IBCA, utilizados em conjunto para formar o filme fino ativo das células.

A Tab. 1 apresenta o resumidamente as características das amostras estudadas, identificando-se as condições adotadas para o ensaio em câmara climática e o padrão para o eletrodo metálico (linhas cruzadas ou paralelas).

Tabela 1 – Amostras estudadas identificando-se o tipo de ensaio (Câmara climática e suas condições de umidade e temperatura) e o padrão do eletrodo metálico.

CONDIÇÃO DE ENSAIO EM CÂMARA CLIMÁTICA (85°C e 85% Umidade Relativa)	
PADRÃO DO ELETRODO METÁLICO	REGISTRO FOTOGRÁFICO EM DETALHE DO ELETRODO METÁLICO
PADRÃO COM LINHAS CRUZADAS	
PADRÃO COM LINHAS PARALELAS	

A Fig. 2 apresenta o registro fotográfico da base de vidro na qual as amostras foram curvadas (Fig. 2a), e uma base metálica de referência para curvatura adotada; na Fig. 2b é identificado o diâmetro de 9cm.

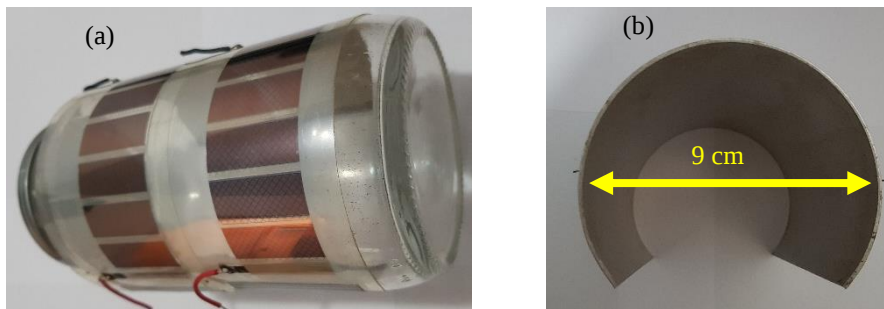


Figura 2 – Registro fotográfico da base curvas de vidro e b) base metálica curva de referência para diâmetro.

2.2 Caracterização elétrica em corrente contínua

A caracterização elétrica em corrente contínua foi realizada no simulador solar padrão classe A+A+A+ da empresa PASAN, modelo HighLIGHT 3LMT, calibrado para a condição de massa de ar AM 1,5 e potência de 100 mW/cm². Nesta caracterização são obtidos parâmetros como tensão de circuito aberto (Voc), Corrente de curto-circuito (Isc), Fator de Forma (FF) e potência de conversão energética (PCE). Além disso, são calculados também os parâmetros de resistência série e paralela, considerando-se o modelo para células solares com um diodo.

2.3 Processo de degradação acelerada em câmara climática

Para o processo de degradação acelerada as amostras foram submetidas a temperatura de 85°C e umidade relativa de 85%, baseando-se nas normas IEC 61215 e 61646, utilizadas para painéis solares inorgânicos e de filmes finos, como a tecnologia CIGS, por um período de 1000 horas. Para o estudo em questão adotou-se o período sugerido pela norma ou até a amostra apresentasse eficiência de conversão energética menor que 1%. As amostras foram alocadas na câmara climática da MECALOR, modelo EC/1,8/AR-URC.

2.4 Caracterização elétrica em corrente alternada

As medições de impedância (Ke *et al.*, 2015) foram realizadas utilizando-se o módulo FRA32M conectado ao equipamento AUTOLAB® da Metrohm. Os dados obtidos foram tratados no *software* NOVA®, também da empresa Metrohm. Com base em estudos prévios (Santos, *et al.*, 2016), verificou-se que a melhor faixa de frequências a ser adotada para o presente estudo seria de 100 Hz a 100 kHz; frequências abaixo ou acima da faixa adotada proporcionam dados coletados desconexos e que não contribuem para o estudo. Além disso, as medidas de impedância foram realizadas no modo passivo, isto é, as medições são realizadas com ausência de luz e sem sinal de corrente contínua sobreposto ao de corrente alternada. A amplitude adotada para o sinal em corrente alternada foi de 100 mV.

2.4.1 Modelo elétrico equivalente utilizando Espectroscopia de Impedância

Os modelos elétricos equivalentes, obtidos com base na técnica de Espectroscopia de Impedância, normalmente geram circuitos do tipo R-C (Resistência-Capacitância). Pelo fato das amostras analisadas não apresentarem uma capacitância ideal, o que se justifica na prática, o *software* de tratamento de dados NOVA®, pertencente ao conjunto de análise do AUTOLAB® propiciam modelos do tipo R-CPE (Resistência – Elemento de Fase Constante, CPE, do inglês *Constant Phase Element*) Diard *et al.* (2013). Assim, para se trabalhar com valores de capacitância, é necessário a conversão do CPE em uma pseudo-capacitância, a qual pode ser equacionado como por meio de uma impedância ou admitância. O equacionamento para a impedância, considerando um CPE, é apresentado na Fig. 2, isto é, o valor de n varia entre 0,7 e 1 e, quanto maior seu valor mais próximo será o comportamento do CPE a de um capacitor ideal, conforme Eq. (1).

$$Z_{CPE} = -\frac{1}{Q(j\omega)^n} \quad (1)$$

onde n pode variar entre 0,7 e 1.

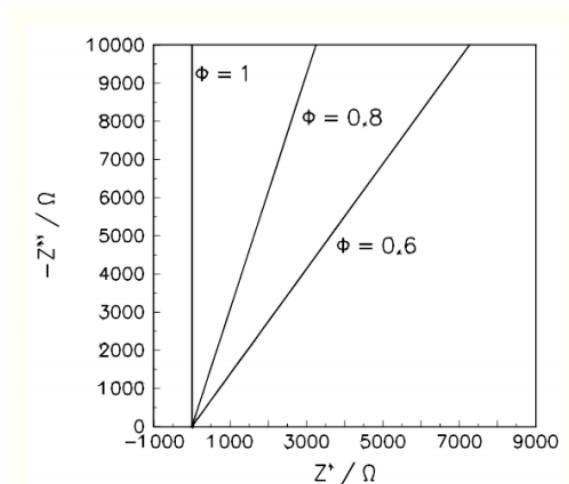


Figura 2 – Gráfico adaptado da literatura com a representação da curva de Nyquist para um Elemento de Fase Constante (Dalmolin, 2005).

No caso dos modelos apresentados neste estudo, o CPE é originalmente obtido com valores de admitância, os quais a partir do tratamento de dados é convertida em pseudo-capacitância no próprio *software* NOVA, utilizando-se o Eq. (2). Assim, todas as capacitâncias dos modelos elétricos analisados neste estudo, são em verdade, pseudo-capacitâncias equivalentes.

A admitância obtida pode ser convertida em pseudo-capacitância, conforme Eq. (2),

$$C_{pseudo} = Y_0^n \cdot R^{\left(\frac{1}{n}-1\right)} \quad (2)$$

onde, Y_0 – admitância do elemento de fase constante; R – resistência do resistor; n – expoente do elemento de fase constante.

3. RESULTADOS

3.1 Caracterização em corrente contínua

A Fig. 3 apresenta a curva I-V média para amostras com eletrodo metálico com padrão cruzado. Estas amostras, após processo de degradação acelerada, apresentam variação tanto da resistência série quanto da paralela (modelo para células solares com um diodo). Analisando-se qualitativamente as curvas, constata-se uma redução na corrente fotogerada ou corrente de curto-circuito (I_{sc}) e também a redução da tensão de circuito aberto (V_{oc}), com variação percentual relativa média de 13,6% e 56,3%, respectivamente, após um período de 65 horas em processo de degradação acelerada. Em condição plana, as amostras apresentam decaimento de eficiência em período maior, cerca de 650 horas, independentemente do padrão do eletrodo metálico (dados não apresentados) (Santos *et al.*, 2016).

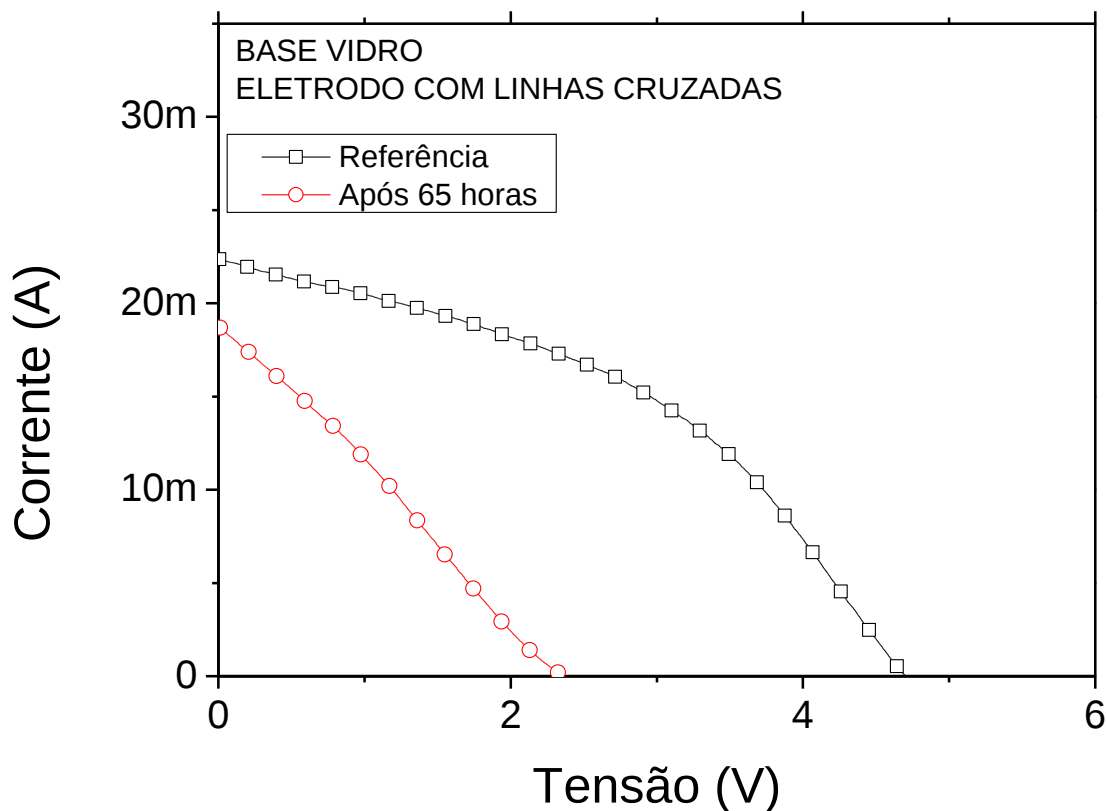


Figura 3 - Curva média da corrente em função da tensão aplicada para amostras com eletrodo metálico com padrão cruzado. Curva de referência (REF) e após processo de degradação acelerada por um período de 65 horas.

A Fig. 4 apresenta as curvas I-V para amostras com eletrodo metálico com padrão de linhas paralelas. Na Figura 4, por conta da escala, aparentemente, parece não haver redução significativa no I_{sc} , porém, analisando-se os dados, observa-se que a variação percentual relativa para esse parâmetro é uma redução de 25%, enquanto que para o V_{oc} houve uma redução de 43,6%.

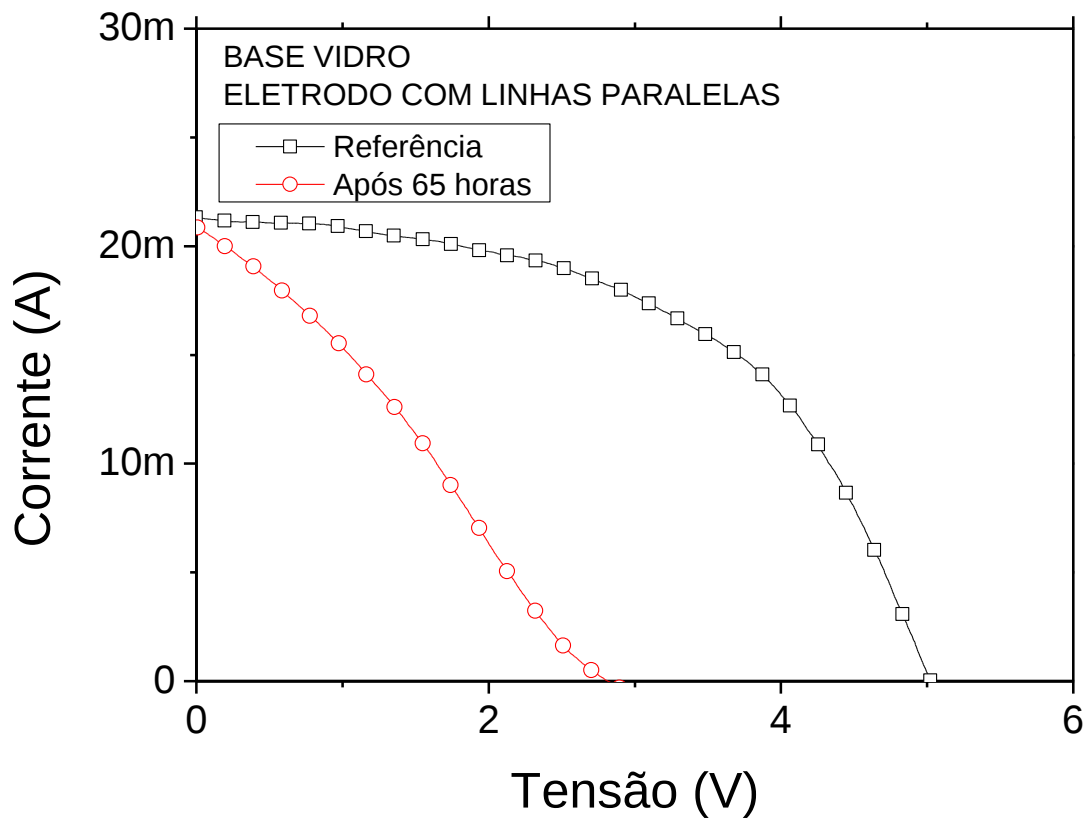


Figura 4 - Curva média da corrente em função da tensão aplicada para amostras com eletrodo metálico com padrão de linhas paralelas. Curva de referência (REF) e após degradação por um período de 65 horas.

A Tab. 2 apresenta os dados extraídos e calculados para as amostras caracterizadas, com destaque para a variação do parâmetro FF para as amostras com eletrodo metálico com padrão de linhas paralelas. Estas amostras também sofreram redução mais significativa em sua eficiência, apresentando variação relativa de 76,7%.

Tabela 2 – Parâmetros extraídos e calculados para as amostras com eletrodo com padrão de linhas cruzadas e paralelas, respectivamente, curvadas sobre base de vidro. Dados oriundos das medidas de referência e após degradação acelerada por um período de 65 horas.

	PADRÃO DO ELETRODO METÁLICO	TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO – VOC (V)	CORRENTE DE CURTO CIRCUITO – ISC (mA)	POTÊNCIA MÁXIMA - P _{MAX} (mW)	FATOR DE FORMA – FF (%)	EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO ENERGÉTICA – PCE (%)
MEDIDAS DE REFERÊNCIA	LINHAS CRUZADAS (LC)	5.978	22	44	33.21	2.05
	LINHAS PARALELAS (LP)	5.778	28	74	45.53	3.43
APÓS 65 HORAS DE DEGRADAÇÃO ACELERADA	LC	2.492	19	12	25.41	0.55
	LP	3.259	21	17	24.93	0.80
VARIAÇÃO PERCENTUAL LC		58.3%↓	13.6%↓	72.7%↓	23.5%↓	73.2%↓
VARIAÇÃO PERCENTUAL LP		43.6%↓	25.0%↓	77.0%↓	45.2%↓	76.7%↓

A Tab. 3, apresenta os dados referentes às resistências série (R_s) e paralela (R_{sh}), respectivamente, para as amostras com padrão de linhas cruzadas e paralelas, respectivamente, considerando o modelo elétrico de um diodo para dispositivos fotovoltaicos. Neste caso, o principal parâmetro a ser observado é a R_{sh} , que é amplamente afetada ao longo do tempo. Além disso, observa-se que a variação da R_{sh} é mais pronunciada para a amostra com eletrodo com padrão de linhas paralelas.

Tabela 3 - Parâmetros de resistências série e paralela para as amostras com eletrodo metálico com padrão de linhas cruzadas e paralelas, respectivamente, curvadas sobre base de vidro. Dados de referência e após processo de degradação acelerada por um período de 65 horas.

	PADRÃO DE LINHAS CRUZADAS		PADRÃO DE LINHAS PARALELAS	
	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)
MEDIDAS DE REFERÊNCIA	252,433	547,257	117,767	3334,991
APÓS 65 HORAS DE DEGRADAÇÃO ACCELERADA	141,685	143,058	186,484	177,123
VARIAÇÃO RELATIVA PERCENTUAL	43,9%↓	73,9%↓	36,8%↑	94,7%↓

3.2 Caracterização em corrente alternada

A Fig. 5 apresenta as curvas média de Nyquist para as amostras com eletrodo com padrão de linhas cruzadas e curvada sobre base de vidro. Qualitativamente, verifica-se, qualitativamente, significativa redução na resistência paralela (considerando o modelo elétrico equivalente com par R-CPE) após 65 horas de degradação em câmara climática.

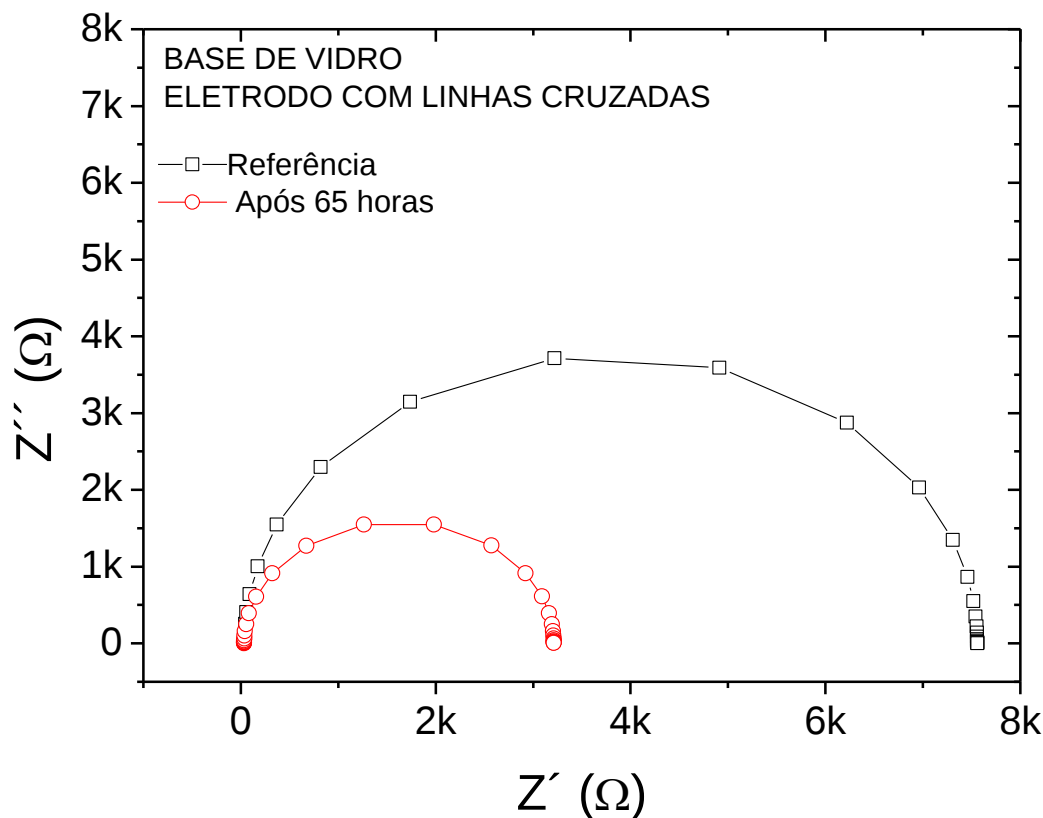


Figura 5 - Curva média de Nyquist para as amostras com eletrodo com padrão de linhas cruzadas e curvada sobre base de vidro. Curva de referência (REF) e após processo de degradação acelerada por um período de 65 horas.

Na Fig. 6, são apresentados os modelos elétricos equivalentes para as medidas de referência (Figura 6a) e após 65 horas de degradação acelerada em câmara climática (Figura 6b). Verifica-se, efetivamente, que a maior variação ocorreu para o parâmetro R_p , que neste caso possui redução na variação percentual relativa de 57,71% entre a medição de referência e após 65 horas de degradação em câmara climática. Para a variação relativa percentual da capacitância houve aumento de 23,08%.

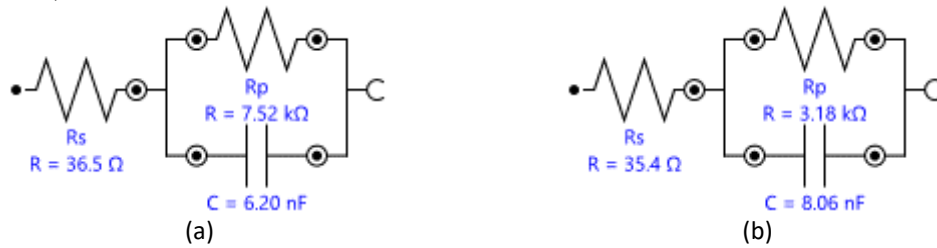


Figura 6 - Modelos elétricos equivalentes para a amostra D008 a) referência, b) após 65 horas de degradação.

A Fig. 7 apresenta as curvas médias de Nyquist para as amostras (também curvadas sobre base de vidro) com eletrodos metálicos com padrão de linhas paralelas. Assim, como as amostras descritas anteriormente, de modo qualitativo, observa-se redução significativa na resistência paralela ao longo do tempo, considerando-se o modelo R-CPE e CPE convertida em pseudo-capacitância. Deste modo, verifica-se que há um padrão que relaciona o parâmetro R_p e o processo de degradação acelerada.

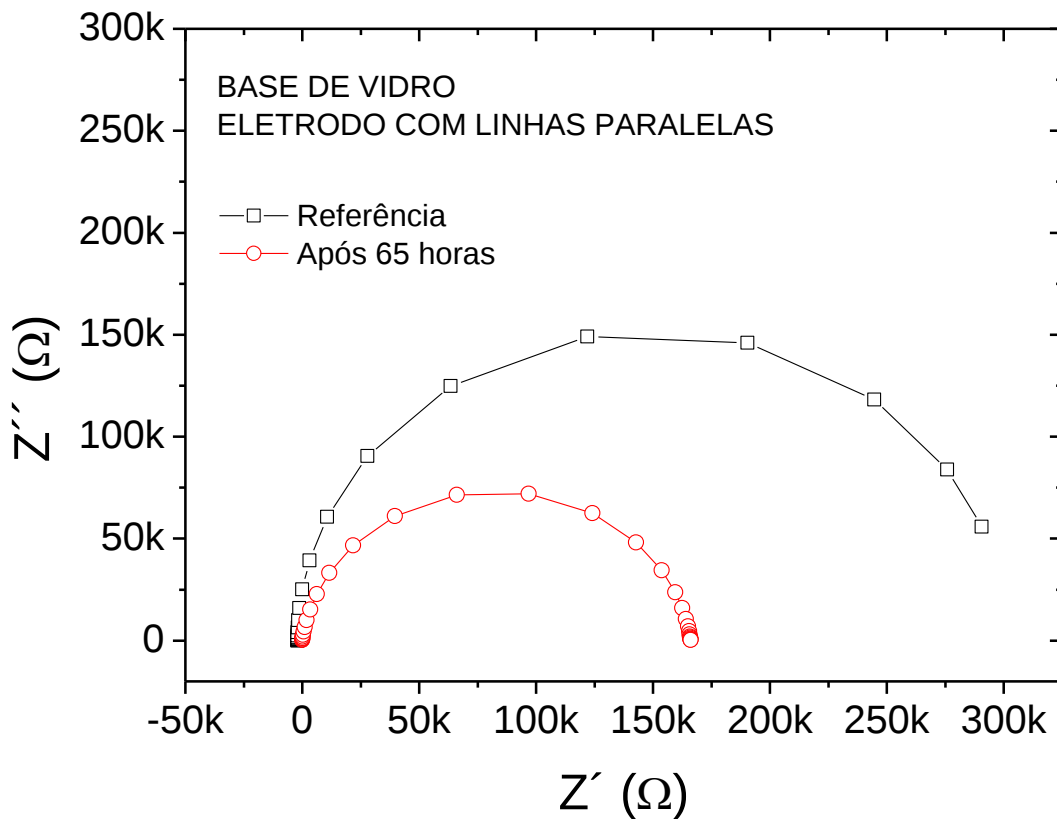


Figura 7 - Curva média de Nyquist para as amostras com eletrodo metálico com padrão de linhas paralelas e curvadas sobre base de vidro. Curva de referência e após processo de degradação acelerada por um período de 65 horas.

Os modelos elétricos equivalentes obtidos para as amostras com eletrodo metálico com padrão de linhas paralelas, apresentados na Fig. 8, confirmam a análise prévia qualitativa, isto é, prevalência na redução de R_p , cuja variação percentual relativa, comparando-se referência e após processo de degradação acelerada, foi uma redução de 45,21%, enquanto que sua capacitância apresentou variação pouco significativa; neste caso, uma redução de 13,92%.

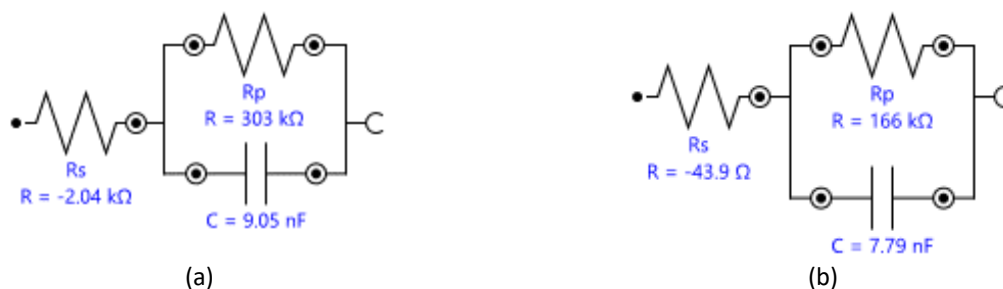


Figura 8 - Modelos elétricos equivalentes para as amostras com eletrodo metálico com padrão de linhas paralelas, a) curva de referência e b) após 65 horas de processo de degradação acelerada.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho estudou-se o processo de degradação acelerada de Células Solares Orgânicas de Heterojunção Flexíveis com configuração Invertida curvadas sobre uma base de vidro. Foram produzidas amostras com eletrodos metálicos com padrão de linhas cruzadas e também linhas paralelas. Além disso, foi considerado, no estudo, o impacto da flexibilidade no processo de degradação acelerada. As amostras foram caracterizadas em corrente contínua e alternada. Na caracterização em corrente contínua utilizou-se o simulador solar, cujos parâmetros obtidos e calculados revelaram variação percentual significativa. As amostras com eletrodo metálico com padrão de linhas paralelas apresentaram, comparativamente, maior decréscimo na eficiência, no fator de forma e também na resistência paralela (considerando o modelo de um diodo para a célula solar). Por outro lado, com a caracterização em corrente alternada, constatou-se que os modelos elétricos equivalente, obtidos com a técnica de Espectroscopia de Impedância, identificaram que o parâmetro de maior relevância, frente o processo de degradação acelerada, é a resistência paralela (considerando o modelo elétrico obtido, par R_p -CPE, das curvas de Nyquist). Neste caso, o parâmetro R_p apresentou redução significativa, independentemente do padrão do eletrodo metálico. Deste modo, com base em análises preliminares dos parâmetros obtidos, é possível relacionar a redução de desempenho tanto em corrente contínua como alternada. A análise dos dados, utilizando-se a técnica de Espectroscopia de Impedância, pode ser melhorada, aplicando-se tensão em corrente contínua sobreposta ao de corrente alternada, colocando, desta maneira, a amostra em uma condição ativa com transporte de portadores de carga. Além disso, há perspectiva de se analisar, comparativamente, a condição da amostra com e sem irradiação solar padrão e seu impacto nas medidas de impedância. Por fim, de modo global, verifica-se também que o processo de degradação acelerada é mais pronunciado quando as amostras se encontram curvadas, comparativamente às análises das medições com as amostras sem estresse de curvatura (dados não apresentados) (Santos *et al.*, 2016).

Agradecimentos

Agradecimentos aos pesquisadores do Centro Suíço de Microeletrônica (CSEM), aos pesquisadores e técnicos do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, aos professores, pesquisadores e técnicos do Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e também ao CNPq por apoiar financeiramente este projeto (processo 107967/2017-0).

REFERÊNCIAS

- Bagnis, D. et al.; “Performance and light stability study on icba and pcbm fullerene acceptors related to the choice on electron transport material”. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, Anais, 2016.
- Brabec, C. J. et al.; “High precision processing of flexible P3HT/PCBM modules with geometric fill factor over 95%”. *Organic Electronics*, v. 15, p. 2256-2263, 2014.
- Brabec, C. J. et al.; “Flexible organic P3HT:PCBM bulk-heterojunction modules with more 1 year outdoor lifetime”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 92, p. 727-731, 2008.
- Choi, H. et al.; “Screen printed silver top electrode for efficient inverted organic solar cells”. *Materials Research Bulletin*, v. 70, p. 412-415, 2015.
- Dalmolin, C.; “Preparação e caracterização de eletrodos de polímeros condutores sobre carbono vítreo reticulado para aplicação em baterias secundárias”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, 2006. site: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/6076/TeseCD.pdf?sequence=1> . Acesso em 01/11/2019.
- Diard, J. -P.; Le Gorrec, B.; Montella, C.; “Handbook of Electrochemical Impedance Spectroscopy - Electrical circuits containing CPEs”. Bio-logic, site: <http://www.bio-logic.net/wp-content/uploads/QCircuits.pdf>, 2013, acesso em: 01/05/2018.
- Green, M. A. et al; “22.8% efficient silicon solar cell”. *Applied Physics Letter*, v. 55, p. 1363-1365, 1989.

- Iwamoto, M. et al.; “Fundamentals of bulk heterojunction organic solar cells: An overview of stability/degradation issues and strategies for improvement”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 84, p. 43-53, 2018.
- Jacobson, M. Z.; “Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security”. *Energy & Environmental Science*, v. 2, p. 148-173, 2009.
- Ke, J.; Zhang, N.; Low, E.; Wang, R.; Kam, Z. M.; Wang, X.; Liu, B.; Zhang, J.; “Organic photovoltaic initial stage degradation analysis using impedance spectroscopy”. *Synthetic Metals*, v. 202, p. 63-67, 2015.
- Kovac, J.; Peternai, L.; Lengyel, O.; “Advanced light emitting diode structures for optoelectronics applications”. *Thin Solid Films*, v. 433, p. 22-26, 2003.
- Krebes, C. F.; “Roll-to-roll fabrication of polymer solar cells”. *Materials Today*, v. 15, p. 36-49, 2012.
- Kuwabara, T. et al.; “Inverted bulk-heterojunction organic solar cell using chemical bath deposited titanium oxide as electron collection layer”. *Organic Electronics*, v. 11, n. 6, p. 1136-1140, 2010.
- Lattane, S.; “Electron and hole transport layers: their use in inverted bulk heterojunction polymer solar cells”. *Electronics*, v. 3, p. 132-164, 2014.
- Meissner, D.; Wöhrle, D.; “Organic Solar Cells”. *Advanced Materials*, v. 3, no 3, p. 129-138, 1991.
- Obotowo, I. N.; Obot, I. B.; Ekpe, U. J.; “Organic sensitizers for dye-sensitized solar cell (DSSC): Properties from computation, progress and future perspectives”. *Journal of Molecular Structure*, v. 1122, p. 80-87, 2016.
- Park, N. -G. et al.; “Highly Reproducible Perovskite Solar Cells with Average Efficiency of 18.3% and Best Efficiency of 19.7% Fabricated via Lewis Base Adduct of Lead(II) Iodide”. *Journal of the American Chemical Society*, v. 137, no 137, p. 8696-8699, 2015.
- Rüther, R. et al.; “The strategic siting and the roofing area requirements of building-integrated photovoltaic solar energy generators in urban areas in Brazil”. *Energy and Buildings*, v. 40, no 3, p. 365-370, 2008.
- Saidur, R. et al.; “A review on global solar energy policy”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, no 4, p. 2149-2163, 2011.
- Santos, G.; Zilles, R.; “TECNOLOGIA DE FRONTEIRA: conhecendo as células solares orgânicas” *Revista Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica*, v. 4, n. 20, p. 4-10, 2018.
- Santos, G.; et al.; “Estudo do processo de degradação células solares orgânicas de heterojunção invertidas”. *Anais do VI Congresso Brasileiro de Energia Solar*, Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- Shirakawa, H.; Ikeda, S.; “Infrared Spectra”. *Polymer Journal*, v. 2, p. 231-244, 1971.
- Travis, L.; Venkataraman, D.; “Organic solar cells: A overview focusing on active layer morphology”. *Photosynthesis Research*, v. 87, p. 73-81, 2006.
- Zhang, Y.; Li, L.; Yuan, S.; Li, G.; Zhang, W.; “Electrical properties of the interfaces in bulk heterojunction organic solar cells investigated by electrochemical impedance spectroscopy”. *Electrochimica Acta*, v. 109, p. 221-225, 2013.

ACCELERATED DEGRADATION PROCESS STUDY ON FLEXIBLE BULK HETEROJUNCTION ORGANIC SOLAR CELLS USING IMPEDANCE SPECTROSCOPY TECHNIQUE

Abstract. *This work has aimed to study Flexible Inverted Bulk Heterojunction Organic Solar Cells. The samples were fabricated in Swiss Center for Electronic and Microtechnology (CSEM), located in Minas Gerais, Brazil. The samples were bended under a base of glass. The samples were put in an environment chamber for an accelerated degradation process under 85°C and 85% humidity, which standard test were based on IEC 61215 and 61646 during 1000 hours (or until sample efficiency reach values under 1%). The metallic electrodes have parallels and crusade patterns. To evaluate degradation process, the samples were characterized using a solar simulator A+A+A+ standard to obtain parameters as open-circuit voltage (Voc), short-circuit current (Isc), fill factor (FF), power conversion efficiency (PCE) and also serie (Rs) and parallel (Rsh) resistances. Besides, there was an alternated current characterization through the Impedance Spectroscopy technique, which allowed extract parameters to build an electrical model and its initial analysis considering parameters changed with degradation process.*

Keywords: *Organic Solar Cell, Electrical Characterization, Impedance Spectroscopy*