

ESTUDO DA FOTODEGRADAÇÃO EM MÓDULOS SOLARES ORGÂNICOS (OPV) NAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DO BRASIL

Lucas Phillip Zólio Gonzaga de Moraes – lucaszolio@hotmail.com

Antonia Sônia Alves Cardoso Diniz

GREEN Solar – IPUC, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

Lawrence Lee Kazmerski

Renewable and Sustainable Energy Institute (RASEI), University of Colorado Boulder, Boulder, Colorado USA

Gabriela de Amorim Soares

ONINN Centro de Inovações, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

Resumo. Atualmente as tecnologias da energia solar fotovoltaica são técnica e economicamente viáveis para a geração de energia elétrica. Dentre as tecnologias emergentes, os módulos com células solares orgânicas (OPV) vêm apresentando aumento na eficiência, atualmente excedendo 19% em laboratórios. As vantagens do processo incluem baixo custo, flexibilidade, rápida fabricação em rolo a rolo, uso de materiais abundantes. No entanto, a perda de energia durante a operação devido fotodegradação é um problema complexo e ainda não é completamente compreendido. O objetivo dessa pesquisa é investigar a fotodegradação e os mecanismos de perdas associados em dispositivos OPV nas condições tropicais no Brasil, correlacionando as características elétricas e óticas dos módulos OPV com as mudanças nas propriedades químicas e estruturais sob a exposição à radiação solar durante sua operação. Os parâmetros elétricos dos dispositivos foram monitorados ao longo do tempo do tempo de exposição em bancada de teste externo e medidos no simulador solar. As propriedades físicas e químicas/composicionais dos materiais foram analisados usando testes destrutivos com microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). A análise identificou a quebra de ligações dentro da camada ativa, indicando uma alteração na estrutura orgânica da camada e consequentemente na potência de saída do módulo associadas à combinação de temperaturas e irradiância solar elevadas durante a operação em função do tempo de exposição.

Palavras-chave: Energia Solar, Fotodegradação, Módulo Fotovoltaico Orgânico (OPV)

1. INTRODUÇÃO

A atual era de avanços científicos e tecnológicos está focada em abordar questões críticas tais como o aumento populacional, mudanças climáticas globais, as preocupações ambientais e questões relacionadas a disponibilidade alimentos e a água, que estão impulsionando a crescente demanda mundial por novas fontes de energia limpa (Ren21, 2023). O setor de energia limpa vem crescendo rapidamente, mostrando um crescimento de 9,6% em 2022, em relação a 2021 (Ren21, 2023; Irena, 2023; Iea, 2022).

A energia oriunda de hidroelétricas continua sendo a principal fonte de energia renovável, no entanto, a energia solar fotovoltaica e eólica têm se expandido e alcançado recordes de instalações anuais (Ren21, 2023). E isso deve continuar, com a energia renovável representando mais de 80% da demanda global até 2050 (Nation, 2018). A energia fotovoltaica tem dominado o setor de geração de energia elétrica em adições anuais e ultrapassou 1 TW acumulado instalado em 2022 (Ren21, 2023; Irena, 2023; Mints, 2023). O Brasil é um mercado de energia fotovoltaica forte e emergente, classificado em 4º lugar entre as instalações de países do mundo em 2022 (Ren21, 2023).

Embora a esfera de pesquisa permaneça diversificada, o lado comercial terrestre é dominado pelos módulos de silício (Si), seguindo à distância pelos módulos de telureto de cadmio (CdTe) de filme fino. As pesquisas em células solares orgânicas (OPV) foram iniciadas na década de 1980, mas foram intensificadas nos anos 2000 devido ao potencial dessa tecnologia para formatos flexíveis de baixo custo, disponibilidade de materiais e compatibilidade ambiental. A Fig. 1 mostra as eficiências permaneceram modestas ao longo da próxima década e meia (NREL, 2023). No entanto, em 2018-2019, o OPV teve um ponto de potencial, com aumentos rápidos no desempenho de dispositivos de laboratório. Os dispositivos OPV agora alcançaram eficiências impressionantes, com células de pesquisa validadas com eficiência de 19% (NREL, 2023).

Esse aumento recente de eficiência despertou maior interesse nessa tecnologia, assim como em seu impacto em células solares de perovskitas híbridas (Bati *et al.*, 2023). No entanto, a confiabilidade e a vida útil dos dispositivos OPV ainda são desafios. Existem vários aspectos de confiabilidade a serem considerados, mas a degradação resultante da radiação solar e da exposição ambiental são cruciais e estão no foco da pesquisa (Al-Ahmad *et al.*, 2022; Solak e Irmak, 2023; Sampaio e González, 2022; Zhang *et al.*, 2022; Leo, 2016).

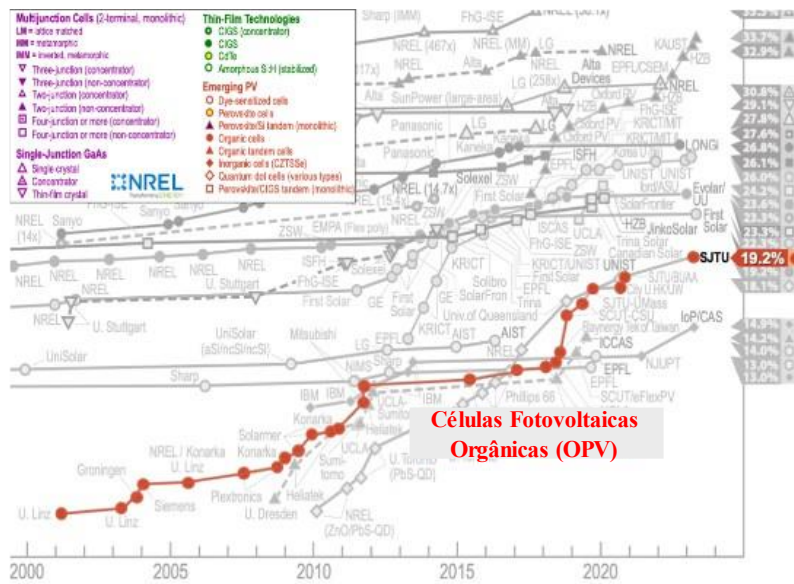


Figura 1 - Gráfico de eficiências destacando as células solares OPV no período de 2000 até o presente (adaptado do Gráfico de Eficiências NREL, 2023).

A física envolvida na conversão fotovoltaica e as diferenças estruturais entre células solares orgânicas e inorgânicas são significativamente distintas. Ao contrário das células solares inorgânicas “convencionais”, os dispositivos OPV utilizam absorvedores de luz moleculares ou poliméricos que resultam em éxcitons localizados (análogo a partículas compostas por pares elétrons-lacunas ligados). O absorvedor é usado em conjunto com um aceitador de elétrons, como o fulereno, que possui estados energéticos moleculares que facilitam a transferência de elétrons.

Após a absorção do fóton, o éxciton resultante migra para a interface entre o material absorvedor e o material aceitador de elétrons. Nessa interface, a discrepância energética entre os orbitais moleculares fornece a força motriz suficiente para separar o éxciton e criar portadores de cargas livres (elétrons e lacunas). A física e química relacionada ao material e ao dispositivo OPV foram extensivamente estudadas na literatura (Bati *et al.*, 2023; Al-Ahmad *et al.*, 2022; Solak e Irmak, 2023; Sampaio e González, 2022; Zhang *et al.*, 2022; Leo, 2016; Araújo, 2018; Blom *et al.*, 2008; Guo *et al.*, 2010; Mihaiilechi *et al.*, 2004; Braun *et al.*, 1984; Deibel *et al.*, 2010; Tamai *et al.*, 2015).

O interesse em módulos OPV tem sido mantido principalmente devido ao seu custo competitivo e seus formatos físicos e eletro-óticos flexíveis. Isso proporcionou a tecnologia como ideal para o uso em ambiente construído, um setor de energia que ainda não teve uma grande inserção de energia fotovoltaica. As bandas de absorção do OPV podem ser ajustadas para corresponder ao espectro desejado, permitindo a produção de várias cores.

Além disso, a transparência do OPV pode ser ajustada, variando de totalmente transparente até semitransparente permitindo o controle dos níveis de luz que atravessa em janelas. E o formato do OPV permite que esse possa ser integrado a edifícios (BIPV – *Building Integrated Photovoltaic*), proporcionando grande valor a essa aplicação, exemplos podem ser vistos na Fig.2. Outras aplicações são principalmente nichos, como iluminação interior/exterior, aumento de eletricidade em veículos, janelas de energia e estruturas ornamentais. O OPV comercial demonstrou eficiências de início de vida compatíveis com essas aplicações. No entanto, para competir nos principais mercados de energia fotovoltaica, desafios ainda precisam ser resolvidos em relação à estabilidade adequada e à vida útil.

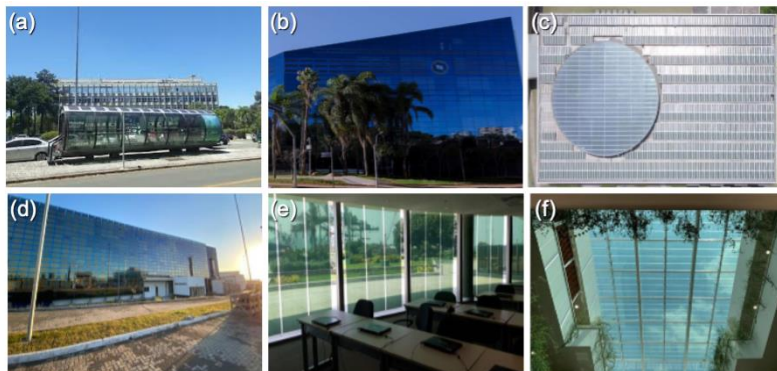


Figura 2- Exemplos no Brasil de aplicações de módulos OPV em edifícios para a geração de eletricidade: (a) Estação de transporte rápido em Curitiba; (b) Edifício de escritórios da TOTVS em São Paulo; (c) Integração no telhado; (d) Fachada do edifício CAO; (e) Área de escritórios da Petrobrás; (f) Claraboia do shopping Morumbi. Imagens da SUNEW Filmes Fotovoltaicos.

O objetivo desta pesquisa é examinar o desempenho e a confiabilidade de materiais e dispositivos OPV nas condições climáticas específicas do Brasil. Na região, a umidade média varia entre 70% e 90 %, as temperaturas ambiente entre 25°C e 34°C e a irradiância solar excede 900 W/m² próximo a meio-dia, com altos índices de raios UV. O foco principal desse trabalho é investigar questões de fotodegradação, ou seja, a perda de potência de saída devido a vários fatores, como temperatura e intensidade de exposição à radiação solar.

O principal objetivo deste trabalho é estabelecer as relações entre as propriedades elétricas do dispositivo e as alterações nas propriedades químicas e estruturais dos materiais nos módulos OPV. Através desses estudos, o objetivo é identificar as alterações químicas, físicas, elétricas induzidas pela fotodegradação em dispositivos OPV.

2. METODOLOGIA

Para este estudo, foram utilizados um conjunto de cinco minimódulos com células solares orgânicas (OPV), conforme ilustrado na Fig. 3, fornecidos especificamente pela ONINN Centro de Inovações, parceira neste trabalho. Essas estruturas de teste possuem células solares com geometria comercial padrão, interconexões e encapsulamentos.

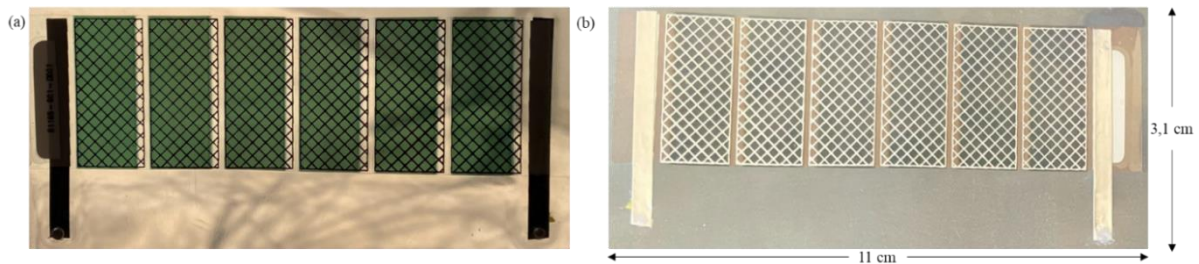


Figura 3 - (a) Minimódulo OPV utilizado neste estudo parte frontal. (b) Minimódulo OPV utilizado neste estudo parte traseira.

A seção transversal genérica das células solares é representada na Fig. 4. Os módulos OPV foram fabricados utilizando o processo padrão comercial de rolo a rolo (R2R) (Solak e Irmak, 2023). Os módulos OPV consistem em 6 células solares conectadas em série, com uma área ativa de 21,6 cm², e são encapsuladas com um epóxi curável por UV entre os filmes de barreira flexíveis, com uma taxa de transmissão de água (WVTR) de ordem de 10⁻³ g/cm²/dia. Detalhes sobre o material e a fabricação dos módulos podem ser encontrados em Miranda *et al.* (2021).

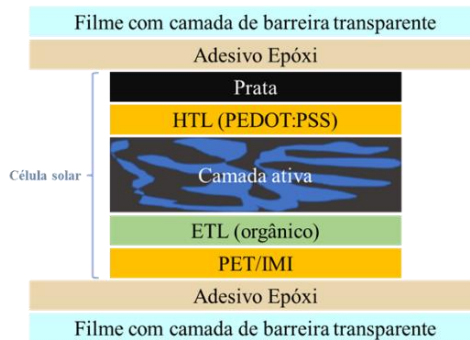


Figura 4 - Representação em corte transversal do dispositivo OPV padrão.

O fluxograma do estudo é apresentado na Fig. 5. Cinco minimódulos com características I-V similares ao mostrado na Fig. 3 foram fornecidos para este estudo pela ONINN. Quatro desses minimódulos solares (Módulos 1-4) foram selecionados para o protocolo de teste de degradação, que envolveu exposição em bancadas externas, em condições tropicais existentes, por 30, 60, 90 e 120 dias.

Os quatro módulos fotovoltaicos OPV selecionados para o protocolo de teste de degradação foram montados em bancadas de testes no laboratório do Grupo de Estudos em Energia da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (GREEN PUC Minas), vinculado ao Instituto Politécnico da PUC Minas (IPUC), localizado na cidade de Belo Horizonte em Minas Gerais.

Um minimódulo (Módulo 5) foi escolhido como referência e inicialmente foi submetido a avaliação de testes destrutivos para estabelecer as propriedades químicas e composicionais iniciais da camada fotoativa. As características elétricas de cada minimódulo exposto nas bancadas foram inicialmente medidas sob condições padrão de teste (STC) do simulador solar pertencente a ONINN, antes do período de exposição.

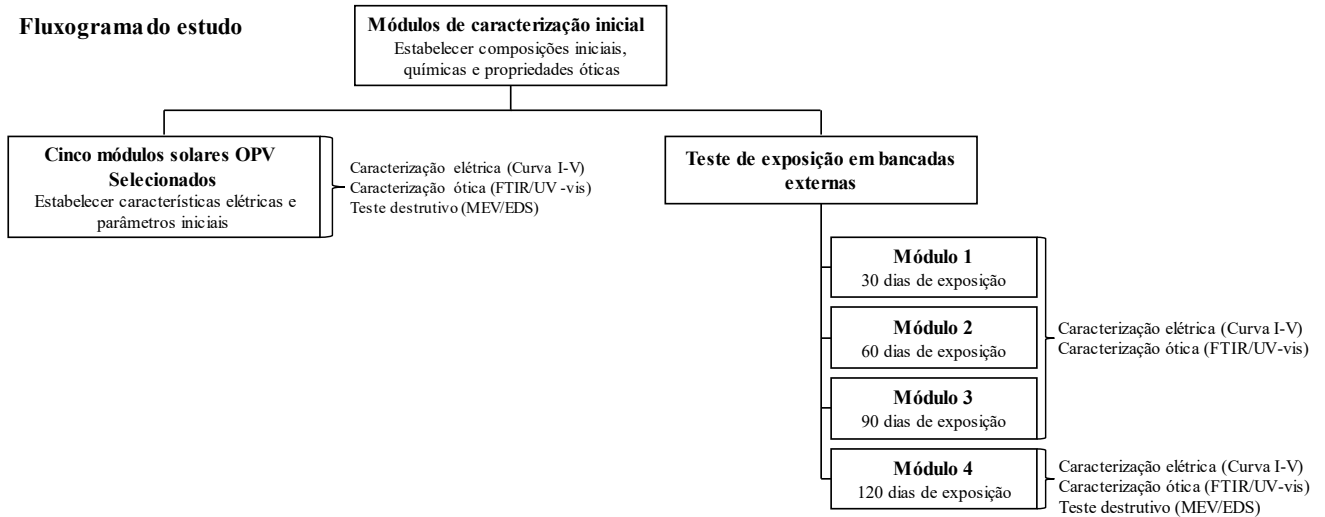


Figura 5 – Fluxograma do estudo definindo a progressão da pesquisa e a caracterização.

As técnicas de caracterização incluíram:

- **Caracterização elétrica**

A medição das curvas características I-V antes da exposição dos módulos OPV foram feitas no simulador solar sob condições de teste padrão (Fig. 6), registrando os principais parâmetros de tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto-circuito (I_{sc}), fator de preenchimento (FF), potência máxima ($P_{máx}$), tensão e corrente máxima ($V_{máx}$, $I_{máx}$), eficiência de conversão, resistência em série e em paralelo ($R_{série}$, $R_{paralelo}$). [Instrumento – Simulador Solar Wacom, modelo WXS-156S-10, classe AAA com uma célula de referência de silício (Si) sob filtro AM 1.5G].

- **Microscopia Eletrônica de Varredura/Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raios-X (EDS)**

Para medições das propriedades físicas e análise elemental da camada fotoativa. [Instrumento - JEOL, modelo JSM IT300].

- **Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) - Refletância Total Atenuada (ATR)**

Informações sobre a presença ou ausência de grupos funcionais específicos, bem como a estrutura química e ligações de ligação dos materiais orgânicos. [Instrumento - Bruker Modelo Alpha equipado com um ATR de diamante de reflexão única com uma faixa de varredura de 400 cm^{-1} a 4000 cm^{-1}].

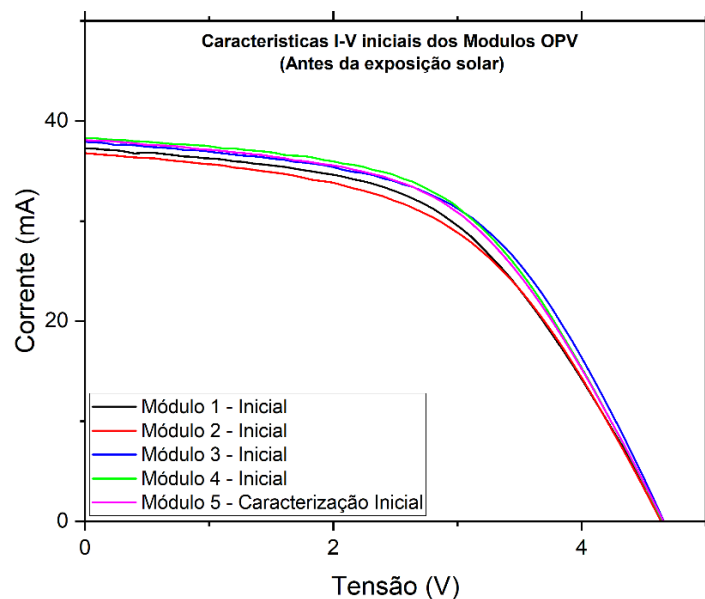


Figura 6 - Medidas iniciais dos cinco minimódulos fotovoltaicos OPV.

3. RESULTADOS

O foco principal é a correlação das mudanças nas características elétricas dos minimódulos com os valores medidos das propriedades composicionais e químicas da camada fotoativa orgânica. Isso fornece indicações diretas das causas subjacentes para a fotodegradação dos módulos OPV após exposição prolongada nas condições climáticas tropicais.

Caracterização elétrica dos minimódulos OPV em exposição na bancada externa

Inicialmente, foi realizado a medição das curvas I-V dos módulos OPV, antes da exposição externa, conforme pode ser visto na Fig. 6.

Seguindo o protocolo de teste do fluxograma (Fig. 5), as características elétricas foram registradas como uma função de tempo de exposição em bancadas externas, com medições nos módulos (1-4) OPV no final de cada período em 30, 60, 90 e 120 dias. Esses resultados das curvas I-V são mostrados na Fig. 7 para cada um dos módulos OPV. Nos primeiros 30 dias seguintes os módulos OPV ficaram são relativamente estáveis - mas as avaliações dos parâmetros I-V indicam o início da fotodegradação. O resumo dos efeitos do tempo de exposição relacionados às curvas I-V na Fig. 7, listando os principais parâmetros dos dispositivos, é apresentado na Tab. 1.

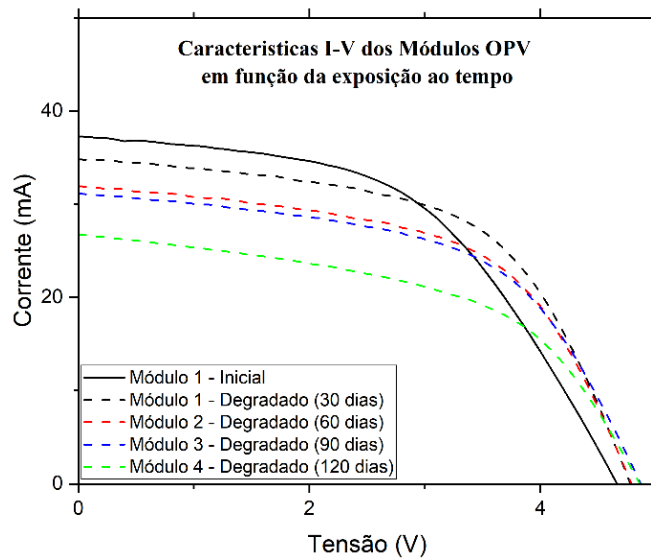


Figura 7 - Medidas da característica I-V dos minimódulos OPV em função do tempo de exposição.

Tabela 1 - Medições dos dados do módulo OPV após o período de exposição apresentando degradação

Parâmetros elétricos	Módulo 1		Módulo 2		Módulo 3		Módulo 4		Módulo 5	
	Inicial	30 dias	Inicial	60 dias	Inicial	90 dias	Inicial	120 dias	Inicial	-
$P_{\text{máx}}$ (mW)	88,58	94,78 (7%)	86,62	85,57 (-1%)	94,26	83,67 (-11%)	94,22	67,24 (-29%)	92,64	
V_{oc} (V)	4,67	4,78 (3%)	4,64	4,79 (3%)	4,65	4,88 (3%)	4,65	4,87 (4%)	4,66	
I_{sc} (mA)	37,28	34,88 (-6%)	36,78	31,92 (-13%)	37,90	31,12 (-17%)	38,31	26,74 (-30%)	38,10	
$V_{\text{máx}}$ (V)	3,01	3,46 (15%)	3,08	3,49 (13%)	3,16	3,51 (11%)	3,07	3,51 (14%)	3,06	
$I_{\text{máx}}$ (mA)	29,45	27,40 (-7%)	28,12	24,55 (-13%)	29,80	23,87 (-20%)	30,73	19,14 (-38%)	30,30	
FF (%)	50,91	56,89 (12%)	50,79	56,01 (10%)	53,40	55,26 (3%)	52,87	51,78 (-2%)	52,16	
η (%)	4,10	4,39 (7%)	4,01	3,97 (-1%)	4,37	3,88 (-11%)	4,36	3,12 (-28%)	4,29	
R_{serie} (Ω)	45,30	33,95 (-19%)	43,54	36,73 (-16%)	38,83	41,20 (6%)	40,72	48,36 (19%)	41,85	
R_{paralelo} (Ω)	1079,79	1088,15 (1%)	1008,44	1009,03 (0%)	1138,36	1043,12 (-8%)	1297,40	781,10 (-40%)	1143,17	

Três estágios de desempenho de módulos OPV podem ser identificados a partir das características elétricas apresentados nas curvas I-V. No primeiro estágio, os módulos apresentam um ganho muito moderado de potência no primeiro período de exposição de aproximadamente 30 dias. Este fato é atribuído à redução da recombinação assistida por defeitos internos e mudanças na morfologia. Essas melhorias resultam de rearranjos de moléculas dentro da camada ativa da célula solar OPV (Fig. 4) devido à irradiância solar, aumentando a mobilidade de portadores de carga, diminuindo a densidade dos defeitos e melhorando a transferência de carga entre moléculas.

No segundo estágio, além de 60 dias observa-se uma degradação lenta e linear na $P_{\text{máx}}$, com desempenhos e parâmetros elétricos retornando aos seus valores iniciais. No terceiro estágio (de 90 a 120 dias), a degradação na potência máxima é significativa que a degradou cerca de 30% após 120 dias de exposição externa. Os módulos OPV nesse estágio apresentam eficiências reduzidas nas faixas de 2 a 3%. A resistência em série ($R_{\text{série}}$) e a resistência em paralelo (R_{paralelo}) corroboram para estas reduções de eficiência.

Caracterização da camada fotoativa

Foram utilizadas técnicas de análise físico-química para identificar quaisquer alterações nas camadas ativas OPV dos módulos em função dos tempos de exposição em bancadas externas e dos parâmetros elétricos estabelecidos (Tab. 1). O módulo de caracterização de referência estabeleceu as propriedades iniciais da camada para essas comparações.

Para investigar a natureza molecular e quaisquer mudanças nas ligações e na estrutura química da camada orgânica, foi utilizado o Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) para avaliar o material. A Fig. 8 resume os resultados, mostrando o FTIR (absorbância) em função do número de onda para o conjunto de camadas ativas iniciais e expostas nos módulos.

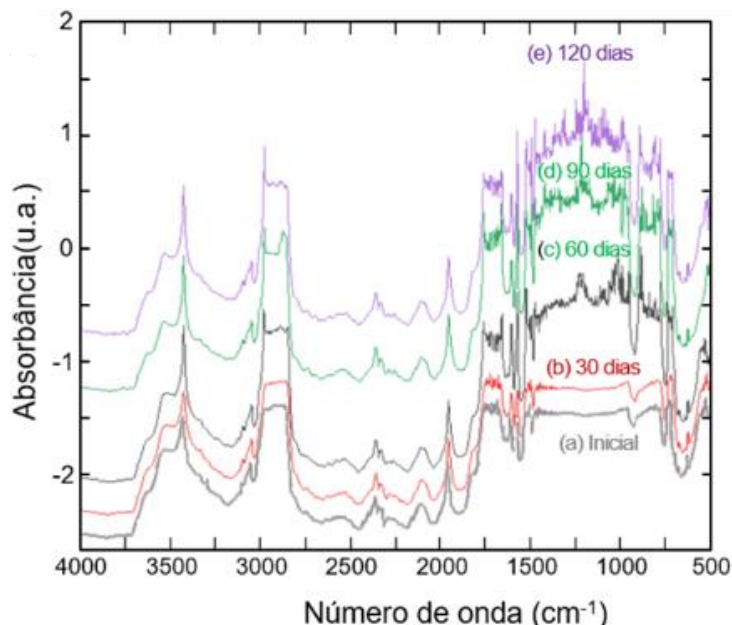


Figura 8 - Caracterização da camada fotoativa orgânica: (a) Transmissão óptica para a faixa de comprimento de onda de 400 nm a 900 nm; (b) Análise FTIR mostrando alterações na faixa de comprimento de onda de 500 a 1500 nm.

A mudança mais evidente ocorre nas regiões do infravermelho próximo, especificamente na banda entre 750 nm e 1500 nm. Novamente, a camada se mantém estável durante o período de exposição de 30 dias. Mudanças começaram a ocorrer após 60 dias e se tornam pronunciadas após 90 dias. O surgimento e os deslocamentos para comprimentos de onda mais curtos desses picos estão associados à quebra de ligações C-H e O-H, alterando a natureza eletrônica do material orgânico (Jiang *et al.*, 2018; Alkhazaili *et al.*, 2015).

Dado que a composição do polímero doador não é conhecida, não é possível concluir mais detalhadamente. A degradação não é catastrófica, e o módulo mantém a operação, mas com uma perda de potência de cerca de 30%.

A morfologia e as composições elementares da camada ativa foram examinadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS). Os resultados são mostrados para o caso inicial e para 120 dias de exposição na Fig. 9b. As morfologias das camadas através de exposições de 60 dias foram praticamente idênticas às da referência inicial.

O ensaio de EDS mostra uma composição elementar esperada principalmente de carbono (C) e oxigênio (O), com baixos níveis de contaminantes de sódio (Na), potássio (K) e cálcio (Ca). No entanto, no caso de exposição mais longa partículas de tamanho micrométrico são visualizadas, com baixos níveis de cobre (Cu) e zinco (Zn). A camada também

foi examinada em corte transversal, e os mesmos níveis dessas duas impurezas metálicas foram detectados. A origem é desconhecida, já que esses elementos não fazem parte da composição de nenhuma camada.

É possível, no entanto, que estejam presentes na fita adesiva do barramento e no material de soldagem, feito após o encapsulamento. A operação em temperaturas mais altas podem ser responsáveis pela difusão das partículas através da camada ativa. Isso também poderia explicar a detecção de baixos níveis de alumínio (Al).

Alternativamente, esses metais podem ser componentes do adesivo ou do condutor transparente proprietário e migrar através de fissuras nas camadas da célula solar devido à diferença na expansão térmica entre o óxido condutor transparente e a camada adesiva, necessitando de uma investigação adicional para determinar a origem desses componentes metálicos.

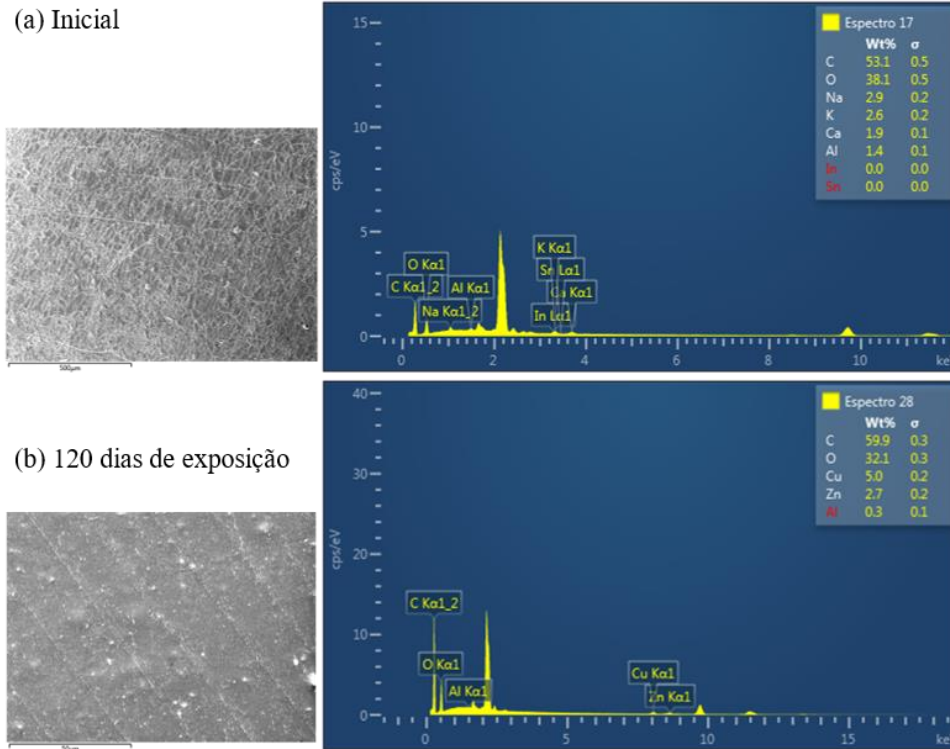


Figura 9 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise semiquantitativa da espectroscopia de energia de dispersão (EDS) na camada fotoativa orgânica: (a) Inicial, sem condição de degradação; (b) após 120 dias de exposição, degradado

4. CONCLUSÕES

Foram examinados os desempenhos de materiais e módulos OPV nas condições climáticas específicas do Brasil. O objetivo era contribuir para uma melhor compreensão da confiabilidade desses dispositivos e correlacionar quaisquer mudanças nos parâmetros elétricos com a integridade óptica, composicional e química da camada fotoativa orgânica.

Foram selecionados módulos com características elétricas iniciais quase idênticas, e a composição química e elemental de um módulo de caracterização de referência foram estabelecidas para comparações. Os módulos foram expostos às condições normais de operação tropical (temperatura, irradiância solar e UV elevado) e examinados em intervalos de 30 dias ao longo de um período de 120 dias. Durante essas avaliações, os módulos OPV apresentaram 3 estágios de desempenho.

Durante o primeiro estágio (até 30 dias de exposição), os módulos demonstraram parâmetros elétricos aprimorados com aumentos de potência máxima na faixa de 5% a 7%. Isso se deve aos efeitos atribuídos à redução da recombinação assistida por defeitos microestruturais.

Essas melhorias resultam de rearranjos de moléculas dentro da camada ativa da célula OPV devido à irradiância solar e elevadas temperaturas, aumentando a mobilidade de portadores de carga, reduzindo a densidade de defeitos e melhorando a transferência de carga entre moléculas. A melhoria está correlacionada com melhorias na $R_{série}$ do dispositivo e no FF típico de efeitos de absorção de luz relatados em várias tecnologias de PV de filme fino.

No segundo estágio, observa-se uma fotodegradação linear lenta em $P_{máx}$ de 30 a cerca de 60 dias, com parâmetros elétricos retornando aos seus valores iniciais. A análise FTIR indica algumas mudanças nas ligações C-H e O-H. A composição elemental do filme não sofre alterações em relação às medições de referência iniciais.

No terceiro estágio (de 90 a 120 dias), a degradação na potência máxima é significativamente pronunciada, tanto $P_{máx}$ quanto eficiência degradando acima de 25% após 120 dias. Esses módulos neste estágio inferior de desempenho continuam a funcionar com eficiências reduzidas na faixa de 2% a 3%. O aumento e os deslocamentos para números de

onda mais curtos dos picos FTIR entre 750 nm e 1500 nm estão associados à quebra de ligações C-H, O-H alterando a natureza eletrônica do material orgânico. A análise da composição elementar também detectou baixos níveis de Cu e Zn associados a partículas de tamanho micrométrico na camada. Suas origens não são certas. A operação em temperaturas mais altas podem ser responsáveis pela difusão de partículas através da camada ativa, claramente identificado com a fotodegradação.

Este estudo focou exclusivamente na camada fotoativa orgânica, que é particularmente suscetível a mudanças sob essas condições operacionais tropicais. O grau de exposição à radiação solar UV e a integridade das interfaces sob as condições operacionais também requerem investigações adicionais. No entanto, a fotodegradação observada não é catastrófica, e os módulos continuam a operar, embora com potência reduzida, o que seria necessário para algumas aplicações.

4.3 Autorização e reconhecimentos

Os autores autorizam a publicação do trabalho em favor da ABENS, assumindo toda a responsabilidade sobre o conteúdo dos mesmos.

Agradecimentos

Os autores agradecem sinceramente a assistência técnica, orientação e apoio do GREEN PUC Minas, aos laboratórios de Química e Mecânica, onde os ensaios foram realizados, ao Instituto Politécnico (IPUC) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas). As discussões técnicas, orientações e fornecimento dos minimódulos OPV pela ONINN foram fundamentais para este estudo e são sinceramente apreciados e reconhecidos. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Por fim, agradecemos à ABENS e à CBENS 2024 por nos proporcionar a oportunidade de apresentar e obter feedback adicional para este artigo.

REFERÊNCIAS

- A. Al-Ahmad, B. Vaughan, J. Holdsworth, W. Belcher, X. Zhou, P. Dastoor, The role of the electron transport layer in the degradation of organic photovoltaic cells, *Coatings*, vol. 12, no. 8, (2022). Doi: [10.3390/coatings12081071](https://doi.org/10.3390/coatings12081071)
- A. Alkhazaili, M.M. Hamasha, G. Choi, S. Lu, C. R. Westgate, Reliability of thin films: Experimental study on mechanical and thermal behavior of indium tin oxide and poly(3,4-ethylenedioxythiophene), *Microelectronics Reliability*, vol. 55, no. 3–4, pp. 538–546, (2015). doi: [10.1016/j.microrel.2015.01.013](https://doi.org/10.1016/j.microrel.2015.01.013)
- A.J. Heeger, A.G. Maciarmid, Transport, magnetic and structural studies of polyacetylene. *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 77, 1-24 (1981). <https://doi.org/10.1080/00268948108075226>
- A.S.R. Bati, Y.L.Zhong, P.L. Burn, M.K. Nazeeruddin, P.E. Shaw, M. Batmunkh, Next-generation applications for integrated perovskite solar cells. *Communications Materials* 4, 2 (2023). <https://doi.org/10.1038/s43246-022-00325-4>
- B.H.S. Miranda, L. Q. Corrêa, G. A. Soares, J. L. Martins, P. L. Lopes, M. L. Vilela, J. F. Rodrigues, T. G. Cunha, R. Q. Vilaça, S. Castro-Hermosa, L. Wouk, D. Bagnis. Efficient fully roll-to-roll coated encapsulated organic solar module for indoor applications, *Solar Energy*, vol. 220, pp 343-353 (2021). doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.025.
- B.R. Weinberger, M. Akhtar, S.C. Gau, Polyacetylene photovoltaic devices, *Synthetic Metals* 4, 187-197 (1982). [https://doi.org/10.1016/0379-6779\(82\)90012-1](https://doi.org/10.1016/0379-6779(82)90012-1)
- C. Deibel, V. Dyakonov. Polymer-fullerene bulk heterojunction solar cells, *Reports on Progress in Physics*, vol. 73, no. 9, (2010). Doi: [10.1088/0034-4885/73/9/096401](https://doi.org/10.1088/0034-4885/73/9/096401)
- C.L. Braun, Electric field assisted dissociation of charge transfer states as a mechanism of photocarrier production, *J Chem Phys*, vol. 80, no. 9, pp. 4157–4161 (1984). Doi: [10.1063/1.447243](https://doi.org/10.1063/1.447243)
- E.K. Solak, E. Irmak, Advances in organic photovoltaic cells: a comprehensive review of materials, technologies, and performance. *RSC Advances* 13, 12244-12269 (2023). Doi: [10.1039/d3ra01454a](https://doi.org/10.1039/d3ra01454a)
- F.L. Araújo. Estudo das propriedades de transporte e recombinação de cargas em células solares orgânicas: efeitos de aditivo e de degradação, Tese, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- G.Z. Zhang, F.R. Lin, F. Qi, T. Heumuller, et al. Renewed prospects for organic photovoltaics. *Chemical Reviews* 122, 14180-14274 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00955>
- IEA, World Energy Outlook 2022, IEA Paris, License: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A), 2022. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- International Electrotechnical Commission. IEC 60904-9 Photovoltaic Devices, 2022. <https://webstore.iec.ch/publication/28973>

- IRENA, Renewable Capacity Statistics 2023, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, UAE, 2023. www.irena.org
- J. Guo, H. Ohkita, H. Benten, S. Ito, Charge generation and recombination dynamics in poly(3-hexylthiophene)/fullerene blend films with different regioregularities and morphologies, *J. Am. Chem. Soc.* vol. 132, no. 17, pp. 6154–6164 (2010). Doi: [10.1021/ja100302p](https://doi.org/10.1021/ja100302p)
- K. Leo, Organic photovoltaics. *Nat Rev Mater* 1, 16056 (2016).
- M. Gostein, L. Dunn, Light soaking effects on PV modules: Overview and literature review. *Proc. NREL PV Module Reliability Workshop*, 2011. https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/pvmrw2011_p25_tf_dunn.pdf
- NATIONS, Energy Transition UN Report-Towards the achievement of SDG 7 Net-zero emissions, pp. 157–166, 2018, NREL. Best research-cell efficiency chart, August 2023. <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.pdf>
- Office of the Historian, US Department of State, Oil Embargo 1973-1974. <https://history.state.gov/milestones/1969-1976/oil-embargo>
- ONINN. Organic Solar Cell, 2022. <https://sunew.com.br/opv/> (accessed Jun. 29, 2023).
- P. Mints, PV Market Report, The Solar Flare, Issue 2, SF-22023, SPV Market Research, April 30, 2023; See also, SPV Market Research, Photovoltaics Manufacturer Capacity, Shipments, & Revenues 2022/2023, SPV-Suppl 11, April 2023, <https://www.spvmarketresearch.com/services.html>
- P.G.V. Sampaio, M.O.A. González, A review on organic photovoltaic cell, *International Journal of Energy Research*, 46, 17813-17828 (2022). <https://doi.org/10.1002/er.8456>
- P.W.M. Blom, V. D. Mihailetschi, L. J. A. Koster, D. E. Markov, Device physics of polymer: Fullerene bulk heterojunction solar cells, *Advanced Materials*, vol. 19, no. 12, pp. 1551–1566 (2007). doi: [10.1002/adma.200601093](https://doi.org/10.1002/adma.200601093)
- REN21, Renewables 2023 Global Status Report: Demand Module Report, REN21 Secretariat, UN Environment Programme, Paris, France, 2023. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2023_Demand_Modules.pdf; And, Renewables 2023 Global Status Report: Supply Module Report. REN21 Secretariat, UN Environment Programme, Paris, France; 2023 https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR-2023_Energy-Supply-Module.pdf
- S.N. Chen, A.J. Heeger, Z. Kiss, A.G MacDiarmid, S.C. Gau, D.L. Peebles. Polyacetylene, (CH)_x: Photoelectrochemical solar cell. *Applied Physic Letters* 36, 96-98 (1980). <https://doi.org/10.1063/1.91288>
- V.D. Mihailetschi, L. J. A. Koster, J. C. Hummelen, P. W. M. Blom, Photocurrent generation in polymer-fullerene bulk heterojunctions, *Phys Rev Lett*, vol. 93, no. 21 (2004), doi: [10.1103/PhysRevLett.93.216601](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.216601)
- Y. Tamai, H. Ohkita, H. Benten, S. Ito, Exciton diffusion in conjugated polymers: From fundamental understanding to improvement in photovoltaic conversion efficiency, *Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 6, no. 17, pp. 3417–3428 (2015). doi: [10.1021/acs.jpcclett.5b01147](https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.5b01147)
- Z. Jiang, S. Soltanian, B. Gholamkhash, A. Aljaafari, P. Servati, Light-soaking free organic photovoltaic devices with sol-gel deposited ZnO and AZO electron transport. *RSC Advances* (2018). <https://doi.org/10.1039/C8RA07071G>

STUDY OF PHOTODEGRADATION OF ORGANIC SOLAR CELLS UNDER BRAZILIAN CLIMATE CONDITIONS

Abstract. At present, photovoltaic solar energy technologies are technically and economically viable for generating electrical energy. Among the emerging technologies, modules with the organic solar cells (OPV) have been showing an increase in efficiency, exceeding 19% in laboratories so far. The advantages of the process include low cost, flexibility, fast roll-to-roll manufacturing, and the use of eco-friendly materials. Nevertheless, energy loss during operation due to the photodegradation is an extremely complex problem and is not yet fully understood. The objective of this research is to investigate the photodegradation and the associated loss mechanisms in OPV devices under tropical conditions in Brazil, correlating the electrical parameters of the OPV modules with alterations in chemical and structural properties under solar radiation exposure during their operation. The electrical parameters of the devices were monitored over the exposure time on an external test bench, and measured in the solar simulator. The physical, chemical, and compositional properties of the materials were analyzed using standard tests with scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive spectroscopy (EDS), and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). The analysis identified the breaking of bonds within the active layer, indicating a change in the organic structure of the layer that consequently affected the output power of the module associated with the combination of high temperatures and solar irradiance during operation over a long exposure time.

Keywords: Solar Energy, Organic Photovoltaics (OPV), Photodegradation