

GERAÇÃO E DEGRADAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS ORGÂNICOS EM INSTALAÇÕES VERTICAIS E HORIZONTAIS

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

Anderson Lima

Juliana Martins

Jair Rodrigues

Diego Bagnis

Centro de Inovações CSEM Brasil – Departamento de Eletrônica Orgânica e Híbrida

Resumo. A tecnologia fotovoltaica orgânica (OPV) tem apresentado um desenvolvimento expressivo nos últimos anos, com valores de eficiência superiores a 18%. Apesar disso, a estabilidade continua a ser um entrave à sua completa comercialização. O OPV possui características únicas de leveza, transparência e flexibilidade que o diferencia de outras tecnologias fotovoltaicas. No entanto, como um material orgânico, está sujeito à degradação pelas condições às quais está exposto em uma aplicação: luz, oxigênio, umidade temperatura, entre outras. Nesse trabalho buscou-se avaliar a utilização de módulos OPV em duas posições, horizontal e vertical, de modo a comparar a geração de energia e a degradação ao longo do tempo. Foi observado que, instalado na posição vertical, o OPV gerou no primeiro ano o correspondente a 62% da energia de uma posição horizontal; apesar disso, a degradação foi menos acelerada, resultando em maior geração nos 6 meses subsequentes. Esse resultado indica que a aplicação do OPV em instalações verticais, como fachadas de prédios, é favorecida por apresentar uma degradação mais lenta, assim como por aproveitar as características únicas do OPV.

Palavras-chave: OPV, Degradação, Teste outdoor, fachada vertical

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia fotovoltaica orgânica (OPV) vem se desenvolvendo rapidamente nos últimos anos. Graças à diversidade de materiais orgânicos que podem ser desenhados e sintetizados, tanto para a camada ativa como para as camadas transportadoras, grandes avanços têm sido alcançados. Recentemente, um novo recorde foi estabelecido para células, com o valor de 18.2% (Zhang *et al.*, 2021).

A tecnologia do OPV apresenta vantagens sobre as tecnologias tradicionais de silício e filmes finos inorgânicos, como a processabilidade em solução e em baixas temperaturas, por processos de produção do tipo rolo a rolo e com menor custo e gasto de energia (Mulligan *et al.*, 2015; Mateker and McGehee, 2017). Além disso, suas características de leveza, flexibilidade, semitransparência e a variedade de cores possíveis tornam o OPV atrativo para aplicações integradas em prédios, mobiliário urbano e veículos (Riede, Spoltore and Leo, 2021).

Apesar dos desenvolvimentos em pesquisa, eficiências altas, comparáveis ao silício, ainda estão restritas a células de laboratório. Além disso, outro grande desafio dessa tecnologia é a estabilidade e o tempo de vida das aplicações. Avanços em estabilidade tem sido alcançados em testes acelerados de laboratório, com milhares de horas sendo reportadas na literatura (Du *et al.*, 2019). Nesse tipo de teste, os fatores de estresse para a estabilidade do OPV, como luz, temperatura e umidade, são aplicados de forma constante ou em ciclos, em níveis superiores aos experimentados em ambiente real, de forma a acelerar a degradação e facilitar a identificação dos mecanismos envolvidos na perda de desempenho (Reese *et al.*, 2011). Apesar de úteis nas etapas de desenvolvimento, é difícil ter uma correlação entre testes acelerados e aplicações reais que permita prever o tempo de vida do OPV (Corazza, Krebs and Gevorgyan, 2015). Para isso, testes *outdoor*, que são realizados próximos às condições reais, ainda são a melhor opção. Apesar de longos, uma vez que acontecem em tempo real, são os mais confiáveis, uma vez que contam com a dinâmica ambiental que não pode ser simulada no ambiente de laboratório (David *et al.*, 2021).

Nesse estudo, foram realizados testes do tipo *outdoor* para comparar o desempenho de módulos de OPV instalados em uma posição horizontal, com inclinação correspondente à latitude local, e na vertical. O objetivo do teste é comparar a geração de energia e a degradação dos módulos, de modo a encontrar a condição que melhor se aplica ao OPV.

2. METODOLOGIA

2.1 Fabricação dos módulos

Módulos de OPV foram fabricados pelo CSEM Brasil seguindo a estrutura invertida, conforme ilustrado na Fig. 1. Os módulos foram processados pelo método rolo a rolo (R2R) em uma máquina de estação única sobre um substrato flexível de politereftalato de etileno (PET) modificado para maior estabilidade térmica, recoberto por uma camada de óxido de índio-estanho/metal/óxido de índio-estanho (IMI). Todas as camadas foram depositadas em ar utilizando-se solventes não-clorados e não-halogenados. Um polímero à base de amina foi utilizado como camada transportadora de elétrons (ETL). Para a camada fotoativa foi utilizada uma formulação comercial azul que utiliza como aceitador um material do tipo fulereno. Como camada transportadora de buracos (HTL) foi utilizado o e polietilenodioxitiofeno:poliestirenosulfonato (PEDOT:PSS). Os dispositivos foram finalizados com a deposição de uma camada de pasta de prata em forma de *grid* pelo método de serigrafia, resultando em módulos semitransparentes com 6 células conectadas em série e área ativa total de 21,6 cm².

Os módulos foram encapsulados por um processo R2R, com um filme de barreira flexível de base PET com taxa de transmissão de vapor d'água (WVTR) da ordem de 10⁻³g.cm⁻².dia⁻¹ e um adesivo de base epóxi de cura UV, também com propriedades de barreira (10⁰g.cm⁻².dia⁻¹).

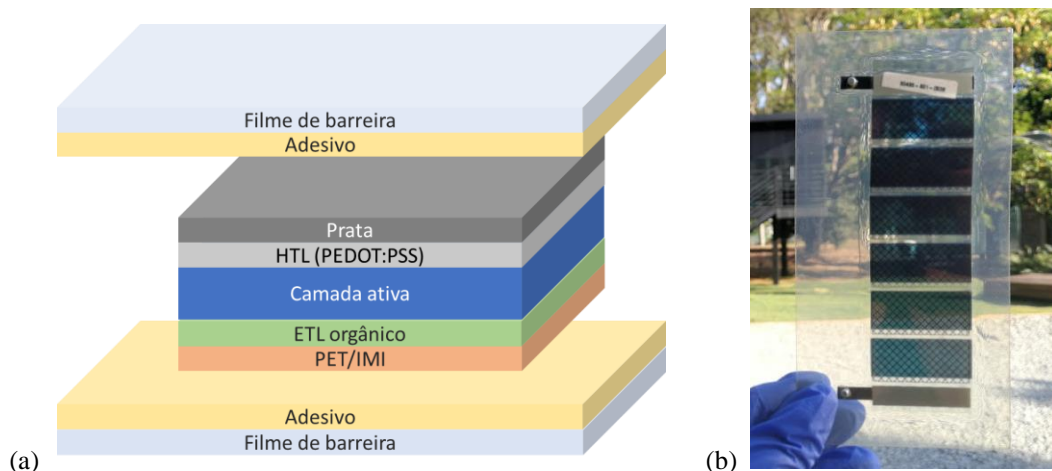


Figura 1 - (a) Estrutura do OPV. (b) Módulo OPV finalizado.

2.2 Caracterização elétrica

Os parâmetros fotovoltaicos foram medidos por curvas corrente-tensão (IV) em um simulador solar Wacom WXS-156S-10, com espectro AM 1.5G e irradiância de 1000 W/m² (1 sol). Além da eficiência de conversão energética (PCE), foram analisados a tensão de circuito aberto (V_{oc}), a densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}), o fator de preenchimento (FF) e as resistências em série (R_s) e em paralelo ou *shunt* (R_{sh}).

2.3 Teste outdoor

Os módulos foram testados em Belo Horizonte (19.9° S, 43.9° W) próximos às condições reais de operação, seguindo o protocolo ISOS-O-2 (Reese *et al.*, 2011). Os módulos horizontais foram posicionados sobre uma estrutura metálica com inclinação de 20°, correspondente à latitude local, e orientados para o Norte – condição ótima de geração para um sistema fixo -. Os módulos verticais foram colocados no mesmo suporte com uma adaptação para a posição de 90°, também com orientação para o Norte. A montagem final pode ser vista na Fig. 2. Todos os módulos foram conectados a cargas correspondentes ao ponto de máxima tensão inicial, medido em 1 sol. As medidas de curva corrente-tensão (I-V) foram realizadas de forma automática a cada 1h com um Keithley série 2400. Um piranômetro (Shaanxi Enjoy - TBQ-2-B) foi posicionado no suporte de inclinação em 20° para acompanhamento da irradiância. Além disso, foram coletadas informações de temperatura ambiente e umidade a cada curva IV.



Figura 2 – Suporte com as amostras para o teste *outdoor*. As amostras Horizontais foram colocadas em uma estrutura de alumínio com inclinação de 20° e orientado para o Norte entre as duas amostras Verticais, presas em cada extremidade a uma adaptação para o ângulo de 90°. O piranômetro foi instalado na mesma posição da estrutura.

2.4 Análise de dados

A estimativa de geração de energia foi feita a partir do valor de potência máxima (P_{max}) retirado das curvas I-V medidas a cada hora. Para evitar a discretização dos dados, foi realizado um ajuste gaussiano à potência e a energia calculada pela integral da curva. Dias com dados faltantes foram preenchidos por interpolação.

Para a análise de degradação, os dados foram filtrados para o nível de irradiância de 1 sol. Foi considerado uma margem de 5%, ou seja, de 950 a 1050 W/m². Além disso, foram descartadas medidas nas quais houve variação maior que 5% entre a irradiância medida no início e no final da curva IV, de modo a eliminar curvas distorcidas por efeitos de sombreamento, como os causados por nuvens, pássaros, ou outros fatores.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas fotovoltaicas e os parâmetros elétricos das amostras encapsuladas antes do teste são apresentados na Fig. 3 e na Tab. 1, respectivamente. Os dados mostram que as amostras selecionadas para ambas as condições possuem características similares entre si.

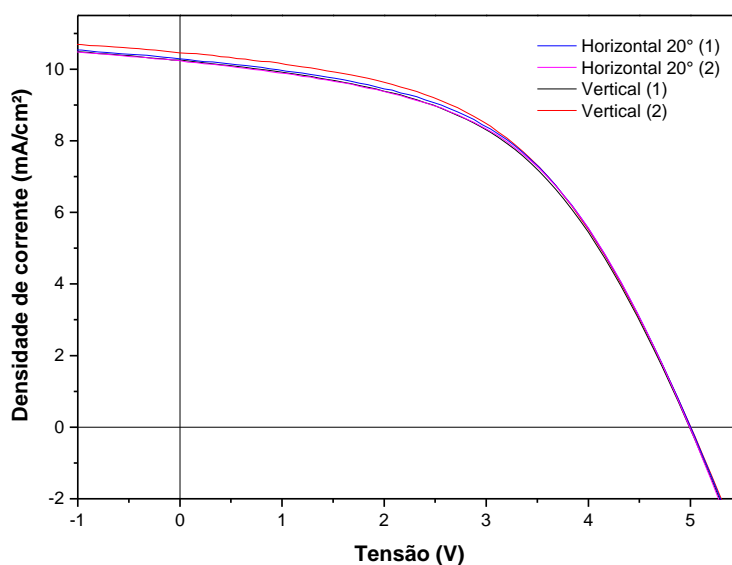


Figura 3 - Curvas fotovoltaicas dos módulos encapsulados antes do teste.

Tabela 1 - Parâmetros elétricos iniciais dos módulos OPV, medidos no simulador solar com espectro AM 1,5 e irradiância de 1000W/m².

Amostra	Voc (V)	Isc (mA)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	PCE (%)	Pmax (mW)	Rs (Ohm)	Rsh (Ohm)
Horizontal 20° (1)	5.00	37.1	10.3	50.1	4.30	92.7	44.4	956
Horizontal 20° (2)	4.99	36.8	10.2	50.2	4.27	92.2	43.2	913
Vertical (1)	4.99	36.9	10.2	49.7	4.24	91.5	44.6	932
Vertical (2)	5.00	37.7	10.5	49.4	4.32	93.2	45.1	983

A estimativa de geração energética no período é apresentada na Fig. 4. É possível perceber que a consistência entre as amostras de mesma condição permanece ao longo do teste. No caso da condição vertical, uma das amostras teve o contato rompido após pouco mais de um ano. Por ter ficado um período em circuito aberto, que é uma condição que acelera a degradação do OPV (Heumueller *et al.*, 2016; Khenkin *et al.*, 2019) optou-se por retirar a amostra de teste.

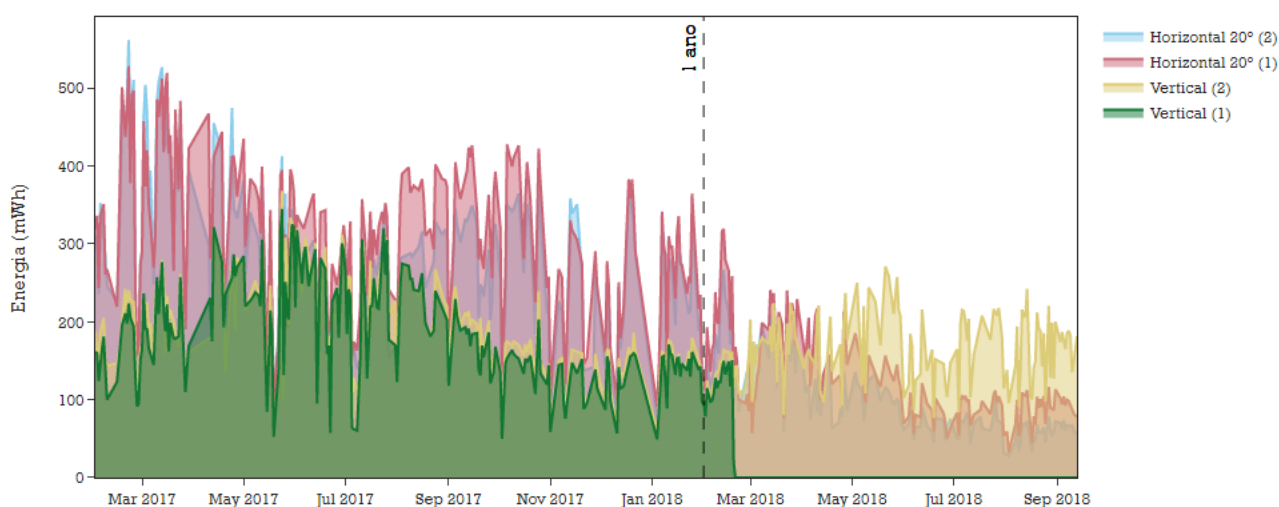


Figura 4 - Geração de energia dos módulos OPV durante o período de teste.

É possível observar que os picos de geração para cada condição acontecem em estações opostas do ano. Para as amostras horizontais, os picos de geração coincidem com os meses de março e outubro, no início do outono e da primavera. No verão, quando os dias são mais longos e a insolação maior, a energia gerada diminui, o que pode ser atribuído a uma maior frequência de dias chuvosos. No mês de julho, a geração é mínima na horizontal e máxima na vertical, o que se justifica pela posição mais baixa do sol. Contribui ainda para essa maior geração o fato de ser uma estação seca. Vale ressaltar que nesse período, a geração na vertical coincide com a geração na posição horizontal.

No primeiro ano de teste, a geração vertical foi equivalente a 62% da geração horizontal. Após um ano, no entanto, é possível perceber que a geração vertical passa a ser superior à horizontal, mesmo nos períodos mais desfavoráveis. Isso pode ser explicado por uma degradação mais acelerada dos dispositivos horizontais, que estão mais expostos às intempéries. Nessa condição, as amostras recebem maior incidência de luz, que é um fator importante para a degradação do OPV. Além disso, recebem mais chuva e acumulam umidade, enquanto na vertical, a tendência é que haja escoamento.

A degradação dos dispositivos pode ser observada analisando-se os dados em um nível de irradiância fixa. Nos gráficos de Fig. 5 a Fig. 10 são apresentados os dados coletados em (1000 +/- 50) W/m², medidos na mesma posição que as amostras horizontais, com inclinação de 20° e orientação Norte. Pelo fato de a irradiância não ter sido medida na posição vertical, a avaliação de degradação para essas amostras foi limitada, mas é apresentada no mesmo gráfico. Os dados são apresentados normalizados em relação à primeira medida.

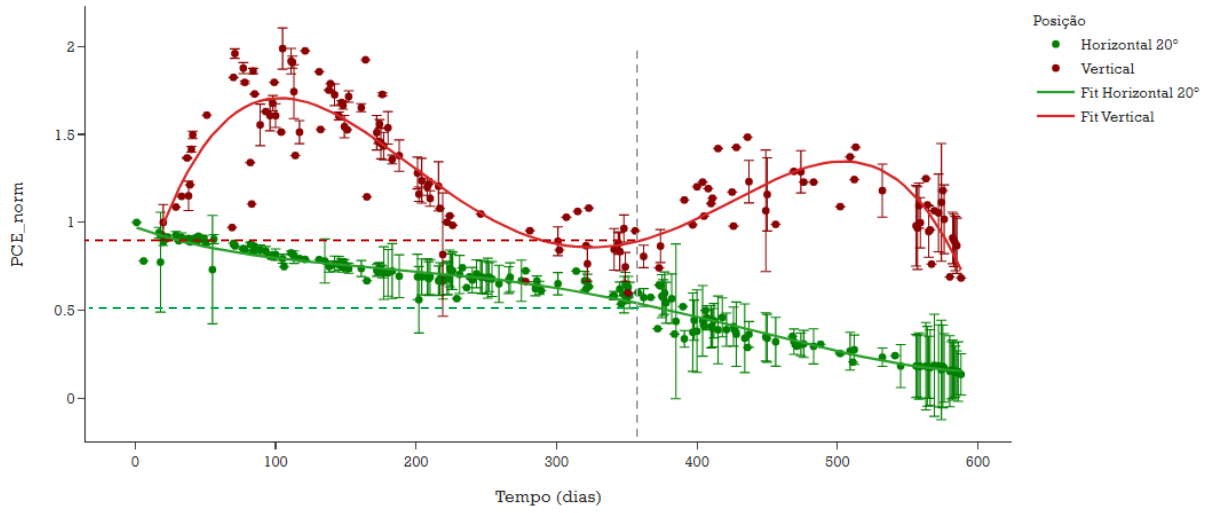


Figura 5 - Evolução da eficiência de conversão ao longo do tempo.

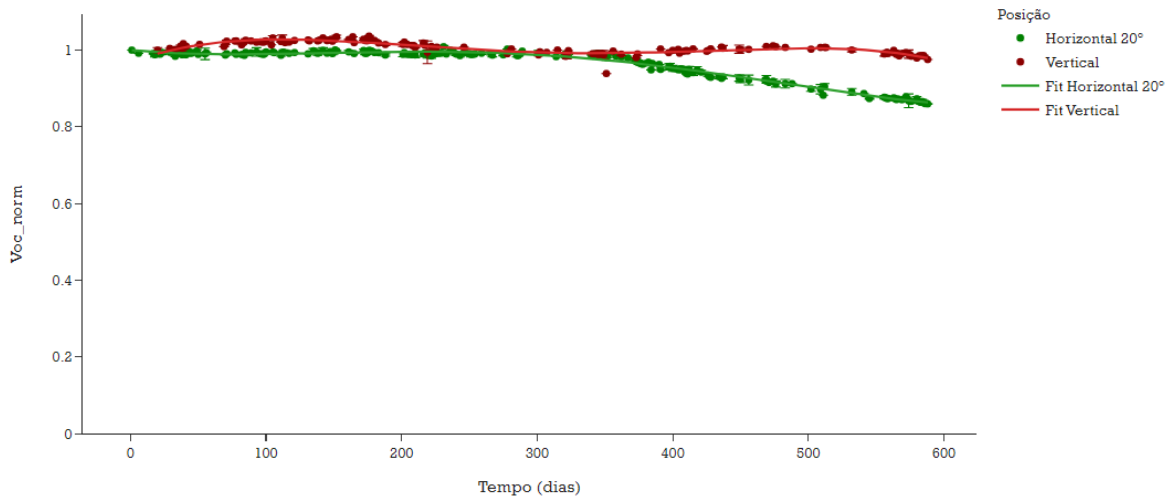


Figura 6 - Evolução da tensão de circuito aberto ao longo do tempo.

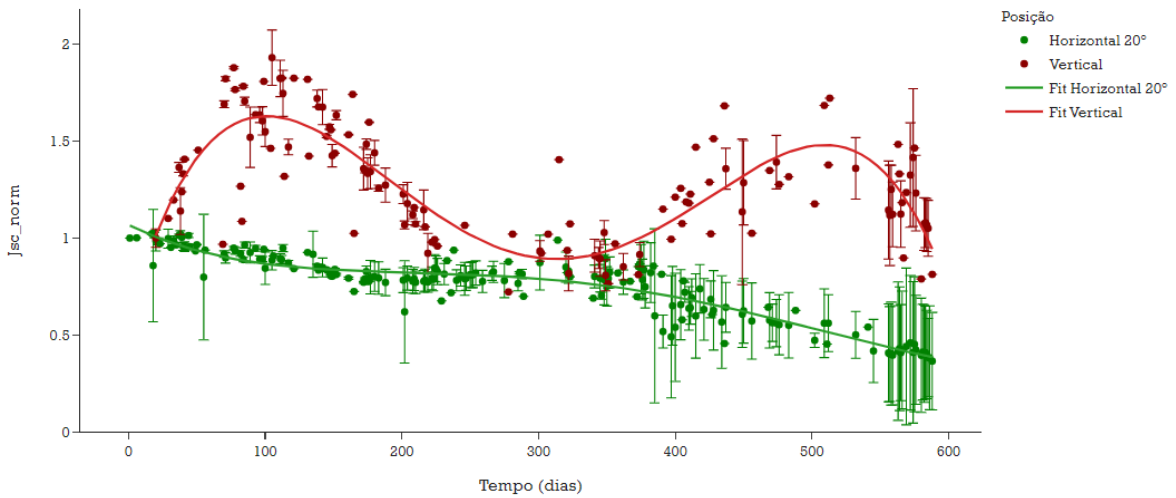


Figura 7 - Evolução da densidade de corrente de curto-circuito ao longo do tempo.

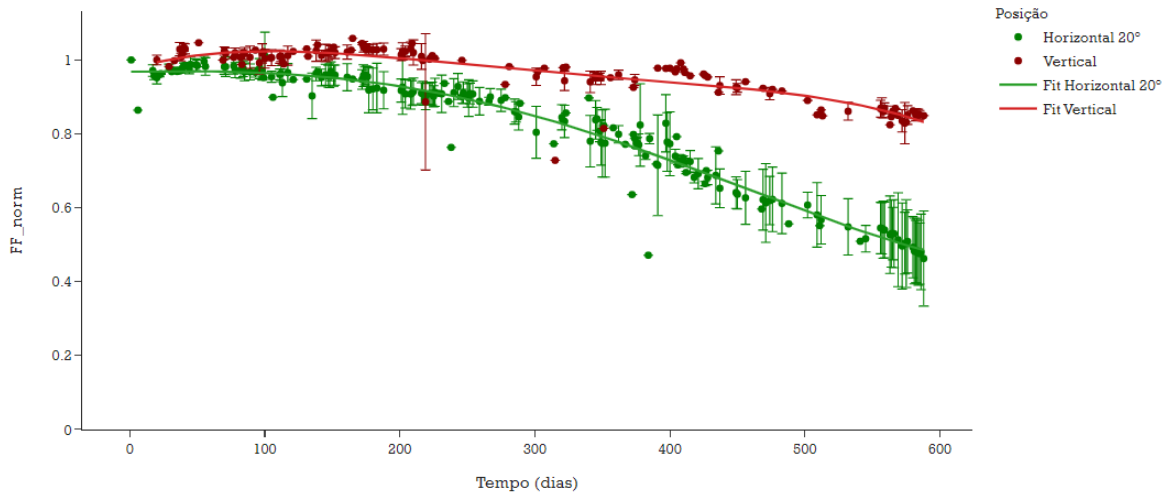


Figura 8 - Evolução do fator de preenchimento ao longo do tempo.

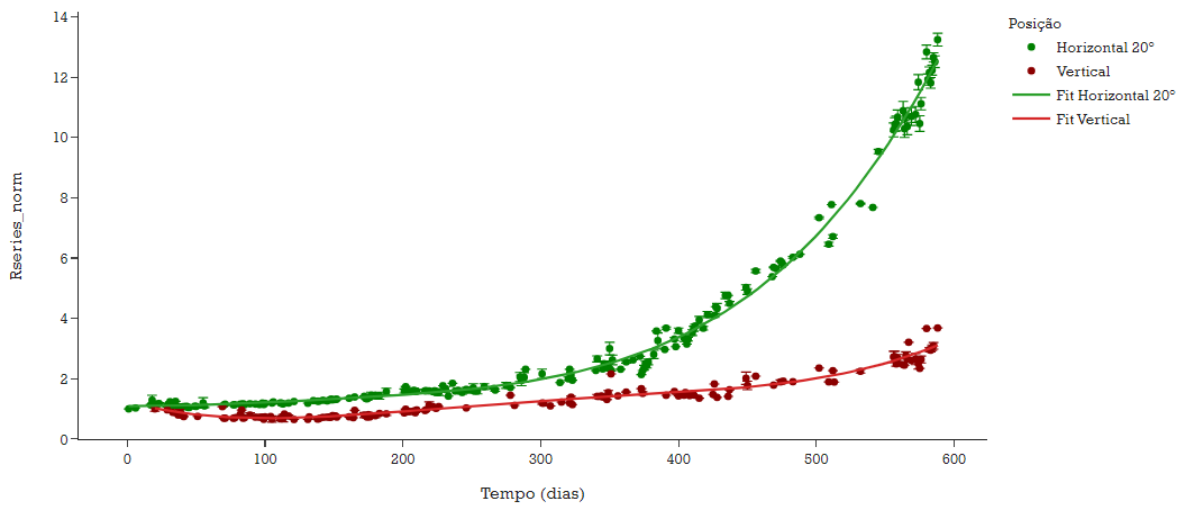


Figura 9 - Evolução da resistência em série ao longo do tempo.

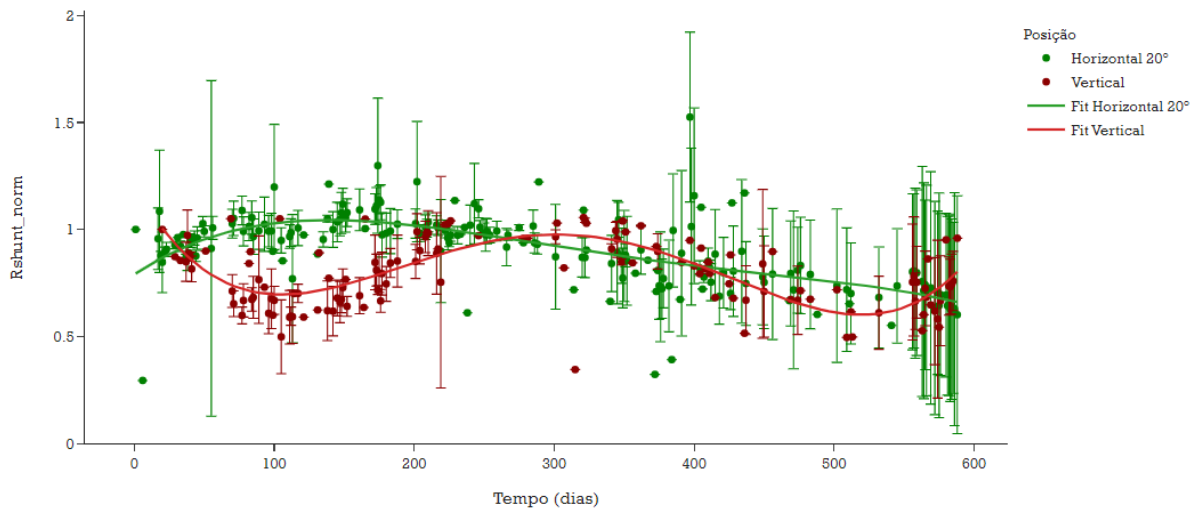


Figura 10 - Evolução da resistência shunt ao longo do tempo.

As amostras testadas sobre a posição Horizontal 20° apresentaram degradação linear, com mudança de inclinação após 300-350 dias de teste. Inicialmente, a degradação das amostras está diretamente relacionada às quedas de Jsc e FF, com contribuição similar dos dois parâmetros. No segundo período, as quedas de Jsc e FF são acentuadas, esse último por uma contribuição significativa da resistência em série, que aumenta de forma exponencial. Nesse período, há também um início de queda de Voc. Pelo comportamento dos parâmetros, é possível assumir que no período inicial a degradação é majoritariamente intrínseca e relacionada à luz, com provável efeito de dimerização e mudança de morfologia (Gevorgyan *et al.*, 2017; Mateker and McGehee, 2017). Já no segundo período, a aceleração do processo de degradação pode ser associada à penetração de umidade e oxigênio pela barreira flexível, o que resulta em processos de oxidação e aumento de resistência entre as camadas (Seemann *et al.*, 2011; Cheng and Zhan, 2016).

Em relação às amostras verticais, a análise é dificultada pelo fato de a irradiância não ser fixa, como no caso anterior. No entanto, é possível ainda fazer algumas considerações. O comportamento do gráfico de PCE segue a tendência do gráfico de Jsc, indicando a variação de irradiância nos diferentes períodos do ano, com picos nos períodos de inverno, nos quais o sol está em uma posição mais baixa, com maior incidência de luz nos módulos verticais. Analisando-se os dados após um ano, quando as condições de irradiância se repetem, observa-se que houve degradação também na condição vertical, mas de apenas 10%, enquanto na Horizontal 20° as amostras perderam quase 50% de eficiência. Essa maior estabilidade se revela nos parâmetros Voc, FF e resistência em série. O fato de não haver queda de Voc é um indicativo de que não houve penetração significativa de água nos dispositivos. Isso sugere que, nesse tipo de instalação, os requisitos para o filme de barreira em relação à taxa de transmissão de vapor, assim como de proteção UV, já que a exposição à luz direta é reduzida, podem ser menores, o que pode diminuir o custo da aplicação.

Um caso real que confirma as vantagens da instalação vertical do OPV foi apresentado por (Corrêa, Costa Junior and Costa, 2022). A instalação, com 200m^2 de OPV laminado em vidro, foi feita na fachada noroeste de um prédio em São Paulo-SP. Detalhes da instalação podem ser vistos na Fig.11 e estudados em maior detalhe na publicação.



Figura 11 - Instalação de OPV em fachada vertical realizada pela empresa Sunew. (a) Vista do prédio (b) detalhes da fachada. Fonte: Sunew

A análise de geração mensal de energia mostra um comportamento semelhante ao observado no experimento, com resultado superior nos meses de abril a setembro (Fig. 12). Conforme apresentado, nesse período, apesar dos menores índices de radiação global, a baixa elevação do sol aumenta a incidência de luz em superfícies verticais, principalmente naquelas orientadas para o norte. Além disso, a comparação entre os dois anos analisados, de 2018 e 2019, mostra que, apesar das variações sazonais, há estabilidade na geração ao longo do tempo, confirmando o resultado do experimento para amostras verticais e o potencial dessa tecnologia para esse tipo de aplicação.

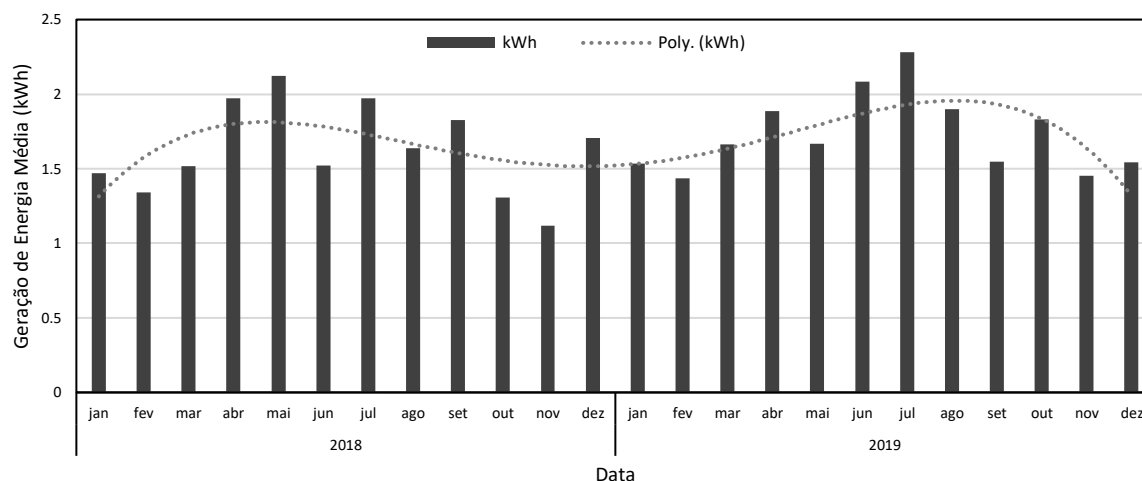


Figura 12 - Geração energética da instalação nos anos de 2018 e 2019. (Corrêa, Costa Junior and Costa, 2022)

4. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados mostraram que durante o período de um ano, um módulo de OPV instalado em uma posição vertical gerou o correspondente a 62% da energia de um módulo em uma posição fixa ótima, com inclinação correspondente à latitude local, ambos orientados para o Norte. No entanto, nos 6 meses seguintes, a geração passou a ser superior, devido à degradação mais acelerada dos módulos na horizontal. Conclui-se que na posição vertical, os módulos estão menos expostos à luz direta e à umidade, contribuindo para a sua menor degradação. Esses resultados demonstram a vantagem de se instalar o OPV em fachadas de prédios, como no exemplo apresentado, onde é possível inclusive fazer uso de outras características, como leveza, flexibilidade, transparência e demais aspectos estéticos inerentes a essa tecnologia.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CSEM Brasil pelo suporte à pesquisa; à Sunew e à Luiza Corrêa pelos dados da instalação.

REFERÊNCIAS

- Cheng, P. and Zhan, X. (2016) 'Stability of organic solar cells: Challenges and strategies', *Chemical Society Reviews*. Royal Society of Chemistry, 45(9), pp. 2544–2582. doi: 10.1039/c5cs00593k.
- Corazza, M., Krebs, F. C. and Gevorgyan, S. A. (2015) 'Lifetime of organic photovoltaics: Linking outdoor and indoor tests', *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Elsevier, 143, pp. 467–472. doi: 10.1016/j.solmat.2015.07.037.
- Corrêa, L. de Q., Costa Junior, E. F. da and Costa, A. O. S. da (2022) 'Análise De Eficiência De Geração De Painéis Fotovoltaicos Orgânicos Integrados À Fachada De Edifício', (January 2022), pp. 1–10. doi: 10.29327/154013.24-52.
- David, T. W. *et al.* (2021) 'Predicting diurnal outdoor performance and degradation of organic photovoltaics via machine learning; relating degradation to outdoor stress conditions', *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 29(12), pp. 1274–1284. doi: 10.1002/pip.3453.
- Du, X. *et al.* (2019) 'Efficient Polymer Solar Cells Based on Non-fullerene Acceptors with Potential Device Lifetime Approaching 10 Years', *Joule*. Elsevier Inc., 3(1), pp. 215–226. doi: 10.1016/j.joule.2018.09.001.
- Gevorgyan, S. A. *et al.* (2017) 'Improving, characterizing and predicting the lifetime of organic photovoltaics', *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(10). doi: 10.1088/1361-6463/50/10/103001.
- Heumueller, T. *et al.* (2016) 'Morphological and electrical control of fullerene dimerization determines organic photovoltaic stability', *Energy and Environmental Science*. Royal Society of Chemistry, 9(1), pp. 247–256. doi:

10.1039/c5ee02912k.

- Khenkin, M. V. *et al.* (2019) ‘Bias-dependent degradation of various solar cells: Lessons for stability of perovskite photovoltaics’, *Energy and Environmental Science*, 12(2), pp. 550–558. doi: 10.1039/c8ee03475c.
- Mateker, W. R. and McGehee, M. D. (2017) ‘Progress in Understanding Degradation Mechanisms and Improving Stability in Organic Photovoltaics’, *Advanced Materials*, 29(10). doi: 10.1002/adma.201603940.
- Mulligan, C. J. *et al.* (2015) ‘Levelised cost of electricity for organic photovoltaics’, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Elsevier, 133, pp. 26–31. doi: 10.1016/j.solmat.2014.10.043.
- Reese, M. O. *et al.* (2011) ‘Consensus stability testing protocols for organic photovoltaic materials and devices’, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(5), pp. 1253–1267. doi: 10.1016/j.solmat.2011.01.036.
- Riede, M., Spoltore, D. and Leo, K. (2021) ‘Organic Solar Cells—The Path to Commercial Success’, *Advanced Energy Materials*, 11(1), pp. 1–10. doi: 10.1002/aenm.202002653.
- Seemann, A. *et al.* (2011) ‘Reversible and irreversible degradation of organic solar cell performance by oxygen’, *Solar Energy*. Elsevier Ltd, 85(6), pp. 1238–1249. doi: 10.1016/j.solener.2010.09.007.
- Zhang, M. *et al.* (2021) ‘Single-layered organic photovoltaics with double cascading charge transport pathways: 18% efficiencies’, *Nature Communications*. Springer US, 12(1), pp. 1–10. doi: 10.1038/s41467-020-20580-8.

POWER GENERATION AND DEGRADATION OF ORGANIC PHOTOVOLTAIC MODULES IN VERTICAL AND HORIZONTAL INSTALATIONS

Abstract. *Organic photovoltaics (OPV) has shown significant development in recent years, with efficiency values above 18%. Nevertheless, stability remains an impediment to its complete commercialization. OPV has unique characteristics of lightness, transparency and flexibility that differentiate it from other photovoltaic technologies. However, as an organic material, it is subject to degradation by the conditions to which it is exposed in an application: light, oxygen humidity, temperature, among others. This work aimed at evaluating the use of OPV modules in two positions, horizontal and vertical, in order to compare energy generation and degradation over time. It was observed that, installed in a vertical position, the OPV modules generated in the first year 62% of the energy of a horizontal position; however, the degradation was slower, resulting in higher generation in the subsequent 6 months. This result indicates that the use of OPV in vertical installations, such as building facades, should be favored, since it shows a slower degradation rate, as well as takes advantage of the unique characteristics of OPV.*

Key words: *OPV, Degradation, Outdoor test, Vertical Façades*