

RESULTADOS PRELIMINARES PARA DISPOSITIVOS DE PEROVSKITA EM CONDIÇÕES REAIS E EXTREMAS DE OPERAÇÃO - UM PASSO FUNDAMENTAL RUMO A APLICAÇÕES PRÁTICAS

Marília Braga – mbraga.ufsc@gmail.com

Lucas Augusto Zanicoski Sérgio

Anelise Medeiros Pires

Maria Luiza Cugnier Ribeiro

Ricardo Rütther

Universidade Federal da Santa Catarina, Laboratório Fotovoltaica-UFSC

Resumo. A crescente demanda por fontes de energia sustentáveis, vem impulsionando a pesquisa em tecnologias fotovoltaicas mais eficientes e acessíveis. Neste contexto, as células solares de perovskita surgem como uma tecnologia promissora devido à sua facilidade de fabricação, baixo custo e alto potencial de conversão de energia solar. Embora tenham registrado avanços notáveis, a implementação prática em condições reais enfrenta desafios, especialmente em relação à exposição a fatores estressores como luz, umidade, oxigênio e temperatura. Este trabalho apresenta a infraestrutura estabelecida no Fotovoltaica-UFSC para medição de dispositivos fotovoltaicos sob condições reais de operação e indoor. A abordagem inovadora envolve uma bancada experimental com medições automáticas de curva IV de dispositivos fotovoltaicos, bem como simulador solar que permite a medição em ambiente controlado de perovskitas sob níveis extremos de iluminação, diferentes distribuições espectrais e elevadas temperaturas. Em especial, a infraestrutura permite avaliar os impactos de elevados níveis de irradiância na eficiência dos dispositivos, com foco na otimização da eficiência e estabilidade de minimódulos de perovskita para locais com níveis extremos de incidência solar, como o Brasil. Resultados mostram que a degradação de dispositivos de perovskita ainda é um fator importante a ser otimizado, principalmente para condições reais de operação. Os dados adquiridos mostram que a eficiência dos dispositivos construídos é similar para condições padrão de irradiância e para níveis extremos, existindo ainda espaço para otimização dos dispositivos visando melhorar esta eficiência.

Palavras-chave: Perovskitas, Sobreirradiância, Medidas em Sol Real.

1. INTRODUÇÃO

A demanda crescente por fontes de energia sustentáveis tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias fotovoltaicas (FV) mais eficientes e acessíveis. Nesse cenário, as células solares de perovskita emergiram como uma promissora alternativa, destacando-se por sua relativa facilidade de fabricação, baixo custo e alto potencial de conversão de energia solar em eletricidade. A camada fotoativa de perovskita é constituída por estruturas químicas representadas por ABX_3 , onde "A" denota um cátion de grande porte, como Cs^+ ou metil amônio, "B" também é um cátion, comumente Pb^{2+} , e "X" representa um ânion, em particular I-, Br-, Cl-.

As células FV de perovskita demonstraram um notável aumento na eficiência de conversão nos últimos anos, tornando-se objeto de intensa pesquisa e desenvolvimento (Wali *et al.*, 2020). Atualmente, o recorde de eficiência certificada para uma célula de perovskita é de 26,1%, em uma área de apenas 0,0493 cm^2 (NREL, 2023). Sua flexibilidade, leveza e capacidade de absorver uma ampla gama de comprimentos de onda solar as tornam altamente versáteis e adequadas para uma variedade de aplicações. Uma aplicação muito promissora da tecnologia é o uso da célula de perovskita sobre uma célula de outra tecnologia, em um modelo denominado *tandem*, onde a célula de baixo absorve os comprimentos de onda que são invisíveis à célula de cima. Neste contexto, a perovskita já é aplicada a células de diversas tecnologias, com o recorde de eficiência certificada sendo de 33,9% para uma célula *tandem* de perovskita-silício com área de 1 cm^2 (PV Magazine, 2023). Este recorde é um marco importante, pois supera a eficiência máxima que pode ser atingida por uma célula de silício de única-junção, um limite importante na física de semicondutores, também chamado de limite de Shockley-Queisser (Shockley and Queisser, 1961). Células com arquitetura *tandem* de perovskita-silício, possuem uma eficiência máxima teórica de 43% (Yu *et al.*, 2016), um ganho significativo em relação à capacidade individual do semicondutor.

Entretanto, apesar dos avanços promissores em ambientes controlados de laboratório, a implementação prática de células de perovskita em condições reais de irradiação solar permanece uma área desafiadora e crucial para a validação de seu desempenho efetivo. O desafio da estabilidade em condições reais de operação está, principalmente, na exposição simultânea de diversos fatores de estresse (Karimipour *et al.*, 2023), como luz, umidade, oxigênio e temperatura.

A motivação central deste trabalho reside na necessidade premente de avaliar minimódulos fotovoltaicos de perovskita sob condições reais de exposição solar (Ali *et al.*, 2023). O desenvolvimento de uma bancada experimental composta por medições automáticas de curva IV a cada minuto, proporciona uma abordagem inovadora e abrangente para avaliar o comportamento dinâmico desses minimódulos em resposta às condições extremas de irradiância,

temperatura e umidade encontradas no local do estudo. A análise não apenas se concentra na eficiência inicial desses dispositivos, mas também na degradação ao longo do tempo, oferecendo uma visão holística do desempenho sob sol real a longo prazo desses dispositivos.

Este estudo não se limita apenas à avaliação da eficiência, mas busca compreender como os minimódulos de perovskita respondem sob condições extremas de irradiância e temperatura. A análise destas variáveis críticas permitirá uma avaliação robusta e realista do desempenho dos minimódulos fotovoltaicos, refletindo as complexas condições ambientais que podem ser encontradas em instalações fotovoltaicas ao ar livre.

Em especial, o projeto no qual este trabalho está inserido busca desenvolver e otimizar dispositivos solares para níveis de irradiância acima do padrão de testes (1000 W/m^2), um tópico inovador no setor. Com base em medições de irradiância realizadas em várias regiões do Brasil pela equipe do Fotovoltaica-UFSC, com resolução temporal de 1 segundo, foram identificados eventos frequentes de sobreirradiância em todo o país. Esses eventos se caracterizam por apresentar níveis de irradiância significativamente superiores aos 1000 W/m^2 geralmente usados na qualificação e etiquetagem de potência de dispositivos solares fotovoltaicos globalmente. Eventos de sobreirradiância são característicos de países ensolarados e com condições climáticas propícias a formação de nuvens, perfil no qual boa parte dos países na área de energia solar não se encaixam, fazendo com que o tema não ganhe muita atenção e, quando mencionado, é evidenciado apenas como curiosidade.

No Brasil, campanhas de medição realizadas em locais com instalações de usinas solares fotovoltaicas de grande porte mostraram que até 30% da irradiação anual ocorre em níveis iguais ou superiores aos 1000 W/m^2 (do Nascimento *et al.*, 2019). Dentre os dez maiores valores de sobreirradiância registrados na literatura em todo o mundo, sete foram medidos no Brasil, sendo o maior valor registrado em baixa altitude (e segundo maior no geral) foi medido na localidade deste estudo: Florianópolis/SC, com $1845,5 \text{ W/m}^2$. (Martins *et al.*, 2022). Estes eventos trazem preocupações quanto a operação e manutenção de sistemas FV, susceptíveis a queima de fusíveis durante eventos de sobreirradiância, bem como no dimensionamento de inversores, os quais tem suas perdas por saturação subestimadas quando empregados dados com baixa resolução temporal, temas já abordados pela equipe do Fotovoltaica-UFSC (Braga *et al.*, 2020; do Nascimento *et al.*, 2019).

O objetivo do projeto ao qual este trabalho está vinculado não é suscitar novas preocupações em relação a eventos de sobreirradiância, mas sim demonstrar o potencial de otimização que pode ser derivado deles, com enfoque no desenvolvimento de células e minimódulos de perovskita. Em paralelo com a otimização da eficiência para altas irradiâncias, os pesquisadores buscam aprimorar a robustez desta tecnologia inovadora quando submetida a tais condições. O tema de otimização da eficiência já foi abordado preliminarmente em um trabalho anterior do grupo, que buscava a otimização do número de *busbars* de células de silício, levando em consideração níveis extremos de irradiância medidos com alta resolução temporal (Queiroz *et al.*, 2022). Dentro do escopo do projeto, também busca-se identificar o comportamento da eficiência de módulos FV comerciais de diferentes tipos e tecnologias sob condições extremas de irradiância, uma informação ainda desconhecida.

O presente trabalho está sendo conduzido no laboratório Fotovoltaica-UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), um centro de pesquisa dedicado ao avanço da tecnologia fotovoltaica. O laboratório é equipado com instalações de ponta e uma equipe de pesquisadores altamente qualificados, proporcionando o ambiente ideal para a realização de estudos inovadores como este. A sinergia entre a infraestrutura de pesquisa avançada e a expertise dos pesquisadores posiciona o laboratório como um local privilegiado para conduzir experimentos pioneiros que contribuirão significativamente para o avanço contínuo da tecnologia fotovoltaica de perovskita em condições reais de operação. Este artigo busca compartilhar os resultados preliminares obtidos, oferecendo contribuições para a comunidade científica e a indústria interessada no desenvolvimento de soluções eficientes e duráveis em energia solar fotovoltaica.

2. INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

2.1 Bancada de testes a céu aberto

A bancada de testes utilizada para este estudo é composta por cargas eletrônicas e sensores ambientais. As cargas eletrônicas são responsáveis pela realização da medição de curvas IV dos dispositivos em intervalos de um minuto com medição a quatro fios, visando minimizar as incertezas associadas a perdas resistivas no cabeamento. Além disso, as cargas eletrônicas permitem a operação contínua dos dispositivos FV em ponto de máxima potência, ponto de tensão fixo, circuito aberto, ou curto-circuito. Contudo, a operação em ponto de máxima potência ainda precisa ser validada para a tecnologia de perovskita, uma vez que os algoritmos tradicionais de rastreamento do ponto de máxima potência no modelo perturba-e-observa podem significativamente subestimar a real potência máxima dos dispositivos na presença de histerese (Cimaroli *et al.*, 2017).

As cargas eletrônicas possuem duas topologias distintas: uma com ventilação ativa para dissipação de potência, utilizada na medição de módulos FV em até 900 W ; e outra apenas com dissipação passiva de calor, limitando a potência que é capaz de medir em 300 W e, portanto, utilizada com dispositivos menores, como na medição de minimódulos e células FV. Apesar desta subdivisão entre cargas para medição de alta potência (*High Power* – HP) e baixa potência (*Low Power* – LP), cada carga eletrônica foi eletricamente modificada para se obter a melhor precisão possível no intervalo de medição de corrente e tensão de interesse.

A Tab. 1 traz a relação de cargas eletrônicas disponíveis para medições na bancada de testes, bem como os intervalos de corrente e tensão que suportam e a resolução mínima das medidas. A incerteza da determinação dos parâmetros elétricos durante as medidas depende da temperatura de operação dos componentes, mas são de até 0,3% para corrente e até 0,2% para tensão. O sistema experimental foi projetado e configurado para a medição de módulos fotovoltaicos em uma ampla faixa de tensões e correntes. Além disso, também é possível medir células solares e minimódulos, considerando diversas combinações de tensões e correntes. Este sistema dispõe de instrumentação completa e precisa para avaliar e caracterizar o desempenho de dispositivos solares, adaptando-se a variadas especificações e requisitos

Tabela 1 – Características das cargas eletrônicas utilizadas nos canais de medição do projeto.

TIPO	NÚMERO DE CARGAS DO TIPO	INTERVALO DE MEDIÇÃO	RESOLUÇÃO DAS MEDIDAS ELÉTRICAS	PRINCIPAL APLICAÇÃO
LP-A	7	2 V / 20 A	0,3 μ V / 2 μ A	Células individuais de silício cristalino e perovskita.
LP-B	14	4,5 V / 1 A	0,5 μ V / 0,2 μ A	Células individuais e minimódulos de perovskita até 4 células em série.
LP-C	7	20 V / 2 A	3 μ V / 0,3 μ A	Minimódulos de perovskita até 20 células em série.
HP-D	12	80 V / 20A	1 mV / 200 μ A	Módulos de silício cristalino de baixa corrente.
HP-F	12	80 V / 40A	1 mV / 400 μ A	Módulos de silício cristalino de corrente elevada.
HP-G	4	230 V / 5 A	15 mV / 200 μ A	Módulos de filmes finos de elevada tensão.

As cargas eletrônicas permitem a parametrização das curvas IV de forma bastante detalhada. É possível determinar a direção da curva, o número de pontos de medição, bem como intervalo de medição entre eles. Para módulos FV comerciais, estes parâmetros já estão bastante consolidados, contudo, para tecnologias emergentes e instáveis, como perovskitas, a correta determinação destes parâmetros é essencial para medidas precisas dos parâmetros elétricos. O uso de parâmetros incorretos pode levar a medidas incorretas e conclusões precipitadas sobre o comportamento e eficiência dos dispositivos. No caso específico de perovskitas, a literatura mostra que é necessário um tempo de estabilização mais longo em cada ponto de medição, sendo que medidas demasiadamente rápidas tendem a sobrestimar a corrente para a determinada tensão (Christians *et al.*, 2015). Há ainda mais um fator complicador: como a formulação empregada nos dispositivos de perovskita varia, valores encontrados na literatura de tempo de estabilização e varredura da curva como sendo otimizados para uma formulação, não necessariamente se aplicam a outros tipos de célula.

No caso de medidas em campo, entretanto, é necessário evitar que as condições do ensaio variem durante o registro da curva, fazendo com que medidas demasiadamente longas sejam inviáveis sob Sol real. No contexto deste projeto, há um desafio a mais: os eventos de sobreirradiação que se busca avaliar ocorrem em dias com nuvens e variações abruptas e rápidas dos níveis de irradiação, sendo que eventos de borda de nuvem podem durar apenas alguns segundos, dificultando ainda mais a realização de medidas longas.

Visando superar todas estas barreiras, a equipe optou por realizar medidas de curva IV com um tempo de estabilização mais longo, mas registrar um número menor de pontos ao longo da curva. Sendo assim, a resolução da curva IV será menor, mas a representatividade do ponto de corrente para aquele nível de tensão será melhor. Com base em valores encontrados na literatura, as medidas iniciais dos minimódulos de perovskita do projeto estão sendo realizadas com tempo de estabilização de 25ms. Estes parâmetros resultam em uma taxa de varredura de 3200 mV/s, valor que corresponde a parâmetros empregados em outros experimentos a céu aberto com perovskitas (Pescetelli *et al.*, 2022). A direção de curva escolhida foi uma combinação *forward-reverse*, de modo a avaliar o efeito de histerese que ocorre com perovskitas (Hishikawa *et al.*, 2016). Com os parâmetros escolhidos, a medida de curva IV de minimódulos de perovskita demora pouco mais de um segundo.

Para além da medida de parâmetros elétricos em si, a análise dos dispositivos FV requer informações das condições do ensaio. A Tab. 2 apresenta os dados dos sensores instalados na bancada experimental. Nota-se que é possível mensurar os valores de irradiação no plano da bancada experimental de três maneiras diferentes: pela integração das medidas espectrais obtidas pelos espectrorradiômetros, pelo uso de piranômetros ou por meio de fotodiodos. No entanto, é importante ressaltar que cada tipo de sensor desempenha um papel específico no contexto do sistema construído, conforme descrito abaixo.

Os piranômetros possuem a melhor precisão e estabilidade, resposta espectral ampla, e resposta temporal moderada. Sendo assim, estes sensores são utilizados para o registro das irradiação durante as medidas de curva IV dos dispositivos para posterior correção dos valores para STC e análise dos resultados. A medida de irradiação é realizada tanto no plano frontal, quanto no posterior da bancada, permitindo assim a análise da irradiação refletida para avaliação de módulos bifaciais.

Os fotodiodos, por outro lado, possuem uma precisão menor e resposta espectral limitada, mas sua resposta é 500 vezes mais rápida do que a dos piranômetros. Este último fato faz destes sensores os melhores para detecção e registro de eventos de sobreirradiação. O custo relativamente menor dos sensores também permite o uso dele em múltiplos locais, visando garantir a uniformidade da irradiação ao longo 30 metros do rastreador utilizado como suporte dos dispositivos avaliados. Sendo assim, a bancada conta com fotodiodos em suas extremidades norte e sul, bem como na parte central. O sistema funciona da seguinte forma: as medidas de curva IV e parâmetros ambientais são tomadas a

cada minuto, de forma simultânea para todos os dispositivos. Quando o sistema de fotodiodos identifica um evento de sobreirradiação, as medidas passam a ser tomadas com resolução subminutal. A resolução temporal máxima das medidas varia de acordo com a parametrização das curvas IV, que tendem a ser mais lentas para dispositivos de perovskita, e pode ser restringida pela potência dos módulos FV, em função da capacidade limitada de dissipação de potência das cargas no caso de muitas medidas consecutivas.

Os espectrofotômetros são responsáveis por quantificar e registrar a quantidade de energia incidente para os diferentes comprimentos de onda que compõem a luz solar. Os dois dispositivos empregados possuem papel complementar, visando registrar todo o espectro incidente relevante para a medida de dispositivos FV em Sol real. Estas medidas são importantes pois as condições espectrais em Sol real diferem do espectro padrão ASTM G173-03, se fazendo necessário corrigir as medidas conforme a resposta espectral do dispositivo FV e a distribuição espectral da irradiação incidente. Os dispositivos medidos possuem respostas espectrais distintas e variam majoritariamente com a tecnologia FV empregada, sendo que o comprimento de onda de corte da resposta espectral é inversamente proporcional a energia de banda proibida (*bandgap*) do semiconductor. Por exemplo, a resposta espectral de módulos de CdTe é limitada em aproximadamente 900 nm, enquanto a de células de silício monocristalino vai até cerca de 1200 nm. Os dispositivos de perovskita, contudo, podem ter diferentes composições com respostas *bandgaps* distintos, que podem ser ajustados a depender do contexto. Por exemplo, para aplicações em células *tandem*, o ideal são perovskitas com resposta espectral mais focada em comprimentos de onda curtos (*bandgap* elevado), complementando a resposta do silício cristalino.

A temperatura dos dispositivos FV é medida através de sensores PT-100 Classe A, com medições a quatro fios. Cada módulo, minimódulo e célula avaliado possui medida individual e específica de temperatura em sua parte posterior. O posicionamento dos sensores em módulos segue o indicado pela normativa técnica internacional IEC 61724-1:2021, sendo que, no caso de medidas de módulos bifaciais, os sensores e cabos foram posicionados a fim de reduzir ao máximo o sombreamento das células.

Por fim, uma estação compacta é utilizada para medir as variáveis climáticas: temperatura ambiente, umidade relativa, e temperatura ambiente. O projeto ainda conta com uma estação solarimétrica completa, localizada a alguns metros, com registro fotográfico de nuvens (relevante para a análise de eventos de borda de nuvem), medidas de irradiação direta, difusa e global através de diversos sensores, pluviômetro, e muitos outros (Braga *et al.*, 2019). Esta vasta gama de variáveis medidas em um mesmo lugar permite correlacionar o desempenho e degradação dos dispositivos com as condições locais, além de possibilitar análises adicionais, como a avaliação de modelos de estimativa de temperatura de operação.

Tabela 2 – Sensores e dispositivos de medição instalados na bancada de testes.

SENSOR	MODELO	CLASSE	TEMPO DE RESPOSTA	MEDIDA
Piranômetro	EKO MS-80S	A	< 0.5 s	Irradiância no plano dos dispositivos FV.
Piranômetro	EKO MS-80S	A	< 0.5 s	Irradiância refletida na parte posterior dos dispositivos FV.
Espectroradiômetro	EKO MS-711	-	-	Distribuição espectral na faixa de 300 - 1100 nm
Espectroradiômetro	EKO MS-712	-	-	Distribuição espectral na faixa de 900 - 1700 nm.
Fotodiodo	EKO ML-01	C	< 1 ms	Sistema de gatilho para valores de alta irradiação.
Sensores de Temperatura	PT-100	A	-	Temperatura dos dispositivos FV.
Estação Compacta	MetSENS 500	-	-	Temperatura, velocidade e direção do vento, umidade relativa.

A parte da bancada dedicada a medição de células e minimódulos é composta por uma chapa de acrílico transparente, de modo a interferir minimamente na reflexão de luz e temperatura das amostras. A conexão elétrica com o sistema de medição é feita através de conectores MC4, resistentes a intempéries. A placa de acrílico possui diversas furações para fixação as amostras, as quais são instaladas em suportes plásticos desenvolvidos especificamente para esta aplicação (Fig. 1d). Os suportes permitem também a fixação dos sensores de temperatura e dos cabos de medição de modo que o cabeamento não exerça forças contra o encapsulamento. Os contatos elétricos dos minimódulos são recobertos por um polímero, de modo a isolá-los e melhor proteger a estanqueidade do encapsulamento, que é fragilizado neste ponto devido à interface entre as células solares e o contato elétrico externo. Os suportes contam ainda com um método de fixação dos sensores de temperatura que dispensa o uso de fita adesiva, permitindo assim a retirada das amostras sem danificá-las. Este artifício é importante para viabilizar a avaliação dos compostos químicos presentes nos filmes degradados, permitindo melhor entender os mecanismos de degradação envolvidos.

Além das medidas automatizadas realizadas na bancada de testes, o *setup* experimental ainda permite a realização de medidas de eletroluminescência (EL) em campo. Este ensaio tem como base o efeito fotoluminescente de dispositivos FV quando polarizados por uma fonte externa. Nesta situação, os dispositivos emitem luz em comprimentos de onda específicos, que dependem do *bandgap* do semiconductor. Os comprimentos de onda emitidos não são visíveis a olho nu e possuem baixa luminosidade, mas a imagem de EL pode ser capturada por câmeras

adaptadas em ambientes escuros, utilizando-se um tempo de abertura do obturador maior para que mais luz seja capturada. Este ensaio é importante para avaliar a saúde dos minimódulos, permitindo a identificação da existência e evolução de defeitos no filme, por exemplo. A Fig. 2 apresenta imagens da realização do ensaio e exemplos de imagens de um minimódulo novo e após degradação. A rotina do experimento de avaliação de minimódulos de perovskita ainda inclui a realização de inspeções visuais das amostras, com limpeza e registros fotográficos semanais.

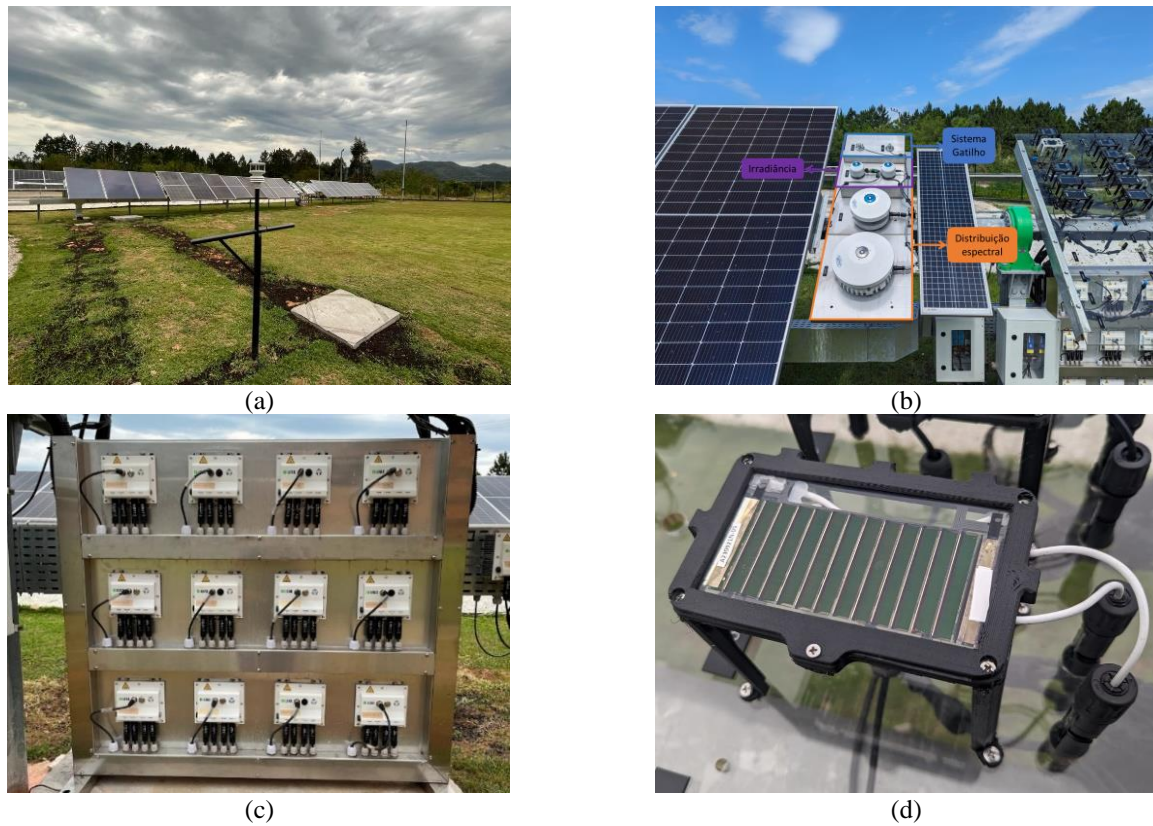


Figura 1 – Imagens da bancada de testes para avaliação de células, minimódulos e módulos FV ao ar livre instalada no laboratório Fotovoltaica-UFSC: (a) vista geral; (b) sensores no plano da bancada; (c) cargas eletrônicas para medida de dispositivos de baixa potência; (d) minimódulo de perovskita instalado na bancada.

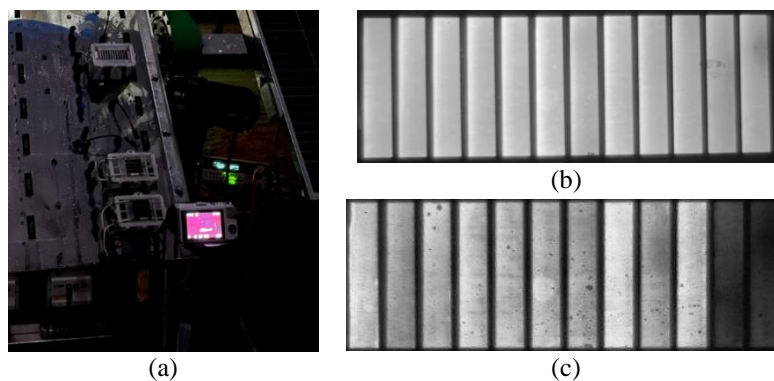


Figura 2 – Eletroluminescência de minimódulos de perovskita: realização do ensaio em campo (a) e resultados para um mesmo minimódulo antes (b) e após degradação (c).

2.2 Infraestrutura para medidas *indoor*

Além da bancada em céu aberto, este projeto conta com um laboratório de medição *indoor*, permitindo a caracterização e testes de dispositivos solares de pequena área em simulador solar e através de eletroluminescência. Permitindo condições mais controladas e maior precisão, o simulador solar é empregado na validação das medidas em campo e na qualificação das amostras antes e depois da exposição. O equipamento adquirido no âmbito deste projeto permite ainda a realização de testes de degradação e estabilidade dos minimódulos, com lâmpadas LED que oferecem ótima estabilidade e durabilidade.

Os ensaios podem ser realizados em níveis de irradiância de até 1,6 sois (1600 W/m²), viabilizando a determinação de uma curva de eficiência por nível de irradiância para condições mais controladas e estáveis que as externas. O equipamento é capaz também de modificar o espectro simulado, permitindo mimicar condições espectrais características do Brasil, que diferem das padrão e podem resultar em ganhos significativos para tecnologias com resposta espectral mais azulada (Braga *et al.*). A variação espectral ainda pode ser usada para estressar os dispositivos, com espectro mais voltados para o ultravioleta (UV), causador de fotodegradação em perovskitas.

A área iluminada do simulador é de 240 mm x 240 mm, permitindo a medição de células de silício de grande área, que são a grande tendência do mercado hoje (ITRPV, 2023), bem como a análise de dispositivos inovadores de perovskita de maior área, um passo necessário para a viabilização da tecnologia (Razza *et al.*, 2016). A base do simulador, equipada com controle de temperatura, permite a análise da degradação dos minimódulos sob diferentes níveis de luz e temperatura. Esta funcionalidade também possibilita a determinação do coeficiente de temperatura dos dispositivos, um dado imprescindível para a correção das medidas em campo para condições padrão, e o qual não pode ser encontrado facilmente na literatura, devido ao fato de que cada formulação de perovskita possui características e respostas térmicas distintas.

2.3 Tratamento de dados

Este estudo foca em resultados preliminares para minimódulos de perovskita, sendo duas as principais análises: a avaliação da degradação dos dispositivos, e a caracterização da eficiência dos dispositivos para diferentes níveis de irradiância. No caso da análise de degradação, as medidas são integradas em valores diários, enquanto para a avaliação de eficiência em níveis de irradiância, as medidas pontuais são analisadas.

As medidas em condições reais de operação ocorrem em diversos níveis de irradiância e temperatura de operação dos dispositivos, o que impacta os parâmetros elétricos obtidos. Portanto, as medidas realizadas a céu aberto precisam ser corrigidas para uma condição comum, de modo a permitir sua comparação com valores obtidos em simulador solar e até entre si. Usualmente, as condições escolhidas para comparação de resultados de curva IV são as chamadas condições padrão de teste (*Standard Test Conditions* - STC), definidas como 1000 W/m² de irradiância incidente no plano dos dispositivos, 25°C de temperatura da célula e espectro ASTM G173-03. Estas condições padrão são definidas na normativa internacional IEC 61215-2:2021, enquanto os métodos empregados para corrigir medidas realizadas em contextos diferentes destes são definidos pela IEC 60891:2021.

Para medidas em campo, é necessário buscar condições de medição as mais próximas possíveis das STC, de modo a minimizar os erros associados à correção dos valores esta condição. O fator que mais impacta na correção dos valores de potência medidos é a irradiância, que possui relação quase linear com a potência. Portanto, as normativas geralmente definem valores mínimos de irradiância para a realização de testes de determinação e potência. A normativa internacional IEC 62446-1:2016+AMD1:2018 CSV requer irradiância estável e mínima de 400 W/m², já no Brasil, a norma ABNT NBR 16274 prevê um valor mais restrito, possivelmente em função do recurso solar abundante em nosso território, de 700 W/m².

No caso deste estudo, foi optado por adotar valores mínimos de irradiância para avaliar a degradação dos dispositivos, buscando valores médios diários mais precisos. Contudo, em certas épocas do ano, o plano da bancada de testes recebe irradiância limitada em função da latitude local e do rastreador possuir inclinação fixa de zero graus no eixo norte-sul. Desta forma, de modo a garantir um número suficiente de medidas diárias na avaliação da degradação dos dispositivos de perovskita, empregou-se um filtro para irradiâncias mínimas de 500 W/m² nas análises realizadas até o momento. Foi também determinado um número mínimo de medidas por dia para que o valor de eficiência seja considerado.

A análise de eficiência para diferentes níveis de irradiância, por outro lado, foi realizada com as medidas pontuais de potência. As medidas são corrigidas para STC para que possa ser avaliada a variação da eficiência em função do nível de irradiância, excluindo-se o impacto do nível de irradiância na potência.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

3.1 Perfil das amostras de minimódulos de perovskita

Os minimódulos de perovskita analisados neste projeto possuem duas configurações: a primeira é composta por 4 células em série, e a segunda por apenas 12 células em série. As amostras são encapsuladas, com contatos elétricos para conexão ao sistema de medição. A Tab. 3 e a Fig. 3 trazem informações estatísticas sobre as amostras recebidas. Observa-se que a eficiência média dos dispositivos de 4 células é de 9,8%, enquanto os dispositivos de 12 células chegam a eficiências de até 11,7%. Este resultado não está relacionado à arquitetura do minimódulo em si, é apenas um reflexo do fato de que os processos de fabricação empregados estão mais otimizados para a arquitetura de 12 células, o que pode também ser constatado pelo menor desvio padrão entre eficiências obtidas para minimódulos deste tipo.

3.2 Desafios e otimizações na medição ao ar livre

Uma parte significativa dos primeiros dispositivos testados apresentaram uma degradação de potência acentuada. A Fig. 4 mostra que menos de um terço das amostras ainda apresentava mais do que 50% da eficiência inicial após 10

dias de exposição. Dentre os três minimódulos que não apresentaram degradação acentuada nestes 10 primeiros dias, todos ainda tinham pelo menos 50% da eficiência inicial (4% a 6% em valores absolutos) na marca dos 20 dias, e preservaram entre 14% e 20% da eficiência inicial até o 50º dia. Vale enfatizar que, mesmo com a aplicação de filtros que buscam reduzir as incertezas na determinação de eficiência ao ar livre, as variações entre medidas diárias pode ocorrer em função das diversas condições de irradiação e temperatura encontradas em campo.

Inspecções visuais mostraram que o local de contato elétrico foi a origem da degradação de muitos dos minimódulos que apresentaram degradação acentuada, podendo esta estar associada a uma fragilidade do encapsulamento neste ponto, permitindo o ingresso de umidade e oxigênio e acelerando a degradação. Isto ocorre apesar das medidas preventivas tomadas no preparo das amostras para medidas *outdoor*, como o posicionamento dos contatos elétricos na parte posterior, para evitar o acúmulo de água sobre o contato, e o uso de polímeros para isolá-los e melhor proteger o encapsulamento. Visando atenuar este problema, um ponto de otimização implementado em amostras posteriores foi o afastamento dos contatos elétricos dos dispositivos da parte ativa das células.

A continuidade de algumas medidas de eficiência também foi prejudicada por conta de pontos de mau-contato ocorrentes na solda responsável pela conexão elétrica entre os cabos de medição e o contato dos minimódulos, que é bastante frágil. O uso de cabos de menor secção transversal e mais flexíveis em testes posteriores teve como objetivo atenuar este problema, enquanto ainda garantindo perdas mínimas na condução da corrente dos dispositivos durante as medidas.

Tabela 3 – Dados estatísticos das amostras de minimódulos de perovskita recebidas.

INDICADOR	GERAL	4 CÉLULAS	12 CÉLULAS
Eficiência Média	12,69%	11,8%	12,7%
Eficiência Mínima	7,82%	7,8%	9,6%
Eficiência Máxima	10,21%	9,8%	11,0%
Desvio Padrão	1,29%	1,26%	0,95%
Número de Amostras	48	32	16

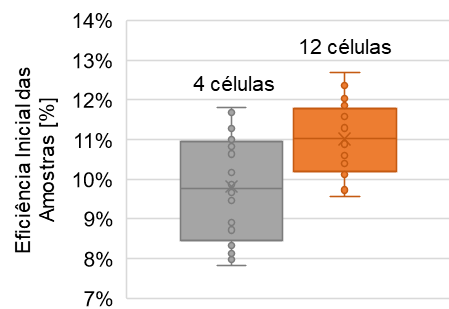


Figura 3 – Gráfico de caixa para a eficiência das amostras de minimódulos de perovskita recebidas.

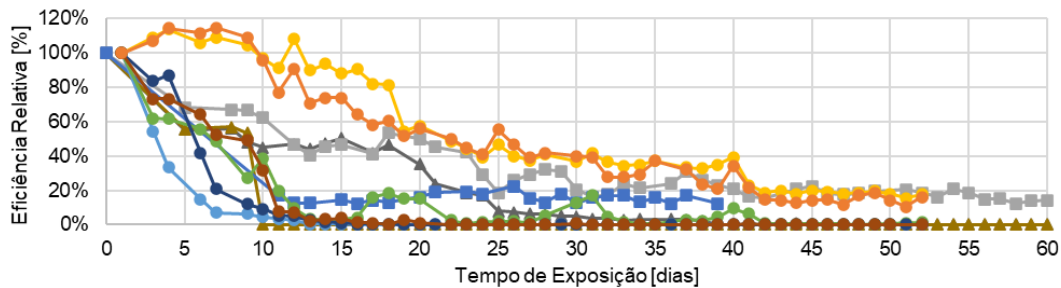


Figura 4 – Eficiência relativa ao decorrer do tempo de exposição das primeiras amostras testadas.

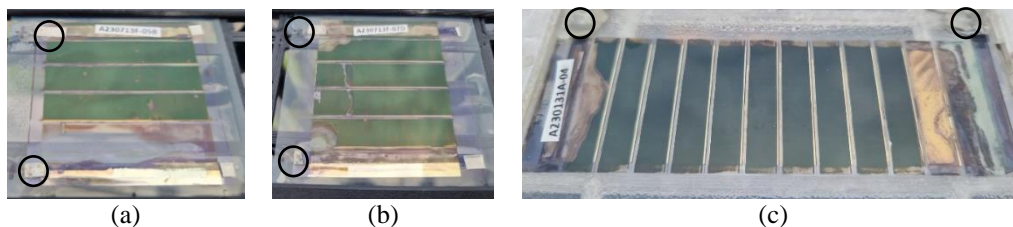


Figura 5 – Imagens de minimódulos de perovskita que apresentaram degradação de potência e visual acentuada, originada na interface entre as células e o contato elétrico (indicados de forma aproximada através de círculos pretos).

3.3 Avaliação de degradação a céu aberto

Com métodos otimizados, uma segunda rodada de medições foi realizada para 11 minimódulos: 6 deles com 4 células em série, e 5 com 12 células. Os resultados são apresentados na Fig. 6, para as duas topologias. Os diferentes marcadores (quadrado, triângulo e losango) indicam três materiais diferentes utilizados como filme de barreira nos minimódulos. A irradiação acumulada no plano dos dispositivos e a temperatura média das amostras também são apresentados.

Observa-se que, apesar das melhorias realizadas com base nos resultados da primeira etapa de testes, os resultados para minimódulos de quatro células ainda apresentam degradação considerável, com todas as amostras apresentando menos do que 5% de eficiência após 7 dias de exposição. A Fig. 7 apresenta os registros da inspeção visual (a) e ensaios de EL (c) realizados após o 5º dia de exposição de uma destas amostras. Atribui-se a graduação desta amostra ao curto-circuito de uma das células, que deixa de emitir luminosidade no ensaio de EL por não estar recebendo a corrente da fonte de tensão. Esta falha se apresenta também através da redução da tensão de circuito aberto, também medida nos ensaios de curva IV. Esta falha pode ser atribuída a um defeito na fabricação dos dispositivos, em uma das etapas de corte a laser responsável pelo isolamento das células.

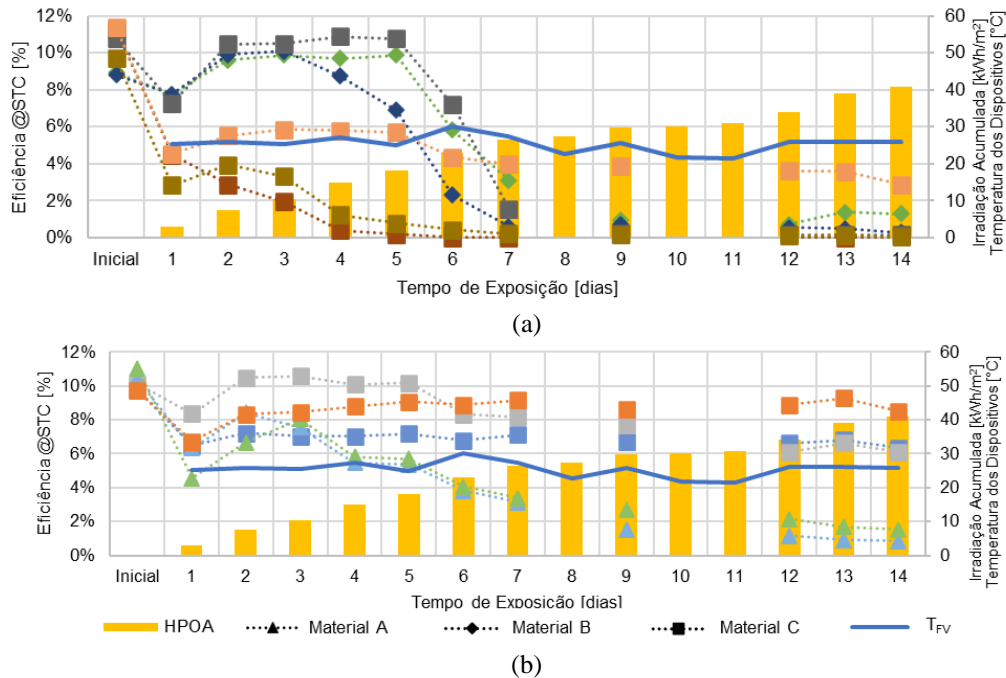


Figura 6 – Resultados dos testes de degradação de minimódulos de perovskita com 4 (a) e 12 (b) células em série e encapsulados com diferentes filmes de barreira e expostos a condições reais de operação.

Já os minimódulos de 12 células apresentaram resultado melhores, com as amostras empregando o material C como filme de barreira tendo 6% a 8% de eficiência mesmo após duas semanas de exposição. As amostras de 12 células que foram feitas com o material A, contudo, apresentaram degradação acentuada. Este resultado é inesperado, visto que o filme A possui um filtro UV, que deve desacelerar a fotodegradação do filme de perovskita.

Analisando um dos minimódulos que apresentaram degradação acentuada com o material A, observa-se que após o 5º dia de exposição o minimódulo não apresenta defeitos visuais (Fig. 7b). Contudo, a Fig. 7d mostra células desconectadas e pontos escuros na EL de um destes minimódulos. Estes pontos indicam contaminação do substrato causando uma má formação do filme de perovskita naquele ponto. Vale destacar que as amostras feitas com material A e C foram produzidas em datas diferentes por pesquisadores diferentes. Devido à baixa reprodutibilidade do processo de fabricação destes dispositivos, é possível que os resultados encontrados tenham mais relação com defeitos de fabricação do que com o material empregado como filme de barreira.

3.4 A influência do nível de irradiância e temperatura de operação

Conforme colocado, um dos principais objetivos deste projeto é a avaliação e otimização da eficiência de dispositivos solares para irradiâncias acima das condições padrão de teste. Este estudo apresenta os resultados preliminares da avaliação de eficiência sob diferentes níveis de irradiância para minimódulos de perovskita. A Fig. 8 apresenta os resultados para dois dos minimódulos avaliados: um que apresentou degradação acentuada na primeira rodada de medidas (a) e o que apresentou melhor eficiência após as duas semanas de exposição na segunda rodada de medidas (b). A ausência de medições próximas a 700 W/m² e as elevadas eficiências nesta faixa são erros de medida causados pelo sistema. As cores dos pontos indicam o tempo de exposição, e na Fig. 8a fica evidente a degradação acentuada, com eficiências bastante baixas para os dados mais recentes. Observa-se ainda que não foram obtidas medidas altas de irradiância nos primeiros dias de medição da primeira rodada do experimento, sendo estas limitadas em cerca de apenas 800 W/m². Contudo, observa-se que, mesmo após a degradação, não há uma queda de eficiência para altas irradiâncias em relação a irradiâncias mais baixas. O minimódulo da Fig. 8a apresenta resultado similar, com valores de eficiência similares para 1000 W/m² e 1200 W/m². Para ambos os minimódulos, os resultados mostram um ganho de eficiência para irradiâncias acima de um certo valor, um comportamento esperado e similar ao de outras tecnologias FV.

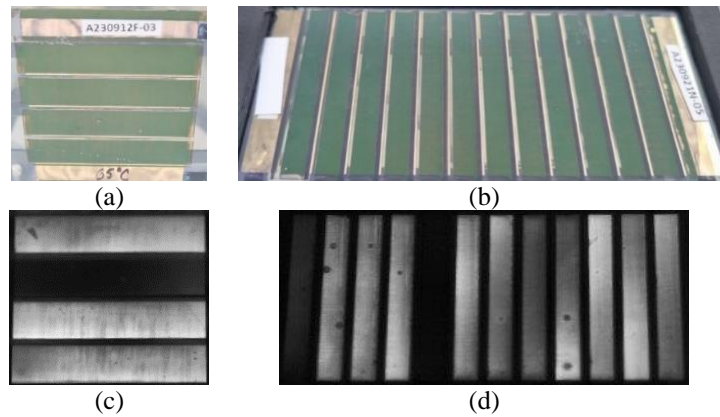


Figura 7 – Imagens visuais (acima) e de eletroluminescência (abaixo) de minimódulos de perovskita com 4 (direita) e 12 (esquerda) células em série após cinco dias de exposição a condições reais de operação.

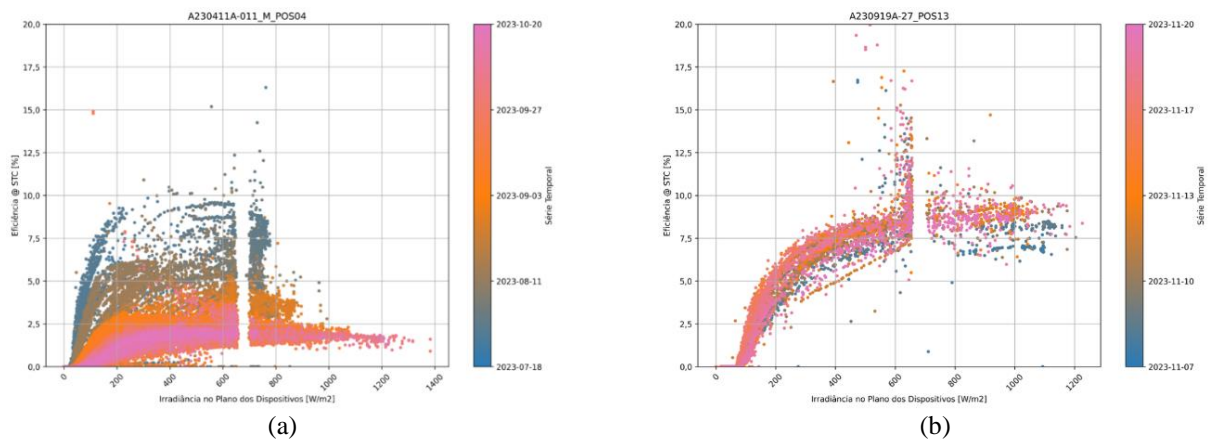


Figura 8 – Resultados preliminares do impacto do nível de irradiância na eficiência de minimódulos de perovskita.

4. COMENTÁRIOS FINAIS

Este trabalho procurou apresentar a infraestrutura de pesquisa estabelecida no laboratório Fotovoltaica-UFSC para medição de dispositivos FV sob condições reais de operação e *indoor*. Em especial, a infraestrutura permite avaliar os impactos de elevados níveis de irradiância na eficiência dos dispositivos, com foco na otimização da eficiência e estabilidade de minimódulos de perovskita.

Os resultados mostram que a degradação de dispositivos de perovskita ainda é um fator importante a ser otimizado, principalmente para condições reais de operação. Resultados preliminares mostram que a eficiência dos dispositivos construídos é similar para condições padrão de irradiância e para níveis extremos. Há ainda espaço para otimização dos dispositivos visando melhorar esta eficiência, com a redução das células (melhorando a resistência série) e variação da espessura da camada ativa. A análise da degradação sob níveis elevados de irradiância ainda não é conclusiva, pois observa-se que há ainda muitos fatores impactando a degradação acelerada dos dispositivos. Contudo, estudos estão sendo desenvolvidos para avaliação e otimização deste parâmetro em laboratório, onde as condições podem ser mais bem controladas.

Trabalhos futuros incluem análises de amostras aprimoradas de minimódulos e células de perovskita sob condições reais de operação. A infraestrutura laboratorial *indoor* deve permitir ainda a análise dos dispositivos em um ambiente controlado, com exposição à elevadas temperaturas, níveis de iluminação extremos e diferentes espectros.

Agradecimentos

Os autores agradecem à SHELL pelo suporte financeiro a este estudo através dos projetos 22076-4 e 22717-3 realizados em parceria com a UNICAMP no âmbito do programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). O projeto gostaria de agradecer à Brametal, pela doação do rastreador utilizado como bancada para os experimentos, bem como à Romiotto e à EKO, pelo desenvolvimento e fornecimento do sistema de medição a céu aberto empregado neste estudo. Os autores também gostariam de expressar sua gratidão aos colegas do laboratório Fotovoltaica-UFSC que, embora não tenham participado diretamente desta pesquisa, desempenharam um papel crucial na concepção, instalação e manutenção dos sistemas utilizados neste estudo. Marília Braga agradece ainda o apoio recebido da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior –Brasil (CAPES) através de suas bolsas de doutorado.

REFERÊNCIAS

- Ali, M. U., Mo, H., Li, Y., Djurišić, A. B. 2023. Outdoor Stability Testing of Perovskite Solar Cells: Necessary Step toward Real-Life Applications. *APL Energy*. vol. 1, n. 2. AIP Publishing, LLC. doi:10.1063/5.0155845.
- Braga, M., De Oliveira, A. K. V., Burnham, L., Dittmann, S., Gottschalg, R., Betts, T., Rodríguez-Gallegos, C. D., Reindl, T., Rütther, R. 2020. Solar Over-Irradiance Events: Preliminary Results from a Global Study. In *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*.
- Braga, M., do Nascimento, L. R., Rütther, R. 2019. Spectral Modeling and Spectral Impacts on the Performance of Mc-Si and New Generation CdTe Photovoltaics in Warm and Sunny Climates. *Solar Energy*. vol. 188, August. Elsevier Ltd, pp. 976–988. doi:10.1016/j.solener.2019.06.073.
- Braga, M., Rafael Do Nascimento, L., Rütther, R. *Spectral Impacts on the Performance of Mc-Si and New-Generation CdTe Photovoltaics in the Brazilian Northeast*.
- Christians, J. A., Manser, J. S., Kamat, P. V. 2015. Best Practices in Perovskite Solar Cell Efficiency Measurements. Avoiding the Error of Making Bad Cells Look Good. *Journal of Physical Chemistry Letters*. American Chemical Society. doi:10.1021/acs.jpcclett.5b00289.
- Cimaroli, A. J., Yu, Y., Wang, C., Liao, W., Guan, L., Grice, C. R., Zhao, D., Yan, Y. 2017. Tracking the Maximum Power Point of Hysteretic Perovskite Solar Cells Using a Predictive Algorithm. *Journal of Materials Chemistry C*. vol. 5, n. 39. Royal Society of Chemistry, pp. 10152–10157. doi:10.1039/c7tc03482b.
- do Nascimento, L. R., de Souza Viana, T., Campos, R. A., Rütther, R. 2019. Extreme Solar Overirradiance Events: Occurrence and Impacts on Utility-Scale Photovoltaic Power Plants in Brazil. *Solar Energy*. vol. 186, July. Elsevier Ltd, pp. 370–381. doi:10.1016/j.solener.2019.05.008.
- Hishikawa, Y., Shimura, H., Ueda, T., Sasaki, A., Ishii, Y. 2016. Precise Performance Characterization of Perovskite Solar Cells. *Current Applied Physics*. vol. 16, n. 8. Elsevier B.V., pp. 898–904. doi:10.1016/j.cap.2016.05.002.
- ITRPV. 2023. *International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2022 Results*.
- Karimipour, M., Paingott Parambil, A., Tabah Tanko, K., Zhang, T., Gao, F., Lira-Cantu, M. 2023. Functionalized MXene/Halide Perovskite Heterojunctions for Perovskite Solar Cells Stable Under Real Outdoor Conditions. *Advanced Energy Materials*. vol. 2301959, pp. 1–16. doi:10.1002/aenm.202301959.
- Martins, G. L., Mantelli, S. L., Rütther, R. 2022. Evaluating the Performance of Radiometers for Solar Overirradiance Events. *Solar Energy*. vol. 231, n. November 2021. Elsevier Ltd, pp. 47–56. doi:10.1016/j.solener.2021.11.050.
- NREL. 2023. *Best Research-Cell Efficiencies*.
- Pescetelli, S., Agresti, A., Viskadourous, G., Razza, S., Rogdakis, K., Kalogerakis, I., Spiliariotis, E. et al. 2022. Integration of Two-Dimensional Materials-Based Perovskite Solar Panels into a Stand-Alone Solar Farm. *Nature Energy*. June. doi:10.1038/s41560-022-01035-4.
- PV Magazine. 2023. Longi Claims 33.9% Efficiency for Perovskite-Silicon Tandem Solar Cell. *PV Magazine*.
- Queiroz, L. M., Sturm, L.-M. C., Braga, M., Rütther, R. 2022. Optimization of the Number of Busbars in Crystalline Silicon Solar Cells. In *IX Congresso Brasileiro de Energia Solar*. Florianópolis.
- Razza, S., Castro-Hermosa, S., Di Carlo, A., Brown, T. M. 2016. Research Update: Large-Area Deposition, Coating, Printing, and Processing Techniques for the Upscaling of Perovskite Solar Cell Technology. *APL Materials*. vol. 4, n. 9. doi:10.1063/1.4962478.
- Shockley, W., Queisser, H. J. 1961. Detailed Balance Limit of Efficiency of P-n Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics*. vol. 32, n. 3, pp. 510–519. doi:10.1063/1.1736034.
- Wali, Q., Iftikhar, F. J., Khan, M. E., Ullah, A., Iqbal, Y., Jose, R. 2020. Advances in Stability of Perovskite Solar Cells. *Organic Electronics*. vol. 78, n. February 2019. Elsevier B.V., pp. 105590. doi:10.1016/j.orgel.2019.105590.
- Yu, Z., Leilaieoun, M., Holman, Z. 2016. Selecting Tandem Partners for Silicon Solar Cells. *Nature Energy*. vol. 1, n. 11. Nature Publishing Group, pp. 1–4. doi:10.1038/nenergy.2016.137.

PRELIMINARY RESULTS FOR PEROVSKITE DEVICES UNDER REAL AND EXTREME OPERATING CONDITIONS - A FUNDAMENTAL STEP TOWARDS PRACTICAL APPLICATIONS

Abstract. *The growing demand for sustainable energy sources has been driving research into more efficient and affordable photovoltaic technologies. In this context, perovskite solar cells emerge as a promising technology due to their ease of fabrication, low cost, and high potential for solar energy conversion. Despite notable advancements, practical implementation under real conditions faces challenges, particularly concerning exposure to stressors such as light, humidity, oxygen, and temperature. This work presents the infrastructure established at Fotovoltaica-UFSC for measuring photovoltaic devices under real operating conditions and indoors. The innovative approach involves an experimental setup with automatic IV curve measurements of photovoltaic devices and a solar simulator allowing measurements in a controlled environment for perovskites under extreme illumination levels, different spectral distributions, and elevated temperatures. Specifically, the infrastructure enables the assessment of the impacts of high irradiance levels on device efficiency, focusing on optimizing the efficiency and stability of perovskite minimodules for high irradiance locations, such as Brazil. Results indicate that the degradation of perovskite devices remains a significant factor to be optimized, particularly for real operating conditions. The acquired data shows that the efficiency of the constructed devices is similar for standard irradiance conditions and extreme levels, suggesting room for further device optimization to enhance efficiency.*

Keywords: *Perovskites, Overirradiance, Field Measurements.*