

CONSTRUÇÃO DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO FLEXÍVEL DE PEROVSKITA

Gabriela de Amorim Soares – gabriela.amorim@oninn.com

Adriano dos Santos Marques

Fernanda Alves Guimarães

Izabela Silva Bicalho

Sílvia Letícia Fernandes

Guilherme Xisto Gomes Alves

David Cauã Pereira

Bárbara Hellen de Souza Miranda

Maria Luiza Pereira Vilela,

Jair Francisco Rodrigues

Thalita Mara Gomes da Silva

Juliana Luiza da Silva Martins

Rodrigo Vilaça de Queiroz

Diego Bagnis

Oninn Centro de Inovações, Belo Horizonte, Minas Gerais

Resumo. *Minimódulos de perovskita foram fabricados com camadas processadas pelos métodos de deposição por lâmina (blade coating) e evaporação térmica para a construção de um painel fotovoltaico de perovskita. Os minimódulos foram agrupados em 3 grupos de 6 unidades e conectados em paralelo formando strings, que foram laminadas individualmente. As strings foram conectadas em série, formando um painel, que recebeu um segundo processo de laminação. Os módulos, as strings e o painel foram caracterizados eletricamente por curvas de tensão-corrente (IV), demonstrando a viabilidade do processo. O painel final apresentou eficiência de 8,6%, com redução de 17% em relação ao desempenho médio dos minimódulos utilizados na montagem, sendo as perdas resultantes dos processos de laminação e manipulação das amostras. A análise de eletroluminescência mostrou diferenças entre os minimódulos usados e entre células de um mesmo minimódulo, apesar do desempenho elétrico inicial semelhante. No teste de estabilidade à temperatura e umidade (65 °C, 85% umidade relativa), o painel apresentou resultados promissores, mantendo 80% do desempenho após mais de 3000 h de exposição.*

Palavras-chave: *Perovskita, Painel Solar de Perovskita, Energia Fotovoltaica*

1. INTRODUÇÃO

As células solares de perovskita atraíram muita atenção na última década devido ao rápido aumento na eficiência e no potencial de produção de baixo custo. Essas células solares têm o nome da estrutura cristalina da perovskita, que é caracterizada por seu arranjo único de átomos. Os materiais de perovskita usados em células solares são tipicamente compostos híbridos orgânico-inorgânicos com fórmula geral ABX_3 , onde A e B são cátions e X é um ânion (Seok and Guo, 2020).

As propriedades excepcionais dessa classe de materiais perovskita, como seu alto coeficiente de absorção de luz e excelente mobilidade dos portadores de carga, os tornam altamente atrativos para conversão de energia solar (Zhou *et al.*, 2018). Em apenas alguns anos desde a sua descoberta, as células solares de perovskita alcançaram progressos notáveis em termos de eficiência, atingindo níveis recordes que superam os de muitas tecnologias solares estabelecidas. As células de junção simples, fabricadas em escala laboratorial, já atingiram valores de eficiência superiores a 25% (Park *et al.*, 2023) e os módulos estão próximos de 18% (Ritzer *et al.*, 2022). Este rápido progresso pode ser atribuído aos avanços contínuos na síntese de materiais, arquitetura de dispositivos e processos de fabricação. Pesquisadores de todo o mundo estão explorando incansavelmente novas estratégias para melhorar a estabilidade, durabilidade e escalabilidade das células solares de perovskita (Saliba *et al.*, 2018).

Uma das principais vantagens das células solares de perovskita é a sua relação custo-benefício. Essas células podem ser fabricadas usando técnicas simples e de baixo custo, como o processamento por soluções, que permite a produção em larga escala do tipo rolo-a-rolo (Basumatary and Agarwal, 2022). Além disso, os materiais de perovskita podem ser sintetizados usando elementos abundantes e prontamente disponíveis, reduzindo a dependência de materiais raros e de valor elevado (Atta, Galal and El-Ads, 2016).

Além de seu alto desempenho e vantagens de custo, as células solares de perovskita oferecem versatilidade em termos de design e aplicação. Elas podem ser facilmente integradas em vários formatos, incluindo módulos flexíveis e semitransparentes, permitindo seu uso em uma ampla variedade de ambientes, como sistemas fotovoltaicos integrados em edifícios e dispositivos eletrônicos portáteis.

No entanto, os desafios permanecem no caminho para a comercialização. As células solares de perovskita são suscetíveis à umidade, calor e à luz, fatores que causam a sua degradação ao longo do tempo (Domanski *et al.*, 2016). A estabilidade e a durabilidade a longo prazo são áreas de investigação ativa, com o objetivo de abordar estas questões e garantir a viabilidade das células solares de perovskita em condições reais. Além da estabilidade, há ainda os desafios relacionados aos processos de fabricação, devido à sobreposição de camadas de espessuras nanométricas e à necessidade de um processo de cristalização controlado da perovskita.

Nesse trabalho é abordado uma etapa no processo de escalonamento da tecnologia, que consiste na integração de minimódulos para a formação de painéis fotovoltaicos de maior escala. Essa etapa de prototipagem se mostra relevante no desenvolvimento da tecnologia para antever desafios relacionados às conexões e ao processo de encapsulamento do material.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Minimódulos de perovskita

Os minimódulos de perovskita utilizados para a montagem do painel foram fabricados na Oninn Centro de Inovações com uma estrutura do tipo p-i-n, seguindo a sequência de camadas expostas na Fig. 1. As camadas são depositadas sobre um substrato flexível de Politereftalato de etileno (PET), recoberto por uma camada de óxido de índio e estanho (ITO) com uma resistência de folha de $20 \Omega/\text{cm}^2$. As camadas de óxido de níquel (NiO), MeO-2 PACz([2-(3,6-Dimethoxy-9H-carbazol-9-yl)ethyl]phosphonic Acid) e de perovskita, foram depositadas pela técnica de deposição por lâmina (*blade coating*, Erichsen), usando solventes considerados verdes, ou seja, de menor periculosidade para o operador e que permitem a deposição de grandes áreas em atmosfera ambiente. As camadas de fulereno C_{60} , Bathocuproine (BCP) e prata (Ag) foram depositadas via processo de evaporação (Angstrom). A formulação da perovskita utilizada é a iodeto brometo de chumbo cério e formamidínio, $\text{CsFAPb}(\text{BrI})_3$.

A construção do minimódulo monolítico é feita a partir de cortes seletivos realizados via laser. O corte do tipo P1 é feito sobre o substrato PET/ITO, de forma a isolar eletricamente as células. Após a deposição das camadas até o BCP, é feito o corte do tipo P2, que remove todas as camadas acima da camada de ITO para permitir a conexão entre as subcélulas. Por fim, após a deposição da prata, é realizado o corte P3, removendo apenas a camada de prata. A lateralidade desses cortes e a retirada específica de algumas camadas permite a formação de um módulo com subcélulas conectadas em série em um substrato único. A Fig. 1 apresenta um esquema das camadas e dos cortes. O corte P1 foi feito com um laser UV de comprimento de onda de 355 nm (Spectra Physics), enquanto os cortes P2 e P3 foram feitos em um laser verde de 532 nm (Coherent). Os minimódulos utilizados para a construção do painel foram fabricados com 12 subcélulas de $2,236 \text{ cm}^2$ de área ativa cada, totalizando $26,8 \text{ cm}^2$.

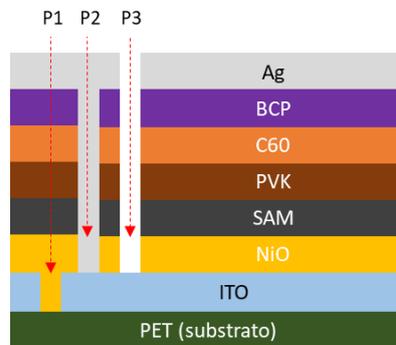


Figura 1 - Representação das camadas dos dispositivos de perovskita e dos cortes P1, P2 e P3 para formação do módulo monolítico.

2.2 Interconexões e laminação

O processo de montagem do painel segue as etapas descritas no fluxograma da Fig. 2. Inicialmente, os minimódulos são selecionados e separados de acordo com o desempenho fotovoltaico. Para a construção desse painel, foram selecionados 18 minimódulos, separados em 3 *strings*. Os minimódulos em cada *string* são conectados em paralelo, de modo que a corrente de cada um deles se soma, mantendo o valor de tensão. Assim, a escolha dos minimódulos em cada *string* deve levar em conta os valores de corrente e tensão, de modo a obter *strings* com desempenho elétrico semelhante para a montagem do painel.

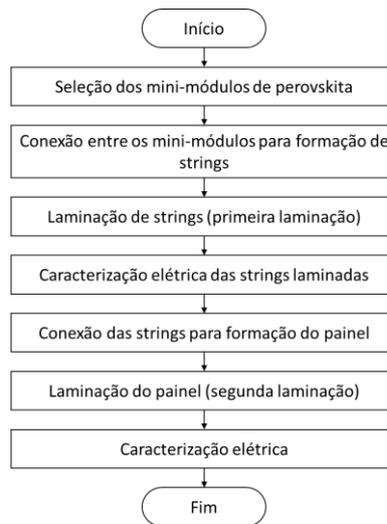


Figura 2 - Fluxograma da montagem do painel fotovoltaico de perovskita.

A montagem da *string* é feita a partir do alinhamento dos minimódulos com os eletrodos de mesma polaridade para o mesmo lado e conexão dos mesmos por uma fita condutiva adesiva (*busbar*), conforme Fig. 3. As *strings* montadas passam por um processo de laminação do tipo rolo a rolo, com uso de um adesivo líquido a base de epóxi, com cura UV e filmes de barreira flexíveis com taxa de transmissão de vapor de água (WVTR, do inglês *water vapor transmission rate*) da ordem de 10^{-4} g/m².dia. Essa primeira laminação facilita a manipulação das *strings*, uma vez que o eletrodo de topo evaporado é bastante frágil e pode ser facilmente danificado durante o processo de conexões. Após a laminação, a *string* laminada é recortada, mantendo uma borda de 5 mm de laminação e é feita uma abertura na barreira para o contato elétrico. Essa abertura é feita por um laser CO₂ diretamente sobre a fita condutiva, em formato circular, com 2-3 mm de diâmetro, que recebe em seguida um contato por solda. A Fig. 4 apresenta a visão em corte de uma *string* laminada.

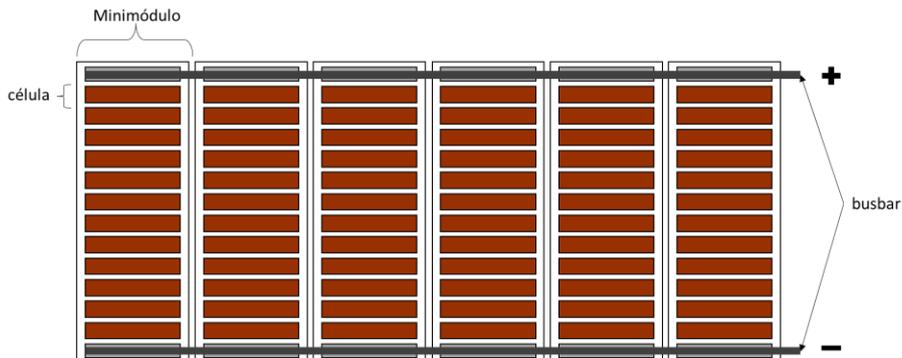


Figura 3 - Montagem de uma *string* com minimódulos conectados em paralelo.

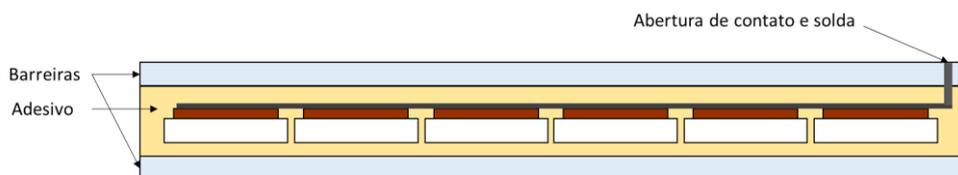


Figura 4 - Esquema em corte da primeira laminação, representando as camadas e a abertura do contato.

As *strings* laminadas são caracterizadas eletricamente no simulador solar para avaliar possíveis perdas durante a laminação. As *strings* são então conectadas entre si para a formação do painel. Nesse caso, as *strings* foram conectadas em série a partir das aberturas de contato realizadas anteriormente, também com o uso de fitas condutoras. Para a ligação em série, os polos positivos de uma *string* foram conectados aos negativos da outra. Os polos não conectados das *strings* laterais (um positivo e um negativo) foram estendidos para a posterior colocação da caixa de junção: esses serão os contatos finais do painel. A Fig. 5 representa as conexões citadas.

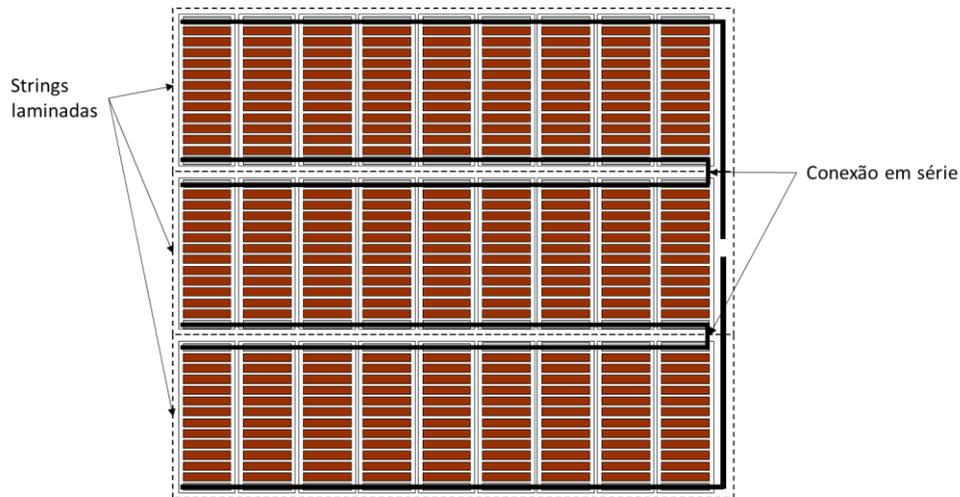


Figura 5 - Conexão das *strings* em série para formação do painel.

As *strings* conectadas passaram por um segundo processo de laminação, similar ao primeiro, mas com uma barreira mais espessa, com o mesmo adesivo e processos descritos na primeira. Devido à maior dimensão, esse processo foi realizado na *spin-off* da Oninn, a Sunew, na qual é possível laminar estruturas com até 50 cm de largura. Após a segunda laminação, foi feita novamente a abertura de contato, cujo objetivo é conectar os cabos de saída do painel. Essa conexão é feita dentro da caixa de junção, que é preenchida com silicone para vedação e proteção dos contatos. A Fig. 6 apresenta a visão em corte do painel laminado. O painel é finalizado com o ajuste de tamanho das bordas da segunda laminação e posterior caracterização elétrica.

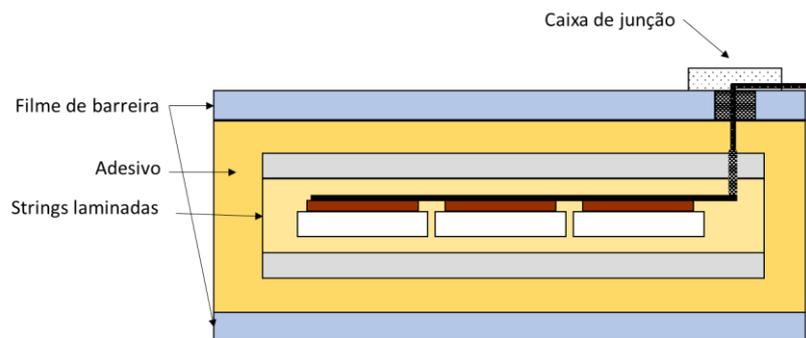


Figura 6 - Corte esquemático da segunda laminação do painel.

2.3 Caracterização

As medidas de curva IV dos minimódulos foram realizadas em um simulador AAA da marca Wacom, com lâmpada de Xe e espectro AM1.5G. As *strings* laminadas e o painel final foram medidos no simulador solar da Sunew Filmes Fotovoltaicos Impressos SA, composto por um conjunto de 5 lâmpadas de plasma. A calibração da irradiância foi feita com uma célula padrão de silício (Rera).

As imagens de microscopia foram feitas com o microscópio ótico Leica, modelo DFC295. A eficiência quântica externa (EQE) foi medida com o equipamento PTS-2-QE Quantum Efficiency/IPCE System da Sciencetech. Medidas de eletroluminescência (EL) foram realizadas como serviço pelo Laboratório Green – PUC-MG.

3. RESULTADOS

3.1 Minimódulos

A Fig. 7 apresenta um minimódulo após o processo de fabricação, usado para a montagem do painel. Na Fig. 8 são apresentadas as análises de EQE e microscopia da camada de perovskita e dos cortes P1, P2 e P3, representativas das amostras produzidas. Pela análise de EQE, observa-se a perovskita converte em elétrons os fótons da faixa de comprimento de onda de 300 a 800 nm, com uma eficiência máxima próxima de 80%. Pela análise de microscopia ótica, observa-se que há boa uniformidade na cristalização, sem presença de buracos. Em relação aos cortes, observa-se que houve boa definição de corte, sem a presença de rebarbas ou defeitos significativos.

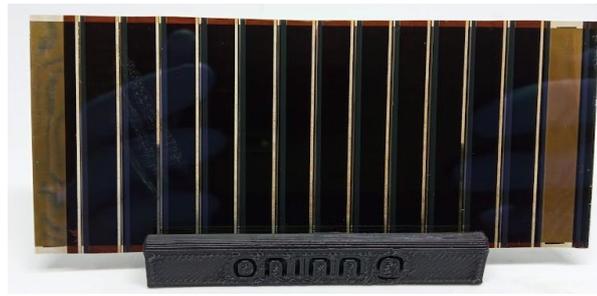


Figura 7 - Módulo de perovskita.

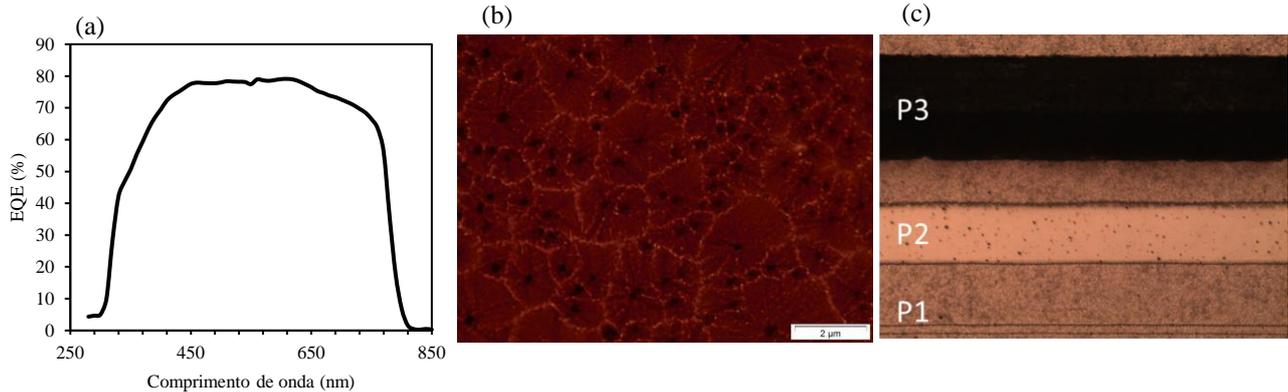


Figura 8 - (a) EQE, (b) microscopia ótica da camada de perovskita, (c) microscopia ótica dos cortes P1, P2, P3

Os parâmetros elétricos dos minimódulos são apresentados na Tabela 1, que também apresenta a divisão entre as 3 *strings*, a média e o desvio padrão. Observa-se que os valores médios obtidos para as *strings* foram parecidos, o que é positivo para evitar perdas na conexão final. O desvio padrão dentro de cada grupo se manteve entre 7 e 8% em relação à eficiência, que se deve à fabricação individualizada dos módulos por um processo não-automatizado.

Tabela 1 - Parâmetros elétricos dos minimódulos utilizados para a construção do painel e estimativa dos valores para cada *string*.

<i>String</i>	Amostras	Voc [V]	Jsc [mA/cm ²]	FF [%]	Eficiência [%]
<i>String 1</i>	M1	12,4	18,2	62,0	11,7
	M2	12,2	17,7	60,6	10,9
	M3	11,8	18,7	56,8	10,4
	M4	11,6	18,9	56,0	10,3
	M5	11,9	17,4	57,8	10,0
	M6	11,7	18,3	52,1	9,3
	Média	11,9	18,2	57,5	10,4
	Desvio padrão	0,3	0,6	3,5	0,8
<i>String 2</i>	M7	12,3	18,5	61,6	11,7
	M8	12,1	18,6	58,7	11,0
	M9	12,3	17,6	58,0	10,5
	M10	11,7	18,9	56,6	10,4
	M11	11,9	17,5	57,3	9,9
	M12	11,2	18,5	56,2	9,7
	Média	11,9	18,2	58,1	10,5
	Desvio padrão	0,4	0,6	1,9	0,7
<i>String 3</i>	M13	12,4	18,3	60,0	11,3
	M14	11,9	18,0	59,5	10,6
	M15	12,0	17,5	59,1	10,4
	M16	11,5	18,8	57,2	10,3
	M17	11,8	18,4	56,0	10,2
	M18	11,6	17,8	53,9	9,3
	Média	11,9	18,1	57,6	10,3
	Desvio padrão	0,3	0,4	2,4	0,7

3.2 Strings

As curvas IV das 3 *strings* após a primeira laminação são apresentadas na Fig. 9 e os parâmetros medidos na Tabela 2. Observa-se que houve boa coincidência entre as *strings* no que se refere a todos os parâmetros. Em relação aos valores antes e após a laminação, observou-se uma ligeira queda de FF e Voc e aumento de Jsc. As quedas de FF e Voc podem ser justificadas pelo processo de laminação, que aplica pressão sobre as amostras, além de um ligeiro aumento de temperatura e exposição UV. O aumento de Jsc, no entanto, não é esperado, porém uma possível explicação seria a possibilidade da camada de laminação (adesivo + filme) criar um efeito óptico positivo, com processos de refração internos que aumentaram a transmissão de luz e a absorção. A Fig. 10 apresenta o espectro de transmitância da barreira usada na primeira laminação (*strings*) e da barreira usada na segunda laminação, para a finalização do painel. Ambas apresentam valores de transmitância próximos a 90% na região do visível e diferem entre si pelo fato de a segunda apresentar um corte na região de 400nm, o que impede a entrada de luz UV no painel, que é um fator importante para a degradação da perovskita.

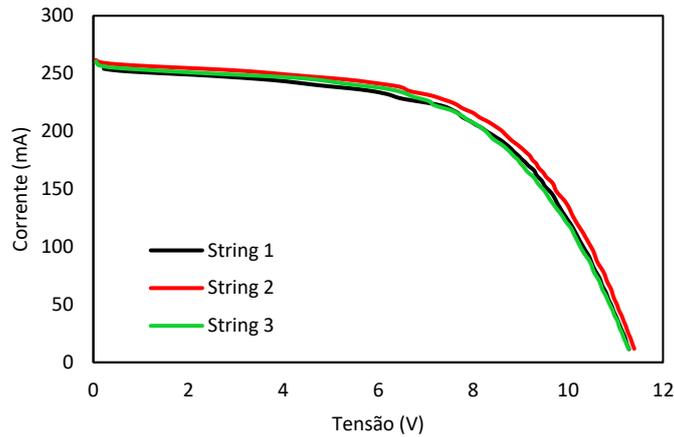


Figura 9 - Curvas IV das *strings* após a primeira laminação.

Tabela 2 - Parâmetros fotovoltaicos das *strings* após a primeira laminação.

	<i>String 1</i>	<i>String 2</i>	<i>String 3</i>
Voc [V]	11,4	11,5	11,4
Isc [mA]	258,2	265,8	264,7
Jsc [mA/cm²]	18,9	19,5	19,4
FF [%]	56,4	56,5	55,0
Eff. [%]	10,3	10,8	10,3
Vmax [V]	8,1	8,3	8,1
Imax [mA]	203,9	207,5	205,1
Pmax [W]	1,7	1,7	1,7

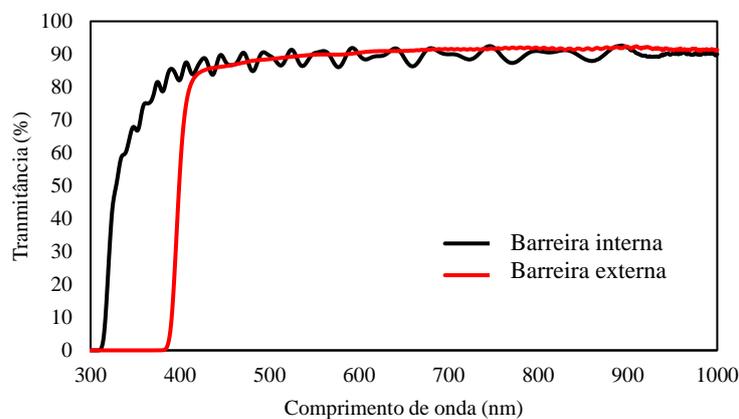


Figura 10 - Transmitância dos filmes utilizados na primeira e segunda laminação.

3.3 Painel

O painel finalizado pode ser visto na Fig. 11. Após a conexão em série das *strings* e do processo de segunda laminação, a dimensão final do painel foi de 27 cm x 33 cm, com 483 cm² de área ativa. A curva característica do painel foi medida no simulador solar e é apresentada na Fig. 12. Os principais parâmetros são apresentados na Tabela 3.

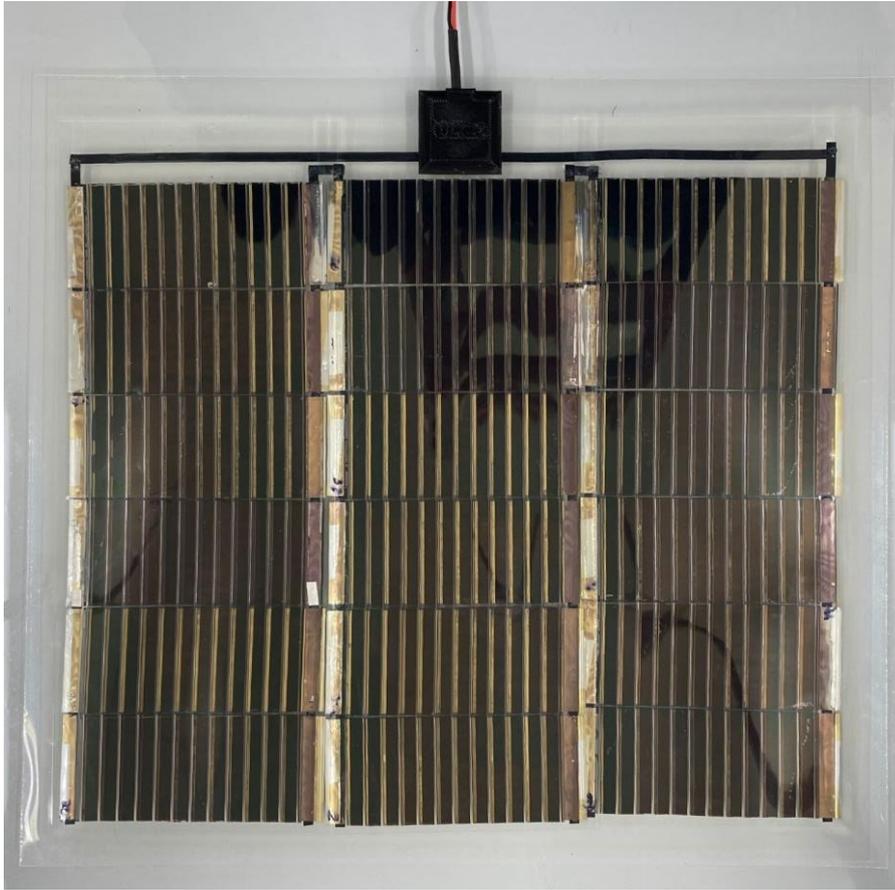


Figura 11 - Foto do painel fotovoltaico de Perovskita.

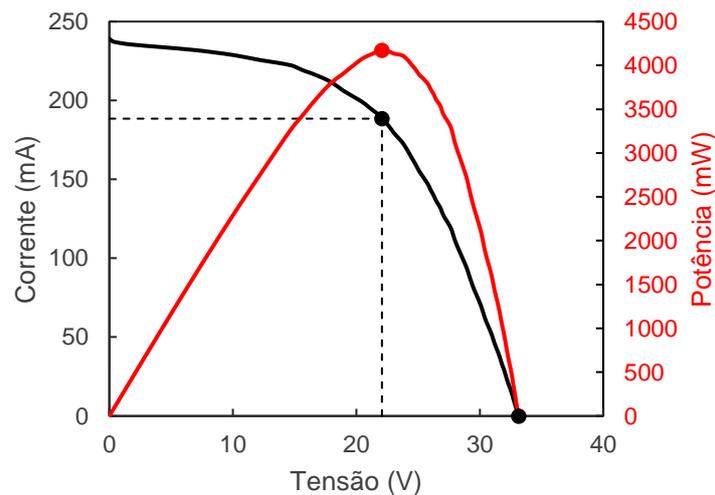


Figura 12 – Curva característica do painel de perovskita construído.

Observa-se que, em relação às medidas anteriores, houve uma pequena diminuição de todos os parâmetros, o que se justifica pelo segundo processo de laminação. Em relação ao valor médio de eficiência dos minimódulos produzidos, a queda total para o painel foi de 17%.

Tabela 3 - Parâmetros elétricos do painel fotovoltaico de perovskita construído.

Voc (V)	33,1
Isc (mA)	236,0
Jsc (mA/cm²)	17,6
FF (%)	53,3
PCE (%)	8,6
Vmax (V)	22,1
Imax (mA)	188,4
Pmax (W)	4,2

O painel também foi caracterizado por análise de EL, realizada no Laboratório Green – PUC-MG. A Fig. 13 mostra a imagem obtida no ensaio.

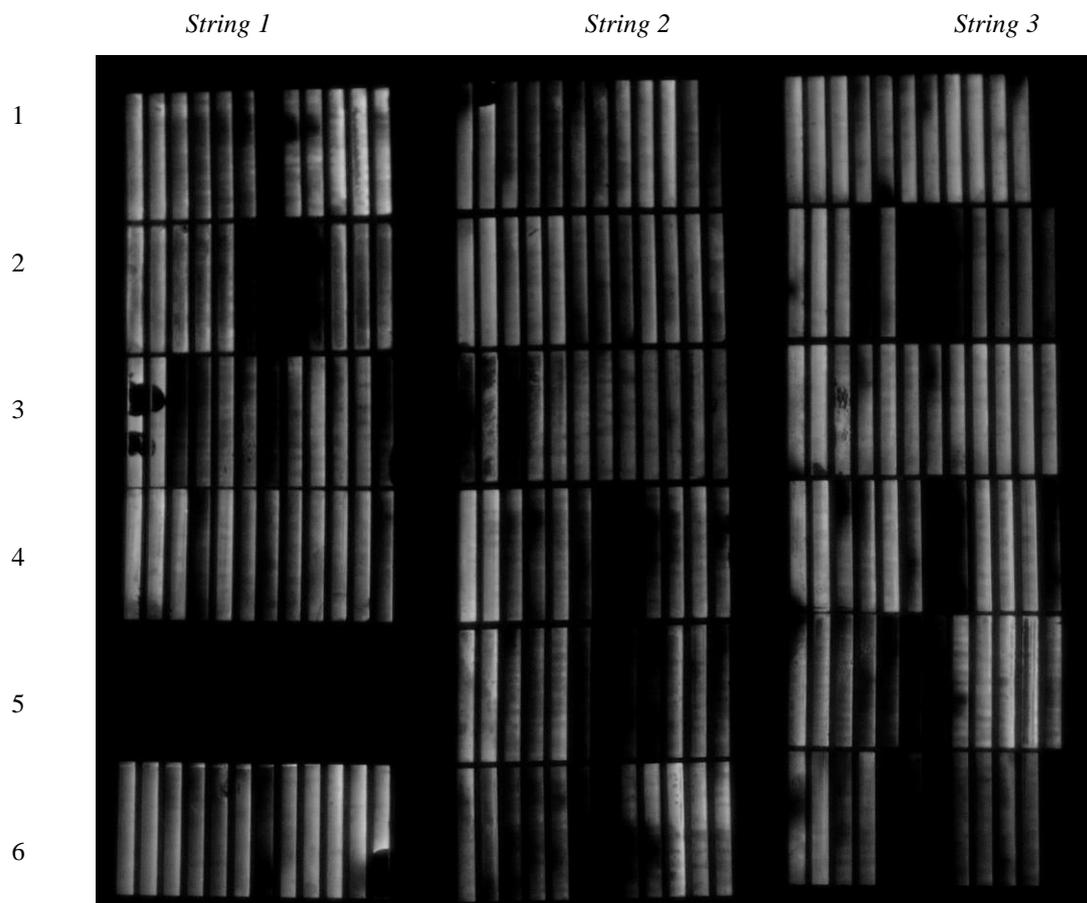


Figura 13 - Eletroluminescência do painel de perovskita.

Observa-se pela imagem que não há uniformidade entre os módulos que compõem o painel, apesar de eletricamente parecidos antes da montagem. Além disso, dentro dos próprios módulos há diferença entre as células. Para facilitar a análise, o módulo pode ser dividido entre *Strings* 1, 2 e 3, da esquerda para a direita, com módulos de 1 a 6 de baixo para cima.

Observa-se imediatamente que o módulo 5 da *String* 1 está completamente escuro. Não é possível afirmar que esse módulo não esteja funcionando, haja visto o valor de Voc obtido na medição IV. No entanto, por essa técnica é possível analisar de forma relativa as áreas com maior (áreas claras) e menor resposta (áreas escuras), e pode-se dizer que esse módulo apresenta desempenho muito inferior aos demais. Defeitos laterais observados nos módulos 3 e 6 da *String* 1 e no módulo 1 da *string* 2 parecem bem delimitados e reconhecíveis no painel pelo lado da prata, podendo ser conectados a uma quebra da camada de prata, reforçada ou causada pelo processo de laminação. Os módulos 2 da *String* 1, 4-5-6 da *String* 2 e 2-4-5-6 da *String* 3 apresentam de 2 a 4 células centrais com resposta baixa. Esse comportamento parece ser aleatório, mas em um número significativo de módulos, podendo estar conectado tanto ao processo de deposição quanto aos cortes P1, P2 ou P3 dos módulos.

De forma geral, a análise do painel foi importante para comprovar que a seleção dos módulos não deve ser realizada apenas pela resposta fotovoltaica. A partir da análise prévia dos módulos, seja por técnicas de EL ou LBIC (*light beam induced current*) é possível evitar o uso de módulos defeituosos que podem comprometer futuramente a estabilidade e o funcionamento do painel.

3.4 Ensaio em câmara climática

O teste em câmara climática foi feito de acordo com o protocolo ISOS-D-3 (Khenkin *et al.*, 2020), em 65 °C e 85% de umidade relativa. O painel foi removido periodicamente da câmara climática para medição em simulador solar. Na Fig. 14 é apresentada a evolução dos principais parâmetros fotovoltaicos ao longo do tempo.

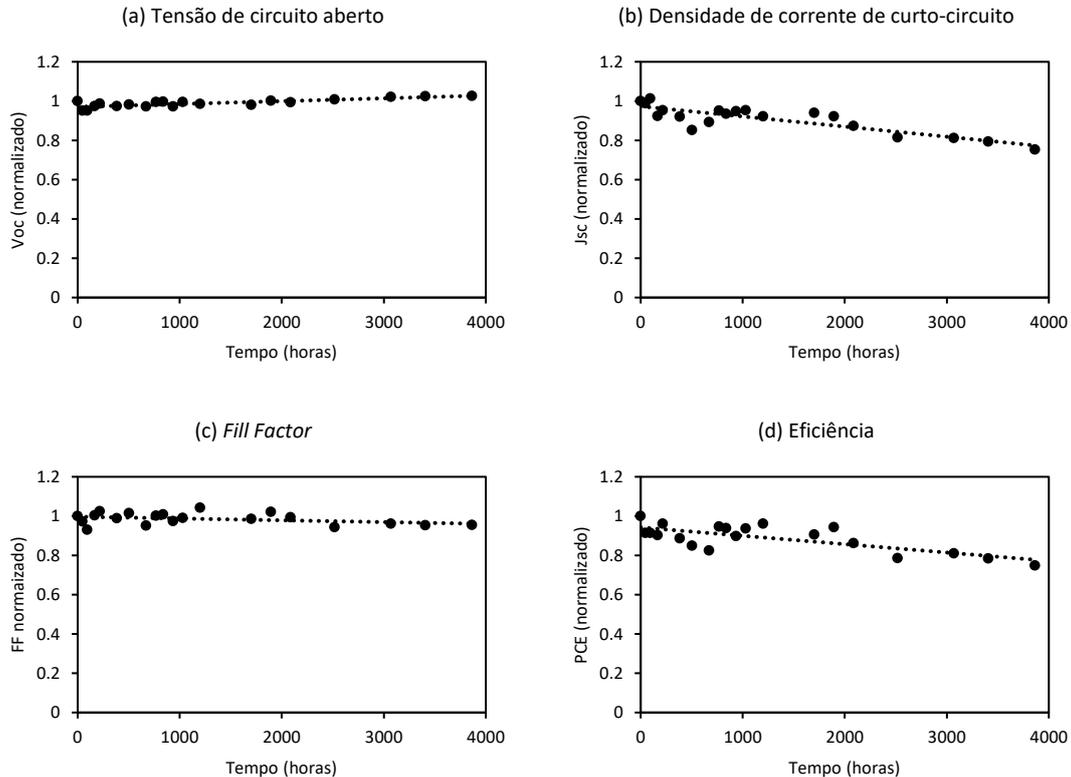


Figura 14 - Evolução dos parâmetros fotovoltaicos no teste em câmara climática: (a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF e (d) PCE.

Nas primeiras horas de teste, foram observadas pequenas variações nos parâmetros fotovoltaicos, mais significativas em relação à J_{sc} , mas também presente nas medidas de FF e V_{oc} . Essas variações são de diferentes naturezas, mas em geral ligadas ao sistema de medição e ao simulador solar empregado para as medidas. As pequenas variações de tensão podem ser atribuídas a diferenças de temperatura de medição, que não é controlada e que pode variar de uma medida para outra dependendo do tempo de exposição da amostra à luz antes da medida (escala de segundos). Variações de densidade de corrente podem ser atribuídas a medições realizadas em diferentes regiões do simulador solar, que, devido à extensão de 2.0 m e ao uso de 5 lâmpadas, não possui uniformidade ideal. Variações de FF podem ser atribuídas aos dois fatores anteriores, mas também à precisão mais baixa do traçador de curvas empregado (Prova 210).

Apesar das variações, observa-se que, pelas linhas de tendência, a degradação do painel testado é lenta, com V_{oc} e FF relativamente estáveis, mas com uma queda linear de J_{sc} . Os motivos da degradação pela corrente ainda precisam ser investigados, mas, de forma geral, é possível observar que o painel atinge 80% da eficiência inicial após 3000 h de teste. Esse resultado demonstra a eficiência dos materiais e do processo de encapsulamento empregado na construção do painel de perovskita. Para as tecnologias tradicionais, a norma (IEC-61215-1, 2016) exige a manutenção de 80% da eficiência por pelo menos 1000 h. Apesar de a temperatura de teste nesse caso ser de 85 °C, o resultado de 3000 h com 65 °C apresentado é bastante promissor, indicando que, com a adoção de estruturas intrinsecamente mais estáveis, é possível atingir os requisitos da norma com o mesmo processo de encapsulamento utilizado nesse trabalho.

4. CONCLUSÃO

A partir de minimódulos de 12 células, foi possível construir um painel fotovoltaico flexível de perovskita, combinando ligações em série e em paralelo. Considerando-se os desafios de impressão das camadas que compõem os dispositivos de perovskita, principalmente em relação ao processo de cristalização, essa forma de construção se mostra

vantajosa por permitir a escolha de regiões com maior qualidade de deposição, diminuindo a ocorrência de defeitos que podem prejudicar o funcionamento do painel. Além disso, a formação de *strings* por conexões em paralelo e posterior conexão das *strings* em série garante ainda mais flexibilidade nos valores de corrente e tensão de saída, permitindo uma maior customização do produto de acordo com a aplicação pela escolha do número de minimódulos e de *strings* usadas na montagem.

O painel construído apresentou eficiência de 8,6%, com perda de 17% em relação aos minimódulos iniciais, sendo a segunda laminação o processo que mais afetou o seu desempenho. Observou-se variações significativas entre os minimódulos e entre células de um mesmo minimódulo na análise de eletroluminescência, indicando a necessidade de seleção dos minimódulos não apenas pelos valores elétricos, mas por outras técnicas de imagem que permitem a identificação de falhas que podem prejudicar o funcionamento do painel. Por fim, os dois processos de laminação empregados se mostraram efetivos para a proteção do painel no teste em câmara climática, com mais de 3000 h acima de 80% da eficiência inicial. Estudos adicionais são necessários para aumentar a estabilidade intrínseca da perovskita, de forma a aumentar a estabilidade térmica de 65 para 85 °C e a estabilidade na luz, que ainda precisa ser avaliada ao nível de painel, com todas as suas interconexões envolvidas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Oninn e à equipe de eletrônica orgânica pelo suporte na realização do trabalho, à equipe da Sunew Filmes Fotovoltaicos Impressos SA pelo apoio na realização das medidas das *strings* e do painel e à CEMIG pelo financiamento dentro do Projeto ANEEL PD-04951-00660/2022: Interconexão de minimódulos de perovskita.

REFERÊNCIAS

- Atta, N. F., Galal, A. and El-Ads, E. H. (2016) ‘Perovskite Nanomaterials – Synthesis, Characterization, and Applications’, Perovskite Materials - Synthesis, Characterisation, Properties, and Applications. doi: 10.5772/61280.
- Basumatary, P. and Agarwal, P. (2022) ‘A short review on progress in perovskite solar cells’, Materials Research Bulletin, 149, p. 111700. doi: 10.1016/J.MATERRESBULL.2021.111700.
- Domanski, K. et al. (2016) ‘Not All That Glitters Is Gold: Metal-Migration-Induced Degradation in Perovskite Solar Cells’, ACS Nano, 10(6), pp. 6306–6314. doi: 10.1021/acsnano.6b02613.
- IEC-61215-1 (2016) Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval. Part 1: Test requirements. Geneva, Switzerland.
- Khenkin, M. V. et al. (2020) ‘Consensus statement for stability assessment and reporting for perovskite photovoltaics based on ISOS procedures’, Nature Energy, 5(1), pp. 35–49. doi: 10.1038/s41560-019-0529-5.
- Park, J. et al. (2023) ‘Controlled growth of perovskite layers with volatile alkylammonium chlorides’, Nature, 616(July 2022). doi: 10.1038/s41586-023-05825-y.
- Ritzer, D. B. et al. (2022) ‘Upscaling of perovskite solar modules: The synergy of fully evaporated layer fabrication and all-laser-scribed interconnections’, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 30(4), pp. 360–373. doi: 10.1002/pip.3489.
- Saliba, M. et al. (2018) ‘Perovskite Solar Cells: From the Atomic Level to Film Quality and Device Performance’, Angewandte Chemie - International Edition, 57(10), pp. 2554–2569. doi: 10.1002/anie.201703226.
- Seok, S. Il and Guo, T. F. (2020) ‘Halide perovskite materials and devices’, MRS Bulletin, 45(6), pp. 427–430. doi: 10.1557/mrs.2020.140.
- Zhou, D. et al. (2018) ‘Perovskite-Based Solar Cells: Materials, Methods, and Future Perspectives’, Journal of Nanomaterials, 2018. doi: 10.1155/2018/8148072.

BUILDING A PEROVSKITE PHOTOVOLTAIC PANEL

Abstract. Perovskite minimodules were manufactured by blade coating and evaporation processes to assemble a perovskite photovoltaic panel. The minimodules were grouped into 3 groups of 6 units and connected in parallel to form strings, which were laminated individually. The strings were then connected in series, forming a panel, which received a second lamination process. Modules, strings and the panel were electrically characterized by IV curves, demonstrating the viability of the process. The final panel constructed presented an efficiency of 8,6%, with a reduction of 17% in relation to the average performance of the minimodules used in the assembly. These losses are a result, of the lamination and sample handling processes. The electroluminescence analysis showed differences between the minimodules used and between cells of the same minimodules, despite similar initial electrical performance. In the temperature and humidity stability test (65 °C, 85% relative humidity), the panel showed promising results, maintaining 80% of performance after more than 3000 h of exposure.

Keywords: Perovskite, Perovskite solar panel, Photovoltaic energy