

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

Jaqueline Barbosa da Silva

**USO DE ACEITADORES NÃO-FULERENO COMO ETL (CAMADA
TRANSPORTADORA DE ELÉTRON) NA
CÉLULA DE PEROVSKITA**

Belo Horizonte

2025

Jaqueline Barbosa da Silva

**USO DE ACEITADORES NÃO-FULERENO COMO ETL (CAMADA
TRANSPORTADORA DE ELÉTRON) NA
CÉLULA DE PEROVSKITA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Química do Instituto de Ciências
Exatas, da Universidade Federal de
Minas Gerais, como requisito para a
obtenção do título de Bacharel em
Química Tecnológica.

Orientadora: Prof^a. Dra. Nelcy Della
Santina Mohallem

Co-orientador: Dr. Adriano dos
Santos Marques

Belo Horizonte

2025

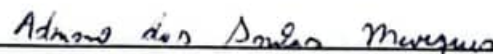
UFMG

COLEGIADO DE QUÍMICA
Instituto de Ciências Exatas
Fone: (031) 3409-5799/6386
E-mail: colgradqui@icex.ufmg.br

Ata da sessão de avaliação do Trabalho de Conclusão de Curso de graduação em Química Tecnológica da Universidade Federal de Minas Gerais, da aluna Jaqueline Barbosa da Silva, nº de registro 2019094279.

O Trabalho de Conclusão de Curso da aluna Jaqueline Barbosa da Silva, intitulado "Uso de aceitadores não-fulereno como etl (camada transportadora de elétron) na célula de perovskita", foi avaliado e aprovado pela Banca Examinadora constituída por Dr. Diego Bagnis (Oninn Centro de Inovações), Prof. Fabiano Vargas Pereira (DQ - UFMG), Dr. Adriano dos Santos Marques (Oninn Centro de Inovações), coorientador do trabalho de conclusão de curso, e Profa. Nelcy Della Santina Mohallem (DQ - UFMG), orientadora do trabalho de conclusão de curso, no dia 05 de dezembro de 2025.


Profa. Nelcy Della Santina Mohallem


Dr. Adriano dos Santos Marques


Dr. Diego Bagnis


Prof. Fabiano Vargas Pereira

Dario

Windmoller:40403696020

Assinado de forma digital por
Dario Windmoller:40403696020
Dados: 2025.12.11 18:44:32 -03'00'

Prof. Dario Windmöller / Profa. Dalva Ester Costa Ferreira
Coordenador / Vice coordenadora dos Cursos de Graduação em Química e Química Tecnológica
ICEx -UFMG

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, em especial à minha mãe, que por todo tempo tornou possível essa caminhada com seu apoio incondicional, força e amor.

Aos meus amigos, que estiveram sempre presentes pela companhia, incentivo, risadas e apoio nos dias mais difíceis tornando essa jornada mais leve.

Às minhas crianças, que com um jeitinho único trouxeram alegria e sentimento de esperança em um futuro mais bonito e inspirador.

À minha orientadora, pela disposição, paciência, dedicação e valiosas orientações que contribuíram de forma essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador, pelas contribuições, apoio, e pela disponibilidade em compartilhar conhecimento e experiência fundamentais para o desenvolvimento dessa pesquisa.

À Oninn por dispor de toda a infraestrutura necessária para a realização deste trabalho. A toda equipe de OE pela cumplicidade e aprendizados diários, deixo meu mais profundo e sincero agradecimento.

Agradeço também ao LCPNano - Laboratório de Caracterização e Processamento da Nanomateriais da UFMG que proporcionou o treinamento necessário para a realização autônoma das análises de microscopia de força atômica e microscopia eletrônica de varredura. A confiança, o suporte técnico e o ambiente colaborativo foram fundamentais para o meu aprendizado e para a parte de caracterização desta pesquisa.

RESUMO

Nos últimos anos, os dispositivos fotovoltaicos de perovskita vêm se mostrando uma tecnologia bastante promissora devido às suas vantagens tais como alta eficiência na conversão da energia solar em elétrica e ao seu baixo custo. Entretanto, estes dispositivos ainda apresentam alguns problemas que dificultam a sua adoção e comercialização, tais como dificuldades em certas etapas de fabricação e a estabilidade final do dispositivo. Uma das etapas com problemas a serem superados é a deposição da camada transportadora de elétrons (ETL), que tem grande importância para um bom funcionamento e desempenho dos dispositivos fotovoltaicos. O material tradicionalmente utilizado para este fim é um derivado do fulereno, o éster metílico do ácido fenil-C61-butírico (PCBM), que vem apresentando dificuldade de formação de um filme sobre a camada de perovskita. O presente trabalho se refere ao teste de aceitadores do tipo não-fulereno (*Non-Fullerene Acceptor* - NFA) como materiais transportadores de elétrons na célula de perovskita. Inicialmente avaliou-se o uso dos materiais não-fulerenos Y5 e Y6, além do fulereno PCBM, tanto isoladamente quanto em combinações dopadas. Os resultados indicaram que o Y5 apresentou baixo desempenho devido ao desalinhamento energético com a perovskita, enquanto o Y6 demonstrou melhor compatibilidade, embora com ganhos discretos de eficiência. As misturas com PCBM não resultaram em melhorias expressivas, indicando limitações na formação de filmes uniformes. Em seguida, foram aplicados tratamentos superficiais utilizando radiação UV, UV/O₃ e lâmpada de excímero, variando-se o tempo de exposição. Os filmes foram caracterizados por meio de microscopia ótica, microscopia de força atômica (AFM), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia ultravioleta-visível, e a espessura dos filmes foi medida utilizando perfilometro. As análises morfológicas por AFM e MEV mostraram que o tratamento com excímero altera significativamente a topografia da perovskita, aumentando a rugosidade e promovendo modificações estruturais mais intensas em exposições prolongadas. Em termos de desempenho, o tratamento foi favorável para as amostras com PCBM, enquanto não apresentou efeito positivo para o Y6. Assim, o estudo evidencia que o controle das condições de processamento e o ajuste das interfaces são fatores determinantes para a utilização dos NFA em dispositivos de perovskita.

Palavras-chave: Energia renovável. Célula solar. Perovskita. ETL. Não-fulereno.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	6
1 OBJETIVO	10
1.1 Objetivo geral	10
1.2 Objetivos específicos.....	10
2 REFERENCIAIS TEÓRICOS.....	11
2.1 Efeito fotovoltaico	11
2.2 Dispositivos fotovoltaicos.....	12
2.3 Células solares de perovskita	13
2.4 Princípio de funcionamento	15
2.5 Arquitetura dos dispositivos.....	16
2.6 ETM: materiais transportadores de elétrons	17
2.7 Métodos de deposição.....	20
2.8 Desempenho elétrico.....	24
3 METODOLOGIA	26
3.1 Materiais.....	26
3.2 Métodos.....	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5 CONCLUSÃO	50
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	52
REFERÊNCIAS.....	53

INTRODUÇÃO

Os combustíveis fósseis vem sendo a principal fonte de geração de energia para suprir a demanda da população mundial por todos esses anos. A queima dos combustíveis fósseis acarreta na deterioração do meio ambiente devido a liberação de gases causadores do efeito estufa (RAPHAEL et al., 2017). Para além da queima, o processo de extração do petróleo em si apresenta grandes riscos de danos uma vez que o vazamento do óleo causa contaminação de águas e solos afetando ecossistemas marinhos e terrestres, reduzindo a biodiversidade e qualidade de vida. Levando em conta o impacto ambiental e alto risco do não suprimento da demanda energética devido à escassez dos fósseis, encontrar novas fontes de energia é uma tarefa urgente para um mundo sustentável.

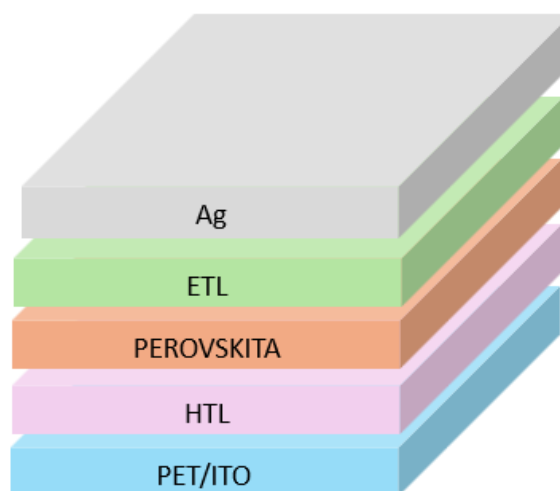
A energia solar se mostra uma ótima alternativa por ser uma fonte limpa e renovável, sua conversão em eletricidade por meio de células solares é uma abordagem promissora para lidar com a escassez de energia. Um ponto vantajoso é que a energia irradiada pelo Sol na Terra é cerca de 10.000 vezes superior à taxa de consumo energético humano, essa energia radiante é praticamente inesgotável. Outro ponto bem importante que a faz uma boa alternativa, é que a conversão energética realizada por uma célula fotovoltaica é considerada limpa e segura. (Wang; Xiao; Chen, 2014).

As células solares de perovskita (do inglês *Perovskite Solar Cells* - PSCs) vêm se destacando por se tratar de uma tecnologia que apresenta vantagens como alta eficiência na conversão da energia solar em elétrica, baixo custo e flexibilidade. Apresentam também propriedades físicas e optoeletrônicas que proporcionam eficiente condução de carga em células fotovoltaicas, além de ser possível de realizar sua deposição a partir de soluções, o que a torna promissora para fabricação através do método rolo-a-rolo (Chilvery et al., 2016). O fato de ter um elevado coeficiente de absorvidade molar faz com que a perovskita não necessite de uma camada muito espessa para performar bem, possibilitando o processamento de filmes finos, flexíveis e mais baratos.

A estrutura da PSC com configuração p-i-n é tida como invertida, e o empilhamento do dispositivo se inicia com um substrato contendo uma camada condutora seguido pela camada de HTL, logo após a camada ativa de perovskita, finalizando com a camada de ETL seguida do eletrodo de topo. Todas as camadas têm um papel fundamental para um bom funcionamento e desempenho do dispositivo. A camada transportadora de elétrons em particular, se encontra na interface superior da perovskita, para apresentar uma

boa eficiência na condução dos elétrons é necessário apresentar um bom alinhamento de band gap, mobilidade eletrônica e receptividade na interação.

Figura 1 – Ilustração da estrutura da PSC com configuração p-i-n



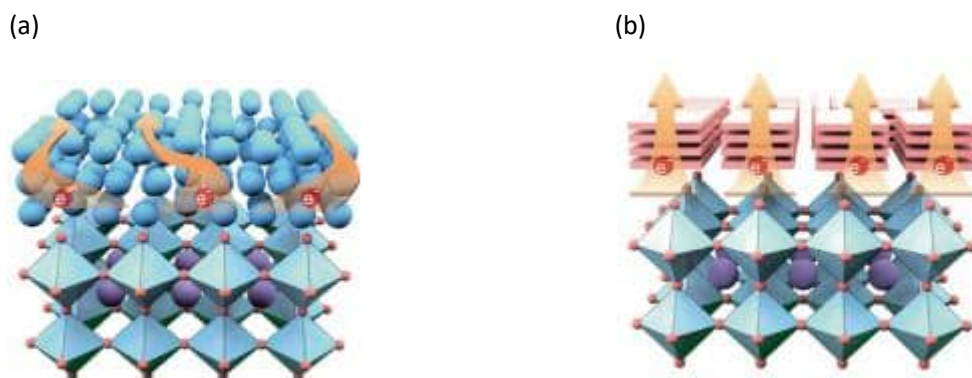
Fonte: próprio autor.

Os ETMs fulerenos (C60), foram essenciais para o desenvolvimento das PSCs, porém apresentam desvantagens críticas, destacadas por Said; De Wolf. (2025) como:

Baixa solubilidade, necessitando de deposição térmica a vácuo, e coalescência em derivados de maior peso molecular com propriedades eletrônicas alteradas após evaporação térmica prolongada. Além disso, estados ativos de recombinação podem ser induzidos na interface perovskita/C60. A funcionalidade limitada das moléculas C60 também dificulta sua capacidade de manter a estabilidade mecânica dos PSCs e dos tandems de perovskita/silício. Esses fatores prejudicam a escalabilidade industrial dos dispositivos de perovskita que dependem do C60 (Said; De Wolf, 2025).

Para lidar com as limitações citadas, aceptores não-fulereno (NFAs) foram desenvolvidos como alternativas potenciais. Uma vez que apresentam níveis de energia ajustáveis e empacotamento molecular aprimorado, podem apresentar grupos funcionais específicos, permitindo um transporte de elétrons mais eficiente e uma passivação superior. (Said; De Wolf, 2025).

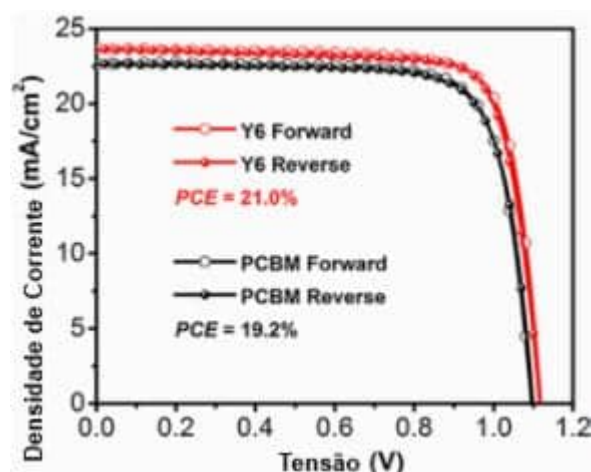
Figura 2 – Esquemas do caminho de transporte de elétrons



(a) No fullereno (b) No não fullereno.
Fonte: Said; De Wolf, 2025.

Os NFAs Y5 e Y6 são materiais de fácil acesso comercial, comumente utilizados em células solares orgânicas (OPV), e mais recentemente vem sendo testado como ETL nas PSCs produzidas pelo método de *spin coating* e alcançando bons resultados, como uma eficiência significativamente melhorada de 21,0% através da substituição do PCBM pelo Y6 (Figura 3). (Hu et al., 2020).

Figura 3 – Curva de densidade de corrente em função da tensão de circuito aberto



Fonte: Hu et al., 2020.

O avanço da tecnologia fotovoltaica baseada em perovskita depende diretamente da transição de métodos laboratoriais, como o *spin coating*, para técnicas escalonáveis e compatíveis com produção industrial, como o *blade-coating* e rolo-a-rolo. A técnica *spin coating* proporciona filmes altamente uniformes em pequenas áreas sob

condições controladas, ela não é viável para fabricação contínua ou de módulos de grande área. Em contraste, o blade coating permite deposição em áreas maiores e integra a transferência da tecnologia para um processamento em rolo-a-rolo. O emprego das técnicas de deposição escalonáveis, representa um passo essencial para aproximar a pesquisa em filmes de perovskita das condições reais de produção industrial. Ao permitir o controle de parâmetros críticos em áreas maiores e em ambiente, esses métodos oferecem um cenário mais realista do desempenho tecnológico quando comparado às técnicas tradicionais de laboratório, como o *spin coating*.

Portanto, este trabalho tem a proposta de utilizar esses materiais como transportadores de elétrons na célula de perovskita empregando as técnicas de deposição de slot-die rolo-a-rolo e *blade-coating* buscando condições de processamento escalonáveis contribuindo para a compreensão dos desafios e potencialidades associados à transição da tecnologia para rotas de fabricação escalonáveis e comparar a performance do Y5 e Y6 com a do PCBM de forma a constatar a superioridade frente ao fulereno no desempenho do dispositivo fotovoltaico.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho de aceitadores não-fulereno como materiais transportadores de elétrons na célula de perovskita.

1.2 Objetivos Específicos

- Utilizar as técnicas de deposição de rolo a rolo e *blade-coating*, visando adequar a tecnologia para um processo escalonável.
- Investigar condições de deposição dos materiais não-fulereno, como concentração, velocidade de deposição e *annealing*.
- Caracterizar as camadas e os dispositivos fotovoltaicos fabricados.
- Comparar o desempenho dos materiais nas condições mais promissoras frente ao PCBM.

2 REFERENCIAIS TEÓRICOS

2.1 Efeito Fotovoltaico

O uso direto da energia solar pode ser feito pela transformação da luz solar em eletricidade através do efeito fotovoltaico. Este fenômeno teve sua descoberta atribuída ao físico francês Alexandre Edmond Becquerel, em 1839, durante seus experimentos com eletrodos metálicos e eletrólitos, Becquerel observou que a condutividade aumentava com o aumento da quantidade de luz (Dixit et al., 2023).

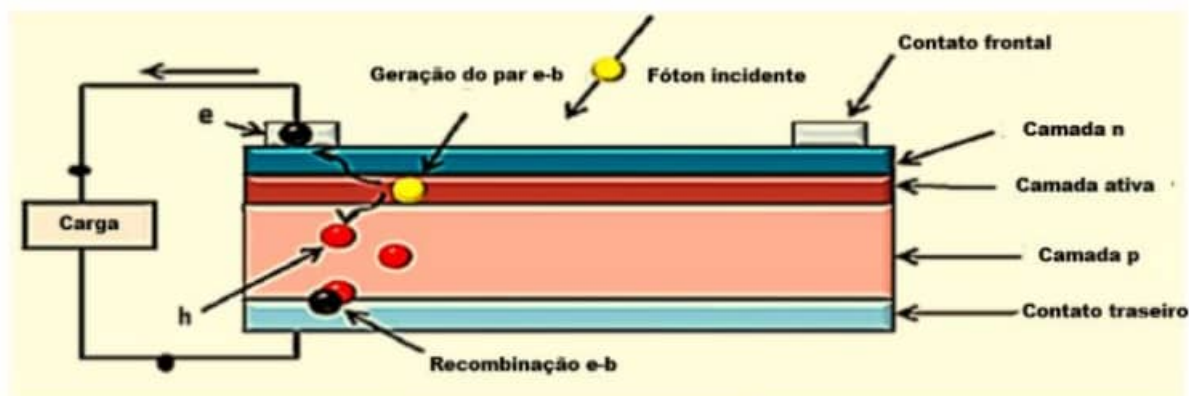
No ano de 1873 Willoughby Smith descobriu que o selênio possui propriedades fotovoltaicas. Já em 1877, Adams e o seu aluno Richard Day projetaram e desenvolveram a primeira célula solar, utilizando selênio, que alcançou uma eficiência de 0,5% (Marques Lameirinhas; Torres; De Melo Cunha, 2022). Isso possibilitou que em 1883 Charles Fritts construísse a primeira bateria solar com folhas de selênio, alcançando 1% de eficiência, o que ganhou uma repercussão notória por se tratar de geração de energia sem que houvesse a queima de combustíveis (Raphael et al., 2017).

Em 1905 Albert Einstein explicou o efeito fotoelétrico, que está intimamente relacionado ao efeito fotovoltaico, e é descrito por DIXIT et al (2023) como um fenômeno que ocorre quando um material absorve luz em uma frequência acima de um limiar, que varia com a substância, em que elétrons são liberados.

Para que o efeito fotovoltaico ocorra é necessário primeiramente que haja absorção de fótons pelo material fotoativo que compõe a camada ativa, levando à geração de portadores de carga (pares elétron-buraco). Quando um fóton com energia ($E = h\nu$) superior à energia de gap (E_g) do material, essa energia é suficiente para promover um elétron da banda de valência (E_v) para a banda de condução (E_c), deixando um buraco no nível de valência. O excesso de energia do fóton ($h\nu - h\nu_0$), sendo " $h\nu_0$ " a energia mínima necessária para gerar o par elétron-buraco, é convertido em energia cinética adicional do elétron ou do buraco e, posteriormente, dissipado como calor no semicondutor. Em seguida, os portadores de carga gerados pela luz são separados. Em um circuito solar externo, os buracos podem fluir para longe do material fotoativo por meio da camada p, e os elétrons podem fluir através da camada n e passar pelo circuito antes de se recombinarem com os buracos. Por fim, os elétrons separados são usados para acionar um circuito elétrico e

depois de passar por este circuito, os elétrons se recombinam com os buracos. (Al-Ezzi; Ansari, 2022).

Figura 4 – Ilustração do efeito fotovoltaico em uma célula fotovoltaica



Fonte: Al-Ezzi; Ansari, 2022.

2.2 Dispositivos Fotovoltaicos

As células fotovoltaicas funcionam por meio da conversão da energia dos fótons incidentes diretamente em eletricidade. A conversão de energia se dá por uma diferença de potencial elétrica (ddp) estabelecida nas extremidades dos contatos metálicos, por meio da incidência de luz sobre o material semiconductor (Sze; Ng, 2007).

As tecnologias existentes de desenvolvimento desses dispositivos vêm evoluindo ao longo dos anos e são classificadas em três gerações com base no material utilizado, eficiência e custo de produção.

A primeira geração é constituída por células solares baseados em silício monocristalino que apresentam alta eficiência e maior vida útil, mas despendem de um alto consumo de energia, elevada pureza dos materiais e, portanto, apresenta alto custo. As células de silício policristalino que tem uma série de cristais acoplados e fundidos possuem uma eficiência de conversão de energia menor do que as monocristalinas (Suthar et al., 2022).

A segunda geração é caracterizada por filmes finos que possuem baixo custo de produção e consumo mínimo de material. Segundo SUTHAR et al. (2022) essa classe se divide em três tipos: a) Células solares de silício amorfo (a-Si) possuem menor eficiência e

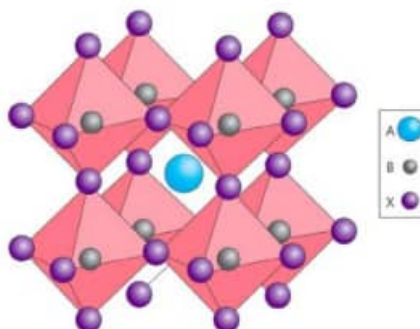
estabilidade comparada com as de silício cristalino, e em contrapartida apresentam baixo custo de fabricação, grande potencial, produção em larga escala e peso leve. b) Células solares de telureto de cádmio (CdTe) apresentam uma eficiência maior que as de (a-Si), estabilidade térmica e química, com aplicações em larga escala e menor custo de eletricidade por watt. c) Células solares de diseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) possuem eficiência similar as de (CdTe) e durabilidade semelhante à das células solares de silício.

A terceira geração emerge com a missão de superar as limitações das gerações anteriores, é caracterizada por inovações no design dos dispositivos e na engenharia de interfaces, englobando tecnologias promissoras como: a) Células solares sensibilizadas por corante (DSSCs) são compostas por um eletrodo de trabalho (geralmente TiO_2), corante sensibilizador, eletrólito e contra eletrodo, são transparentes e de baixo custo, mas possuem eficiência baixa. b) Células solares orgânicas (OPVs) utilizam polímeros orgânicos para absorver luz, se destacam pela flexibilidade, semi-transparência e possibilidade de ter diferentes colorações. Apesar de progressos significativos, ainda enfrentam desafios de estabilidade, custo e eficiência inferiores aos do silício. d) Células solares de perovskita (PSCs) consistem em um material com a estrutura do tipo perovskita (ABX_3) como camada ativa. São o destaque desta geração em termos de eficiência, rivalizando com o silício, e suas principais vantagens incluem o baixo custo de produção, flexibilidade e leveza. (Suthar et al., 2022).

2.3 Células solares de perovskita

A Perovskita é o nome dado ao mineral titanato de cálcio (CaTiO_3), que recebeu esse nome em homenagem ao mineralogista russo Lev Alexeievich Perovski. Este mineral possui uma estrutura cristalina do tipo ABX_3 , formada por octaedros, com o cátion B situado no centro do octaedro e o ânion X se encontra em cada um dos vértices. A junção de 8 octaedros forma uma vacância no centro, onde fica localizado o cátion A, de maior volume. (Mahapatra et al., 2022). Como esta estrutura cristalina foi observada primeiramente no mineral e posteriormente verificou-se que outros materiais poderiam adotar a mesma estrutura, denominou-se esse arranjo cristalográfico de estrutura tipo Perovskita.

Figura 5 - Estrutura cristalina típica de perovskita



Fonte: CHILVERY, 2016.

Para as perovskitas utilizadas em células solares, o cátion monovalente (A) pode ser constituído por moléculas de metilamônio (CH_3NH_3^+ , abreviado como MA^+), formamidínio ($\text{CH}(\text{NH}_2)_2^+$ abreviado como FA^+), cézio (Cs^+) e rubídio Rb (Rb^+), B é dado por um cátion metálico bivalente, sendo eles chumbo (Pb^{2+}), estanho (Sn^{2+}) e germânio (Ge^{2+}), e os haletos iodo (I^-), bromo (Br^-) e cloro (Cl^-) podem representar o X da estrutura.

Em 2009 pela primeira vez foi criada uma célula solar utilizando perovskita por Miyasaka et al., em que o iodeto de metilamônio e chumbo (MAPbI_3) foi empregado como um sensibilizador em uma célula solar sensibilizada por corante, atingindo uma eficiência de 3,8%. (Kojima et al., 2009). Com o passar dos anos a tecnologia foi submetida a otimizações de deposição e configuração do dispositivo, e em um pouco mais de 10 anos depois, essas células ultrapassaram valores de eficiência de 25% (NREL Best Research-Cell Efficiency Chart).

A PSC de MAPbI_3 é comumente mais estudada, por apresentar propriedades vantajosas para aplicação em optoeletrônica, entretanto possui problemas, como baixa estabilidade térmica e *band gap* mais amplo (1,55 eV). Já as perovskitas de iodeto de chumbo e formamidínio (FAPbI_3) apresentam maior estabilidade térmica e um *band gap* mais ideal de 1,48 eV. A FAPbI_3 possui comprimentos de difusão de elétrons e buracos suficientemente longos para permitir o transporte eficiente das cargas elétricas, tornando as células solares de heterojunção planar uma configuração adequada para seu uso. Além disso, resultados recentes mostram que essa estrutura possui excelente potencial para o desenvolvimento de PSCs eficientes. (Zheng et al., 2022).

Apesar do alto potencial de eficiência, as PSCs ainda enfrentam limitações críticas de estabilidade: a exposição à luz, calor, umidade e oxigênio levam a interações que podem induzir reações químicas com potencial para causar degradação irreversível

(Dunfield et al., 2020). Unido a esses fatores, a toxicidade do chumbo na perovskita, também é um limitante para a aplicação comercial dessas células. (Fazal; Rubaiee, 2023). Isso reforça a necessidade de estudos contínuos voltados ao avanço tecnológico, incluindo o desenvolvimento de composições alternativas e estratégias que superem essas limitações.

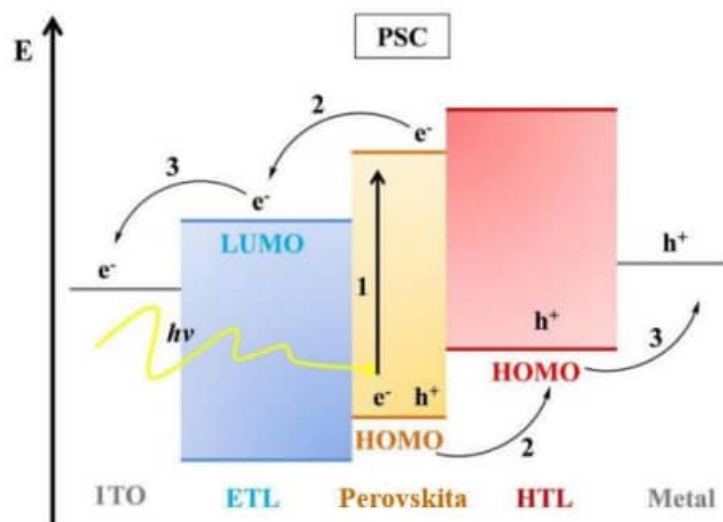
2.4 Princípio de funcionamento

As células solares que utilizam a estrutura perovskita como camada ativa absorvedora de luz tem o funcionamento dividido em três partes principais, como descrito por Hussain et al. (2018):

(1) absorção de fótons seguida pela geração de carga livre, (2) transporte de carga e (3) extração de carga. Quando a luz solar incide sobre uma PSC, a perovskita absorve luz, éxcitons são gerados e portadores de carga (elétrons e lacunas) são produzidos após a dissociação do éxciton. A dissociação do éxciton ocorre na interface entre a camada de perovskita e a camada transportadora de carga. Quando o elétron é separado da lacuna e injetado na camada transportadora de elétrons (ETL), ele migra para o ânodo, que na maioria dos casos é vidro de óxido de estanho dopado com flúor (FTO). Simultaneamente, a lacuna é injetada na camada transportadora de lacunas (HTL) e subsequentemente migra para o cátodo (geralmente metal). Os elétrons e lacunas são coletados pelos eletrodos de trabalho e contra-eletrodos, respectivamente, e transportados para o circuito externo para produzir corrente (Hussain et al., 2018).

Assim quando o composto absorve luz, um elétron é excitado do orbital molecular ocupado mais alto (HOMO, do inglês *Highest Occupied Molecular Orbital*) para o orbital molecular desocupado mais baixo (LUMO, do inglês *Lowest Unoccupied Molecular Orbital*). (Marinova; Valero; Delgado, 2017). Isso pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Diagrama de funcionamento da célula solar de perovskita



Fonte: adaptado de HUSSAIN et al., 2018.

2.5 Arquitetura dos dispositivos

Para a avaliação do desempenho desses dispositivos a configuração deles é de extrema importância. Segundo Hussain et al. (2018) as PSCs podem ser classificadas como estruturas regulares (n-i-p) e invertidas (p-i-n), dependendo se o primeiro material no caminho da luz incidente é o transportador de elétrons ou buracos. Essas duas estruturas podem ser subdivididas em mesoporosas e planares. A estrutura mesoporosa incorpora uma camada porosa na célula, enquanto a estrutura planar irá consistir em todas as camadas planares.

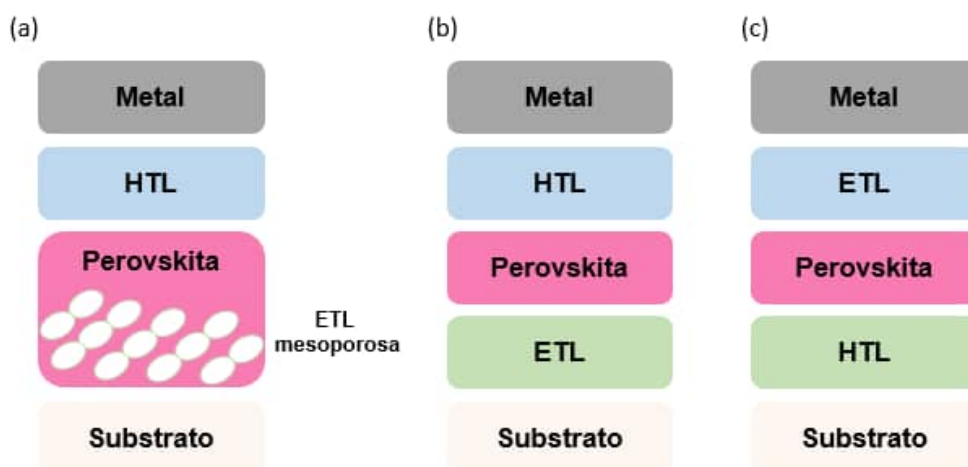
A primeira estrutura arquitetônica da célula de perovskita foi a mesoporosa n-i-p convencional. A construção do dispositivo se inicia com um substrato transparente onde é depositada a camada transportadora de elétrons que atua como uma matriz porosa em nanoescala oferecendo uma maior área de contato com a camada seguinte que é a de perovskita. Em sequência ocorre a deposição da camada transportadora de buracos, finalizando com o eletrodo metálico no topo.

Com os avanços através de pesquisas nesse campo outras configurações estruturais foram desenvolvidas, resultando nas arquiteturas planares que são evoluções da estrutura mesoporosa. A planar n-i-p é constituída de uma camada ETL depositada sobre o substrato condutor transparente, sucedida pela deposição da camada de perovskita, da camada de HTL finalizando com barramento de topo, um eletrodo metálico. Nesse caso,

diferente da mesoporosa, a camada de ETL é fina e compacta constituída de óxidos sem orifícios.(Zhang et al., 2023).

A arquitetura planar p-i-n é tida como invertida, ou seja, a camada HTL é depositada primeiro sobre o substrato condutor, seguida pela camada de perovskita, pela camada compacta de ETL e por fim o eletrodo metálico.

Figura 7 – Arquiteturas das células solares de perovskita



(a) Mesoporosa n-i-p; (b) Planar n-i-p; (c) Planar p-i-n.
Fonte: próprio autor.

2.6 ETM: materiais transportadores de elétrons

Um material transportador de elétrons (ETM, do inglês *Electron Transport Material*) atua de forma a transferir os elétrons de forma eficiente para o eletrodo, e para isso deve apresentar boa mobilidade eletrônica, *band gap* amplo e níveis de energia compatíveis para uma transferência eficiente de elétrons. Além disso, deve possuir boa qualidade antirreflexo e formar uma camada morfologicamente uniforme, compacta e sem orifícios para evitar o contato direto entre a camada de perovskita com o substrato condutor transparente. (Mahapatra et al., 2022).

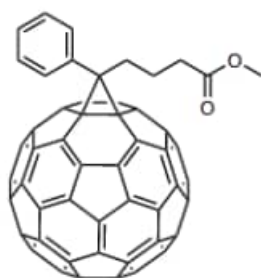
Os ETMs utilizados em células solares de perovskita podem ser orgânicos que são normalmente usados na arquitetura invertida ou inorgânicos usados na arquitetura de dispositivos regulares. O dióxido de titânio (TiO₂) é o ETM inorgânico mais empregado em arquiteturas convencionais do tipo n-i-p, devido às suas boas propriedades de transporte eletrônico e resistência química, entretanto, seu processo tradicional de sinterização requer

altas temperaturas (acima de 450 °C) inviabilizando seu uso junto a materiais e arquiteturas sensíveis ao calor.

O óxido de zinco (ZnO) e o óxido de estanho (SnO₂) têm recebido destaque pois em comparação TiO₂ possuem a possibilidade de processamento em baixas temperaturas e maior mobilidade eletrônica. O ZnO apresenta boa condutividade e transparência, entretanto, apresenta instabilidade química, prejudicando a durabilidade e comercialização a longo prazo das PSCs. Já o SnO₂ foi avaliado como material mais promissor para arquiteturas eficientes e duráveis de células solares de perovskita devido sua alta mobilidade eletrônica, baixa recombinação e maior estabilidade.(Hussain et al., 2018).

Nas PSCs de arquitetura invertida, materiais orgânicos do tipo n comumente utilizados são os fulerenos C60 e seus derivados. Destacam-se devido ao seu bom alinhamento de bandas, alta mobilidade eletrônica e compatibilidade com processos de deposição em solução a baixa temperatura. Entre os derivados, o PCBM (éster metílico do ácido [6,6]-fenil-C61-butírico) é o material mais amplamente utilizado, caracterizando-se pela sua alta condutividade elétrica e eficiente capacidade de extinção da fotoluminescência da perovskita, o que indica uma transferência de carga otimizada (Hussain et al., 2018). Apesar da boa afinidade eletrônica, esses materiais ainda enfrentam limitações de mobilidade eletrônica e podem sofrer degradação sob luz e umidade, limitando sua estabilidade.

Figura 8 – Estrutura molecular do PCBM



Fonte: (Said; De Wolf, 2025)

Aceitadores não-fulereno (NFAs), comumente utilizados em energia fotovoltaica orgânica, representam uma alternativa promissora aos ETLs baseados em fulereno devido à sua viabilidade de modificação estrutural e excelentes propriedades eletrônicas. (Huang et al., 2025).

Como exemplo de NFAs temos o Y5 e Y6 que pertencem a série Y, uma nova classe de aceitadores não-fulerenos de alto desempenho. O desempenho superior dos NFAs da série Y pode ser atribuído principalmente ao seu empacotamento molecular mais

ordenado e à maior eficiência eletroluminescente, resultando em maior eficiência quântica para fotocorrentes mais altas e menor perda de energia para tensões mais altas (Li et al., 2020).

Figura 9 – Estruturas das moléculas do Y5 e do Y6



Fonte: (Li et al., 2020)

Em Huang et al. (2025) as vantagens significativas para esses NFAs como candidatos a transportadores de elétrons em PSCs p-i-n são as seguintes:

- (1) compatibilidade com o processamento de solução para formar filmes densos e homogêneos; (2) mobilidade eletrônica adequada e níveis de energia ajustáveis que se alinham bem com a camada de perovskita; (3) passivação efetiva de defeitos pela presença de heteroátomos; e (4) um equilíbrio entre agregação robusta e morfologia suave, obtido por meio de modificações estruturais apropriadas. (Huang et al., 2025).

A estrutura molecular do tipo A-D-A (aceptor-doador-aceptor) das moléculas Y-series, a substituição de heteroátomos e a variação das cadeias laterais, contribuem para melhor acoplamento eletrônico com a camada ativa, favorecendo o transporte de elétrons e reduzindo a recombinação de cargas. Assim, o alinhamento energético que pode ser observado na Figura 10 reforça o potencial dos NFAs, especialmente o Y6, como materiais de transporte eletrônico mais eficientes em comparação ao derivado de fulereno.

Figura 10 – Gráfico de nível energético dos ETMs em relação à perovskita



Fonte: próprio autor.

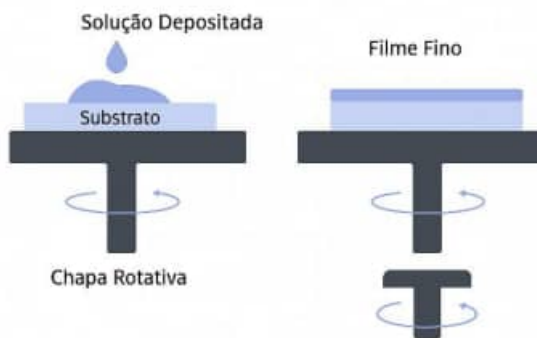
2.7 Métodos de deposição

A qualidade de um dispositivo fotovoltaico de perovskita está diretamente relacionada com a morfologia do filme, que por sua vez é dependente das técnicas de deposição utilizadas na fabricação do dispositivo.

Spin coating é a técnica de deposição mais utilizada em pesquisas com dispositivos de pequena área, altamente versátil quanto aos tipos de tintas que podem ser utilizadas e permite fácil controle da espessura da deposição. A técnica consiste em depositar a tinta sobre o substrato e girá-lo rapidamente, criando uma camada uniforme pela força centrífuga. A espessura da camada depende da velocidade e do tempo de rotação, bem como da viscosidade e concentração da tinta, exigindo muitas vezes curvas de calibração para otimização.

Como vantagens, apresenta secagem rápida induzida pela turbulência da amostra em rotação e possibilidade de aplicação de antissolventes, além de ser uma técnica que reduz a formação de defeitos nos filmes depositados. Contudo, o baixo aproveitamento do material — com mais de 98% de desperdício em uma deposição típica de perovskita — e a limitação com relação à dimensão do substrato utilizado tornam o método inviável para uso industrial em larga escala. Ainda assim, é amplamente usado em pesquisa devido ao baixo custo do equipamento e facilidade de utilização da técnica. (Agresti et al., 2024).

Figura 11 – Ilustração de deposição utilizando a técnica *spin coater*

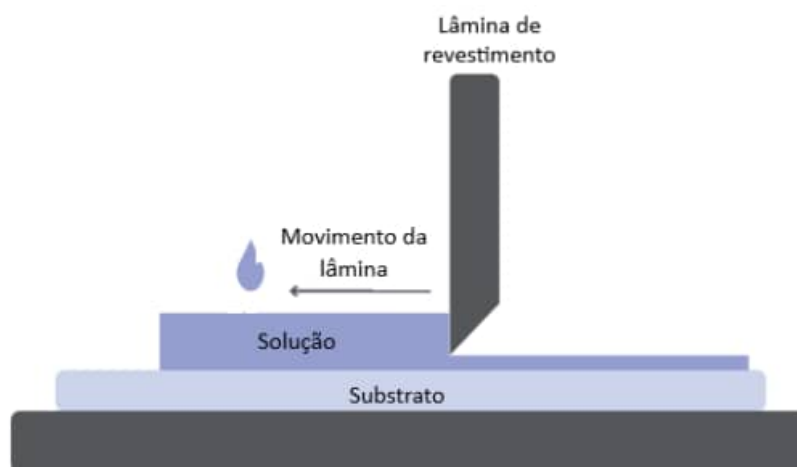


Fonte: adaptado de Ossila, 2025.

A técnica de *Blade-coating* representa um passo inicial importante rumo à fabricação de filmes finos em escala industrial. Nessa técnica, uma lâmina é posicionada a uma altura do substrato, sobre a qual a tinta é depositada e espalhada enquanto a lâmina se move a uma velocidade definida, formando um filme úmido. A espessura depende de fatores como altura da lâmina, em relação ao substrato, velocidade de deslocamento, além de propriedades inerentes da tinta como viscosidade e energia superficial dos materiais envolvidos.

Embora o processo possa gerar variações de espessura ao longo do revestimento, trata-se de um método simples, acessível e versátil, ideal para uma triagem rápida de várias formulações de tintas e uma troca fácil de uma camada para a outra. Além disso, permite ajustar parâmetros térmicos durante o revestimento, sendo útil para filmes de perovskita processados a quente e para o desenvolvimento de métodos de secagem e recozimento que podem ser facilmente transferidos para técnicas industriais (Agresti et al., 2024).

Figura 12 – Ilustração de deposição pelo método de *Blade-coating*



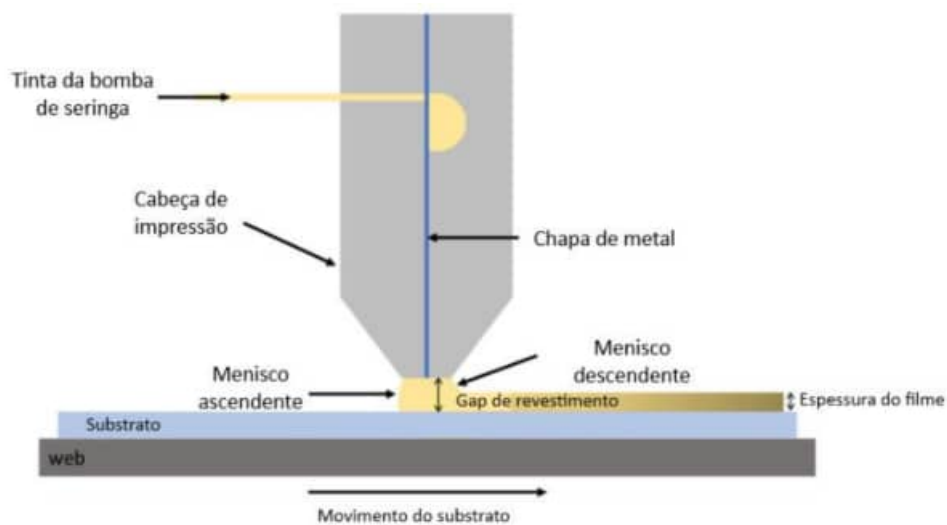
Fonte: adaptado de Ossila, 2025.

O método de fabricação por rolo-a-rolo (do inglês *roll-to-roll*, R2R) baseado em processamento por solução é amplamente utilizado na produção industrial em larga escala de uma variedade de produtos. Ele se destaca em relação a outras abordagens por permitir uma produção contínua e de alto rendimento. Embora o sistema também possa integrar métodos a vácuo, esses processos tendem a aumentar o custo e a complexidade de fabricação, em comparação com as técnicas baseadas em solução.

O sistema rolo-a-rolo é composto por um desenrolador, alinhador do substrato, rolo dosador de tensão, alimentador, pré-aquecedor, fornos, sistema de saída e enrolador. Para obter camadas ativas de alta qualidade em células solares de perovskita flexíveis, é fundamental otimizar tanto os parâmetros mecânicos (como o controle de tração, velocidade e excentricidade dos rolos) quanto os parâmetros da solução, incluindo viscosidade e cinética de cristalização.

Também é integrado ao sistema rolo-a-rolo a cabeça de impressão (do inglês *slot-die*). Durante o processo de deposição, a cabeça de impressão é posicionada próximo ao substrato e, em seguida, a tinta é bombeada para o cabeçote usando uma bomba de seringa. A tinta é então liberada através de uma pequena fenda ao longo do comprimento da cabeça de impressão (Figura 13). O menisco a ascendente desloca o gás na linha de contato móvel, enquanto o menisco a descendente cria a película úmida depositada. A tinta forma uma ponte entre a cabeça de impressão e o substrato, resultando na gota de revestimento e no menisco.

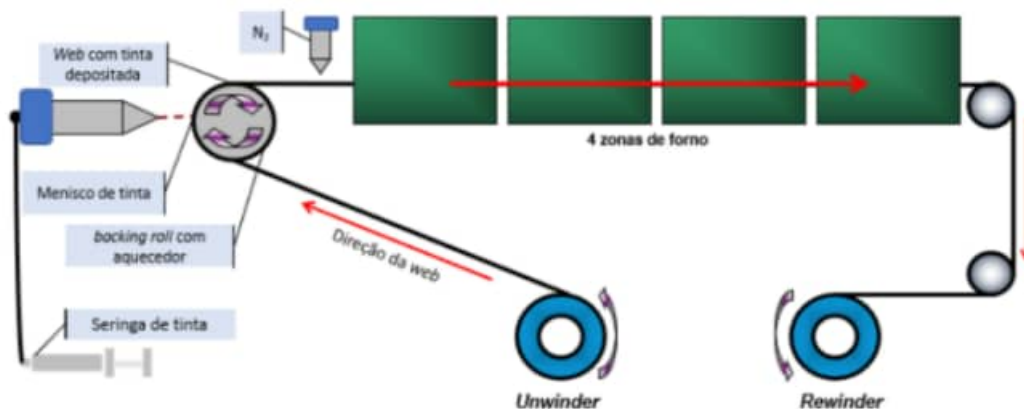
Figura 13 – Ilustração do processo de revestimento slot die coating no método rolo-a-rolo



Fonte: adaptado de Duarte; Andrade, 2024

A espessura das camadas do dispositivo pode ser ajustada por meio das condições de operação do sistema, sendo essencial manter a estabilidade do fluxo de tinta e da velocidade dos rolos. A tensão aplicada ao substrato também influencia a interação entre a superfície e a solução depositada, afetando diretamente a qualidade da camada e sua espessura. Além disso, o tempo e a eficiência da secagem dependem da velocidade do rolo e do comprimento da seção de secagem, devendo-se considerar a temperatura limite de deformação do substrato. Dessa forma, os parâmetros de processamento e o tipo de substrato desempenham papel crucial no desempenho e na estabilidade final das células solares produzidas por esse método. (Benitez-Rodriguez et al., 2021)

Figura 14 – Ilustração da estrutura de deposição do método rolo-a-rolo



Fonte: próprio autor.

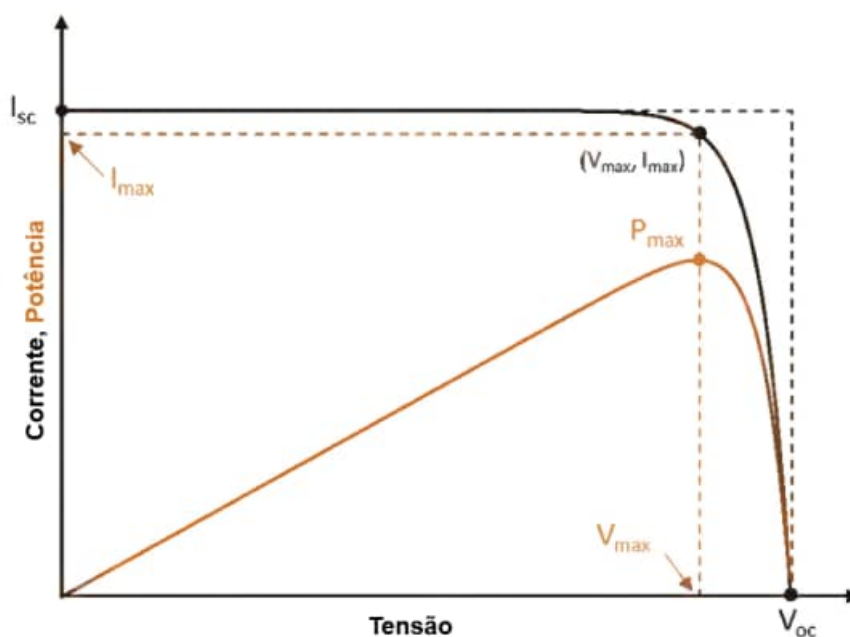
2.8 Desempenho elétrico

O método típico de avaliação do desempenho elétrico das células solares, é através da curva corrente–tensão ($I \times V$). Nesta medida, realiza-se uma varredura de tensão da célula, medindo a corrente gerada em cada ponto com o dispositivo sob iluminação constante de 1 sol (1000 W/m^2). São utilizando simuladores solares com uma lâmpada de xenônio como fonte luminosa em conjunto com filtros AM 1.5G, de forma a se obter um espectro semelhante ao solar.

A partir dessa curva, são extraídos os parâmetros fundamentais de desempenho do dispositivo: corrente de curto-circuito (I_{sc}), densidade de corrente (J_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), fator de preenchimento (do inglês *Fill Factor* - FF) e eficiência de conversão de energia (PCE).

Além desses, também se obtêm resistência em série (R_s) e resistência de shunt ou paralela (R_{sh}), associadas respectivamente às perdas de transporte de carga e às correntes de fuga internas. O ponto de máxima potência (MPP) é o ponto da curva em que o produto $V \times I$ é máximo, representando a condição ideal de operação de um sistema fotovoltaico. (Nisato; Lupo; Ganz, 2024)

Figura 15 – Representação da curva $I \times V$ típica das células solares



Fonte: adaptado de Nisato; Lupo; Ganz, 2024.

O V_{oc} corresponde à tensão máxima de uma célula solar quando o circuito está aberto e não há corrente circulando no sistema. Ela representa a polarização interna da célula solar e é fortemente dependente do *band gap* do material. Já o I_{sc} é a corrente máxima em curto-circuito e depende do tipo de material absorvedor, da intensidade luminosa e da área ativa da célula e por isso, ao comparar diferentes células solares utiliza-se a densidade de corrente (J_{sc}).

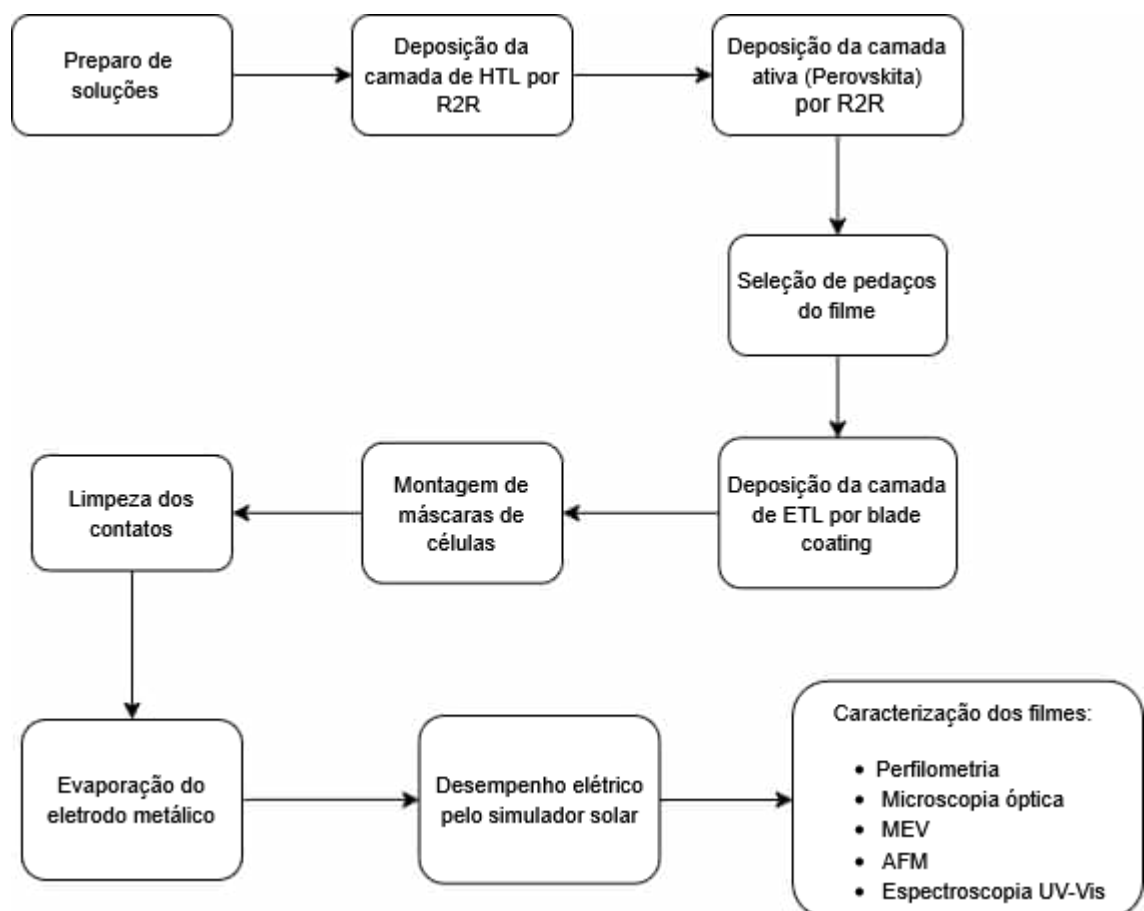
O FF mede a quadratura da curva $I \times V$, indicando a quão próxima ela está da idealidade. Matematicamente, é a razão entre o produto $V_{max} \times I_{max}$ (no seu ponto de operação) e $V_{oc} \times I_{sc}$ (valores máximos de tensão e corrente). A forma da curva e o valor de FF são diretamente afetados pelas resistências em série que está relacionada às perdas no transporte de carga através das diferentes camadas e interfaces e paralela que representa as perdas de corrente através de caminhos alternativos, como defeitos de fabricação, que reduzem a corrente de saída e a tensão da célula solar. (Nisato; Lupo; Ganz, 2024).

3 PARTE EXPERIMENTAL

Para a realização deste trabalho, foram utilizados substratos flexíveis, revestidos com óxido condutor ITO (óxido de estanho e índio) para a produção dos dispositivos. Cada dispositivo contém 8 células diferentes com área de 0,55 cm².

Os dispositivos foram produzidos nos laboratórios da Oninn e o processo de fabricação seguiu as etapas descritas no fluxograma abaixo.

Figura 16 – Fluxograma do processo de produção dos dispositivos



Fonte: Próprio autor.

3.1 Materiais

- Substrato à base de PET recoberto com ITO (óxido de estanho e índio) que o torna condutor.

- Formulação da camada HTL preparada em ambiente inerte e com solvente à base de álcoois.
- Formulação da camada de Perovskita preparada em ambiente inerte e com solvente à base de DMSO (dimetilsulfóxido).
- Solução de Y5 e Y6, solubilizadas em o-xileno.
- Eletrodo metálico – Prata (Ag).

3.2 Métodos

Para cada uma das camadas utilizadas nas células solares de perovskita, as formulações das soluções precursoras foram preparadas em ambiente inerte. Foi utilizada uma balança Shimadzu AUW220D, com resolução de 0,1 mg, que se encontra sobre uma mesa de granito para evitar vibrações.

As camadas de HTL e ETL tiveram seus precursores pesados e dissolvidos em solvente a base de álcoois e em o-xileno, respectivamente. Já a camada ativa de perovskita teve seus precursores (PbI_2 , FAI e CsI) pesados e dissolvidos em um solvente baseado em DMSO de forma a obter a formulação final $\text{Cs}_{0.17}\text{FA}_{0.83}\text{PbI}_3$.

Figura 17 – Equipamento utilizado no preparo das formulações (*Glove box*)

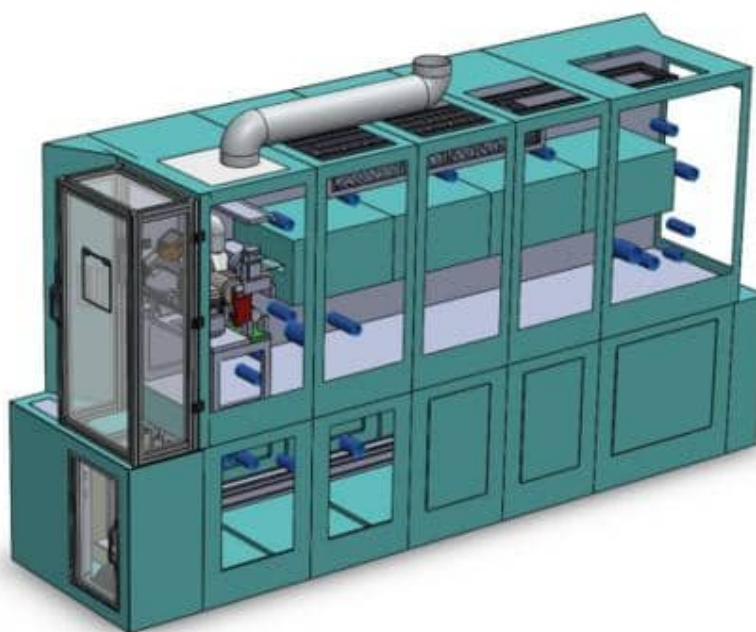


Fonte: Próprio autor.

Cada solvente foi adicionado por meio de micropipetas com diferentes resoluções e todas as formulações foram deixadas em agitação durante à noite para garantir a completa solubilização.

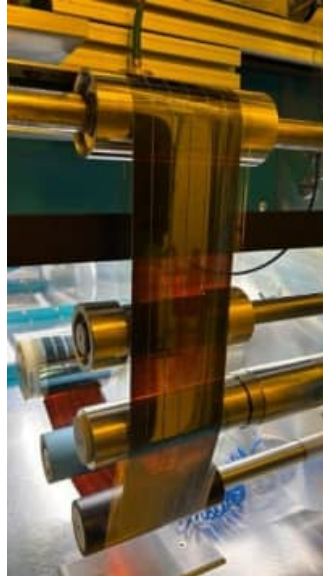
Os dispositivos foram produzidos inicialmente através da deposição de sucessivas camadas através da técnica de *slot-die* em uma máquina rolo-a-rolo. Inicialmente, foi feita a deposição da camada HTL sobre o um substrato flexível. Após a deposição do HTL, foi depositado a perovskita, que atua como camada ativa. A secagem deste material à 100 °C representa o fim do processo executado na máquina rolo-a-rolo utilizado nesta pesquisa.

Figura 18 – Ilustração da máquina rolo-a-rolo utilizada na deposição das camadas de HTL e perovskita



Fonte: Próprio autor.

Figura 19 – Filme de perovskita na saída dos fornos



Fonte: Próprio autor.

Em seguida selecionou-se pedaços de cerca de 7 cm de comprimento desse filme para realizar a deposição da camada de ETL através da técnica de *blade-coating*. Esta técnica é utilizada preferencialmente para materiais que ainda estão nas etapas iniciais de pesquisa e desenvolvimento, como o caso do Y5 e o Y6. A deposição destes materiais sobre a perovskita concluiu a etapa de deposição do ETL do dispositivo.

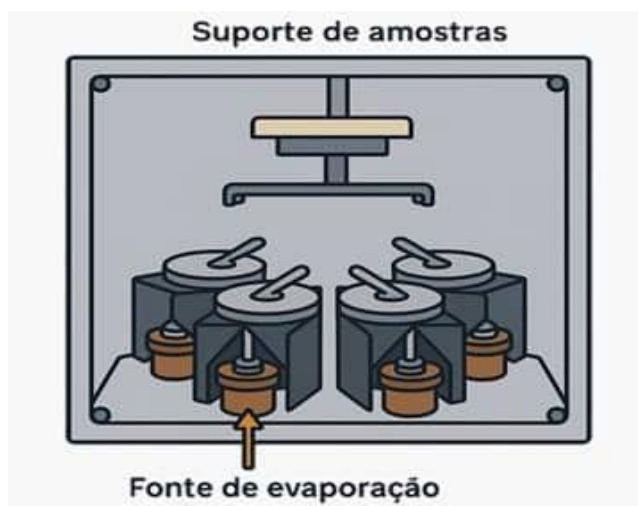
Figura 20 - *Blade coater* utilizado para a deposição da camada de ETL



Fonte: Próprio autor.

Para dar continuidade no processo de fabricação, foi feita a montagem de máscaras de células, que consiste em um suporte de metal que possibilita o encaixe de seis amostras e a limpeza dos contatos para que ao receber o eletrodo metálico ele faça contato direto com o substrato. Em seguida a máscara preparada foi levada para uma evaporadora, onde recebeu a camada da prata evaporada.

Figura 21 – Ilustração de uma evaporadora térmica



Fonte: Próprio autor.

O desempenho elétrico foi avaliado utilizando um simulador solar do tipo AAA com filtro AM 1.5G, visando imitar a influência da atmosfera terrestre, e um sistema de alimentação e medida Keithley 2400. Parâmetros de tensão de circuito aberto, densidade da corrente, fator de preenchimento, eficiência de conversão de energia e resistência em série foram obtidos e utilizados para medir a eficiência do dispositivo. Já a caracterização dos filmes se deu por análises de perfilometria utilizando o Perfilômetro Bruker modelo DektakXT, medidas realizadas por varredura estática na faixa de 6.5 μm . Espectroscopia no UV-Vis utilizando o espectrofotômetro de UV-visível marca Shimadzu e modelo UV-2600, as medidas foram realizadas para comprimentos de onda de 300 nm a 900 nm. Microscopia óptica utilizando o microscópio da marca Leica e modelo DFC295, com ampliação de 20 vezes. Todas realizadas nos laboratórios da Oninn.

A Microscopia eletrônica de varredura foi feita utilizando o microscópio eletrônico de varredura HITACHI-TM4000Plus, por elétrons retroespalhados com magnitudes de 150 e 200. A Microscopia de força atômica, utilizando o microscópio Nanosurf NaioAFM no modo *Static Force* e *Phase Contrast*. Ambas realizadas no LCPNano - Laboratório de Caracterização e Processamento da Nanomateriais da UFMG.

Figura 22 - Simulador solar utilizado na caracterização elétrica dos dispositivos



Fonte: Próprio autor.

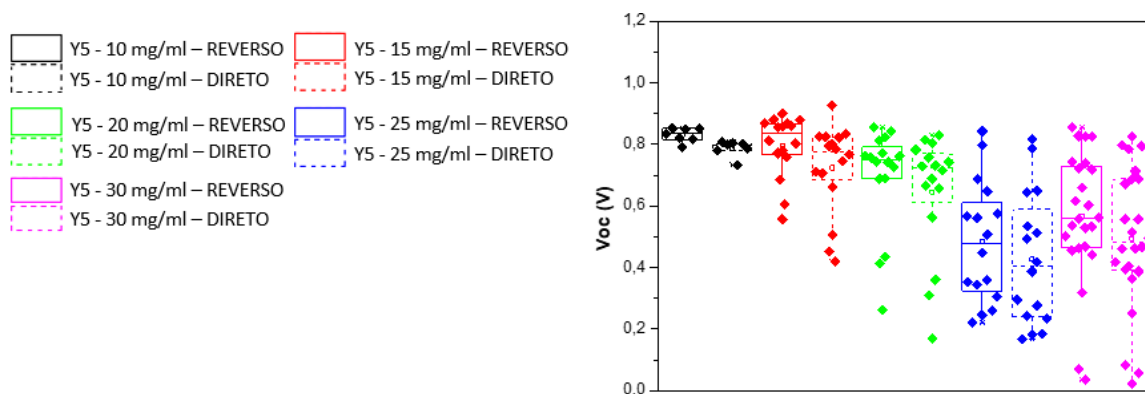
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

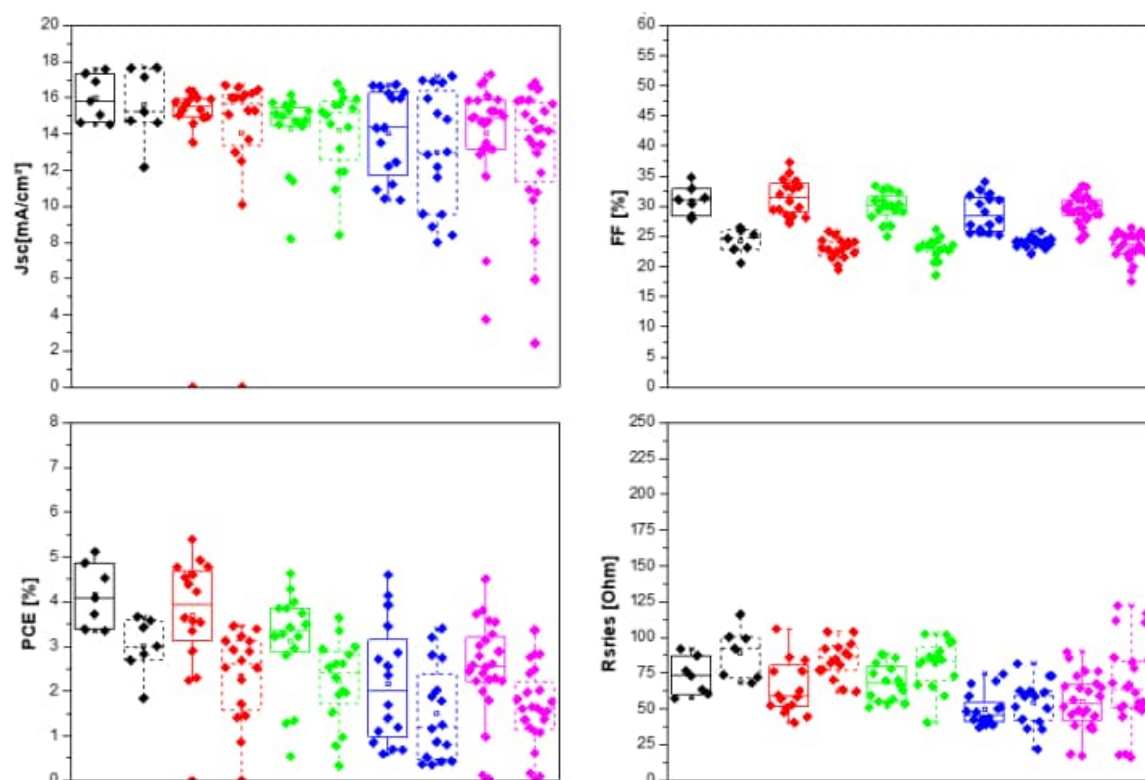
Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos da deposição dos filmes e das análises elétricas das células solares de perovskita, a partir de quatro experimentos realizados. Os parâmetros elétricos foram obtidos das medidas em sentido reverso (linha cheia) e sentido direto (linha tracejada) das células de cada dispositivo fabricado.

O primeiro experimento para a investigação dos NFA como ETL, foi realizado com o Y5 pois ele estava disponível em maior quantidade e possuir menor custo. Como não havia parâmetros prévios sobre a janela de processamento desse material associado à perovskita, inicialmente investigou-se a possibilidade de formação do filme fino, variando sua concentração em 10, 15, 20, 25 e 30 mg/ml. Observou-se que, após o processo de deposição, ocorreu a formação de um filme contínuo, visível a olho nu. A presença desse filme indicou que o material apresentou boa molhabilidade sobre a camada de perovskita.

A Figura 23 apresenta os resultados elétricos obtidos seguindo a ordem dos resultados de tensão, densidade de corrente, fator de preenchimento, eficiência e resistência em série. Na Figura 24 é mostrado a curva JxV das células com de melhor desempenho, a eficiência alcançada por elas foi de 5,11% e 5,39% respectivamente. Os resultados mostram que o Y5 como ETL não teve um bom desempenho, o que já era esperado pelo fato dele não ter um bom alinhamento energético com a perovskita como mostrado na Figura 6. O aspecto positivo desse experimento foi a observação da formação de um filme contínuo, o que proporcionou parâmetros iniciais importantes para o início dos testes com o Y6.

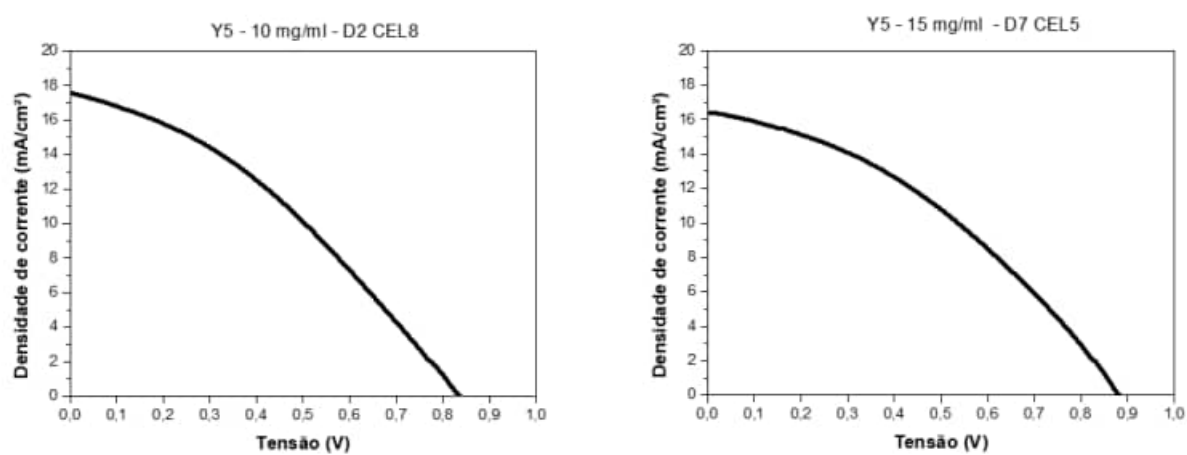
Figura 23 – Gráficos dos resultados de tensão, densidade de corrente, *fill factor*, eficiência e resistência em serie respectivamente





Fonte: Próprio autor.

Figura 24 - Gráficos de densidade de corrente em função da tensão de circuito aberto para as melhores células.



Fonte: Próprio autor.

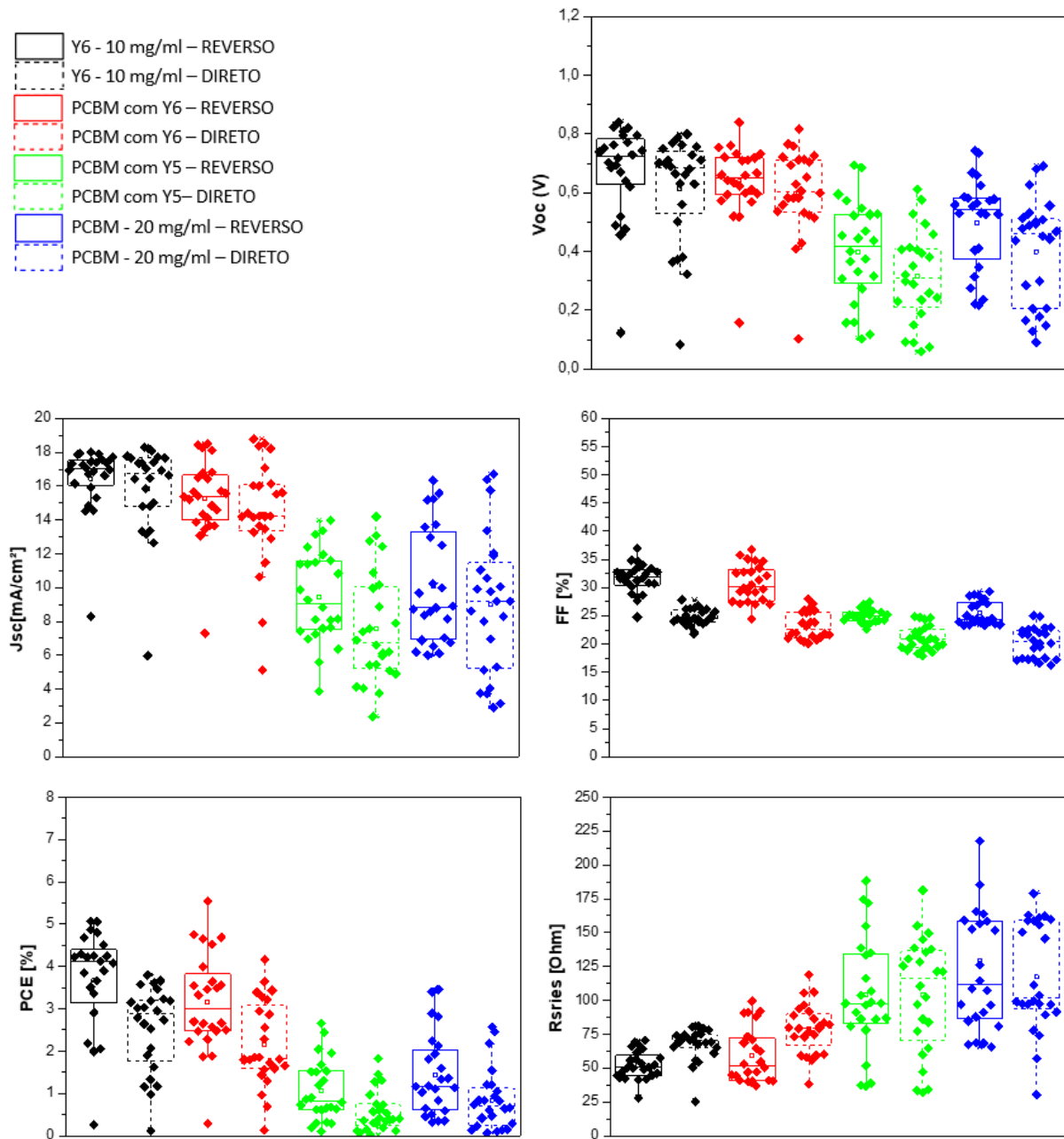
Desta forma seguiu-se para a avaliação do comportamento do outro material não-fulereno desse estudo. Com base no comportamento de formação de filme verificado no experimento anterior, foi utilizado a concentração de 10 mg/mL como ponto inicial para os testes do Y6, já que praticamente não houve variação de performance para os dispositivos de Y5 com base em sua concentração.

Além do Y6 como ETL, foi avaliado a utilização do PCBM em conjunto com os NFAs como material transportador de elétron. Isto foi feito pois o PCBM quando utilizado sozinho não apresenta elevada performance, fator atribuído a dificuldade deste material em formar um bom filme. Decidiu-se testá-lo dopado com Y6 e com Y5 com o intuito de agregar a qualidade de formação de filme, vista no primeiro experimento, com a capacidade do PCBM de receber e conduzir elétrons, objetivando assim melhores resultados.

Conforme mostram as Figuras 25 e 26, os dispositivos contendo o Y6 apresentaram uma tendência discreta de melhora nos parâmetros de densidade de corrente, fator de preenchimento e resistência em série, com suas respectivas médias de 16,45 mA/cm², 31,64% e 52,14 Ohm, o que levou a um pequeno aumento na eficiência média (3,67%) dos dispositivos quando comparados com o PCBM que obteve nesses parâmetros respectivamente as médias de 10,09 mA/cm², 25,45%, 129,51 Ohm e 1,44%. Entretanto, os valores alcançados não são muito superiores aos obtidos pelo experimento prévio com Y5, sendo um resultado aquém do esperado, tendo-se em vista a melhor compatibilidade energética do Y6 com a perovskita.

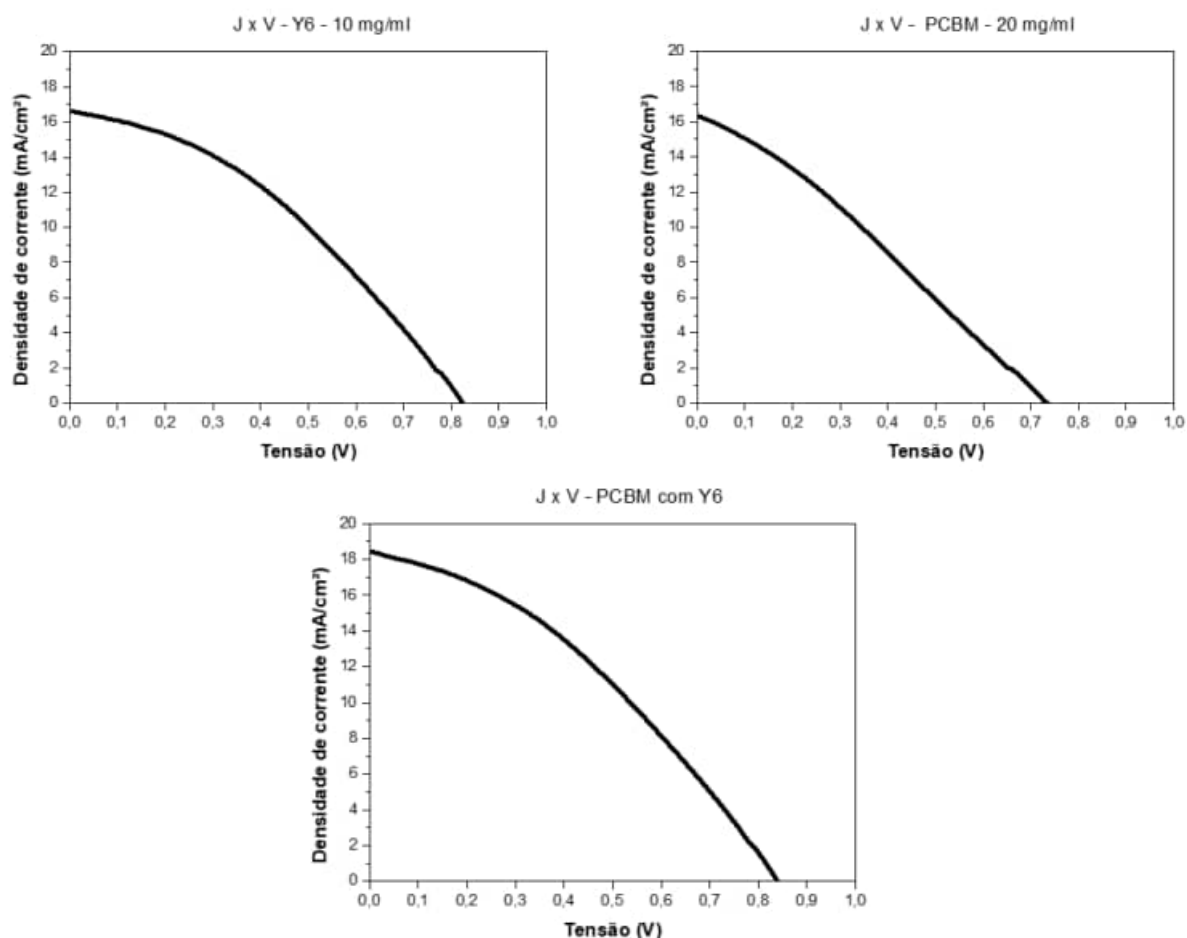
Quanto as células dopadas de PCBM com Y6, os resultados obtidos indicaram que, apesar da dopagem ter sido realizada com o intuito de melhorar a qualidade de formação do filme, o resultado alcançado não foi tão significativo sendo a média de eficiência alcançada de 3,16%, demonstrando que o material, mesmo dopado, ainda apresenta limitações quanto à formação de um filme uniforme e de boa qualidade. Já o PCBM dopado com Y5 teve uma piora de todos os parâmetros em relação os dois aplicados separadamente e apresentaram baixo desempenho fotovoltaico com uma média de eficiência de 1,06%.

Figura 25 – Gráficos dos resultados de tensão, densidade de corrente, *fill factor*, eficiência e resistência em serie respectivamente



Fonte: Próprio autor.

Figura 26 - Gráficos de densidade de corrente em função da tensão de circuito aberto para as melhores células.



Fonte: Próprio autor.

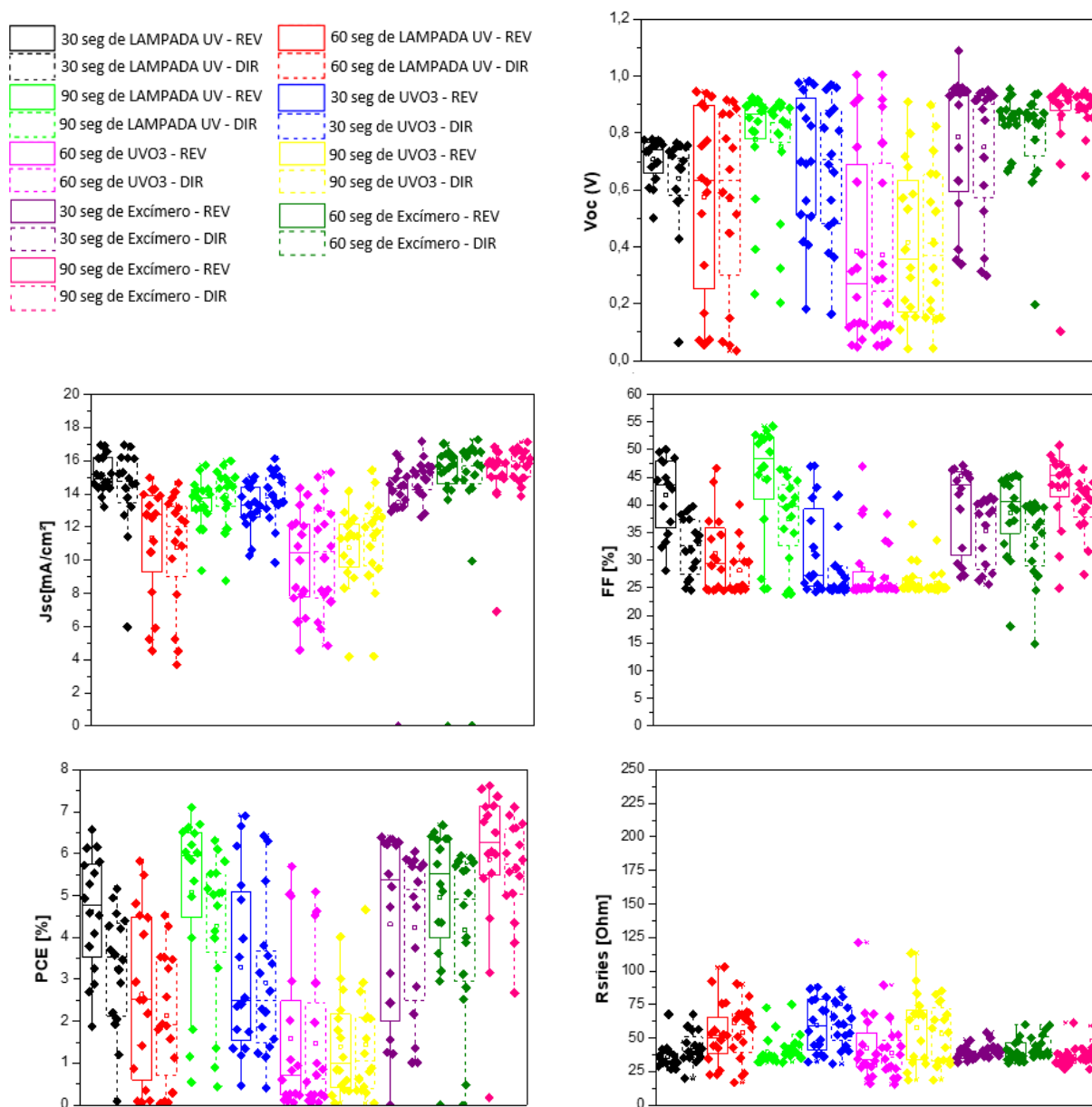
Como os resultados utilizando o Y6 e o PCBM não estavam apresentando bons resultados, apesar de haver relatos do funcionamento desses materiais quando processados por outro método de deposição, surgiram questionamentos sobre se o motivo desse baixo desempenho seria influenciado pela formação e conformação da interface devido ao processo de deposição ou se estaria atrelado a incompatibilidade de alinhamento energético e imperfeições estruturais, na região entre a perovskita e ETL, gerando barreiras de transporte, recombinação de portadores e perda de contato elétrico efetivo.

Em respostas a estes questionamentos decidiu-se estudar tratamentos superficiais que poderia promover melhor contato entre as camadas de perovskita e o ETL com o objetivo de mitigar essas limitações. Então foram selecionados diferentes tipos de

tratamentos superficiais: exposição à lâmpada UV (comprimento de onda: 365 nm), exposição à luz ultravioleta com geração de ozônio – UV/O₃ (comprimento de onda: 185 nm), e exposição à lâmpada de excímero (comprimento de onda: 172 nm) nos tempos de 30s, 60s e 90s; visando avaliar sua influência sobre a performance dos ETMs observadas anteriormente.

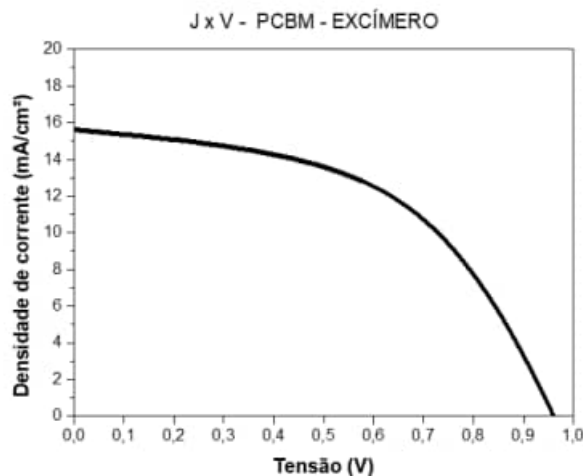
Conforme mostrado na Figura 27, o tratamento promoveu uma melhora no desempenho do dispositivo com PCBM, principalmente na condição de 90s de excímero. Os ganhos de performance ocorreram principalmente pelo aumento do Voc que alcançou 0,96 V e de *fill factor* alcançando 50,76%, que contribuíram para que alguns dispositivos chegassem a eficiências acima de 7%. Representado na Figura 28 temos o gráfico de densidade de corrente em função da tensão de circuito aberto da melhor célula que alcançou a eficiência de 7,63%.

Figura 27 - Gráficos dos resultados de tensão, densidade de corrente, *fill factor*, eficiência e resistência em serie respectivamente



Fonte: Próprio autor.

Figura 28 - Gráfico de densidade de corrente em função da tensão de circuito aberto para a melhor célula.

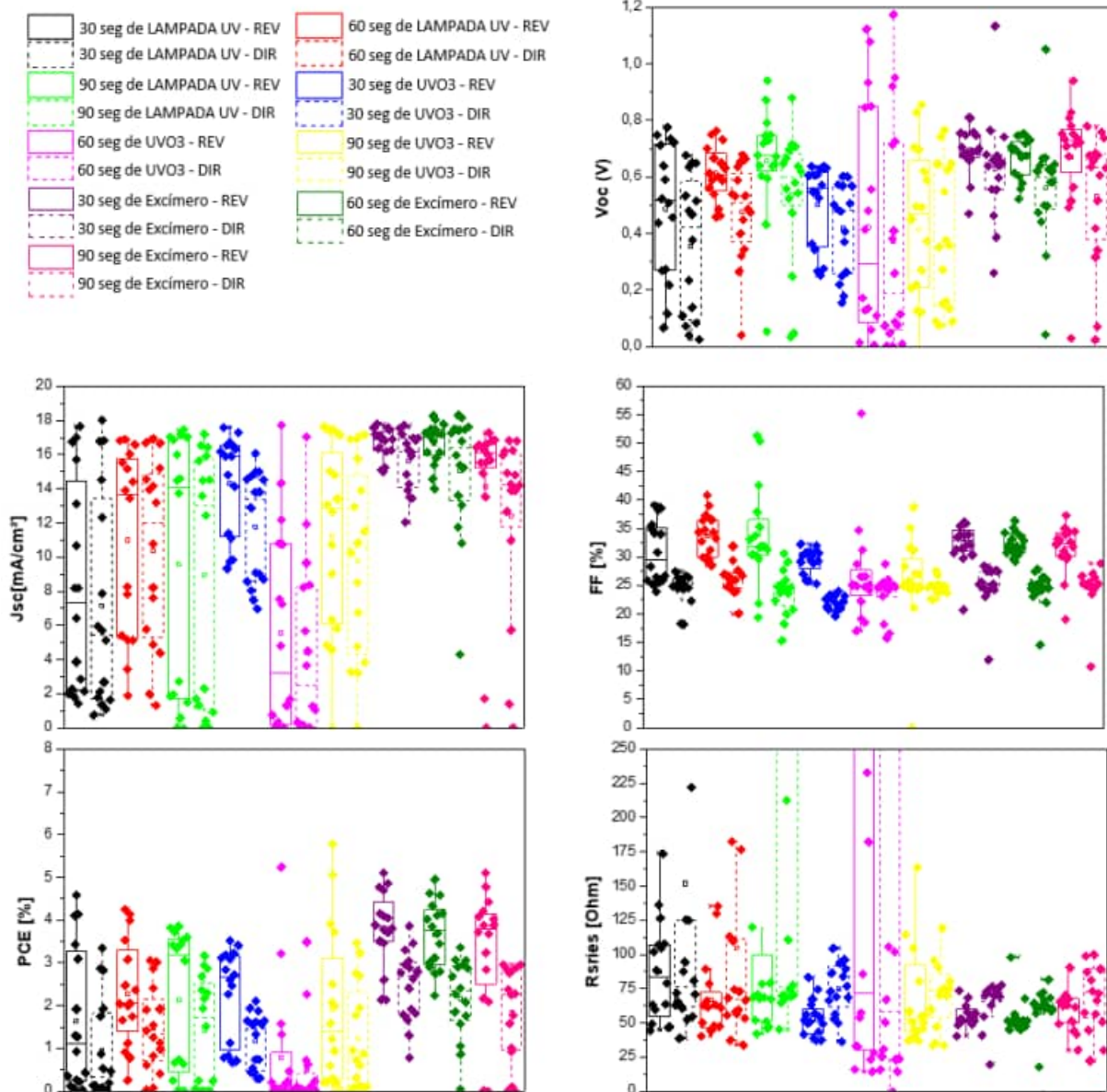


Fonte: Próprio autor.

No quarto experimento, o Y6 foi depositado sobre os filmes que receberam os mesmos tratamentos aplicados no teste anterior, com o objetivo de avaliar se esses processos também influenciariam positivamente o seu desempenho e a performance do dispositivo, de forma similar ao observado para o PCBM. A análise teve como propósito compreender se a modificação superficial promovida pelos diferentes tempos de exposição ao excímero seria capaz de aprimorar a interface entre o Y6 e a perovskita, corrigindo possíveis discontinuidades na formação do filme, favorecendo assim uma melhor extração e transporte de elétrons.

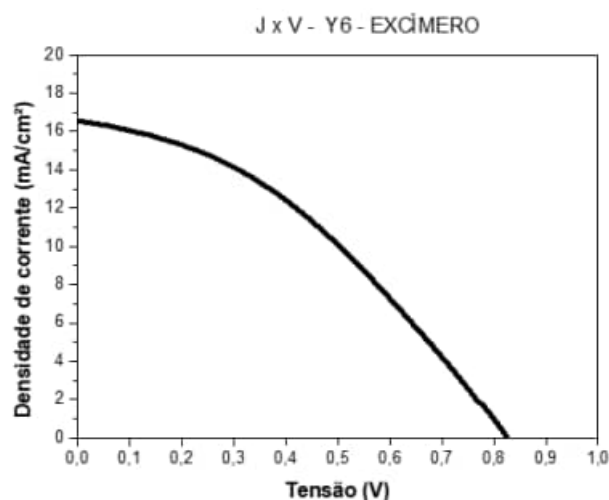
Esperava-se que os tratamentos trariam um melhor comportamento elétrico dos dispositivos baseados no material não-fulereno. No entanto, conforme mostrado nas Figuras 29 e 30, os resultados obtidos não evidenciaram impacto positivo significativo, diferentemente do que foi observado com o PCBM, que apresentou melhora expressiva após o tratamento com excímero. Os parâmetros elétricos indicaram que, mesmo após os tratamentos de superfície, o Y6 manteve desempenho semelhante ao obtido nos testes iniciais apresentando uma média de eficiência de 3,26%, sugerindo que as limitações de seu comportamento não estão diretamente ou somente relacionadas à interface com a perovskita, mas possivelmente a qualidade de formação do filme deste material específico e até mesmo sua adesão à camada.

Figura 29 - Gráficos dos resultados de tensão, densidade de corrente, *fill factor*, eficiência e resistência em serie respectivamente



Fonte: Próprio autor.

Figura 30 - Gráfico de densidade de corrente em função da tensão de circuito aberto para a melhor célula.

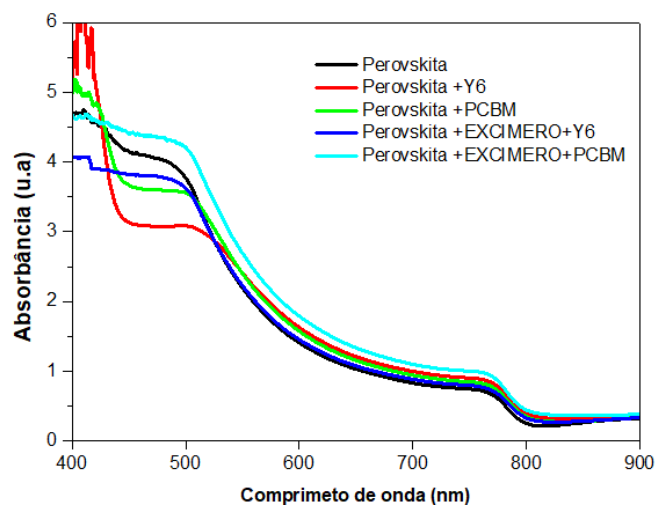


Fonte: Próprio autor.

Após a etapa de preparação dos dispositivos e obtenção dos resultados elétricos, foi possível identificar que a melhor condição experimental correspondeu ao tratamento com lâmpada de excímero por 90s, o qual resultou na maior eficiência de conversão de energia entre todas as amostras avaliadas. Esse resultado evidencia o efeito positivo do tratamento de superfície e assim essa condição foi selecionada como referência para a realização das análises de caracterização morfológica e óptica, visando compreender com melhor os fatores que contribuíram para o desempenho superior observado.

O espectro da perovskita mostrado na Figura 31 mostra sua curva característica de absorção na região do visível, em que as curvas com o PCBM apresentam absorbância superior, em destaque para a condição com o tratamento de 90s de excímero que sugere melhor cobertura do filme, corroborando com o melhor resultado elétrico. As curvas com o Y6 apesar de indicar propriedades ópticas semelhantes apresentam intensidade inferior à perovskita, menos pronunciada com o tratamento de excímero, indicando uma possível heterogeneidade na formação do filme.

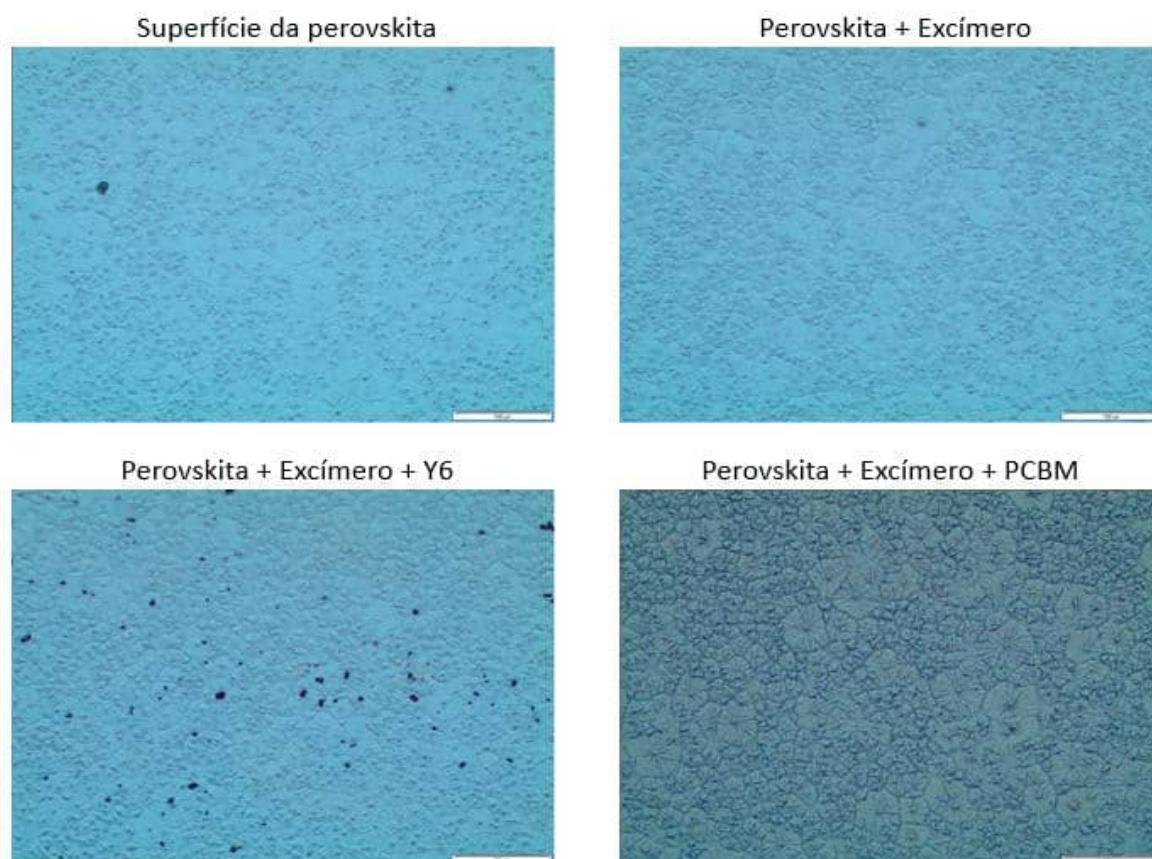
Figura 31 - Espectros de absorção UV-Vis dos filmes formados nos testes realizados



Fonte: Próprio autor.

As características da formação dos filmes levantados pela análise das curvas de absorbâncias podem ser corroboradas pelas imagens a seguir de microscopia óptica em escala de 100 μm , onde pontos de possíveis aglomerados ou má formação pode ser vista no filme com a camada de Y6 depositada. Isso indica que com o tratamento na superfície da perovskita a camada de PCBM como ETL se conformou melhor do que a camada de Y6.

Figura 32 – Microscopia óptica dos filmes de: perovskita, com tratamento de excímero, com tratamento de excímero com a camada de Y6 e com tratamento de excímero com a camada de PCBM, respectivamente



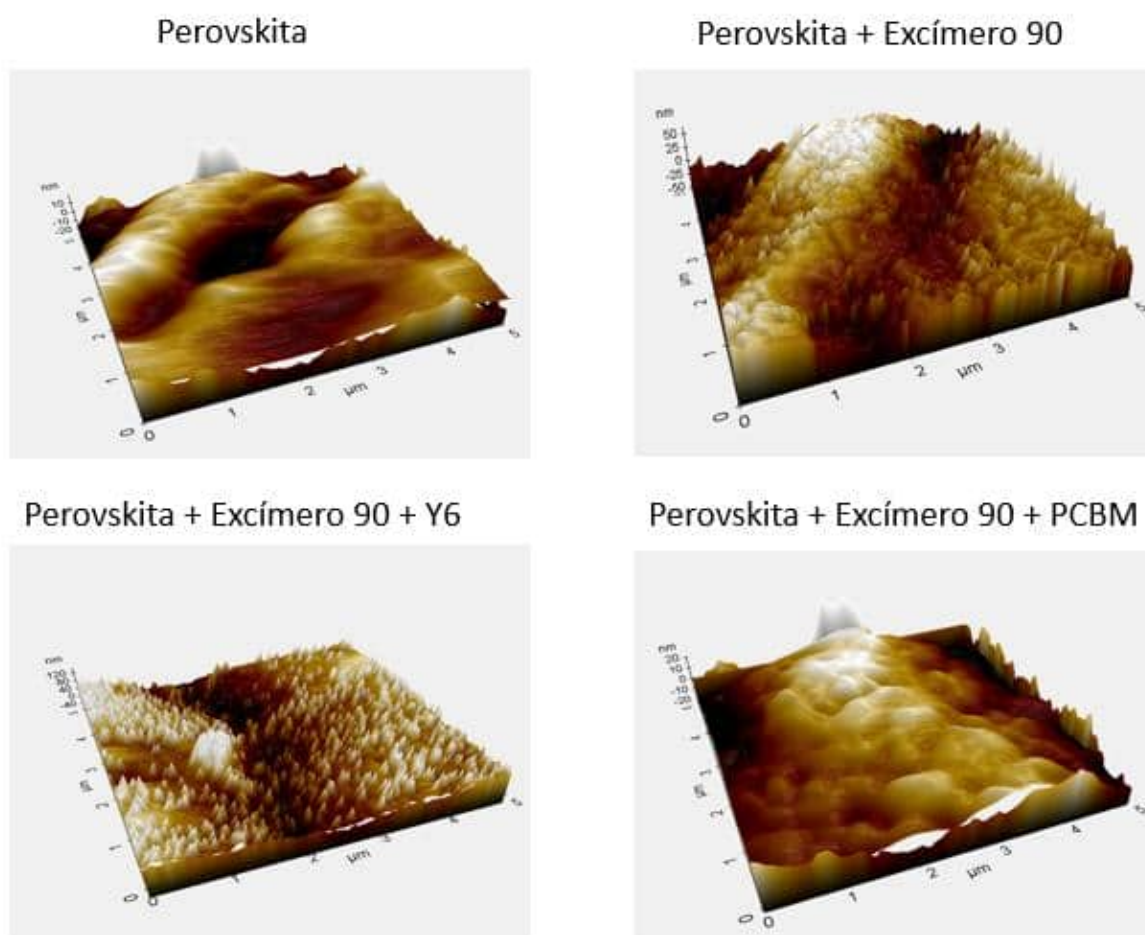
Fonte: Próprio autor.

Após a análise óptica dos filmes, foram realizadas as caracterizações que possibilitaram avaliar a rugosidade do filme de perovskita com e sem o tratamento de excímero, com a camada de Y6 e com a camada de PCBM. As amostras foram avaliadas por Microscopia de Força Atômica (AFM), obtendo informações quantitativas sobre a rugosidade e topografia da superfície que podem ser vistas na Figura 33 e Tabela 1.

O filme de perovskita apresenta uma superfície com topografia levemente irregular, mas compacta e de rugosidade baixa de 8,24 nm. Com a adição dos 90s de excímero, observa-se uma modificação expressiva na morfologia, ocorreu a formação de estruturas pontiagudas na superfície, apresentando vários domínios granulares que elevaram a rugosidade para 19,05 nm. Na amostra de perovskita com 90s de excímero com a camada de Y6, a superfície apresenta uma textura mais heterogênea, com formação de

várias estruturas pontiagudas e maior densidade de grãos, o que aumentou a rugosidade superficial para 29,25 nm e ocasionou em uma possível redistribuição das fases. Já na amostra perovskita com 90s de excímero mais a camada de PCBM, nota-se uma morfologia mais uniforme, não se observa formação as estruturas pontiagudas, indicando uma melhor organização da superfície em comparação à amostra contendo Y6.

Figura 33 – Imagens AFM em 3D dos filmes de: perovskita, com tratamento de excímero, com tratamento de excímero com a camada de Y6 e com tratamento de excímero com a camada de PCBM, respectivamente



Fonte: Próprio autor.

Tabela 1 - Rugosidade dos filmes de: perovskita, com tratamento de excímero, com tratamento de excímero com a camada de Y6 e com tratamento de excímero com a camada de PCBM, respectivamente

Filme de Perovskita	Rugosidade Quadrática Média (nm)
Perovskita	8,24
Excímero 90s	19,05
Excímero 90s +Y6	29,25
Excímero 90s + PCBM	8,70

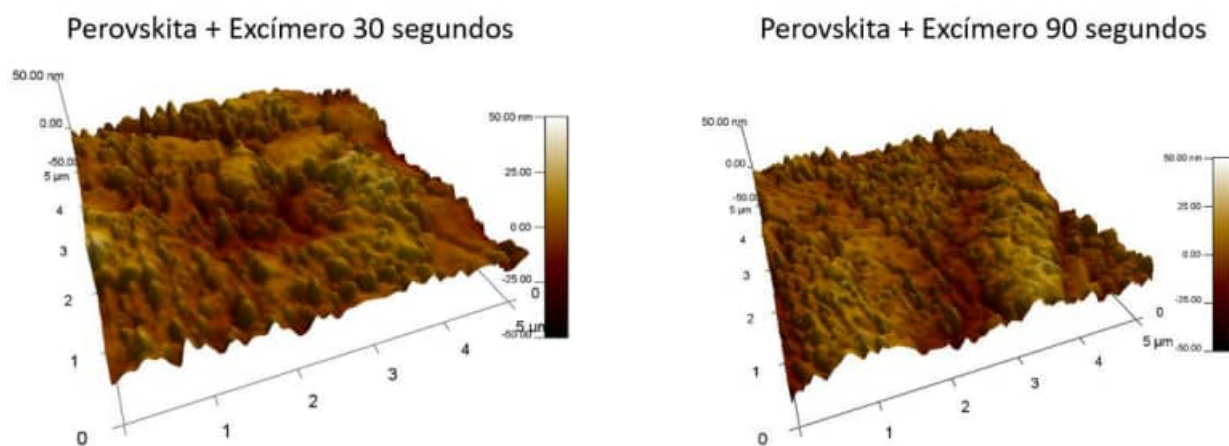
Com base nesses resultados, observou-se que o filme contendo o excímero apresentou uma superfície mais rugosa e com estruturas pontiagudas, sugerindo uma possível alteração na morfologia em função das condições do tratamento.

A rugosidade superficial desempenha um papel importante no desempenho dos filmes de perovskita, pois afeta diretamente a continuidade do filme, a densidade de defeitos e a qualidade das interfaces com as camadas adjacentes. Superfícies mais lisas tendem a formar interfaces mais uniformes com os materiais de transporte de carga, reduzindo a probabilidade da carga se perder em forma de calor ao invés de contribuir para a corrente elétrica. Já rugosidades elevadas podem expor regiões de grão incompletas, gerar variações locais de espessura e intensificar campos elétricos não homogêneos, prejudicando tanto a coleta de portadores quanto a estabilidade operacional do dispositivo.

Diante da observação referentes aos resultados apresentando na Tabela 1 e da importância que a rugosidade representa para um bom desempenho do, foi realizada uma nova análise de AFM, comparando amostras processadas por 30s e 90s de exposição a lâmpada de excímero, com o objetivo de verificar se o tempo de exposição poderia estar relacionado a uma possível degradação do material vinda com formação excessiva de irregularidades na superfície do filme.

Como é mostrado na Figura 34 e tabela 2, a rugosidade quadrática média do filme tratado por 30s foi de 6,81 nm, enquanto o tratamento por 90s resultou em 12,30 nm, isso significa que o filme tratado por 90s ficou quase duas vezes mais rugoso e com a morfologia mais modificada indicando que ocorre degradação do filme ao passo que se aumenta o tempo de exposição.

Figura 34 - Imagens AFM em 3D dos filmes de perovskita com 30s e 90s de exposição a lâmpada de excímero, respectivamente



Fonte: Próprio autor.

Tabela 2 - Rugosidade dos filmes de perovskita com 30s e 90s de exposição a lâmpada de excímero

Filme de Perovskita	Rugosidade Quadrática Média (nm)
Excímero 30s	6,81
Excímero 90s	12,30

Com a análise de perfilometria foi estimada a espessura média dos filmes de perovskita submetidos às condições experimentais diferentes. Conforme apresentado na Tabela 3, o filme de perovskita apresentou uma espessura média de 499 nm, valor que se manteve praticamente invariável após o tratamento com excímero por 90s, indicando que o processo de exposição não promoveu alterações significativas na espessura da camada ativa. Já com a adição das camadas de ETL com Y6 e PCBM sobre a perovskita tratada, observou-se um aumento progressivo na espessura média (527 nm e 585 nm respectivamente), o que está associado à deposição adicional dos materiais a uma conformação mais espessa do filme, especialmente no caso do PCBM.

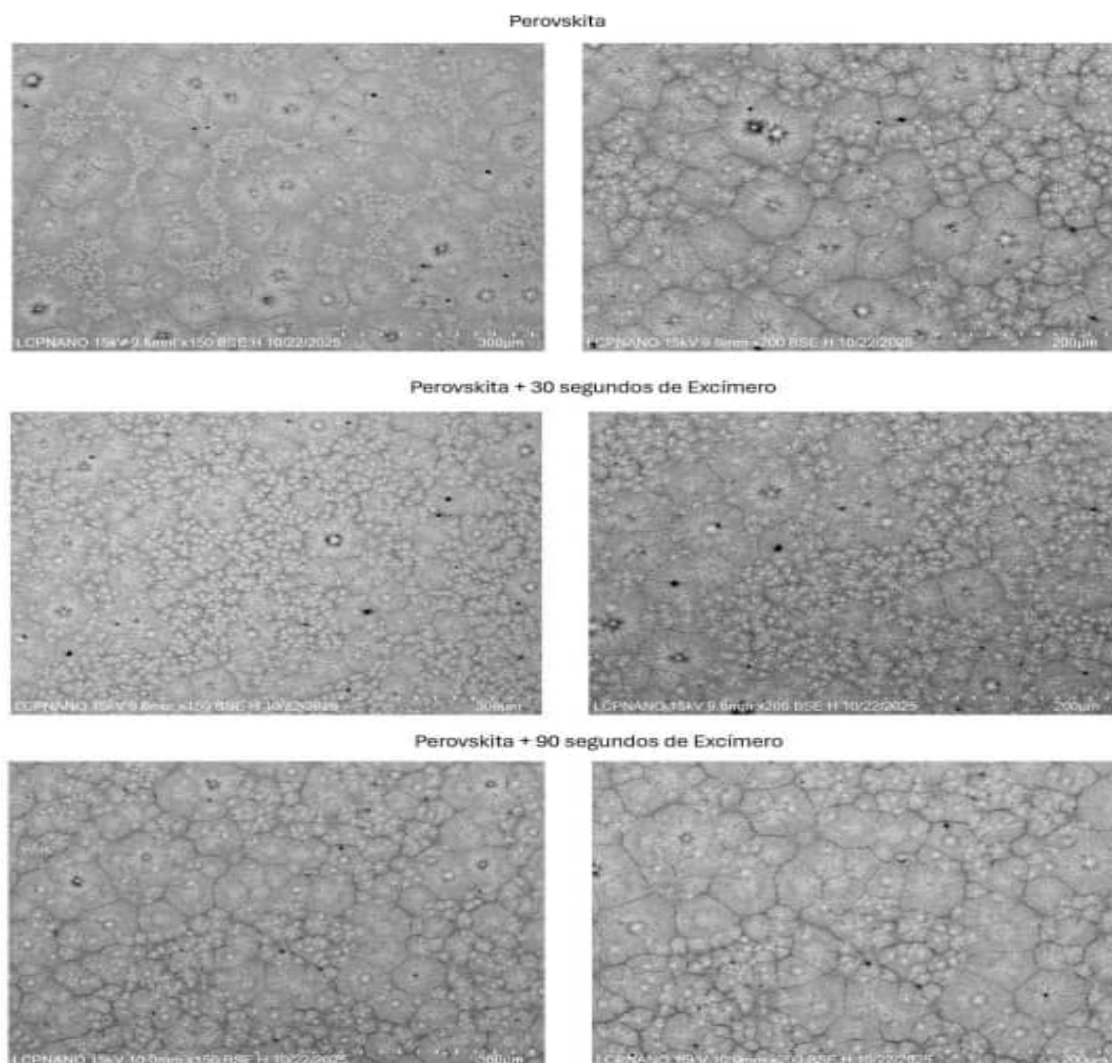
Tabela 3 – Resultados de espessura dos filmes de: perovskita, com tratamento de excímero, com tratamento de excímero com a camada de Y6 e com tratamento de excímero com a camada de PCBM, respectivamente

Filme de Perovskita	Espessura Média (nm)
Perovskita	499
Excímero 90s	495
Excímero 90s + Y6	527
Excímero 90s + PCBM	585

A Microscopia Eletrônica de Varredura também foi empregada para a visualização da morfologia superficial dos filmes. As imagens obtidas (Figura 35) mostram que no filme de perovskita a superfície é composta por esferulitos bem definidos e interligados indicando uma boa cristalização, e apresentando poucos defeitos aparentes. Nas imagens da perovskita tratada com excímero por 30s, nota-se uma modificação na textura superficial, com o aparecimento de regiões com esferulitos menores o que sugere uma discreta alteração morfológica que pode estar relacionada à reorganização superficial induzida pela exposição ao excímero. Já na perovskita tratada por 90s, percebe-se uma morfologia mais rugosa e heterogênea, com grãos menos definidos e contornos menos nítidos em comparação às amostras tratadas por 30s. Nota-se também o aparecimento de regiões com contraste mais acentuado, sugerindo danos superficiais, compatíveis com o início de processos de degradação.

Essa análise, em conjunto com os resultados de AFM, reforça a hipótese de que tempos de exposição mais longos podem acentuar tais efeitos, conduzindo a uma morfologia excessivamente rugosa e potencialmente prejudicial à integridade do filme.

Figura 35 – Imagens de MEV dos filmes de: perovskita, perovskita com 30s de tratamento de excímero, perovskita com 90s de tratamento de excímero, respectivamente



Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos mostram que o tratamento superficial aplicado à camada de perovskita exerce papel significativo na qualidade de formação do filme, como evidenciado nas análises de AFM, que mostram melhor recobrimento e conformação quando se utiliza o PCBM como camada transportadora de elétrons. Entretanto, como o mesmo comportamento não foi observado para o Y6, embora estudos na literatura relatarem o seu bom desempenho como material transportador de elétrons em dispositivos fotovoltaicos de perovskita, os resultados obtidos neste trabalho não alcançaram o mesmo desfecho, o que pode estar associado a fatores relacionados ao empilhamento molecular e aos métodos de

deposição empregados. O Y6 apresenta uma estrutura molecular planar, com conjugação π - π que favorece a mobilidade eletrônica quando as moléculas se organizam de forma ordenada e compacta, acontece que essa organização depende das condições de processamento e o método de *spin coating* (utilizado nesses estudos publicados), entrega uma deposição sob atmosfera controlada e em áreas de pequena escala, proporcionando a formação de domínios bem empilhados resultando em uma extração de carga eficiente e altos valores de corrente e eficiência. No entanto em processos escalonáveis utilizados nessa pesquisa, o processamento em ar ambiente, a taxa de secagem diferenciada devido ao método de deposição e as condições de umidade podem comprometer a auto-organização das moléculas, levando a uma desordem morfológica e a uma redução da condução eletrônica.

Neste caso, a forma como as moléculas de Y6 se organizam e interagem com a superfície tratada da perovskita gerou uma cobertura heterogênea. Isso é evidenciado pela maior rugosidade e pela menor espessura observadas nas amostras com o não-fulereno, indicando que o empilhamento molecular do material pode não ter sido compatível com a morfologia ou a energia superficial resultante do tratamento, impossibilitando a formação de uma interface eficiente para extração de cargas, comprometendo o desempenho do dispositivo.

5 CONCLUSÃO

De modo geral, os resultados obtidos permitem concluir que o comportamento dos dispositivos está fortemente associado à morfologia e à compatibilidade energética entre o ETL e a perovskita, e que tratamentos como o uso de lâmpada de excímero, é capaz de melhorar a interface perovskita/PCBM, contribuindo para uma melhor cobertura do filme e desempenho elétrico, enquanto para o Y6 os efeitos foram mais limitados.

Destaca-se que a transferência de materiais originalmente desenvolvidos para células solares orgânicas (OPVs) para aplicação em dispositivos de perovskita representa uma estratégia científica promissora, mas que ainda enfrenta desafios significativos. Materiais como o Y6 e o Y5 amplamente estudados em OPVs devido à sua boa mobilidade eletrônica e compatibilidade energética com doadores orgânicos, apresentam potencial para atuar como ETL em dispositivos de perovskita, aproveitando suas propriedades de aceitação de carga e estabilidade química. Entretanto o comportamento desses materiais em estruturas híbridas depende de um conjunto complexo de fatores como o alinhamento energético, morfologia interfacial, empilhamento molecular e condições de processamento. Ao fazer essa transição encontramos a dificuldade de fazer com que essas propriedades intrínsecas dos não-fulerenos se manifestassem da mesma forma, uma vez que o ambiente químico e físico da interface muda substancialmente, afetando a maneira como as moléculas se organizam e interagem com a camada ativa.

Para além da transferência da tecnologia, são encontradas também dificuldades no escalonamento delas para métodos mais realistas e compatíveis com produção industrial, como o blade coating e o rolo a rolo. Fatores como condições de secagem diferentes, maiores volumes de solução, deposição em condições de ar ambiente e tamanho da área ativa alteram o processo de auto-organização molecular e, conseqüentemente, o empilhamento das moléculas no filme. Levando, muitas vezes, à formação de estruturas desordenadas, com espessuras e interfaces heterogêneas, comprometendo a extração e o transporte de carga. Assim é possível concluir que apesar dos resultados positivos relatados na literatura em condições ideais de laboratório, os desafios associados à reprodutibilidade e uniformidade permanecem evidentes quando se busca a transição para processos escalonáveis e ambientalmente realistas.

Além dos resultados científicos alcançados, o desenvolvimento deste trabalho proporcionou um avanço expressivo na formação experimental da autora. Ao longo do

processo, foram adquiridas habilidades práticas essenciais, como realização de treinamentos que possibilitou a análise independente AFM e MEV, desde a preparação das amostras até a aquisição dos resultados. Da mesma forma, houve o domínio progressivo da deposição de filmes pelo método de *blade coating*, incluindo o controle de parâmetros críticos e a compreensão de como pequenas variações influenciam diretamente a morfologia final do filme. Esse aprendizado prático consolidou o entendimento das relações entre processamento, estrutura e desempenho, contribuindo de forma essencial para a maturidade científica e técnica necessária para pesquisas futuras na área de dispositivos fotovoltaicos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade deste estudo, uma perspectiva promissora envolve a aplicação da técnica de Tempo de Voo (do inglês, *Time-of-Flight* - TOF) para investigar de forma mais aprofundada a mobilidade de portadores de carga nos materiais estudados, em especial no Y6 como transportador de elétrons. Essa caracterização permitiria avaliar se o baixo desempenho elétrico observado está efetivamente relacionado à organização estrutural dos filmes, ao grau de desordem molecular ou a barreiras na interface entre a camada de perovskita e do ETL.

Além da aplicação da técnica TOF, trabalhos futuros também devem se concentrar em estratégias de engenharia de superfície e de interface, uma alternativa viável seria a utilização de camadas ultrafinas de passivação como por exemplo a monocamada auto-organizada (do inglês *Self Assembled Monolayer* – SAM) visando preencher os defeitos de superfície, ajustar o alinhamento energético e melhorar a ancoragem/adesão entre perovskita e ETL.

Por fim trabalhar na otimização das condições de deposição, de forma a aprimorar parâmetros – que influenciam o desempenho das técnicas escalonáveis como *blade-coating* e rolo-a-rolo – como taxa de evaporação do solvente, temperatura do substrato, viscosidade da solução e velocidade de recobrimento.

REFERÊNCIAS

AGRESTI, Antonio; DI GIACOMO, Francesco; PESCE TELLI, Sara; DI CARLO, Aldo. **Scalable deposition techniques for large-area perovskite photovoltaic technology: A multi-perspective review**. In: *Nano Energy*, v. 122, p. 109317, 2024. ISSN: 22112855, DOI: 10.1016/j.nanoen.2024.109317.

AL-EZZI, Athil S.; ANSARI, Mohamed Nainar M. **Photovoltaic Solar Cells: A Review**. In: *Applied System Innovation*, v. 5, n. 4, p. 67, 2022. ISSN: 2571-5577, DOI: 10.3390/asi5040067.

BENITEZ-RODRIGUEZ, Juan F.; CHEN, Dehong; GAO, Mei; CARUSO, Rachel A. **Roll-to-Roll Processes for the Fabrication of Perovskite Solar Cells under Ambient Conditions**. In: *Solar RRL*, v. 5, n. 9, p. 2100341, 2021. ISSN: 2367-198X, 2367-198X, DOI: 10.1002/solr.202100341.

CHILVERY, Ashwith; Das, Sanjib; Guggilla, Padmaja; Brantley, Christina; SUNDAMEYA, Anderson AND. **A perspective on the recent progress in solution-processed methods for highly efficient perovskite solar cells**. In: *Science and Technology of Advanced Materials*, v. 17, n. 1, p. 650–658, 2016. ISSN: 1468-6996, DOI: 10.1080/14686996.2016.1226120.

DIXIT, Aparna; SAXENA, Arti; SHARMA, Ramesh; BEHERA, Debidatta; MUKHERJEE, Sanat. **Solar Photovoltaic Principles**. In: I. ISMAIL, Basel (org.). In: *Solar PV Panels - Recent Advances and Future Prospects*. [sine loco]: IntechOpen, 2023. ISBN: 978-1-83768-676-6, DOI: 10.5772/intechopen.109730. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/chapters/85733>>. Acesso em: 28/set./25.

DUNFIELD, Sean P.; BLISS, Lyle; ZHANG, Fei; LUTHER, Joseph M.; ZHU, Kai; VAN HEST, Maikel F. A. M.; REESE, Matthew O.; BERRY, Joseph J. **From Defects to Degradation: A Mechanistic Understanding of Degradation in Perovskite Solar Cell Devices and Modules**. In: *Advanced Energy Materials*, v. 10, n. 26, p. 1904054, 2020. ISSN: 1614-6832, 1614-6840, DOI: 10.1002/aenm.201904054.

FAZAL, M.A.; RUBAIEE, Saeed. **Progress of PV cell technology: Feasibility of building materials, cost, performance, and stability.** *In: Solar Energy*, v. 258, p. 203–219, 2023. ISSN: 0038092X, DOI: 10.1016/j.solener.2023.04.066.

HU, Qin; CHEN, Wei; YANG, Wenqiang; LI, Yu; ZHOU, Yecheng; LARSON, Bryon W.; JOHNSON, Justin C.; LU, Yi-Hsien; ZHONG, Wenkai; XU, Jinqiu; KLIVANSKY, Liana; WANG, Cheng; SALMERON, Miquel; DJURIŠIĆ, Aleksandra B.; LIU, Feng; HE, Zhubing; ZHU, Rui; RUSSELL, Thomas P. **Improving Efficiency and Stability of Perovskite Solar Cells Enabled by A Near-Infrared-Absorbing Moisture Barrier.** *In: Joule*, v. 4, n. 7, p. 1575–1593, 2020. ISSN: 25424351, DOI: 10.1016/j.joule.2020.06.007.

HUANG, Xiaofeng; XIA, Dongdong; XIE, Qian; WANG, Deng; LI, Qian; ZHAO, Chaowei; YIN, Jun; CAO, Fang; SU, Zhenhuang; ZENG, Zixin; JIANG, Wenlin; KAMINSKY, Werner; LIU, Kaikai; LIN, Francis R.; FENG, Qifan; WU, Binghui; TSANG, Sai-Wing; LEI, Dangyuan; LI, Weiwei; JEN, Alex K.-Y. **Supramolecular force-driven non-fullerene acceptors as an electron-transporting layer for efficient inverted perovskite solar cells.** *In: Nature Communications*, v. 16, n. 1, p. 1626, 2025. ISSN: 2041-1723, DOI: 10.1038/s41467-025-56060-0.

HUSSAIN, Istiak; TRAN, Hoang Phong; JAKSIK, Jared; MOORE, Justin; ISLAM, Nazmul; UDDIN, M. Jasim. **Functional materials, device architecture, and flexibility of perovskite solar cell.** *In: Emergent Materials*, v. 1, n. 3–4, p. 133–154, 2018. ISSN: 2522-5731, 2522-574X, DOI: 10.1007/s42247-018-0013-1.

KOJIMA, Akihiro; TESHIMA, Kenjiro; SHIRAI, Yasuo; MIYASAKA, Tsutomu. **Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells.** *In: Journal of the American Chemical Society*, v. 131, n. 17, p. 6050–6051, 2009. ISSN: 0002-7863, 1520-5126, DOI: 10.1021/ja809598r.

LI, Shuixing; LI, Chang-Zhi; SHI, Minmin; CHEN, Hongzheng. **New Phase for Organic Solar Cell Research: Emergence of Y-Series Electron Acceptors and Their**

Perspectives. In: *ACS Energy Letters*, v. 5, n. 5, p. 1554–1567, 2020. DOI: 10.1021/acsenenergylett.0c00537.

MAHAPATRA, A.; KUMAR, S.; KUMAR, P.; PRADHAN, B. **Recent progress in perovskite solar cells: challenges from efficiency to stability.** In: *Materials Today Chemistry*, v. 23, p. 100686, 2022. ISSN: 24685194, DOI: 10.1016/j.mtchem.2021.100686.

MARINOVA, Nevena; VALERO, Silvia; DELGADO, Juan Luis. **Organic and perovskite solar cells: Working principles, materials and interfaces.** In: *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 488, p. 373–389, 2017. ISSN: 00219797, DOI: 10.1016/j.jcis.2016.11.021.

MARQUES LAMEIRINHAS, Ricardo A.; TORRES, João Paulo N.; DE MELO CUNHA, João P. **A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications.** In: *Energies*, v. 15, n. 5, p. 1823, 2022. ISSN: 1996-1073, DOI: 10.3390/en15051823.

NISATO, Giovanni; LUPO, Donald W.; GANZ, Simone. **Organic and printed electronics: fundamentals and applications.** Second edition ed. Singapore: Jenny Stanford Publishing, 2024. 1 p. ISBN: 978-981-5129-14-4, DOI: 10.1201/9781003484417.

RAPHAEL, Ellen; SILVA, Mariana; SZOSTAK, Rodrigo; SCHIAVON, Marco Antônio; NOGUEIRA, Ana Flávia. **CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITAS: UMA NOVA TECNOLOGIA EMERGENTE.** In: *Química Nova*, 2017. ISSN: 16787064, DOI: 10.21577/0100-4042.20170127. Disponível em: <http://quimicanova.sbq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=6678&nomeArquivo=RV20170031.pdf>. Acesso em: 11/maio/25.

SAID, Ahmed Ali; DE WOLF, Stefaan. **A non-fullerene acceptor for perovskites.** In: *Nature Materials*, v. 24, n. 5, p. 666–667, 2025. ISSN: 1476-4660, DOI: 10.1038/s41563-025-02189-8.

SUTHAR, Deepak; CHUHADIYA, Sakshi; SHARMA, Ritika; HIMANSHU; DHAKA, M. S. **An overview on the role of ZnTe as an efficient interface in CdTe thin**

film solar cells: a review. *In: Materials Advances*, v. 3, n. 22, p. 8081–8107, 2022. ISSN: 2633-5409, DOI: 10.1039/D2MA00817C.

SZE, S. M.; NG, Kwok Kwok. **Physics of semiconductor devices.** *In: Wiley-Interscience online books*. 3. ed ed. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 2007. 1 p. ISBN: 9780471143239, DOI: 10.1002/0470068329.

WANG, Baohua; XIAO, Xudong; CHEN, Tao. **Perovskite photovoltaics: a high-efficiency newcomer to the solar cell family.** *In: Nanoscale*, v. 6, n. 21, p. 12287–12297, 2014. ISSN: 2040-3364, 2040-3372, DOI: 10.1039/C4NR04144E.

ZHANG, Lixiu; MEI, Luyao; WANG, Kaiyang; LV, Yinhua; ZHANG, Shuai; LIAN, Yaxiao; LIU, Xiaoke; MA, Zhiwei; XIAO, Guanjun; LIU, Qiang; ZHAI, Shuaibo; ZHANG, Shengli; LIU, Gengling; YUAN, Ligang; GUO, Bingbing; CHEN, Ziming; WEI, Keyu; LIU, Aqiang; YUE, Shizhong; NIU, Guangda; PAN, Xiyan; SUN, Jie; HUA, Yong; WU, Wu-Qiang; DI, Dawei; ZHAO, Baodan; TIAN, Jianjun; WANG, Zhijie; YANG, Yang; CHU, Liang; YUAN, Mingjian; ZENG, Haibo; YIP, Hin-Lap; YAN, Keyou; XU, Wentao; ZHU, Lu; ZHANG, Wenhua; XING, Guichuan; GAO, Feng; DING, Liming. **Advances in the Application of Perovskite Materials.** *In: Nano-Micro Letters*, v. 15, n. 1, p. 177, 2023. ISSN: 2311-6706, 2150-5551, DOI: 10.1007/s40820-023-01140-3.

ZHENG, Ziwei; WANG, Shiyu; HU, Yue; RONG, Yaoguang; MEI, Anyi; HAN, Hongwei. **Development of formamidinium lead iodide-based perovskite solar cells: efficiency and stability.** *In: Chemical Science*, v. 13, n. 8, p. 2167–2183, 2022. ISSN: 2041-6520, 2041-6539, DOI: 10.1039/D1SC04769H.