NU9

Desenvolvimento de uma plataforma de análise e acompanhamento da estabilidade de módulos fotovoltaicos de perovskita em ponto de máxima potência

Leandro Xavier Correia¹, Thainá Gouvêa Cunha¹, Thiago Pereira de Oliveira¹ (leandrox.correia@gmail.com, thainagcunha@gmail.com, Thiago.p.oliveira@hotmail.com)

Professor orientador: Lucas Silvestre Chaves Co-Orientadores: Adriano dos Santos Marques, Gabriela de Amorim Soares e Professora Juliana Caroline Dias Pereira

Coordenadora: Lúcia Zennaro Correia

Resumo

A busca pela utilização de energias limpas e renováveis vem crescendo ao longo dos últimos anos, visto os impactos positivos ao meio ambiente no longo prazo. Nesse mesmo caminho, a energia solar vem aumentando sua representatividade na matriz energética brasileira, trazendo a necessidade de aplicação de componentes mais eficientes no processo de geração de energia elétrica. A busca por painéis solares com maiores eficiências e menores custos de fabricação fez com que os materiais com estrutura cristalina do tipo perovskita se tornassem elemento de estudo na corrida para evolução da geração de energia elétrica a partir do sol. O objetivo desse trabalho foi desenvolver um sistema de medidas automáticas para avaliação da estabilidade de células de Perovskita. Para tanto, foi utilizado um banco de relés controlado por Arduino e interpretado por um programa em linguagem Python. Esse sistema foi ligado a um equipamento do tipo *sourcemeter*, de modo a fazer a medição periódica das curvas corrente-tensão das amostras, submetidas a iluminação, e mantê-las em ponto de máxima potência nos períodos de repouso. Os testes realizados mostraram a eficácia do sistema montado para acompanhamento dos testes de estabilidade, possibilitando a medição de múltiplas células testadas em paralelo.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica. Perovskita. Desenvolvimento. Estabilidade. Medição contínua.

1. INTRODUÇÃO

O aumento populacional e a alta demanda na produção de bens de consumo levaram a uma exploração intensa de reservas de combustíveis fósseis, energia não renovável, resultando em progressiva diminuição dessa matéria-prima, bem como em problemas ambientais. Diante disso, é necessário a ampliação da matriz de geração energética, especialmente utilizando energias limpas e renováveis, inesgotáveis devido à constante renovação ao serem utilizadas dentro de um intervalo de tempo significativo e emitir menos gases de efeito estufa.

Nessa perspectiva, destaca-se a energia solar como uma opção viável para suprir o consumo de energia elétrica tanto para residências, quanto para indústrias. O Brasil, por estar localizado próximo à linha do Equador, recebe alta incidência de sol durante todo o dia, com pouca variação ao longo das estações do ano, tornando propícia a geração de eletricidade a partir da luz solar. Apesar desse potencial energético, a energia solar se encontra subutilizada, tendo-se em vista que em 2021, o Brasil ocupava a 14^a posição em capacidade instalada de energia solar, conforme a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, 2020)

Para o aproveitamento dessa matriz energética, se utiliza um dispositivo conhecido como célula solar, que é responsável pela conversão da luz solar em corrente elétrica utilizando o efeito fotovoltaico (CARVALHO, A.; et al., 2010). Esse efeito é produzido por uma célula eletroquímica que gera uma diferença de potencial entre dois eletrodos, quando o dispositivo é submetido à luz. Os primeiros painéis solares foram desenvolvidos por Charles Fritts nos anos 1880 e instalados em um telhado na cidade de Nova Iorque, mas somente a partir dos anos 1940, através da patente e dos trabalhos de Russel Ohl, os painéis solares utilizando junções pn de silício tornaram-se viáveis para as aplicações práticas.

As células solares podem ser divididas em primeira, segunda e terceira gerações dependendo do tipo de tecnologia que empregam. As células solares de primeira geração são baseadas na junção pn, cujo principal exemplo são as células solares de silício cristalino e monocristalino, que apresentam alto custo de produção e instalação. As células solares de segunda geração visam diminuir o custo de produção dos dispositivos fotovoltaicos em relação aos da primeira geração ao utilizar menos materiais – filmes finos. Exemplos dessa geração são as células de silício amorfo, telureto de cádmio (CdTe) e células solares de cobre índio gálio e selênio (CIGS). Apesar de reduzir o custo, esta geração atinge uma eficiência mais baixa que as anteriores. Já as células de terceira geração representam as tecnologias mais recentes, como as células fotovoltaicas orgânicas (OPV) e de Perovskita (PSC), que almejam atingir uma alta eficiência e um baixo custo de produção (MACHADO, C.T.; MIRANDA, F.S., 2015). Logo, pesquisas envolvendo desenvolvimento de novos materiais e métodos de fabricação são essenciais para a continuação do aumento de eficiência, durabilidade e baixo custo das placas fotovoltaicas.

O presente trabalho tem como objetivo construir um sistema de medição para avaliar a estabilidade de células fotovoltaicas de Perovskita, utilizando um banco de relés controlado por Arduino e interpretado por um programa implementado na linguagem de programação Python. Como objeto de estudo, optou-se pelo uso de células solares de perovskita, por ser uma tecnologia mais nova e que apresenta diversas vantagens, tais como baixo custo, alta performance e leveza; entretanto, ainda apresentam baixa durabilidade, em razão da sensibilidade aos efeitos do calor, umidade e instabilidade química (PETROVIC, M.; et al., 2005). A estabilidade desse tipo de dispositivos é avaliada a partir do monitoramento do desempenho fotovoltaico ao longo do tempo, sob exposição dos fatores que causam a degradação das células. Nesse projeto, o sistema de medição foi construído para acompanhamento da estabilidade da Perovskita sob a luz, mantendo a célula em ponto de máxima potência.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Radiação solar

O Sol apresenta um potencial energético extremamente elevado, podendo fornecer cerca de 10.000 vezes mais energia do que é consumido diariamente em escala global (RUHLE; ZABAN, 2010). A radiação solar tem característica de energia eletromagnética, constituindose de oscilações sincronizadas nos campos elétrico e magnético, propagando-se através de um movimento ondulatório (QUASCHNING, V., 2011). Essa transferência de energia pode ser diretamente convertida em energia elétrica, por meio de efeitos da radiação sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores com efeito termoelétrico e fotovoltaico.

O efeito termoelétrico ocorre por diferença de potencial, induzido pela junção de dois metais, em que a junção está a uma temperatura mais elevada do que as outras extremidades

dos fios, apresenta baixos rendimentos e custo elevado para a geração de eletricidade. O efeito fotovoltaico sucede-se da excitação dos elétrons de alguns materiais na presença da luz solar, e é um dos fatores relevantes para essa pesquisa (ANEEL, 2005).

2.2 Tecnologia fotovoltaica

A origem em 1839 da tecnologia fotovoltaica decorre da observação de Alexandre-Edmund Becquerel, ao identificar o aparecimento de tensão e corrente elétrica entre dois eletrodos imersos em um eletrólito quando expostos à luz. Essa luz solar, ao incidir sobre uma célula fotovoltaica, pode ser refletida, absorvida ou passar completamente por uma base, entretanto, somente parte da luz absorvida pela célula pode gerar a energia elétrica. Quando incidida em uma célula fotovoltaica na forma de radiação, essa energia dos fótons absorvidos é transferida aos seus átomos e elétrons. Diante disso, ao ganhar energia, esses elétrons soltamse dos átomos do material da placa e formam um fluxo: a corrente elétrica (GHENSEV, 2006). Isso ocorre em materiais semicondutores, que se definem pela existência de bandas de energia, uma com elétrons (banda de valência), e outra sem elétrons, totalmente vazia (banda de condução), não muito distantes.

No entanto, o efeito fotovoltaico permaneceu durante décadas apenas como um fenômeno científico. Em 1883, surgiu a primeira célula fotovoltaica e a primeira bateria solar com folhas de selênio, desenvolvidas por Charles Fritts (LUKE, A.; HEGEDUS, S., 2003). Somente após esses estudos é que em 1941, surgiu a primeira célula solar a base de silício, desenvolvida por Russel Ohl e colaboradores do laboratório Bell labs (CHANDRASEKARAN, J. et al., 2011).

A crise do petróleo de 1973, período em que os países árabes aumentaram o preço do petróleo, impulsionou o interesse de muitas nações pelas energias alternativas. Sob esse raciocínio, a energia solar, principal fonte de energia alternativa, obteve avanços como a instalação no Canadá de um sistema com 6 megawatt (MW) e a primeira célula com eficiência maior do que 20%. Por conseguinte, em 1995, a iniciativa alemã de larga utilização de sistemas fotovoltaicos residenciais impulsionou legislações para a geração dessa energia em vários países. Em 2002, a potência instalada mundial atingiu a marca de 2000MW (LUKE, A.; HEGEDUS, S., 2003). Dados mais recentes destacam que a capacidade global instalada de geração elétrica fotovoltaica, em 2017, foi de 402 GW e os países com maior capacidade foram China, Estados Unidos, Japão, Alemanha e Itália (REN 21, 2018).

2.3. Célula solar

Observa-se que os parâmetros mais importantes para a avaliação de células solares são a eficiência e o custo. Ademais, os materiais utilizados na confecção, a geometria e estrutura são fatores essenciais para obter-se células solares de alto desempenho (YU, M.; et al., 2012). Sucintamente, o funcionamento de uma célula solar convencional baseia-se no efeito fotovoltaico, o qual ocorre em materiais semicondutores. Destaca-se que um semicondutor pode apresentar elétrons com energias distintas na banda de valência (BV) e na banda de condução (BC), e entre ambas predomina uma banda proibida de energia ou *bandgap* (BG).

As células solares de primeira geração, também conhecidas como células de *wafer*, são compostas por dispositivos de junção p-n de silício monocristalino ou policristalino. (MACHADO, C.T.; MIRANDA, F.S., 2015).

As células solares de segunda geração se caracterizam por utilizar filmes finos, com o fim de alcançar eficiências altas e diminuir custos. São exemplos as células solares de silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe) e células solares finas de índio cobre gálio e selênio (CIGS) (SIMYA, O.K.; et al., 2018; AKINOGLU, B.; et al., 2021).

A terceira geração de células solares é feita a partir de novos materiais, incluindo tintas solares depositadas por impressão convencional, corantes solares, e plásticos condutores. Nesse grupo, podem ser incluídas as tecnologias fotovoltaicas de corantes (DSSC – dye sensitize solar cell), orgânica (OPV - organic photovoltaics) e de perovskita (PSC - perovskite solar cell). As principais vantagens dessas tecnologias emergentes são o uso de materiais abundantes na natureza, e assim como as tecnologias de segunda geração, são empregados na forma de filmes finos, o que diminui o volume de material utilizado reduzindo assim o custo de produção. Isso faz com que a terceira geração apresente um grande potencial de redução de custo de geração de energia. Apesar disso, a estabilidade desses materiais é ainda um empecilho à sua comercialização. De forma adicional, o aprimoramento das técnicas de produção e a fabricação em larga escala tornaram as células de silício cristalizado mais viáveis comercialmente (NREL, 2012). Na Figura 1 é possível identificar as características supracitadas nas três gerações solares, desde as principais diferenças até os elementos mais utilizados.







O setor de pesquisas continua em busca de maiores eficiências para o processo de produção de energia solar, portanto existem diferentes categorias de painéis solares. No Anexo 1, é mostrado os avanços das diversas tecnologias fotovoltaicas até 2022. Diversas pesquisas estudam o desenvolvimento de novas células fotovoltaicas, como as células solares de perovskita (RAPHAEL, E.; et al., 2018), tendo-se atualmente um recorde de 25,7% de eficiência alcançada pela UNIST (Ulsan National Institute of Science and Technology) (NREL,2021).

2.3.1 Células solares de Perovskita

A perovskita foi descoberta em 1939 pelo mineralogista Gustav Rose, em um pedaço de rocha metamórfica rico em clorito dos Montes Urais, na Rússia. O mineral foi enviado a ele por August Alexander Kämmerer, o qual reconheceu o grande potencial valor científico da amostra (CHAKHMOURADIAN, A. R.; WOODWARD, P. M., 2014).

Inicialmente, a denominação perovskita foi dada ao mineral titanato de cálcio CaTiO₃, posteriormente englobando também uma família de compostos que possuem a mesma estrutura, ABX₃, onde A e B são cátions e X é um ânion. Em uma estrutura cúbica ideal, o cátion B possui número de coordenação 6, envolvido por um octaedro de ânions, e o cátion A tem número de coordenação de 12 e estrutura cubo octaédrica. Os átomos A, que são geralmente maiores que

Fonte: RAPHAEL, E., et al. (2018)

os átomos B, situam-se no centro, com os átomos de B formando um cubo à sua volta, conforme ilustra a Figura 2. (CHAKHMOURADIAN, A. R.; WOODWARD, P. M., 2014).





Fonte: CHILVERY. (2016)

Anos mais tarde, essa classe de perovskitas levou ao desenvolvimento das células solares de perovskita, que possuem valores altos de eficiência quando comparados aos das demais células solares da terceira geração. Essas altas eficiências são atribuídas às excelentes propriedades do material, como absorção ampla, cobrindo todo o espectro solar, comportamento semicondutor ambipolar e alta condutividade (GOEL, P.; et al., 2020).

A descoberta de que as perovskitas halogenadas podiam ter aplicações fotovoltaicas aconteceu no ano de 2009 no Japão, pelo grupo de pesquisa de Tsutomu Miyasaka, no campus da Toin University of Yokohama (TUY). Seus estudantes, nesse ano, foram responsáveis por preparar a perovskita de haleto de metilamônio de chumbo (MAPbX₃) e investigar as suas propriedades optoeletrônicas, o que deu origem ao primeiro artigo publicado sobre o assunto. Além disso, os autores fabricaram as primeiras células solares sensibilizadas por corantes utilizando a MAPbX₃, obtendo uma eficiência de conversão de energia (PCE, do inglês *Power Conversion Efficiency*) de até 3,8% (KOJIMA, A.; et al., 2009).

Ao longo da última década, a conversão energética das células solares de perovskita passou de 3,8% de eficiência para 25,7%, mostrando-se uma alternativa competitiva e com diferentes aplicações frente às células de silício (GOEL, P.; et al., 2020). Desse modo, destaca-se que as perovskitas halogenadas possuem algumas propriedades intrínsecas excelentes, como grande absorção e coeficientes de emissão, comprimento longo de difusão de carga, mobilidade de portadores de alta carga, síntese fácil e econômica (GOEL, P.; et al., 2020). Outra vantagem da perovskita é a baixa temperatura de processamento da solução, pois permite a fabricação em substratos flexíveis com desempenho satisfatórios. Tais substratos estão ganhando relevância nas pesquisas recentes devido ao menor custo, potencial para escalabilidade, portabilidade, possibilidade de dobra, peso leve, usabilidade e potencial integração em equipamentos eletrônicos. Todas essas propriedades favoráveis tornaram esse material muito interessante no desenvolvimento de células solares altamente eficientes (POPOOLA, I. K.; et al., 2017).

A célula solar de perovskita é um dispositivo multicamadas composto por um óxido condutor transparente (TCO) como um eletrodo frontal, a camada de perovskita, responsável pela absorção de luz, intercalada entre uma camada de transporte de buracos (do inglês *Hole Transport Layer - HTL*) e uma camada de transporte de elétrons (do inglês *Electron Transport Layer - ETL*) e um eletrodo traseiro. A escolha dos materiais que compõem cada camada depende do alinhamento das bandas de energia e dos solventes utilizados no processo.

(VEDOVATTE, R. M, 2018). A figura 3.a apresenta um esquema das camadas e a Figura 4.b mostra uma foto dessa tecnologia fotovoltaica.

Figura 3.a – Esquema de Camadas







Fonte: Elaboração Própria



2.4. Funcionamento das células solares de Perovskita

Nesse tipo de dispositivo fotovoltaico a perovskita atua como material fotoativo, sendo responsável pela absorção e transformação da energia luminosa em elétrica. Esse processo se inicia com a absorção de um fóton com energia maior ou igual à energia de banda proibida. A absorção da energia desse fóton promove a excitação de um elétron do nível de energia orbital molecular superior ocupado HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*), para o nível de energia orbital molecular inferior desocupado, LUMO (*Lowest Occupied Molecular Orbital*), ou seja, da banda de valência para a banda de condução.

Esses portadores de carga são atraídos um pelo outro e ligados pela força de Coulomb, formando pares elétron-buraco chamados éxciton. Após a dissociação do éxciton, o elétron é injetado na banda de condução do ETL, enquanto o buraco é levado para o HTL. Após transitar pelo ETL, o elétron é coletado pelo eletrodo metálico para transitar pelo circuito externo do dispositivo enquanto o buraco é coletado pelo substrato condutor. A Figura 4 abaixo, representa o mecanismo para geração de fotocorrente nos dispositivos. (VEDOVATTE, R. M, 2018)





Fonte: Adaptado VEDOVATTE, R. M, (2018)

2.5. Caracterização Elétrica

Para a análise dos dispositivos em laboratório, são utilizadas condições padrões para teste elétricos de células e módulos fotovoltaicos, utilizando um simulador solar que consiste em uma lâmpada de Xenônio como fonte luminosa com irradiância de 1000 W/m²- O feixe luminoso passa por um filtro AM 1.5G de forma a imitar o espectro da luz solar após ele atravessar a atmosfera terrestre. (WANG, Q.; et al., 2019).

As amostras são colocadas sob iluminação do simulador solar e a caracterização da performance dos dispositivos fotovoltaicos é feita através de uma medida que consiste na aplicação de uma série de tensões no dispositivo. A cada tensão, a corrente fluindo através do dispositivo é medida. A relação entre as tensões aplicadas e os valores de corrente obtidas gera a curva corrente-tensão (IV), que é a representação gráfica desses dois parâmetros e o método universal para a caracterização de dispositivos fotovoltaicos. (WANG, Q.; et al., 2019.)

A Figura 5 ilustra uma curva IV de um dispositivo fotovoltaico. A partir dela são obtidos os principais parâmetros fotovoltaicos que são utilizados para avaliar o desempenho do dispositivo.



Figura 5 – Curva IV

Fonte: Elaboração Própria

Os parâmetros indicados no gráfico possuem os seguintes significados:

- Tensão de circuito aberto (V_{oc}) : Valor máximo de tensão nos terminais da célula fotovoltaica, sem carga conectada.
- Corrente em curto-circuito (*I*_{sc}): Valor máximo de corrente de carga.
- Ponto de máxima potência (MPP): O ponto corresponde ao produto da tensão de potência máxima e a corrente de potência máxima, ou seja, é igual a potência gerada para condição de operação.
- Tensão de máxima potência (V_{max}): Equivale à tensão no ponto de máxima potência.
- Corrente de máxima potência (I_{max}): Equivale à corrente no ponto de máxima potência.

• Fator de preenchimento (FF, do inglês *fill factor*): É a relação entre a potência no MPP e o produto de curto-circuito vezes a tensão em circuito aberto.

$$FF = \frac{V_{mp} x I_{mp}}{V_{oc} x I_{sc}} \tag{1}$$

A eficiência de conversão de energia fotovoltaica (*Power Conversion Efficiency-PCE*) é calculada pela fórmula abaixo:

$$PCE = \frac{V_{oc}I_{sc}FF}{P_{in}}$$
(2)

onde P_{in} é a potência luminosa de entrada.

2.6. Estabilidade das células de Perovskita

Apesar dos avanços nos valores de eficiência das células de perovskita, a estabilidade da estrutura se coloca como um desafio à sua comercialização. Diferentemente das células de silício, que apresentam uma baixa degradação anual (<1%) devido à oxidação dos contatos, as camadas que compõem as células de perovskita estão sujeitas a degradação por contato com oxigênio, umidade, temperatura e luz. Um encapsulamento eficiente dos dispositivos pode ser capaz de blindar a célula da umidade e do oxigênio, mas a estabilidade das células sob iluminação e calor depende de características intrínsecas ao dispositivo. A realização de testes de estabilidade à luz e na presença de temperatura é essencial no desenvolvimento e validação dos dispositivos fotovoltaicos. Esses fatores têm um efeito significativo na degradação dos dispositivos de perovskita, sendo fundamental avaliar como mudanças de materiais e processos influenciam nesse aspecto. (MACHADO, C.T.; MIRANDA, F.S., 2015).

Para a avaliação da estabilidade térmica, os dispositivos são colocados em fornos e/ou placas de aquecimento em circuito aberto e são medidos com certa frequência para monitoramentos dos parâmetros fotovoltaicos. Já no caso da exposição à luz, é conhecido na literatura que o potencial em que a célula opera tem uma influência direta no perfil de degradação, principalmente ao afetar o campo elétrico interno, a corrente e a densidade de portadores de carga gerados pela luz. Na condição de circuito aberto, o campo é mínimo, pois é polarizado direto e tem alta densidade de portadores de carga, pois não há fluxo de corrente. Em curto-circuito, a densidade de corrente é alta assim como campo interno, com pouco acúmulo de carga. A operação no ponto de máxima potência, ou MPP, encontra-se na situação intermediária. Em geral, a maior degradação é observada na condição de circuito aberto e a menor em MPP, mas há casos em que esse padrão não se repete, num indicativo de que há mecanismos múltiplos de degradação atuando ao mesmo tempo. (KHENKIN, M.V.; et al., 2019). Vale lembrar ainda que, quando em operação, os dispositivos fotovoltaicos operam no ponto de máxima potência, o que justifica a necessidade de se realizar testes sob essa condição. No gráfico abaixo da Figura 6, é possível ver o decaimento da eficiência em função do tempo com o efeito da carga aplicada aos dispositivos. Os dispositivos foram mantidos em condições máxima potência (MPP), curto-circuito e circuito aberto durante um tempo e medidos periodicamente. (KHENKIN, M.V.; et al., 2019).





Fonte: Adaptada de Khenkin et al. (2019)

3. METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se por uma pesquisa científica aplicada de natureza qualitativa exploratória porque objetiva construir um sistema de medição para avaliar a estabilidade das células fotovoltaicas de perovskita, capaz de medir 16 células de modo contínuo e mantendo em máxima potência. Para isso, foi utilizado um módulo de relés que é controlado pelo Arduino, que comunica com o programa escrito em Python, o qual registra os dados e recalcula o ponto de máxima potência (MPP), no final das medidas. Dessa forma, o modelo de análise pode ser utilizado em outros casos semelhantes, com poder explicativo e operativos. Como se trata de um material específico investigado em laboratório, o estudo de caso é o modelo metodológico mais apropriado, à medida que apresenta características em comum e consta de levantamentos teóricos, visto que outros trabalhos realizam essa investigação manualmente, em circuito aberto.

Nesse estudo tem se o objetivo exploratório, já que é desenvolvido no Oninn Centro de Inovações, onde as amostras analisadas pelo MPPT (programa em Python) são expostas a um sistema de iluminação de 1000 W/m².

3.1. Células de perovskita

As células de perovskita utilizadas para avaliar o funcionamento do protótipo foram construídas na Oninn Centro de Inovações, local em que se desenvolve o trabalho. Nesse tipo de célula solar, a perovskita utilizada é um composto híbrido orgânico-inorgânico, com composição variada, sendo a mais comum a composição CH₃NH₃PbI₃. Na Figura 7 abaixo, mostra as identificações das amostras fabricadas. É valido ressaltar que os contatos positivos dos dispositivos são comuns e os negativos são individuais.

Positivo Area ativa 0.5cm² Negativo

Figura 7 – Identificação do dispositivo fabricado na Oninn

Fonte: Elaboração Própria

3.2. Sistema de medição

Para a montagem do sistema foram utilizados os seguintes materiais:

- Keithley's Standard Series 2400;
- Arduino Mega;
- Modulo Relé 16 canais
- Painel elétrico;
- Sistema de Iluminação (simulador de luz Solar);
- Cabeamento;
- Computador com programa em Python para rodar o MPPT;

Abaixo, nas Figuras 8.a é o equipamento que simula a luz solar, 8.b é apresentado o painel do sistema do protótipo MPPT e na Figura 8.c. a conexão das amostras.

Figura 8.a. – Simulador de luz solar



Fonte: Oninn Centro de Inovações (2022)

Figura 8.b. – Painel do protótipo MPPT



Fonte: Elaboração Própria

Figura 8.c. – Conexão da amostra no sistema



Fonte: Elaboração Própria

3.3 Método

O método adotado inicialmente para medição das células de perovskita era totalmente manual, o que dependia de um usuário fazer as medições de cada unidade com as amostras em circuito aberto. Outra forma adotada era colocar um resistor como carga, porém, essa resistência só era ajustada no ponto inicial das medidas. Foi observado que para melhor execução do trabalho seria necessário a implantação de um sistema de medição continua em várias amostras de forma simultânea, para que fosse feita a comparação entre elas. Para a resolução desde problema, foi criado um sistema de medição contínuo, automatizado e que mantém todas as amostras em máxima potência. No fluxograma abaixo, é possível observar a sequência de passos do processo MPPT. No Anexo 2, é possível observar também o fluxo do processamento de dados do programa escrito em Python.

Figura 9 – Fluxo de monitoramento da amostra



Fonte: Elaboração Própria

3.3.1 Montagem do sistema de medição

O processo de montagem consiste na ligação entre o Arduino, o módulo de relé, as células de perovskita, o *keithley* e o computador com o programa criado. Abaixo, é apresentado o esquema de montagem.





Fonte: Elaboração Própria

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os testes realizados com as células de Perovskita são apresentados a seguir. Em todos eles, as amostras foram submetidas constantemente a iluminação de 1000W/m², valor de irradiância padrão para medidas fotovoltaicas, e temperatura de 65°C, resultante do aquecimento das amostras provocado pela lâmpada. A avaliação do sistema de medida foi realizada de forma comparativa com outras estratégias de medição, sempre levando em conta o comportamento dos parâmetros fotovoltaicos ao longo do tempo.

4.1. Resistor vs circuito aberto

O estudo para justificar o trabalho consistiu em avaliar a diferença das medidas dos dispositivos fotovoltaicos em circuito aberto e com resistor, no caso, simulando o sistema MPPT. É valido ressaltar que as medidas feitas manualmente e os resistores não foram ajustados após as medidas, ao contrário do sistema MPPT, no qual as medidas são feitas automaticamente e o valor do potencial de tensão é reajustado após cada medida. Na Tabela 1 são apresentados os dados fotovoltaicos medidos em simulador solar sob condições padrões antes do teste. Na Figura 11 são apresentados os gráficos com a evolução dos parâmetros fotovoltaicos ao longo do tempo: Voc, Jsc, FF e eficiência.

	Voc [V]	Jsc[mA/cm ²]	mA/cm²] FF [%]			
Resistor	1.05	21.0	60.0	13.3		
Circuito aberto	1.05	21.1	59.7	13.3		

Tabela 1 – Dados fotovoltaicos medidos no simulador solar

Fonte: Elaboração Própria

Figura 11 - Evolução dos parâmetros fotovoltaicos



Fonte: Elaboração Própria

Podemos observar nos gráficos acima, que as amostras em circuito aberto apresentaram degradação mais expressiva que as amostras conectadas ao resistor. Após 75 horas, a amostra em circuito aberto perdeu cerca de 60% do desempenho fotovoltaico, contra 20% da célula ligada ao resistor. A eficiência da célula fotovoltaica é resultante da combinação dos parâmetros Voc, Jsc e FF e o comportamento apresentado no gráfico de eficiência é, dessa forma, uma combinação dos gráficos dos demais parâmetros. Observa-se pelos gráficos que, apesar das quedas de Jsc e Voc com o tempo, é o FF que mais influencia na forma da curva de degradação da célula em circuito aberto. Em relação à tensão e à densidade de corrente, foi observado que não houve grandes diferenças entre as duas condições de medida.

O resultado desse teste está de acordo com o reportado na literatura e apresentado no item 2.1.6 e confirma a necessidade de manter os dispositivos sob carga quando testados sob iluminação.

4.2. MPPT vs resistor

Para avaliar o princípio do sistema desenvolvido, foi realizada uma comparação de testes de estabilidade sob a luz usando células de uma mesma amostra, em medidas com o resistor citado anteriormente e o sistema MPPT. Foi usada uma célula para cada sistema e os parâmetros fotovoltaicos iniciais são apresentados na Tabela 2. Como as células apresentavam desempenho diferente entre si, a análise de degradação foi feita com os gráficos normalizados pela primeira medida. Os resultados são apresentados na Figura 12.

Tabela 2 – Dados fotovoltaicos medidos no simulador solar

	Voc [V]	Jsc [mA/cm ²]	FF [%]	PCE [%]	
MPPT	0.96	19.46	63.5	11.9	
Resistor	0.90	18.7	56.7	9.6	

Fonte: Elaboração Própria



Figura 12 – Evolução dos parâmetros fotovoltaicos

Fonte: Elaboração Própria

Foram testadas duas células, com diferentes sistemas de medidas, o qual apresentaram o mesmo comportamento em todos os parâmetros, apesar das pequenas variações. No caso do FF, é importante observar a queda gradual e não muito significativa como no caso do circuito aberto citado no caso anterior. Em relação ao gráfico de eficiência, observa-se uma leve queda próximo as 60 horas na célula que foi inserida o resistor. No caso no MPPT, a queda foi continua durante as 300 horas de teste. No gráfico de FF, a célula utilizando o sistema criado (MPPT), também apresentou valores mais constantes se comparado com a amostras com resistor. Esse teste valida o sistema de medidas de MPPT, o qual foi fundamental para a ampliação do número de canais.

4.3. MPPT com medição de múltiplas células

Finalmente, o sistema MPPT construído foi utilizado para comparação de amostras produzidas em 3 condições diferentes, C1, C2 e C3. As informações referentes às condições fazem parte de segredo industrial. Esse tipo de teste é um exemplo de aplicação real dos testes de estabilidade, onde se procura verificar como a mudança de um parâmetro de processo ou material influencia na durabilidade da célula. Os dados fotovoltaicos das amostras são apresentados na Tabela 3. Foram analisadas no total 16 células, 5 a 6 por dispositivo, proporcionando melhor análise estatística. Novamente, a evolução dos parâmetros fotovoltaicos foi analisada de forma normalizada. Os resultados são apresentados na Figura 13.

Tabela 2 – Dados fotovoltaicos medidos no simulador solar

Variation	Voc		STD	Jsc		STD	FF		STD	PCE		STD
C1 (5 células)	0.99	±	0.01	25.0	±	1.4	64	±	3	16.0	±	1.4
C2 (5 células)	0.94	±	0.00	24	±	1	61	±	2	13.9	±	0.3
C3 (6 células)	0.93	±	0.01	27.7	±	0.6	65.5	±	0.5	16.8	±	0.2

Fonte: Elaboração Própria





Fonte: Elaboração Própria

Durante o teste, pode ser observado que as três condições apresentaram comportamentos distintos, tendo em vista a diferença dos materiais utilizados na fabricação. Como observado no gráfico de eficiência, a condição C3 apresentou maior estabilidade que as demais condições. Pode-se dizer que o Voc praticamente não teve variação nessa condição, enquanto as demais apresentaram queda, mais significativa na condição C1. A densidade de

corrente da amostra C3 também ficou mais estável, enquanto C1 e C2 tiveram quedas parecidas. Por fim, a queda de FF na condição C3 foi linear e com baixa inclinação, ao contrário das demais. Pelos dados apresentados, conclui-se que a condição C3 proporciona a fabricação de células mais estáveis que as demais, sendo C1 a condição com os piores resultados.

Conforme foram apresentados os dados acima, o protótipo de medição criado permitiu distinguir de forma estatística a diferença de comportamento entre as três condições testadas ao longo do tempo. Por permitir uma análise automatizada e com menor vulnerabilidade de erro humano, o sistema protótipo de MPPT tornou o processo de medida de estabilidade de células de perovskita muito mais confiável.

Além das células de perovskita, esse protótipo pode ser aplicado a outros tipos de dispositivos fotovoltaicos de terceira geração, como o OPV, que também requerem estudos de estabilidade, além de ser possível a expansão do número de dispositivos medidos através da utilização de uma outra placa de reles.

CONCLUSÕES

Diante das perspectivas para uso da energia solar, existe uma demanda crescente por estudos mais criteriosos com o objetivo de analisar o comportamento dos arranjos fotovoltaicos sob diversas situações de operações e de materiais, principalmente para as novas tecnologias emergentes. Nesse sentido, a criação de ferramentas adequadas que viabilizem tais investigações tornam-se fundamentais para o desenvolvimento de tais tecnologia, visando à sua aplicação comercial.

Baseado nos estudos apresentados no referencial teórico, foi construído o sistema para melhor estudo e acompanhamento das performances das células fotovoltaicas de perovskitas desenvolvidas na Oninn Centro de Inovações.

Com a efetivação desse sistema, constatou-se que os objetivos foram alcançados: as medições com o sistema MPPT construído foram similares ao sistema com resistor, mas resultaram em uma melhoria considerável de automação e maior precisão, uma vez que a cada medida o ponto de máxima potência foi atualizado, o que simula uma aplicação real de sistema fotovoltaico. A possibilidade de se avaliar múltiplas células ao mesmo tempo tornou a análise mais confiável pela possibilidade de uma análise estatística de desempenho, melhorando o processo de pesquisa e desenvolvimento dessa tecnologia, que apresenta um grande potencial para os próximos anos.

2. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Deus primeiramente e sempre, pela oportunidade que nos foi concedida em efetuar essa pesquisa, enfrentar os desafios e alcançar resultados.

Aos nossos coorientadores Adriano dos Santos Marques e Gabriela de Amorim Soares, por acreditarem em nossa competência no desenvolvimento dessa pesquisa, possibilitar que efetuássemos juntamente a Oninn Centro de Inovações a conclusão desse projeto. Além disso, a troca de experiências e as constantes orientações durante este processo foram fundamentais para a realização desse estudo, bem como garantiram a confiabilidade dos nossos resultados.

Aos professores Lucas Silvestre Chaves e Juliana Carolina Dias Pereira pelo suporte e atenção dada a produção desse trabalho. Ademais, por terem aceitado a proposta de fazer parte deste momento importante, não só das nossas vidas, mas da carreira que pretendemos seguir.

Aos amigos, parceiros de vida, de laboratório e de sala dedicamos um muito obrigado, por contribuírem diretamente ou indiretamente na construção de conhecimento, pelos incentivos e apoio emocional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKINOGLU, Bulent G.; TUNCEL, Bilge; BADESCU, Viorel. Beyond 3rd generation solar cells and the full spectrum project. Recent advances and new emerging solar cells. Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 46, p. 101287, 2021

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2005. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Brasília, Brasil, 2005. 2ª ed.ISBN: 85-87491-09-1.

CARVALHO, E.F.A.; CALVETE, M.J.F. Energia Solar: Um passado, um presente... um futuro auspicioso. Revista Virtual de Química, 2010, 2(3), 192-203. ISSN1984-6835

CHAKHMOURADIAN, A. R.; WOODWARD, P. M. Celebrating 175 years of perovskite research: a tribute to Roger H. Mitchell. Pp. 387–391, 2014. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00269-014-0678-9. Acesso em: 16 de Maio 2022.

CHANDRASEKARAN, J. et al. Hybrid solar cell based on blending of organic and inorganic materials- Na overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.15, n.2, p. 1228-1238,2011

CHILVERY, Ashwith et al. A perspective on the recent progress in solution-processed methods for highly efficient perovskite solar cells. Science and Technology of advanced MaTerialS, v. 17, n. 1, p. 650-658, 2016.

GHENSEV, Almir. Materiais e processos de fabricação de células fotovoltaicas. Orientador: Prof. Carlos Alberto Alvarenga. 2006. 154 f. Monografia (Pós-graduação em Fontes Alternativas de Energia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006. Disponível em: https://www.solenerg.com.br/files/monografia_almir.pdf. Acesso em: 16 abr. 2022.

GOEL, P. et al. Perovskite materials as superior and powerful platforms for energy conversion and storage applications. Nano Energy, [S. l.], v. 80, p. 1-27, 1 fev. 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285520311265>. Acesso em: 17 de Maio 2022.

IRENA (2020). Renewable Energy Statistics 2020. The International Renewable Energy
Agency, Abu Dhabi, 2020. Disponível em:
<https://www.irena.org/publications/2020/Jul/Renewable-energy-statistics-2020>. Acesso
em:16 de Maio. 2022.

KHENKIN, M.V.; ANOOP, K.M; EUGENE, A.K.; FISHER, I.V.; Bias-Dependent Degradation of Various Solar Cells: Lessons for Stability of Perovskite Photovoltaics & Environmental Science. Energy 09 de janeiro 2019.

KOJIMA, Akihiro et al. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. Journal of the American Chemical Society, v. 131, n. 17, p. 6050-6051, 2009.

LUKE, A.; HEGEDUS, S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. [s.l] John Wiley & Sons LTD, 2003.

MACHADO, C.T.; MIRANDA, F.S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. Ver. Virtual Quim.2015, 7 (1), 126

NREL.2012. Solar Photovoltaic Technology Basics. National Renewable Energy Laboratory (online) 18 de maio de 2012. (Citado em: 04 de dezembro de 2012) http://www.nrel.gov./learning/re_photovoltaics.html.

PETROVIC, M. et al. Perovskites: Solar cell & engineering applications - materials and device developments. Solar Energy 2015, 122, 678. Acesso em: 15 de Maio. 2022.

POPOOLA, I. K.; GONDAL, M. A.; QAHTAN, T. F. Recent progress in flexible perovskite solar cells: Materials, mechanical tolerance and stability. Elsevier, [s. 1.], 26 out. 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117314120. Acesso em: 13 de Maio. 2022.

QUASCHNING, Volker. 2011. Regenerative Energiesysteme: Technologie – Berechnung-Simulation. Munchen: Carl Hanser Verlag, 2011. ISBN 978-3-446-42732-7.

RAPHAEL, Ellen et al. Células solares de perovskitas: uma nova tecnologia emergente. Química Nova, v. 41, p. 61-74, 2018.

REN 21 (2018). Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Renewables 2018 Global Status Report. Disponível em http://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2018/06/17-8652_GSR2018_FullReport_web_final_.pdf

RÜHLE, S.; SHALOM, M.; ZABAN, A.; Quantum-Dot-Sensitized Solar Cells. ChemPhysChem 2010, 11, 2290

SIMYA, O.K; RADHAKRISHNAN, P; ASHOK, Anuradha. Engineered nanomaterials for industrial application: an overview. Handbook of nanomaterials for industrial applications, p. 127-134, 2018.

VEDOVATTE, Rafael Misael. Estudo de filmes finos para aplicação em dispositivos fotovoltaicos. Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Cava. 2018. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2018. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3540/1/LD_PPGCEM_M_Vedovatte%2 C%20Rafael%20Misael_2018.pdf. Acesso em: 13 maio 2022.

WANG, Q. et al. Enhancement in lifespan of halide perovskite solar cells. Energy & Environmental Science, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 865-886, Royal Society of Chemistry (RSC), 2019. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1039/c8ee02852d. Acesso em: 14 de Maio. 2022.

YU, M.; LONG, YUN-ZE.; SUN, B.; FAN, Z. Recent advances in solar cells based on onedimensional nanostructure arrays. Nanoscale 2012,4,2783.



Anexo 1 – Eficiências das diversas tecnologias fotovoltaicas (1976-2021) – National Renewable Energy Laboratory

Fonte: NREL (2021)





Fonte: Elaboração Própria