

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VICTORIA FERREIRA MANCINI

ESTUDO DA APLICAÇÃO DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA ORGÂNICA EM  
AMBIENTE INTERNO COM ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

CURITIBA

2025

VICTORIA FERREIRA MANCINI

ESTUDO DA APLICAÇÃO DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA ORGÂNICA EM  
AMBIENTE INTERNO COM ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação de Engenharia e Ciência dos Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais .

Orientadora: Prof<sup>ª</sup> .Dr<sup>ª</sup> .Lucimara Stolz Roman  
Coorientador: Dr. Kaike Rosivan Maia Pacheco

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Mancini, Victoria Ferreira

Estudo da aplicação de uma célula fotovoltaica orgânica em ambiente interno com iluminação artificial. / Victoria Ferreira Mancini. – Curitiba, 2025.  
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> .Dr<sup>a</sup> .Lucimara Stolz Roman

Coorientador: Dr. Kaike Rosivan Maia Pacheco

1. Energia solar. 2. Energia renovável. 3. Iluminação. 4. Análise espectral.  
I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais. III. Roman, Lucimara Stolz. IV. Pacheco, Kaike Rosivan Maia. V. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA E  
CIÊNCIA DOS MATERIAIS - 40001016033P9

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **VICTORIA FERREIRA MANCINI**, intitulada: **ESTUDO DA APLICAÇÃO DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA ORGÂNICA EM AMBIENTE INTERNO COM ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL**, sob orientação da Profa. Dra. LUCIMARA STOLZ ROMAN, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 12 de Novembro de 2025.

Assinatura Eletrônica  
13/11/2025 15:52:44.0  
LUCIMARA STOLZ ROMAN  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
13/11/2025 11:34:06.0  
MAIARA DE JESUS BASSI  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ -  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA )

Assinatura Eletrônica  
14/11/2025 09:53:29.0  
CAMILLA KARLA BRITES QUEIROZ MARTINS DE OLIVEIRA  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
13/11/2025 10:02:02.0  
KAIKE ROSIVAN MAIA PACHECO  
Coorientador(a) (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

*Tenho certeza de que, sem a base sólida proporcionada pela minha família, este sonho não teria se tornado realidade. Dedico a conclusão desta pesquisa a todos os meus familiares, em especial aos meus pais, cujo apoio incondicional foi essencial ao longo desta jornada. Também dedico este trabalho ao meu irmão, por toda a ajuda e incentivo que me ofereceu. Meus agradecimentos jamais serão suficientes para expressar toda a minha gratidão.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder o dom da vida e por todas as oportunidades que tive até hoje.

Aos meus pais, Ricardo e Juliana, e ao meu irmão, Gabriel, por me apoiarem incondicionalmente nesta jornada universitária, desde os vestibulares até este momento. Nos dias em que pensei em desistir, vocês estiveram ao meu lado, oferecendo apoio e, quando necessário, puxões de orelha. Tenho muito orgulho da nossa família!

Às famílias Melo, Ferreira e Mancini, por acreditarem no meu potencial e me apoiarem em cada decisão. Ser a primeira neta a conquistar o ensino superior e a pós-graduação em uma universidade pública é um motivo de imensa felicidade para mim.

À Professora Lucimara, por abrir as portas do grupo de pesquisa e me acolher desde os estudos para o TCC da graduação. Além de orientadora, foi uma verdadeira conselheira em todos os momentos em que precisei.

Aos meus amigos, que estiveram comigo desde antes do início do mestrado. Obrigada por me cobrarem quando necessário, por me ouvirem nos momentos de ansiedade e desespero, e por compartilharem comigo as horas de diversão. Sem a amizade de vocês, esses anos teriam sido muito mais difíceis.

Aos amigos que, mesmo à distância, estiveram presentes ao longo dessa trajetória. A amizade de vocês foi fundamental para enfrentar as turbulências do caminho.

Aos colegas do DiNE, que estiveram ao meu lado nesses últimos quatro anos e fizeram parte da construção do conhecimento que adquiri, em especial à Camila, Marcos, Lhonidas e Luciano, que me ajudaram com o desenvolvimento de atividades neste período.

Ao meu coorientador Kaike, por aceitar fazer parte deste trabalho. Sou muito grata pela atenção, pelos conselhos, dicas, broncas e por todas as oportunidades de aprendizado que me proporcionou.

Às Professoras Camilla Oliveira, Marcela Mohallem e Dra. Maiara Bassi, pela atenção, disponibilidade e pelas contribuições que enriqueceram as etapas de qualificação e defesa, contribuindo de forma significativa para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu aprendizado ao longo dessa jornada.

Por fim, à CAPES, pelo apoio financeiro durante o mestrado.

*“A ciência nunca resolve um problema  
sem criar pelo menos outros dez”.*  
*(George Bernard Shaw)*

## RESUMO

A crescente demanda por energia elétrica, impulsionada pelo uso intensivo de dispositivos eletrônicos e sistemas conectados, tem estimulado o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis capazes de operar em ambientes de baixa luminosidade. Entre essas tecnologias, os dispositivos fotovoltaicos orgânicos (OPVs) se destacam pela leveza, flexibilidade, semitransparência e boa resposta sob iluminação artificial. Este trabalho teve como objetivo investigar o desempenho de um painel fotovoltaico orgânico comercial em condições indoor, avaliando sua eficiência elétrica sob diferentes intensidades luminosas e sua capacidade de alimentar um dispositivo de armazenamento de energia (power bank). A metodologia envolveu a realização de medidas de corrente e tensão (IxV), monitoramento de iluminância e temperatura, análise espectral das fontes de luz artificial e comparação com o espectro de absorção do OPV. Os experimentos foram conduzidos em dois ambientes distintos da Universidade Federal do Paraná, abrangendo condições variadas de iluminação artificial e natural. Os principais resultados mostram que o desempenho do OPV depende fortemente da iluminância do ambiente e da compatibilidade entre os espectros de emissão da fonte de luz e de absorção do painel. Verificou-se que a potência gerada é mais sensível à variação de iluminância do que à temperatura. Além disso, a posição do painel em relação à fonte luminosa influenciou significativamente a potência nominal obtida. A integração com o power bank mostrou-se viável, ainda que limitada a taxas de carregamento modestas. Em conjunto, os resultados indicam que OPVs podem ser aplicados em ambientes internos para alimentar dispositivos de baixo consumo, contribuindo para soluções energéticas sustentáveis em cenários urbanos.

**Palavras-chaves:** Energia solar, OPV, ambiente interno, iluminação artificial, eficiência espectral, carregador portátil, energia renovável.

## ABSTRACT

The increasing demand for electrical energy, driven by the widespread use of electronic devices and connected systems, has motivated the development of sustainable technologies capable of operating under low-light conditions. Among these technologies, organic photovoltaic devices (OPVs) stand out due to their light weight, flexibility, semitransparency, and strong performance under artificial lighting. This work aimed to evaluate the performance of a commercial organic photovoltaic panel in indoor environments, assessing its electrical efficiency under different light intensities and its ability to power an energy-storage device (power bank). The methodology involved current–voltage (I×V) measurements, monitoring of illuminance and temperature, spectral analysis of artificial light sources, and comparison with the OPV absorption spectrum. Experiments were conducted in two different indoor environments at the Federal University of Paraná, covering varied conditions of artificial and natural lighting. The main results demonstrate that the OPV's performance is strongly dependent on environmental illuminance and on the compatibility between the emission spectrum of the light source and the absorption spectrum of the panel. The generated power was found to be more sensitive to illuminance variations than to temperature changes. Additionally, the panel's positioning relative to the light source significantly influenced the nominal power obtained. Integration with the power bank proved feasible, although limited to modest charging rates. Overall, the findings indicate that OPVs can be applied indoors to power low-consumption electronic devices, contributing to sustainable energy solutions in urban environments.

**Key-words:** Solar energy, OPV, indoor environment, artificial lighting, spectral efficiency, power bank, renewable energy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1 – Objetivos da agenda 2030 da ONU.<br>Fonte: Nações Unidas - Brasil. . . . .   | 19 |
| FIGURA 2 – Células solares utilizadas para telefonia rural [36]. . . . .  | 25 |
| FIGURA 3 – Diagrama de orbitais do carbono no estado fundamental (A) e no estado hibridizado $sp^3$ (B). Aqui, os orbitais $2s$ e os três orbitais $2p$ fundem-se para formar quatro orbitais híbridos $sp^3$ equivalentes. Fonte: autoria própria. . . . .   | 32 |
| FIGURA 4 – Diagrama de orbitais do carbono no estado fundamental (A) e no estado hibridizado $sp^2$ (B). No estado excitado, um elétron do orbital $2s$ é promovido para o orbital $2p$ vazio, permitindo a formação de três orbitais híbridos $sp^2$ e mantendo um orbital $p$ puro. Fonte: autoria própria. . . . .   | 32 |
| FIGURA 5 – Diagrama de orbitais do carbono no estado fundamental (A) e no estado excitado e hibridizado $sp$ (B). Observa-se que, no estado hibridizado, um orbital $2s$ mistura-se com um orbital $2p$ , formando dois orbitais híbridos $sp$ , enquanto os outros dois orbitais $p$ permanecem inalterados. Fonte: autoria própria. . . . .   | 33 |
| FIGURA 6 – Representações tridimensionais das geometrias moleculares adotadas pelo átomo de carbono, representado por A, conforme seu tipo de hibridização. (a) Na hibridização $sp^3$ , o carbono forma quatro orbitais híbridos distribuídos em uma geometria tetraédrica, com ângulos de ligação de aproximadamente $109,5^\circ$ . (b) Na hibridização $sp^2$ , três orbitais híbridos organizam-se em uma geometria trigonal plana, com ângulos de $120^\circ$ . (c) Na hibridização $sp$ , dois orbitais híbridos alinham-se em uma geometria planar, com ângulo de $180^\circ$ . Fonte: autoria própria. . . . . | 33 |
| FIGURA 7 – Representação esquemática de três tipos de éxcitons: (a) éxciton Frenkel, (b) éxciton intermediário, também conhecido como éxciton de transferência de carga, e (c) éxciton Mott-Wannier. Os círculos simbolizam as unidades moleculares. Fonte: autoria própria. . . .  | 35 |
| FIGURA 8 – Esquema da estrutura de um dispositivo fotovoltaico orgânico com camada ativa. Fonte: autoria própria. . . . .   | 36 |

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 9 – Representação do diagrama de energia de um dispositivo fotovoltaico orgânico (OPV) com estrutura de monocamada. A camada ativa é formada por polímeros semicondutores aceitadores e doadores de elétrons, e o eixo vertical representa os níveis de energia (orbitais HOMO e LUMO). A figura ilustra as etapas fundamentais do funcionamento de um OPV, com estrutura de monocamada: em (1) ocorre a absorção da luz e geração de éxcitons, seguido pela separação das cargas na interface doador/aceitador (2) e em (3) há transporte e coleta de cargas nos eletrodos - elétrons migram para o cátodo e os buracos para o ânodo. Fonte: autoria própria. | 37 |
| FIGURA 10 – Esquema da estrutura de um dispositivo em heterojunção em bicamada, onde há uma camada composta por um doador e outra por um aceitador de elétrons. Fonte: autoria própria. . . . .   | 38 |
| FIGURA 11 – Representação do diagrama de energia para ilustrar o processo de transferência de cargas num dispositivo com heterojunção em bicamada. Em (1), material doador, ocorre a formação dos éxcitons, os quais se difundem até a interface doador/aceitador (2). Ocorre então a transferência do elétron para o material aceitador (3), mantendo o buraco no material doador. O transporte dos elétrons ocorre no material aceitador, enquanto os buracos são transportados no material doador, até atingirem seus respectivos eletrodos. Fonte: autoria própria. . . . .   | 39 |
| FIGURA 12 – Esquema da estrutura de um dispositivo em heterojunção em volume, contando com uma camada ativa composta por uma blenda de materiais, doador e aceitador de elétrons. Fonte: autoria própria.   | 40 |
| FIGURA 13 – Diagrama de energia de um dispositivo com heterojunção em volume. No material doador (1) ocorre a formação dos éxcitons, os quais se difundem até a interface doador/aceitador (2). Há a dissociação dos éxcitons em (3), para as moléculas aceitadoras. Entram as moléculas aceitadoras, os elétrons são transportados, do mesmo modo que os buracos são transportados do material doador até os respectivos eletrodos. Fonte: autoria própria. . . .  | 40 |
| FIGURA 14 – Representação da curva característica de um dispositivo fotovoltaico ideal, no escuro e sob iluminação. Fonte: autoria própria. . .   | 44 |
| FIGURA 15 – Montagem esquemática do método de funcionamento do equipamento [105]. . . . .   | 45 |

- FIGURA 16 – Representação esquemática do processo de deposição de filmes finos por *spin coating*, técnica que permite o controle da espessura do filme por meio da velocidade de rotação e da viscosidade da solução utilizada. O processo ocorre em quatro etapas principais: (1) gotejamento da solução sobre o substrato estacionário; (2) distribuição inicial da solução sobre o substrato, que começa a girar; (3) formação de um filme uniforme pela força centrífuga, enquanto o excesso de solução é expelido e, por fim, (4) secagem e evaporação do solvente, resultando em um filme fino homogêneo. Fonte: adaptado de [107]. . . . . 46
- FIGURA 17 – Ilustração do processo de deposição de filmes finos por *drop-casting*, técnica utilizada na fabricação de dispositivos eletrônicos e sensores. O processo ocorre em três etapas: 1) Uma gota da solução contendo o material ativo é depositada manualmente sobre o substrato. 2) A solução permanece em repouso, permitindo que o solvente evapore naturalmente, promovendo a formação do filme. 3) O substrato é aquecido em uma placa térmica para completar a evaporação do solvente e promover o tratamento térmico do filme. Fonte: adaptado de [108]. . . . . 47
- FIGURA 18 – Representação da técnica de *sputtering*, onde pode ocorrer uma deposição uniforme sobre grandes áreas, através da utilização de alvos com medidas de diâmetros maiores, além de apresentar controle com precisão da espessura do material depositado a partir de ajustes de parâmetros de processo. Entretanto, o equipamento utilizado contém alto valor associado, dificultando a utilização da técnica, junto com a desvantagem de que alguns materiais podem sofrer degradação ao se aplicar um bombardeamento de altos valores de energia [111]. Fonte: adaptado de [112]. . . . . 48
- FIGURA 19 – A figura ilustra o processo de funcionamento de uma câmara de evaporação térmica. O processo de deposição ocorre dentro de uma redoma de vidro, que é evacuada por uma bomba de alto vácuo para reduzir a pressão interna e evitar possíveis contaminações durante a deposição. O material que será depositado (representado pela fonte) é aquecido através de um filamento metálico até evaporar. Os átomos ou moléculas evaporados se deslocam em direção ao substrato, onde se condensam e formam um filme fino sobre a amostra. Fonte: adaptado de [116]. . . . . 49

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 20 – Esquema ilustrativo do processo de deposição de filmes finos por <i>slot-die coating</i> , técnica amplamente utilizada na fabricação de OPVs, por permitir alto controle de uniformidade e espessura, além da compatibilidade com processos em escala industrial, como impressão <i>roll-to-roll</i> . 1) Formação do menisco entre o cabeçote e o substrato, com o fluido sendo depositado por uma fenda controlada. 2) Movimento do substrato em relação ao cabeçote, promovendo a deposição uniforme do filme líquido sobre a superfície. ) Representação do padrão final de recobrimento sobre o substrato, com múltiplas trilhas paralelas de material depositado. Fonte: adaptado de [118]. . . . . | 50 |
| FIGURA 21 – Fachada do Centro de Pesquisas e Eficiência Energética, localizado em Anápolis (GO), onde foram instalados painéis fotovoltaicos orgânicos cobrindo aproximadamente 850 m <sup>2</sup> da estrutura [122]. . . . .   | 51 |
| FIGURA 22 – Equipamento da FOM <i>Technology</i> presente no laboratório. Fonte: Marcos Solivan Camargo. . . . .   | 54 |
| FIGURA 23 – Estação Tubo de Ensaio situada no Centro Politécnico da UFPR, em Curitiba. A estrutura foi utilizada como modelo experimental para a aplicação de painéis fotovoltaicos orgânicos (OPVs). Fonte: Marcos Solivan Camargo. . . . .   | 55 |
| FIGURA 24 – Instalação de placas solares orgânicas no prédio PA, no Centro Politécnico da UFPR. Fonte: arquivo DiNE. . . . .   | 55 |
| FIGURA 25 – Painel fotovoltaico orgânico (OPV) utilizado nos experimentos deste estudo, pertencente ao Grupo de Dispositivos Nanoestruturados (DiNE). O módulo apresenta área total de 49,8 × 125,6 cm e área ativa estimada de 1056 cm <sup>2</sup> . Fonte: autoria própria. . . . .   | 57 |
| FIGURA 26 – Painel fotovoltaico orgânico (OPV) utilizado nos experimentos deste estudo, pertencente ao Grupo de Dispositivos Nanoestruturados (DiNE). O módulo apresenta área total de 49,8 × 125,6 cm e área ativa estimada de 1056 cm <sup>2</sup> . Fonte: autoria própria. . . . .   | 58 |
| FIGURA 27 – <i>Power bank</i> da marca PINENG, modelo PN-952. O exemplar possui capacidade de 3,7V e 5000mAh. Fonte: Saravati Materiais Técnicos . . . . .   | 59 |
| FIGURA 28 – <i>Power bank</i> da marca KTS, modelo KTS-1288. Fonte: J & Y Store.   | 59 |
| FIGURA 29 – Visão geral e organização do ambiente de ensaio 1. a) Visão geral do laboratório DiNE 2. b) Representação esquemática do posicionamento do OPV no local. c) Posicionamento do painel durante a coleta de dados. Fonte: autoria própria. . . . .  | 60 |

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 30 – Visão geral e organização do ambiente de ensaio 2. a) e c) Representações esquemáticas das posições de ensaio 2.1 e 2.2, respectivamente. b) Visão geral da sala de reuniões. Fonte: autoria própria. . . . .   | 62 |
| FIGURA 31 – Luxímetro PHYWE. O funcionamento baseia-se na captação da intensidade luminosa incidente em seu sensor, possibilitando a correlação entre a quantidade de luz disponível no ambiente e o desempenho do painel fotovoltaico durante os ensaios. Fonte: autoria própria. . . . .  | 63 |
| FIGURA 32 – Termômetro FLIR TG165 - Imaging IR Thermometer. Seu funcionamento se dá a partir da detecção da energia emitida, transmitida e refletida, do objeto. O aparelho então converte a informação detectada em uma leitura de temperatura, a qual é exibida em seu visor. Fonte: autoria própria. . . . .   | 64 |
| FIGURA 33 – Multímetro digital MINIPA. Seu funcionamento baseia-se na detecção e conversão dos sinais elétricos em valores exibidos no visor digital. Fonte: autoria própria. . . . .   | 65 |
| FIGURA 34 – Fonte AGILENT, modelo E3643A. Sua função é fornecer condições controladas de operação e realizar a aquisição precisa dos dados necessários para a análise do desempenho fotovoltaico. Fonte: autoria própria. . . . .   | 66 |
| FIGURA 35 – Esquema do circuito experimental utilizado para a medição da corrente elétrica em uma célula solar, com a presença de uma fonte de alimentação auxiliar e um amperímetro conectado em série. O arranjo possibilita a determinação de curvas IxV, a análise do ponto de máxima potência e a caracterização da resposta fotoelétrica sob condições controladas de iluminação. Fonte: autoria própria. . . . . | 66 |
| FIGURA 36 – Fluorog HORIBA (fluorímetro acoplado a espectrofotômetro UV-VIS). Equipamento utilizado para a caracterização óptica de materiais, permitindo a análise de fluorescência e absorbância. O sistema possibilita investigar propriedades espectroscópicas fundamentais para a compreensão do desempenho de dispositivos fotovoltaicos orgânicos. Fonte: autoria própria. . . . .                               | 67 |
| FIGURA 37 – Espectro da distribuição de energia da lâmpada instalada no laboratório [136]. . . . .  | 68 |
| FIGURA 38 – Espectro da distribuição de energia da lâmpada instalada na sala de reuniões [137]. . . . .   | 69 |

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 39 – (a) Amostra A0 utilizada para a caracterização de absorvência do material; (b) Posicionamento da amostra no equipamento de medidas. . . . .   | 70 |
| FIGURA 40 – Espectro de absorção do painel comercial utilizado. . . . .   | 71 |
| FIGURA 41 – Amostra A1 utilizada para caracterização. (a) Película protetora semitransparente de cor laranja; (b) Película protetora (superior) e amostra do OPV após a retirada da camada de proteção (inferior). . . . .  | 72 |
| FIGURA 42 – Imagens da preparação da amostra A2. (a) Camada semitransparente amarelada de material colante; (b) Amostra após a retirada das camadas semitransparente laranja e de cola (superior), camada de proteção laranja (meio) e material colante (inferior). . . . .                                     | 72 |
| FIGURA 43 – Camada nomeada por " <i>grid</i> " retirada da amostra inicial (à esquerda) e amostra A3 do OPV (à direita). . . . .  | 73 |
| FIGURA 44 – Espectro de absorção conjunto de todas as amostras utilizadas. . . . .  | 74 |
| FIGURA 45 – Espectros de absorvência UV-Vis normalizados das amostras A0–A4. . . . .  | 75 |
| FIGURA 46 – Curvas corrente versus tensão (IxV) do dispositivo fotovoltaico orgânico medido em duas condições de iluminação dentro do laboratório: ambiente claro (luzes acesas) e ambiente escuro (luzes apagadas, com iluminação residual proveniente de frestas e LEDs de equipamentos eletrônicos). . . . . | 77 |
| FIGURA 47 – Curva de potência para o painel em ambiente com iluminação artificial ligada. . . . .   | 78 |
| FIGURA 48 – Gráfico da potência nominal pela variação da iluminância. . . . .   | 79 |
| FIGURA 49 – Gráfico da potência nominal pela variação da iluminância. . . . .   | 79 |
| FIGURA 50 – Gráfico de potencia nominal pela variação da temperatura. . . . .   | 80 |
| FIGURA 51 – Gráfico de potência nominal pela variação da temperatura. . . . .   | 81 |
| FIGURA 52 – Curvas IxV do OPV comercial medido em duas posições 2.1 e 2.2, sobre a mesa de reuniões sob duas condições de iluminação: claro (cortinas abertas e luzes artificiais acesas) e escuro (luzes apagadas e cortinas abertas). . . . .   | 82 |
| FIGURA 53 – Gráfico de potência nominal pela variação da iluminância em ambiente sob iluminação artificial presente, com o OPV situado no meio da mesa de reuniões. . . . .   | 83 |
| FIGURA 54 – Gráfico de potência nominal pela variação da iluminância, onde não há influência de iluminação artificial. A claridade presente no local é proveniente da iluminação das janelas. . . . .   | 84 |
| FIGURA 55 – Gráfico de potência nominal pela variação da temperatura, em ambiente sob iluminação artificial presente. . . . .   | 85 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 56 – Gráfico de potência nominal pela variação da temperatura, sob influência apenas da iluminação natural do ambiente. . . . .   | 86 |
| FIGURA 57 – Gráfico de potência nominal pela variação da iluminância em ambiente iluminado, com o OPV situado na beirada da mesa de reuniões. . . . .  | 87 |
| FIGURA 58 – Gráfico de potência nominal pela variação da iluminância em ambiente onde a luz é unicamente proveniente da claridade das janelas, com o OPV situado na beirada da mesa de reuniões. . . . . | 87 |
| FIGURA 59 – Gráfico de potência nominal pela variação da temperatura, com a iluminação artificial da sala de reuniões ligada, com o OPV na beirada da mesa. . . . .                                      | 88 |
| FIGURA 60 – Gráfico da potência nominal pela variação da temperatura, sob iluminação artificial desligada, com o dispositivo situado na beirada da mesa. . . . .   | 89 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| TABELA 1 – Camadas estruturais das amostras utilizadas no gráfico da figura 44.  | 74 |
| TABELA 2 – Parâmetros elétricos característicos do OPV sob iluminação artificial controlada. . . . .   | 78 |
| TABELA 3 – Parâmetros elétricos obtidos a partir das medições do OPV sob iluminação artificial, com o dispositivo posicionado na região central e na beirada da mesa de reuniões. . . . .  | 82 |
| TABELA 4 – Valores mínimos e máximos de potência nominal em cada ambiente de ensaio. . . . .   | 90 |
| TABELA 5 – Tempo estimado de carregamento dos modelos de <i>power bank</i> PINENG e KTS sob diferentes condições de iluminação e locais de posicionamento dos dispositivos OPV, considerando taxas de carregamento de 1% e 100%. . . . . | 92 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

|               |   |
|---------------|---|
| $\eta$        | eficiência de conversão de potência         |
| $\lambda$     | Comprimento de onda da radiação incidente   |
| $FF$          | fator de preenchimento                      |
| $IPCE$        | eficiência quântica externa                 |
| $I_{\lambda}$ | Intensidade da fonte                        |
| $I_{sc}$      | corrente de curto circuito                  |
| $N_c$         | Número de cargas geradas                    |
| $N_f$         | Número de fótons incidentes                 |
| $P_{max}$     | Potência máxima de saída                    |
| $V_{oc}$      | tensão de circuito aberto                   |
| $V_{oc}$      | Tensão de circuito aberto                   |
| $h$           | Constante de Planck                         |
| <b>CIGS</b>   | Seleneto de cobre, índio, gálio             |
| <b>D/A</b>    | Doador/Aceitador                            |
| <b>FTO</b>    | Óxido de estanho dopado com flúor           |
| <b>HOMO</b>   | Nível de maior ocupação molecular           |
| <b>ITO</b>    | Óxido de índio dopado com estanho           |
| <b>LUMO</b>   | Nível de menor ocupação molecular           |
| <b>NREL</b>   | <i>National Renewable Energy Laboratory</i> |
| <b>OFETs</b>  | Transistores orgânicos de efeito de campo   |
| <b>OLED</b>   | Diodo emissor de luz orgânico               |
| <b>OPV</b>    | <i>Organic Photovoltaic</i>                 |
| <b>PCE</b>    | Eficiência de conversão de potência         |
| <b>c</b>      | Velocidade da luz no vácuo                  |

## SUMÁRIO

|          |  |    |
|----------|--|----|
| <b>1</b> | <b>APRESENTAÇÃO</b> . . . . .  | 18 |
| <b>2</b> | <b>OBJETIVOS</b> . . . . .   | 23 |
| <b>3</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .  | 24 |
| 3.1      | HISTÓRIA E CONTEXTO GERAL DA ENERGIA SOLAR . . . . .   | 24 |
| 3.1.1    | Tipos de células fotovoltaicas . . . . .   | 26 |
| 3.1.2    | Comparação do impacto ambiental entre painéis fotovoltaicos de Silício e Orgânicos . . . . . | 27 |
| 3.2      | ELETRÔNICA ORGÂNICA E MATERIAIS FUNCIONAIS . . . . .   | 29 |
| 3.2.1    | Semicondutores orgânicos . . . . .   | 31 |
| 3.2.2    | Éxcitons . . . . .   | 34 |
| 3.3      | DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS ORGÂNICOS (OPVS) . . . . .  | 35 |
| 3.3.1    | Estruturas . . . . .   | 35 |
| 3.3.2    | Estabilidade e encapsulamento . . . . .  | 40 |
| 3.3.3    | Caracterização elétrica de dispositivos fotovoltaicos . . . . .                              | 41 |
| 3.3.3.1  | Eficiência quântica externa (IPCE) . . . . .   | 41 |
| 3.3.3.2  | Curva característica IxV . . . . .   | 42 |
| 3.3.4    | Caracterização óptica de dispositivos fotovoltaicos . . . . .                                | 44 |
| 3.4      | TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO E DEPOSIÇÃO . . . . .   | 46 |
| 3.4.1    | Spin-coating . . . . .   | 46 |
| 3.4.2    | Drop-casting . . . . .   | 46 |
| 3.4.3    | Sputtering . . . . .   | 47 |
| 3.4.4    | Evaporação térmica . . . . .   | 48 |
| 3.4.5    | Slot-die Coating . . . . .   | 49 |
| 3.5      | USO E APLICAÇÕES PRÁTICAS DOS OPVS . . . . .   | 50 |
| 3.5.1    | Uso comercial no Brasil . . . . .  | 50 |
| 3.5.2    | Aplicações <i>low-light</i> . . . . .  | 51 |
| 3.5.2.1  | Desempenho de células fotovoltaicas convencionais em condições de baixa iluminação . . . . . | 52 |
| 3.5.3    | Estudo de caso: OPV e o DINE . . . . .   | 53 |
| <b>4</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> . . . . .   | 57 |
| 4.1      | PAINEL FOTOVOLTAICO ORGÂNICO COMERCIAL . . . . .   | 57 |
| 4.2      | <i>POWER BANK</i> . . . . .  | 58 |
| 4.3      | DESENVOLVIMENTOS DOS TESTES <i>INDOOR</i> . . . . .  | 60 |
| 4.3.1    | Ambiente de ensaio 1 . . . . .   | 60 |
| 4.3.2    | Ambiente de ensaio 2 . . . . .   | 61 |
| 4.3.3    | Medidas de iluminância . . . . .   | 62 |
| 4.3.4    | Medidas de temperatura . . . . .   | 63 |
| 4.3.5    | Medidas de tensão e corrente elétrica . . . . .  | 64 |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 4.3.6    | Espectroscopia de absorção uv-vis . . . . .   | 67        |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> . . . . .  | <b>68</b> |
| 5.1      | EMISSÃO E ABSORÇÃO . . . . .  | 68        |
| 5.1.1    | Espectro de emissão da lâmpada do laboratório . . . . .                               | 68        |
| 5.1.2    | Espectro de emissão da lâmpada da sala de reuniões . . . . .                          | 69        |
| 5.1.3    | Absorção do OPV . . . . .   | 69        |
| 5.1.4    | Análise de compatibilidade espectral . . . . .  | 75        |
| 5.2      | MEDIDAS <i>INDOOR</i> . . . . .   | 77        |
| 5.2.1    | Ambiente de ensaio 1 . . . . .  | 77        |
| 5.2.2    | Ambiente de ensaio 2 . . . . .  | 82        |
| 5.2.3    | Síntese dos valores extremos de potência nominal . . . . .                            | 89        |
| 5.3      | DISCUSSÃO COMPARATIVA ENTRE OS RESULTADOS EXPERI-<br>MENTAIS E A LITERATURA . . . . . | 90        |
| 5.4      | FUNCIONAMENTO DO <i>POWER BANK</i> . . . . .  | 91        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÕES</b> . . . . .   | <b>94</b> |
| 6.1      | RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .  | 95        |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .  | <b>96</b> |

## 1 APRESENTAÇÃO

Nas últimas décadas tem ocorrido um significativo aumento da demanda energética mundial, diretamente ocasionada devido aos novos avanços tecnológicos e principalmente, pela popularização de novos produtos que necessitam de um maior consumo da eletricidade. As novas gerações de *smartphones*, computadores, veículos elétricos, sistemas de inteligência artificial, entre outros, são exemplos de inovações que impulsionam o aumento da demanda energética [1]. O alto uso de data centers para aplicações em nuvem e inteligência artificial, por exemplo, tem aumentado significativamente a demanda da carga energética mundial [2]. Do mesmo modo que a crescente adesão aos veículos elétricos acarretam em uma maior demanda de geração e distribuição de energia elétrica [3], enquanto a ampla disseminação dos dispositivos móveis e computadores conectados à internet promove um uso contínuo de energia tanto em ambiente domésticos, quanto comerciais [4,5]. Juntamente, os setores industriais representam uma grande porcentagem de dependência de energia elétrica [6].

A demanda energética global tem sido suprida predominantemente por fontes que, de algum modo, impactam o meio ambiente, sendo pela extração de recursos naturais, ou pela geração de subprodutos poluentes durante o processo de conversão de energia [7]. Fontes fósseis como carvão vegetal, petróleo e gás natural, ainda são responsáveis por grande parte da matriz energética mundial, ocasionando grandes liberações de gases de efeito estufa e agravando as mudanças climáticas [8].

Mesmo as fontes de energia consideradas limpas, como a energia hidrelétrica, a qual não emite diretamente poluentes durante sua operação, ainda há impactos ambientais gerados por sua construção. A implantação de uma usina hidrelétrica, exige que grandes áreas sejam destinadas aos reservatórios, fazendo com que ocorram alagamentos de áreas de florestas, problema que vem acompanhado pela perda de biodiversidade, além de deslocamentos de comunidades inteiras [9,10]. Como resultado de seu funcionamento, a decomposição da matéria orgânica submersa nos lagos artificiais, pode liberar metano, um gás do efeito estufa tão poluente quanto o dióxido de carbono [11]. Diante desse cenário, torna-se cada vez mais essencial o desenvolvimento de tecnologias energéticas sustentáveis, visando minimizar os impactos ambientais ao longo do ciclo de construção e utilização dos sistemas de geração de energia.

Mantendo o foco na sustentabilidade global, a Organização das Nações Unidas (ONU) deu início a Agenda 2030, como mostra a figura 1. Trata-se de um plano global formado por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas, os

quais são focados em acabar com a pobreza, garantir qualidade de vida as pessoas, de forma que se mantenha a preservação do planeta para as futuras gerações. A Agenda 2030 pretende fazer com que haja um equilíbrio entre desenvolvimento humano e sustentabilidade ambiental [12].



FIGURA 1 – Objetivos da agenda 2030 da ONU.  
Fonte: Nações Unidas - Brasil.

Entre todas as possibilidades, as fontes de energias renováveis surgem como uma iniciativa viável para combater os problemas globais relacionados à sustentabilidade e ao aquecimento global. Especialmente, as que não exigem custos elevados de fabricação e instalação, como por exemplo a energia solar, biomassa e eólica. Porém, qualquer alternativa de fonte energética carrega junto de si desvantagens e limitações técnicas [13, 14].

Nesse contexto, a energia solar se insere dentro de alguns objetivos, são eles:

- Objetivo 7: Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos;
- Objetivo 9: Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação;
- Objetivo 11: Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos,

seguros, resilientes e sustentáveis;

- Objetivo 12: Garantir padrões de consumo e produção sustentáveis;
- Objetivo 13: Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos;
- Objetivo 14: Preservar o ecossistema marinho para conservação da fauna e da flora;
- Objetivo 15: Preservar o ecossistema terrestre para conservação da fauna e da flora;

Os dispositivos fotovoltaicos orgânicos, *Organic Photovoltaic* (OPV) constituem uma categoria dentro da classificação geral dos dispositivos fotovoltaicos e representam uma tecnologia de geração de energia renovável e não poluente. Diferentemente das células solares tradicionais, confeccionadas a partir de silício, os OPVs utilizam materiais orgânicos semicondutores durante o processo de conversão da energia solar em eletricidade.

Essa tecnologia vem crescendo em relação a pesquisas e desenvolvimento, devido as suas vantagens associadas. A flexibilidade, principal vantagem dos fotovoltaicos orgânicos, ocasiona uma versatilidade de aplicações. Com a possibilidade de fabricação sobre substratos flexíveis, é possível aplicá-los em produtos como dispositivos eletrônicos, janelas e fachadas de edifícios, vestuários inteligentes, além de dispositivos de Internet das Coisas (IoT) [15-17].

Além da flexibilidade associada, a semitransparência oriunda dos materiais utilizados, possibilita a passagem parcial da luz, tornando-os adequados para aplicação onde há necessidade de se manter a luz natural, por exemplo em janelas onde não se pode bloquear totalmente a iluminação ambiente [18-21]. Outro importante fator positivo da tecnologia, é o baixo custo de produção devido a possibilidade de fabricação em larga escala por meio de técnicas específicas, as quais serão apresentadas posteriormente [15-17].

Acompanhando as vantagens citadas anteriormente, por funcionarem com baixa iluminação, contam com a possibilidade de utilização em condições *low-light*<sup>1</sup>, ou seja, ambientes com baixa luminosidade [10,21]. Em ambientes internos como escritórios, residências, hospitais e indústrias, a iluminância varia entre 100 e 1000 lux, o equivalente a irradiâncias de 1 a 10 W/m<sup>2</sup>, enquanto a irradiância solar é de aproximadamente 100 W/m<sup>2</sup>. Nesses locais, quando aplicadas as tecnologias fotovoltaicas convencionais, como o silício cristalino, os valores de eficiência são reduzidos, ocasionados por uma limitação luminosa do material. Assim, criam-se oportunidades para aplicações dos dispositivos fotovoltaicos orgânicos, visto que suas

---

<sup>1</sup> Operações em baixa luminosidade.

propriedade ópticas e eletrônicas são adaptáveis às condições locais.

O desempenho mais estável e eficiente dos OPVs sob baixa luminosidade decorre da possibilidade de ajustar o *bandgap*<sup>2</sup> dos materiais orgânicos para coincidir com o espectro da luz artificial. Além disso, esses dispositivos exibem elevada sensibilidade às faixas de comprimento de onda presentes em fontes artificiais, o que favorece sua resposta sob luz difusa e irradiância reduzida [22,23].

Em suma, o OPV oferece diversas vantagens, permitindo-o ser aplicado nos mais diversos ambientes, desde casas e prédios, até roupas e acessórios portatéis, como relógios e itens médicos.

Entretanto, apesar das suas vantagens, os OPVs ainda enfrentam desafios, como por exemplo a necessidade do aumento da eficiência de conversão energética, melhoria na estabilidade dos materiais orgânicos e aumento do tempo de vida dos dispositivos [24-26].

De acordo com o *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), em laboratórios, os modelos de sistemas fotovoltaicos formados por silício, podem alcançar eficiências de até 47,6%. Enquanto, a maior eficiência registrada para células solares orgânicas é de 19,2%, alcançada pela *Shanghai Jiao Tong University*.

No entanto, é importante destacar que os OPVs não foram desenvolvidos com o objetivo de competir diretamente com as tecnologias baseadas em silício. Em vez disso, eles se propõem a expandir as possibilidades de aplicação da energia solar, ocupando nichos onde as células tradicionais apresentam limitações — como em superfícies flexíveis, dispositivos portáteis, ambientes internos ou áreas com restrições de peso e transparência.

Essa diferença nos valores de eficiência justifica um dos diversos desafios enfrentados pelos OPVs. Apesar de oferecerem vantagens como citado anteriormente, a eficiência de conversão de energia solar ainda é inferior à de tecnologias convencionais. Contudo, a pesquisa contínua na área de OPVs busca melhorar essas eficiências, tornando essa tecnologia cada vez mais competitiva [27,28].

Este estudo tem como objetivo averiguar o desempenho de um painel orgânico fotovoltaico sob condições de iluminação artificialmente controlada. Além disso, busca-se avaliar a viabilidade técnica da implementação dessa tecnologia em diferentes ambientes, como um laboratório de pesquisa e uma sala de reuniões, considerando fatores como a eficiência energética em cenários de baixa luminosidade. Previamente, os resultados obtidos indicam que a iluminância exerce maior influência sobre a potência nominal gerada do que a temperatura do ambiente em questão, reforçando a

---

<sup>2</sup> É a diferença de energia entre as bandas eletrônicas de um material, determinando quais comprimentos de onda ele consegue absorver.

importância do controle da intensidade luminosa em aplicações práticas. Observou-se também que o local onde o dispositivo é posicionado em relação à fonte de luz, está diretamente associado aos valores de eficiência energética obtidos, evidenciando a necessidade de estratégias otimizadas para maximizar o desempenho dos painéis.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é realizar coleta de dados elétricos de um painel fotovoltaico (OPV) comercial, desenvolvido pela empresa SUNEW e obtido através de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento da Copel (PD 2866-0470/2017), além do monitoramento da eficiência de acordo com a variação intrínseca de fatores ambientes, como iluminância e temperatura, considerando condições *low-light* de funcionamento.

Com isso, busca-se concluir se em condições *indoor*, ambiente fechado, o desempenho do painel atingiu valores consideráveis ou, se sua geração de energia foi insuficiente para que futuramente modelos de OPVs dessa natureza possam ser aplicados em dispositivos de baixo consumo, como por exemplo instalar esse tipo de painel em mesas de ambientes de escritório, permitindo a coleta e armazenamento de energia, acoplando junto um *power bank* (carregador portátil), o qual será alimentado exclusivamente com a energia proveniente do OPV.

Para tanto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar medidas de  $I_{xV}$  em ambientes de iluminação interna;
- Medir e controlar as condições ambientes dos locais ( temperatura e iluminância);
- Avaliar o desempenho do painel fotovoltaico orgânico sob diferentes condições de irradiância artificial;
- Testar a capacidade do OPV de alimentar um dispositivo de armazenamento de energia (*power bank*), analisando sua viabilidade de uso em aplicações *indoor*;
- Contribuir para o conhecimento sobre painéis fotovoltaicos orgânicos aplicados em ambientes internos.

### 3 INTRODUÇÃO

#### 3.1 HISTÓRIA E CONTEXTO GERAL DA ENERGIA SOLAR

Inicialmente, em 1883 o primeiro módulo solar foi criado, seu inventor foi Charles Edgar Fritts, utilizando a radiação solar de maneira inovadora para produzir energia. O dispositivo era formado ao revestir uma ampla camada de cobre com selênio e, sobre ela, aplicar uma camada fina de folha de ouro, semitransparente. Na ocasião, observou-se que a corrente era produzida não somente com a luz solar, mas com a luz de velas e a claridade do dia também. Com isso, o inventor americano sugeriu que uma nova forma de energia para competir com as usinas de carvão havia sido criada [29].

O módulo apresentava baixa eficiência de conversão elétrica, cerca de 1%, devido as propriedades limitadas do selênio, entretanto supriu a expectativa de mostrar que a tecnologia era capaz de gerar energia elétrica. Mesmo não possuindo bom desempenho para a sua criação, Fritts enviou o módulo para um renomado cientista, Werner von Siemens, que ficou impressionado com a invenção. Siemens apresentou então ao mundo científico a descoberta de Fritts, revelando que havia sido desenvolvido um método direto de conversão da luz solar em energia elétrica [30].

Após a constatação de que a radiação solar poderia gerar energia elétrica, a *Bell Telephone Laboratories* desenvolveu, em 1954, a primeira célula solar fabricada a partir de um *wafers* de silício modificado, denominado célula solar. O desempenho inicial era de 6%, sendo então comparado ao funcionamento de um motor a gasolina. No entanto, o projeto só foi desenvolvido completamente, após serem realizadas inúmeras pesquisas sobre transistores, os quais tinham seu princípio de funcionamento e estruturas, utilizados como base para o projeto [30,31].

O novo modelo de célula solar era composto por duas partes, chamada junção p-n, obtida a partir da dopagem controlado do material semiconductor. Na primeira região, conhecida como tipo n, são inseridas impurezas responsáveis por fornecer elétrons em excesso, os denominados portadores majoritários. Na outra região, tipo p, as impurezas criam buracos<sup>1</sup>. No momento em que as duas regiões entram em contato, ocorre uma difusão dos portadores, ocasionando a formação de uma região de depleção contendo um campo elétrico interno. O campo cria então uma barreira de potencial que separa os portadores gerados a partir da absorção da luz, resultando em uma diferença de potencial entre as regiões. Por fim, ao se conectar a célula a um circuito externo, os elétrons fluem pela carga externa, gerando corrente elétrica contínua [32,33].

---

<sup>1</sup> Lacunas eletrônicas que atuam como portadores de cargas positivas.

Com o avanço das pesquisas após a criação da primeira célula solar de silício pela *Bell Telephone Laboratories* em 1954, os inventores Chapin, Fuller e Pearson, começaram a estudar métodos de aprimorar o desempenho do dispositivo. A partir do aprofundamento acerca dos processos de dopagem, da estrutura da junção p-n e da interação entre luz e semicondutor, foram realizadas diversas modificações nos métodos de fabricação. Esses aprimoramentos permitiram que a eficiência de conversão energética das células solares evoluísse, atingindo valores próximos a 10% ainda na década de 1950 [31,34]. Com as melhorias já realizadas, houve a possibilidade de aplicar as células solares em sistemas específicos, mesmo antes do início da comercialização dos dispositivos. Os sistemas de telefonia rural, foram umas das primeiras aplicações práticas da tecnologia, permitindo que regiões remotas passassem a ter acesso ao meio de comunicação onde o acesso à rede elétrica era inexistente. Para isso, múltiplas células eram interligadas em série e paralelo, formando módulos solares capazes de fornecer potência suficiente para alimentar pequenos sistemas de comunicação, como mostrado na figura 2 [34,35].



FIGURA 2 – Células solares utilizadas para telefonia rural [36].

Em meados de 1956, quando já havia sido consolidada a ideia de conversão de luz solar em energia elétrica, iniciou-se a comercialização dos primeiros módulos solares. Porém, devido aos altos custos de produção, a maioria da população não possuía condições financeiras de adquirir ao menos um módulo com potência de geração de 1 watt [29].

Com o passar dos anos, as pesquisas foram sendo aprimoradas, possibilitando que a tecnologia fosse aplicada em sistemas mais específicos, como iluminação residencial e protótipos de sistemas de satélites. Já no final da década de 1960, os painéis solares se tornaram responsáveis por alimentar satélites norte-americanos e soviéticos. Nesta fase da história da energia solar, a eficiência associada já estava em torno de 14%, um marco significativo para tecnologia fotovoltaica [34,37].

Nos anos que seguiram, o desenvolvimento da energia solar foi impulsionado a partir de novas descobertas. No ano de 1970, o Dr. Elliot Berman, fundador da *Solar*

*Power Corporation*, idealizou um módulo solar a partir de silício de menor pureza, com técnicas de produção de filmes fotográficos. Foi possível então reduzir significativamente os custos de produção, para aproximadamente US\$ 20 por watt. A *Exxon Corporation*, empresa do setor petrolífero, financiou o desenvolvimento da nova tecnologia, pretendendo utilizar painéis solares para alimentar a iluminação de alerta nas plataformas *offshore*. A partir desse momento, a energia solar foi amplamente adotada e utilizada, tornando seu acesso cada vez mais fácil [38,39]

Em meados de 1990, a tecnologia já estava sendo utilizada em áreas remotas, como desertos, e também em grandes cidades. Sua aplicação não era apenas para iluminação, mas para necessidades essenciais, como fornecimento de água. Atualmente, existem diversos tipos de placas solares, as quais são aplicados em inúmeras áreas, como imóveis, automóveis e aeronaves, tornando cada vez maior o alcance e versatilidade da energia solar [36,39].

### 3.1.1 Tipos de células fotovoltaicas

A classificação das células solares pode ser feita categorizando em três gerações diferentes, a partir do material utilizado na composição, métodos de fabricação e nível de maturidade comercial [40-42].

- **Primeira geração - *wafers* de Silício:**

Células solares confeccionadas com base em *wafers* de Silício são exemplares da tecnologia dominante no mercado atual, sua alta demanda é proveniente dos valores associados a eficiência de conversão de energia [40]. No início da utilização da tecnologia, os valores de eficiência alcançavam cerca de 10% a 12%. Ainda que apresentem altos custos de produção e instalação, as eficiências, atualmente, giram em torno de 15% a 20%, variando de acordo com o material empregado, silício monocristalino ou policristalino [42].

- **Segunda Geração - Filmes Finos:**

A geração das células solares é caracterizada por dispositivos fabricados a partir de filmes finos de silício amorfo, telureto de cádmio (CdTe) ou Seleneto de cobre, índio, gálio (CIGS), por exemplo. Apesar de pertencerem a uma geração mais atual, seus valores de eficiência ainda são baixos quando comparados aos valores da primeira geração. Contudo, os custos de fabricação são inferiores aos utilizados nos *wafers* de Si, mesmo utilizando processos de produção envolvendo vácuo e tratamentos térmicos a altas temperaturas [42,43]. De acordo com o *National Renewable Energy Laboratory*,

na década de 1980 a eficiência alcançada era em torno de 5% a 10%, enquanto atualmente os valores podem chegar a cerca de 22% em escala laboratorial [44].

- **Terceira geração - Novas Tecnologias:**

A terceira geração de células solares representa o grupo mais recente e promissor de tecnologias em desenvolvimento no cenário científico. Diferentemente das gerações anteriores, estas células utilizam materiais inovadores como corantes orgânicos, perovskitas e polímeros semicondutores como base para a conversão fotovoltaica [43]. Embora ofereçam vantagens como flexibilidade, baixo custo de fabricação e potencial para aplicação em substratos leves e flexíveis, ainda enfrentam desafios relacionados à estabilidade, durabilidade e à padronização dos processos de fabricação. As eficiências de conversão energéticas eram inicialmente ao redor de 10% em meados de 2012. Contudo, com os avanços em pesquisas de materiais e engenharia de dispositivos, atualmente, escala laboratorial, já foram alcançados valores em torno de 29% para as células de perovskitas [45,46].

Em alguns casos, a nomeação pode ser feita partindo do semicondutores utilizado na fabricação [43]. Alguns exemplos são dispositivos fabricados com semicondutores orgânicos, pontos quânticos, perovskitas, entre outros [43,47].

### 3.1.2 Comparação do impacto ambiental entre painéis fotovoltaicos de Silício e Orgânicos

A crescente demanda por fontes de energia renovável impulsiona a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias fotovoltaicas mais sustentáveis. Nesse contexto, é fundamental avaliar o impacto ambiental das diferentes tecnologias existentes, com destaque para os painéis solares de silício cristalino e os painéis fotovoltaicos orgânicos. As duas tecnologias apresentam vantagens e desvantagens do ponto de vista ambiental, que devem ser consideradas em caso de implementação em larga escala ou em aplicações mais específicas.

#### 1. Fase de produção

Durante a fase de produção, a tecnologia convencional, ou seja, do silício apresenta um significativo impacto ambiental. Para que o silício seja purificado, é necessário utilizar altas temperaturas<sup>2</sup>, além do consumo intensivo de energia<sup>3</sup>, resultando então em alta emissão de gases de efeito estufa [48]. Além disso, o processo envolve a utilização de substâncias químicas agressivas, como ácidos fortes e fósforo, gerando

<sup>2</sup> Superiores a 1500 °C.

<sup>3</sup> Frequentemente proveniente de fontes fósseis.

riscos ambientais e operacionais [49]. Logo, apesar do silício ser um material abundante na crosta terrestre, para que ele seja aplicado em fontes de energia solar, há demanda de processos industriais complexos e intensivos.

Em contrapartida, o processo de produção dos dispositivos fotovoltaicos orgânicos apresenta potencial de menor toxicidade e reduzidas emissões de carbono quando comparado à fabricação de painéis fotovoltaicos convencionais [50]. Além disso, os OPVs possuem um ciclo de produção mais simples e ambientalmente favorável. Sua fabricação pode ser realizada por técnicas de deposição de filme fino, como o *roll-to-roll*, aplicadas sobre substratos flexíveis. Esses métodos operam sob baixas temperaturas<sup>4</sup>, o que contribui para a redução do consumo energético mesmo com o uso de equipamentos modernos [51].

## 2. Uso e ciclo de vida

Durante a fase de uso, ou seja, enquanto estão em funcionamento, os dois tipos de painéis fotovoltaicos apresentam baixos impactos ambientais, visto que são utilizados justamente para gerar energia limpa e renovável. Contudo, a maior diferença entre as duas tecnologias está na durabilidade. Os painéis de silício têm vida útil de 20 a 30 anos, favorecendo sua eficiência energética ao longo dos anos [52]. Em contrapartida, os OPVs ainda enfrentam limitações relacionadas a sua estabilidade operacional, com vida útil entre 5 e 10 anos [53].

Apesar dessa diferença, os painéis orgânicos possuem vantagens quando utilizados em sistemas específicos, como dispositivos portáteis, janelas semitransparentes ou em ambientes internos. Esses são exemplos de aplicações em que leveza, flexibilidade e adaptabilidade têm mais importância do que a durabilidade. Nessas situações, os painéis de silício, por serem rígidos, pesados e dependentes de alta luminosidade, não podem ser aplicados de forma eficiente [54].

## 3. Fim de vida e reciclabilidade

Ao final do tempo útil de funcionamento, os painéis de silício enfrentam desafios relacionados a reciclagem. Mesmo com a existência de processos industriais em desenvolvimento para reaproveitar vidro, alumínio e silício, a reciclagem desses materiais ainda é limitada, juntamente com os altos custos, deixando as técnicas economicamente inviáveis em muitos pontos. Entretanto, caso não seja feito um reaproveitamento dos materiais que constituem os painéis convencionais, o descarte inadequado pode gerar resíduos não biodegradáveis, além de metais contaminantes [55].

---

<sup>4</sup> Geralmente abaixo de 150 °C.

Os OPVs, por sua vez, têm um potencial de reciclabilidade mais alto, visto que sua composição é baseada em materiais orgânicos e estruturas de finas camadas. Isso torna, ao final do ciclo de vida, a separação dos componentes mais simples. Pesquisas recentes demonstram que a reciclagem de dispositivos fotovoltaicos orgânicos caminha no sentido de desenvolver processos industrialmente mais sustentáveis e de baixo custo, visando o reaproveitamento em larga escala dos materiais [56].

Por fim, como dito anteriormente, a escolha entre painéis fotovoltaicos de silício e orgânico deve considerar, além da eficiência energética, o impacto ambiental ao longo de todo o ciclo de vida do dispositivo. Enquanto o silício possui uma maior durabilidade e rendimento em longo prazo, os custos energéticos e de recursos envolvidos na fabricação são mais intensos. Por outro lado, os OPVs são uma alternativa mais sustentável relacionados à fabricação e descarte, com as vantagens de aplicações e curto a médio prazo, considerando ambientes com menor exigência de alto desempenho por um longo período.

### 3.2 ELETRÔNICA ORGÂNICA E MATERIAIS FUNCIONAIS

A eletrônica orgânica, considerada uma área interdisciplinar, estudada também pela grande área de ciência dos materiais, correlaciona a química orgânica com a física do estado sólido, focando no estudo e desenvolvimento de materiais semicondutores baseados em compostos orgânicos, que são capazes de conduzir eletricidade. O desenvolvimento de pesquisas nessa área, permite avançar em relação a nanotecnologia, particularmente com a fabricação de dispositivos eletrônicos a partir de materiais derivados do carbono [57].

A base tecnológica da eletrônica orgânica, é proveniente de compostos moleculares orgânicos conjugados, os quais podem formar materiais semicondutores cujas propriedades são moldadas através de síntese química. Essa variedade estrutural, permite aos materiais oferecerem vantagens únicas quando comparados aos semicondutores inorgânicos tradicionais, tornando maior a aplicação da tecnologia em dispositivos leves, flexíveis, semitransparentes e com menor custos de produção [58].

#### • O início de tudo: descoberta dos polímeros semicondutores

No ano de 1977, a descoberta da condutividade elétrica no poliacetileno dopado com iodo por Heeger, MacDiarmid e Shirakawa, marcou o início da eletrônica orgânica. Até então, os polímeros eram considerados e utilizados com isolantes térmicos, porém a presença de ligações conjugadas permitiu o estudo e descoberta da condutibilidade elétrica. Assim, a descoberta dos três cientistas, rendeu o Prêmio Nobel de Química de

2020, além de estabelecer a base científica para o desenvolvimento de novos materiais eletrônicos baseados em carbono [59,60].

Nos anos seguintes, outros polímeros condutores foram estudados, como por exemplo o polipirrol (PPy) e a polianilina (PANI), cada qual com suas propriedades específicas em relação à estabilidade, dopagem e processabilidade. Permitindo então a aplicação desses materiais em sensores, eletrodos, e dispositivos optoeletrônicos mais complexos [61,62].

#### • **Desenvolvimento de dispositivos OLEDs e OFETs**

Com o passar dos anos, a ciência dos materiais foi avançando nos mais diversos assuntos e pesquisas, até chegar na década de 1980, onde surgiram os primeiros dispositivos eletrônicos orgânicos. Mais especificamente, no ano de 1987, Tang e VanSlyke desenvolveram o primeiro Diodo emissor de luz orgânico (OLED) contendo 1% de eficiência quântica externa e aproximadamente 1,5 lúmens por watt, sendo formado por camadas de moléculas pequenas. Essa inovação ocasionou um salto tecnológico com a demonstração da emissão de luz com alta eficiência em materiais orgânicos, utilizado futuramente no desenvolvimento de telas planas. Por seguinte, no ano de 1990 os avanços tecnológicos foram associados aos Transistores orgânicos de efeito de campo (OFETs), os quais mostraram-se viáveis para aplicações em circuitos eletrônicos flexíveis e sensores [63,64].

#### • **Células Solares Orgânicas (OPVs)**

Outro ramo de importante impacto da eletrônica orgânica é a optoeletrônica fotovoltaica. Os primeiros estudos da área são datados dos anos 1980, onde deram início as pesquisas sobre células solares orgânicas, mais especificamente. Contudo, apenas na virada do século XXI é que as pesquisas ganharam mais abrangência e impacto científico, como por exemplo com o desenvolvimento das chamadas estruturas de junção heterogênea em volume (*bulk heterojunction*), onde eram utilizadas misturas de materiais doadores e aceitadores de elétrons, com eficiências de cerca de 5% [65,66].

Atualmente, com a crescente aplicação dos OPVs e o aumento significativo das pesquisas associadas a essa tecnologia, foi possível atingir, em laboratório, eficiência de cerca de 19%. Assim, as células solares orgânicas se destacam entre outras variedades por conta de sua flexibilidade mecânica, semitransparência, utilização de substratos leves por métodos de baixo custo, tornando promissora a aplicação em dispositivos portáteis e sustentáveis [67,68].

- **Vantagens e desafios da eletrônica orgânica**

Como mostrado na seção de comparação entre a eletrônica orgânica e a eletrônica convencional, a tecnologia orgânica apresenta uma série de vantagens, as quais facilitaram sua aplicação em dispositivos inovadores, como OPVs, telas dobráveis, e sensores biocompatíveis [69,70]. No entanto, a área ainda enfrenta desafios significativos relacionados com a estabilidade e durabilidade dos materiais orgânicos, os quais sofrem frequentemente degradações por umidade, oxigênio e luz ultravioleta, por exemplo [53].

- **Perspectivas futuras**

A eletrônica orgânica segue em constante evolução, com um aprimoramento contínuo na síntese de materiais, além das técnicas de fabricação e arquitetura dos dispositivos, reforçando o potencial de aplicação nas áreas de energia sustentável, saúde digital e tecnologias portáteis. Assim, a combinação entre sustentabilidade, flexibilidade e desempenho, torna a eletrônica orgânica uma área promissora da ciência e engenharia de materiais no século XXI.

### 3.2.1 Semicondutores orgânicos

Para compreender o funcionamento e as propriedades dos dispositivos fotovoltaicos orgânicos, é necessário entender as características estruturais e eletrônicas dos materiais que são utilizados em suas composições. Nesse caso, a química do carbono desempenha um papel central, uma vez que os semicondutores orgânicos utilizados nesses dispositivos são, em grande parte, derivados de cadeias moleculares baseadas em átomos de carbono. Portanto, nesta seção, apresenta-se uma explicação sobre os tipos de hibridização do carbono e como essas configurações influenciam diretamente nas propriedades eletrônicas e geométricas dos compostos orgânicos condutores.

A configuração eletrônica de um átomo de carbono é da forma  $2s^2p^2$ , onde os quatro elétrons estão distribuídos na camada de valência entre os orbitais  $2s$  e  $2p$ , como mostra a figura 3A. Considerando o que o princípio da exclusão de Pauli impõe, poderiam ser formadas apenas duas ligações, visto que o átomo possui dois orbitais  $2p$  incompletos. No entanto, existe a ocorrência do fenômeno de hibridização, onde um elétron do orbital  $2s$  é "promovido" para um orbital vazio do subnível  $2p$ . O resultado fenomenológico faz com que os orbitais  $2s$  e  $2p$  se combinem, dando origem a quatro orbitais híbridos  $sp^3$ , como retratado na figura 3(B), contendo uma energia intermediária se comparada aos orbitais originais. Sabe-se que os orbitais híbridos são incompletos, permitindo que o átomo estabeleça quatro ligações covalentes sigma. Logo, o processo

de hibridização é importante por permitir que ocorra formação de moléculas complexas, cada qual com diferentes propriedades físicas e químicas.

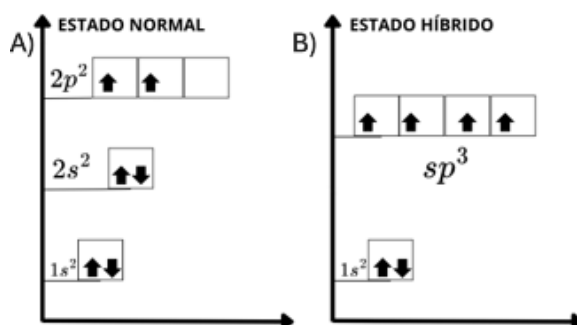


FIGURA 3 – Diagrama de orbitais do carbono no estado fundamental (A) e no estado híbrido  $sp^3$  (B). Aqui, os orbitais  $2s$  e os três orbitais  $2p$  fundem-se para formar quatro orbitais híbridos  $sp^3$  equivalentes. Fonte: autoria própria.

Existem outros dois tipos de hibridização do carbono além da  $sp^3$ . Na figura 4A, um único orbital  $2s$  se combina com outros dois orbitais  $2p$ , dando origem a três orbitais híbridos  $sp^2$ , representado na figura 4B, permitindo que haja formação de até três ligações covalentes sigma. Enquanto o orbital  $2p$  que restou, não sofre hibridização e pode formar uma ligação  $\pi$ .

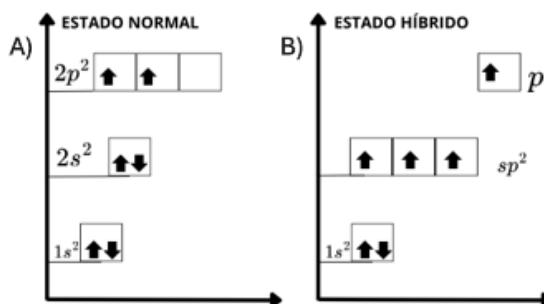


FIGURA 4 – Diagrama de orbitais do carbono no estado fundamental (A) e no estado híbrido  $sp^2$  (B). No estado excitado, um elétron do orbital  $2s$  é promovido para o orbital  $2p$  vazio, permitindo a formação de três orbitais híbridos  $sp^2$  e mantendo um orbital  $p$  puro. Fonte: autoria própria.

No outro caso, um orbital  $2p$  se combina com o orbital  $2s$ , formando a hibridização  $sp$ , representados na figura 5. Neste caso, cada orbital  $sp$  criado pode estabelecer uma ligação covalente sigma. Já os dois orbitais restantes  $p$ , são responsáveis pela formação de ligações  $\pi$ .

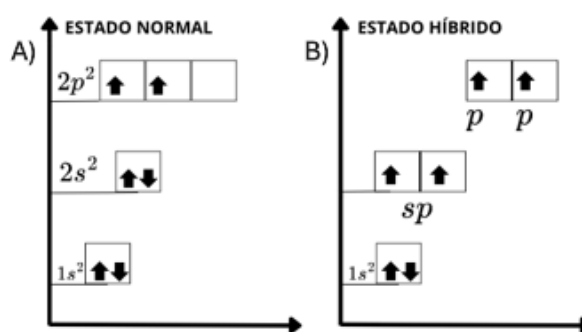


FIGURA 5 – Diagrama de orbitais do carbono no estado fundamental (A) e no estado excitado e hibridizado  $sp$  (B). Observa-se que, no estado hibridizado, um orbital  $2s$  mistura-se com um orbital  $2p$ , formando dois orbitais híbridos  $sp$ , enquanto os outros dois orbitais  $p$  permanecem inalterados. Fonte: autoria própria.

Na química orgânica todos os diferentes tipos de hibridização desempenham um papel importante, facilitando a explicação das propriedades tanto físicas quanto químicas, das moléculas. Um exemplo são as geometrias das moléculas. Hibridizações do tipo  $sp^3$  apresentam formato tetraédrico, enquanto as  $sp^2$  ou  $sp$  são planares. Outro fator importante é a presença de ligações  $\pi$ , as quais influenciam na reatividade e no comportamento químico, tornando-se um fator determinante em diversas reações feitas a partir de materiais orgânicos.

Quando há hibridização  $sp^3$ , os orbitais resultantes (híbridos) tornam-se equivalentes, assumindo forma geométrica tetraédrica, com ângulos de  $109,5^\circ$  entre eles, como representado na figura 6a. Em contrapartida, quando a hibridização é do tipo  $sp^2$ , os três orbitais híbridos ficam simetricamente distribuídos em um plano, originando ângulos de  $120^\circ$  entre si e com estrutura planar, figura 6b. Não menos importante, na classificação  $sp$ , há alinhamento linear, com um ângulo de  $180^\circ$  entre eles, como mostra a figura 6c.

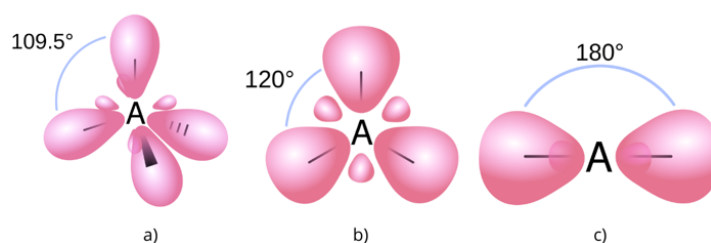


FIGURA 6 – Representações tridimensionais das geometrias moleculares adotadas pelo átomo de carbono, representado por A, conforme seu tipo de hibridização. (a) Na hibridização  $sp^3$ , o carbono forma quatro orbitais híbridos distribuídos em uma geometria tetraédrica, com ângulos de ligação de aproximadamente  $109,5^\circ$ . (b) Na hibridização  $sp^2$ , três orbitais híbridos organizam-se em uma geometria trigonal plana, com ângulos de  $120^\circ$ . (c) Na hibridização  $sp$ , dois orbitais híbridos alinham-se em uma geometria planar, com ângulo de  $180^\circ$ . Fonte: autoria própria.

Quando existem orbitais moleculares sigma ( $\sigma$ ), os mesmos são formados a partir das ligações hibridizadas do carbono, possuindo eixos de simetria colineares e sendo responsáveis por manter a estrutura da molécula unida. Em compensação, os orbitais  $p$  que não sofreram o fenômeno de hibridização, dão origem aos orbitais moleculares  $\pi$ . As ligações  $\pi$  não possuem alta intensidade de contribuição na atração entre os átomos, porém são fundamentais para garantir a estabilidade e a reatividade das moléculas orgânicas [71-73].

### 3.2.2 Éxcitons

Nos semicondutores orgânicos, a absorção de um fóton promove um elétron do nível Nível de maior ocupação molecular (HOMO)<sup>5</sup> para o nível Nível de menor ocupação molecular (LUMO)<sup>6</sup>. Esse processo deixa no HOMO a ausência desse elétron, caracterizada como um buraco, que atua como portador de carga positiva. O éxciton então é originado a partir da interação coulombiana entre esse par elétron-buraco [74-76]. Enquanto nos semicondutores inorgânicos, este fenômeno resulta na formação de éxcitons do tipo Mott-Wannier, representados na figura 7c, caracterizados pela separação entre elétron e buraco superior ao espaçamento entre células unitárias da rede cristalina.

Por outro lado, nos semicondutores orgânicos, os materiais tendem a possuir baixa constante dielétrica, reduzindo assim a blindagem da força de Coulomb e tornando a atração entre o par elétron-buraco mais intensa. Como consequência, nesses materiais os éxcitons apresentam uma redução do raio de Bohr, podendo ser comparados a uma unidade molecular e sendo, portanto, classificados como éxcitons de Frenkel, como ilustrado na figura 7a [76,77]. Além disso, quando há distribuição dos éxcitons ao longo de um pequeno número de unidades moleculares adjacentes, eles passam a ser denominados éxcitons de transferência de carga, conforme representado na figura 7b.

Essa forte ligação impõe desafios às aplicações em dispositivos fotovoltaicos orgânicos, pois a separação espontânea das cargas não ocorre com facilidade. Assim, a dissociação eficiente dos éxcitons depende da presença de interfaces entre materiais com distintos níveis de afinidade eletrônica, como será explicado na seção a seguir, especialmente nas heterojunções doador-aceitador, que promovem a separação das cargas e possibilitam a conversão eficiente da energia luminosa em corrente elétrica [78,79].

<sup>5</sup> *Highest Occupied Molecular Orbital.*

<sup>6</sup> *Lowest Unoccupied Molecular Orbital.*

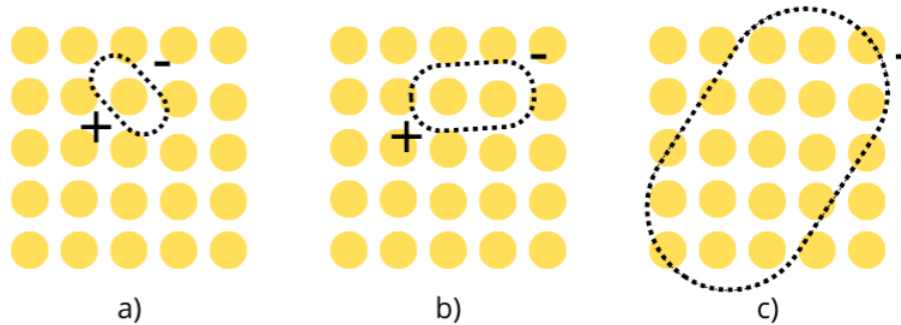


FIGURA 7 – Representação esquemática de três tipos de éxcitons: (a) éxciton Frenkel, (b) éxciton intermediário, também conhecido como éxciton de transferência de carga, e (c) éxciton Mott-Wannier. Os círculos simbolizam as unidades moleculares.  
Fonte: autoria própria.

### 3.3 DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS ORGÂNICOS (OPVS)

Os dispositivos fotovoltaicos orgânicos (OPVs) representam uma aplicação relevante dos polímeros semicondutores. Para além das características já discutidas, destacam-se como uma alternativa promissora por atenderem às demandas da indústria por soluções mais sustentáveis e economicamente viáveis. Além disso, oferecem ao consumidor final a possibilidade de explorar novas formas de aplicação, graças à sua versatilidade de design e integração em diferentes superfícies.

Uma célula solar orgânica é composta por uma sequência de camadas estruturais, que influenciam no seu funcionamento. A seguir serão detalhados as diferentes estruturas de composições de um OPV.

#### 3.3.1 Estruturas

Como dito anteriormente, os dispositivos fotovoltaicos orgânicos ocupam a colocação de tecnologia promissora para suprir a demanda energética dos próximos anos. Nesta seção, serão demonstradas as três principais arquiteturas dos dispositivos, além de seus respectivos modos de funcionamento.

- **Monocamada**

A arquitetura mais simples entre os dispositivos fotovoltaicos orgânicos é a monocamada, representada na figura 8. Essa configuração é composta por uma única camada semicondutora orgânica, denominada camada ativa, responsável pela absorção da luz e pela conversão da energia luminosa em cargas elétricas [80,81]. Essa camada está posicionada entre dois eletrodos com diferentes funções trabalho: o ânodo e o cátodo.

O eletrodo transparente, correspondente ao ânodo, pode ser depositado sobre lâminas de vidro utilizando materiais como Óxido de estanho dopado com flúor (FTO) ou Óxido de índio dopado com estanho (ITO). Ambos são semitransparentes, permitindo a passagem eficiente da luz até a camada ativa, além de atuarem como coletores de buracos [82]. Já o cátodo é geralmente formado por metais como cálcio, magnésio, alumínio ou prata, cuja função é coletar os elétrons gerados no dispositivo [83,84].

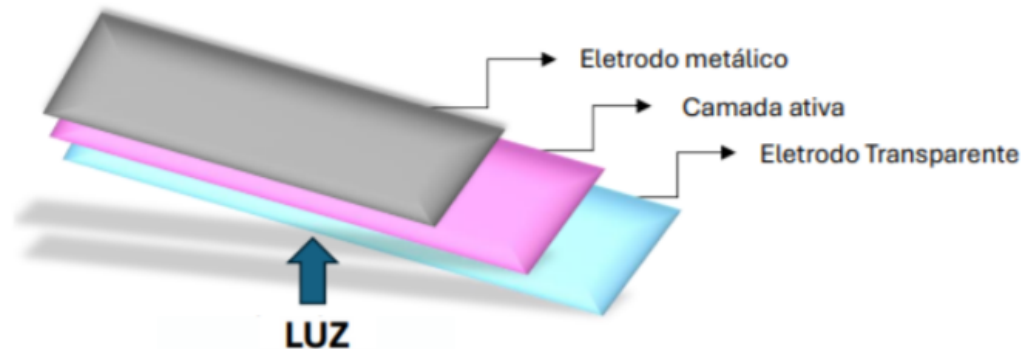


FIGURA 8 – Esquema da estrutura de um dispositivo fotovoltaico orgânico com camada ativa. Fonte: autoria própria.

Inicialmente, a luz incide sobre o dispositivo através do eletrodo transparente, sendo então absorvida pela camada ativa, que se encontra “ensanduichada” entre os eletrodos. Nesse processo, os fótons com energia igual ou superior ao gap do material excitam os elétrons do orbital molecular mais alto ocupado (HOMO) para o orbital mais baixo desocupado (LUMO), gerando éxcitons, conforme ilustrado na figura 9. A separação eficiente desses éxcitons ocorre, principalmente, nas proximidades das interfaces polímero/metal, onde há a formação de um campo elétrico intenso devido à diferença na função trabalho dos eletrodos. Esse campo promove a dissociação das cargas, direcionando os buracos para o ânodo e os elétrons para o cátodo, o que permite a geração da corrente elétrica [82,85,86].

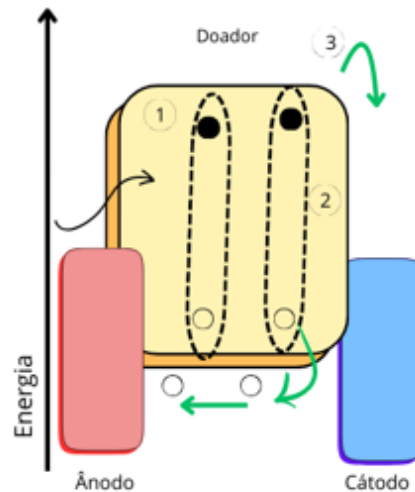


FIGURA 9 – Representação do diagrama de energia de um dispositivo fotovoltaico orgânico (OPV) com estrutura de monocamada. A camada ativa é formada por polímeros semicondutores aceitadores e doadores de elétrons, e o eixo vertical representa os níveis de energia (orbitais HOMO e LUMO). A figura ilustra as etapas fundamentais do funcionamento de um OPV, com estrutura de monocamada: em (1) ocorre a absorção da luz e geração de éxcitons, seguido pela separação das cargas na interface doador/aceitador (2) e em (3) há transporte e coleta de cargas nos eletrodos - elétrons migram para o cátodo e os buracos para o ânodo. Fonte: autoria própria.

- **Heterojunção em bicamada**

Nessa estrutura, figura 10, adiciona-se duas interfaces, uma composta por um material aceitador de elétrons e a outra por material doador de elétrons, dispostas entre os dois condutores (eletrodo metálico e eletrodo transparente).

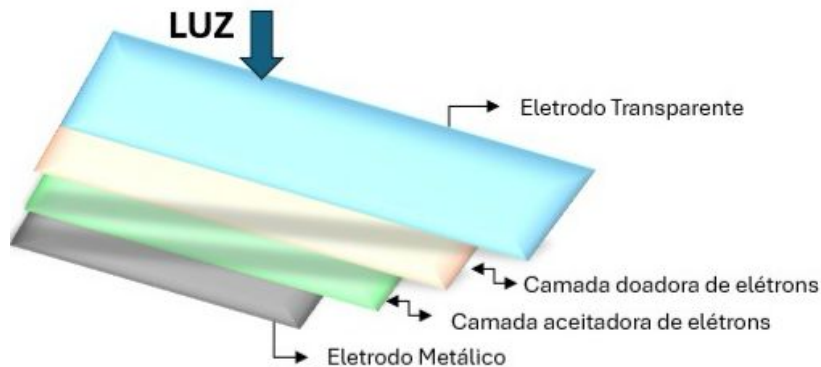


FIGURA 10 – Esquema da estrutura de um dispositivo em heterojunção em bicamada, onde há uma camada composta por um doador e outra por um aceitador de elétrons.  
Fonte: autoria própria.

Nesta configuração, os éxcitons foto-gerados, tanto no material doador, quanto no aceitador, podem ser transportados por meio de difusão até a interface doador/aceitador, para então serem dissociados em elétrons e buracos, contribuindo para a geração da fotocorrente. Após a dissociação, o material doador transporta o buraco até o cátodo, enquanto o material aceitador transporta o elétron até o ânodo, figura 11 [85].

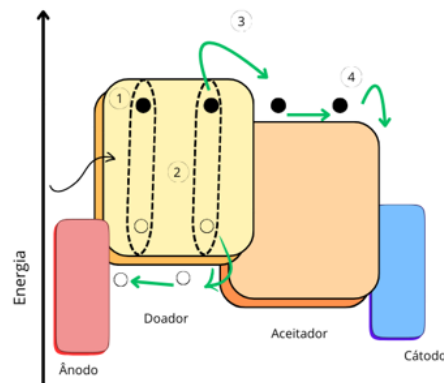


FIGURA 11 – Representação do diagrama de energia para ilustrar o processo de transferência de cargas num dispositivo com heterojunção em bicamada. Em (1), material doador, ocorre a formação dos éxcitons, os quais se difundem até a interface doador/aceitador (2). Ocorre então a transferência do elétron para o material aceitador (3), mantendo o buraco no material doador. O transporte dos elétrons ocorre no material aceitador, enquanto os buracos são transportados no material doador, até atingirem seus respectivos eletrodos. Fonte: autoria própria.

A utilização da interface doador/aceitador é uma estratégia que pode contribuir para o aumento da eficiência de conversão dos dispositivos. No entanto, essa abordagem impõe uma limitação à espessura da camada ativa, que passa a ser restrita pelo comprimento de difusão do éxciton. Como consequência, há uma restrição na geração de fotocorrente, o que impacta diretamente na potência obtida no dispositivo [87].

#### • Heterojunção em volume

Na estrutura criada para suprir a limitação do comprimento de difusão do éxciton, os materiais aceitadores e doadores de elétrons estão misturados, não contendo ordem previamente definida, como mostra a figura 12. Assim, a interface Doador/Aceitador (D/A) não é mais plana como na estrutura de bicamada, mas sim espacialmente distribuída de forma que a distância ocupada seja menor que o comprimento de difusão do éxciton. Essa reestruturação facilita a dissociação dos éxcitons, visto que eles estão dispersos por todo o volume da camada.

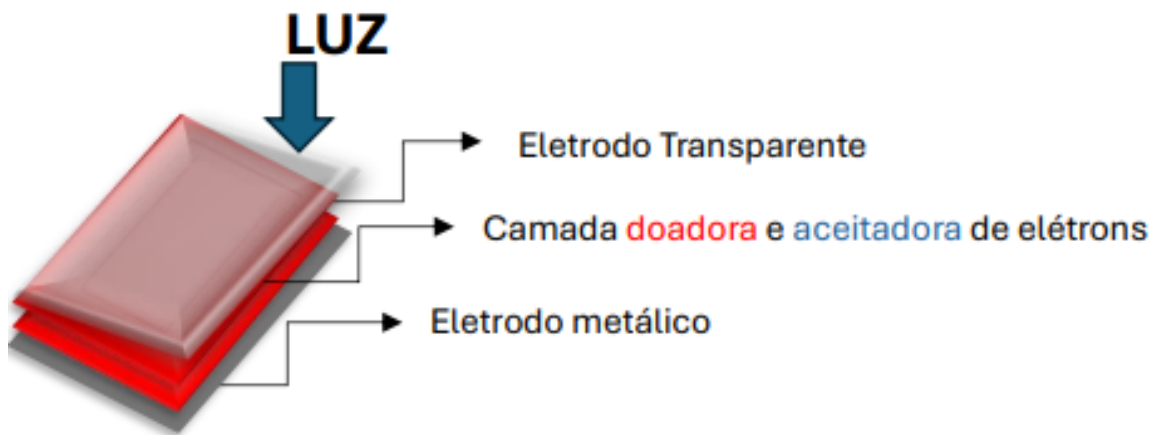


FIGURA 12 – Esquema da estrutura de um dispositivo em heterojunção em volume, contando com uma camada ativa composta por uma blenda de materiais, doador e aceitador de elétrons. Fonte: autoria própria.

Neste tipo de estrutura, a absorção da luz ocorre pelo material doador, um polímero por exemplo, criando um éxciton. Este éxciton sofre então a dissociação na interface D/A, separando o elétron do buraco, deixando cada um em um meio diferente, como representado na figura 13 [88-90].

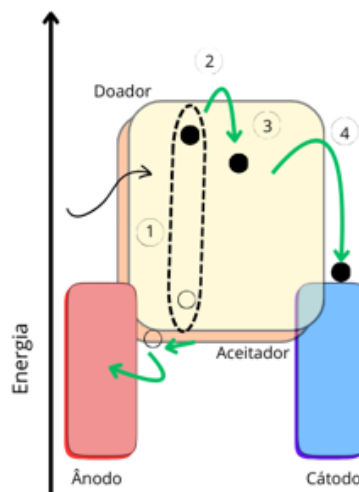


FIGURA 13 – Diagrama de energia de um dispositivo com heterojunção em volume. No material doador (1) ocorre a formação dos éxcitons, os quais se difundem até a interface doador/aceitador (2). Há a dissociação dos éxcitons em (3), para as moléculas aceitadoras. Entradas as moléculas aceitadoras, os elétrons são transportados, do mesmo modo que os buracos são transportados do material doador até os respectivos eletrodos. Fonte: autoria própria.

### 3.3.2 Estabilidade e encapsulamento

Quando expostos a luz, compostos orgânicos são suscetíveis a degradação química, especialmente quando há presença de oxigênio e umidade, os principais fato-

res que delimitam a durabilidade das células solares orgânicas [91]. Quando instalados ao ar livre, os dispositivos estão sujeitos a longos períodos de exposição a radiação solar e variações térmicas, podendo ser induzido a sofrer variações na morfologia dos filmes finos aplicados.

Assim, para conter esses efeitos, são realizados testes de envelhecimento, estudos da cinética de degradação e técnicas avançadas de caracterização, com o intuito de entender os efeitos de degradação. Com a realização de testes, é possível identificar detalhadamente os mecanismos de degradação e os principais fatores que influenciam a estabilidade dos dispositivos, fornecendo dados para o desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias mais duráveis [92-95].

Entre as soluções utilizadas, os métodos de encapsulamento têm se mostrado promissores na função de proteção da camada ativa contra agentes externos, como água e oxigênio [96,97]. Entretanto, ainda não foi possível solucionar de forma efetiva e completa os problemas que diminuem a estabilidade e o tempo de vida dos dispositivos, pois a completa eliminação da infiltração de agentes ambientais nas moléculas utilizadas, ainda é um desafio aos pesquisadores, que estão frequentemente em busca de alternativas para solucionar e reforçar a proteção dos exemplares da tecnologia fotovoltaica orgânica [98].

### 3.3.3 Caracterização elétrica de dispositivos fotovoltaicos

Diversas características são essenciais para determinar a eficiência de um dispositivo fotovoltaico, possibilitando a comparação entre dispositivos fabricados com diferentes materiais. Partindo da resposta espectral associada ao dispositivo, e das curvas características  $I \times V$ , são determinados outros fatores como, eficiência quântica externa (*IPCE*)- uma medida da eficiência em que os fótons incidentes são convertidos em elétrons livres, sendo um parâmetro importante para caracterizar a performance de células solares, tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), fator de preenchimento ( $FF$ ) (*Fill Factor*) e eficiência de conversão de potência ( $\eta$ ).

#### 3.3.3.1 Eficiência quântica externa (IPCE)

A resposta espectral, também chamada de espectro dinâmico, é determinada pela medição da resposta elétrica do dispositivo sob iluminação monocromática em diferentes comprimentos de onda, sem a aplicação de tensão. Esse processo permite obter a densidade de foto-corrente de curto-circuito ( $J_{sc}$ ).

A eficiência quântica externa, *IPCE* – *Incident Photon Converted to Electron*, é definida como a razão entre a fotocorrente gerada e a intensidade da luz monocromática incidente na amostra, desconsiderando a quantidade de fótons refletida pelo substrato. Esse parâmetro expressa a relação entre o número de portadores de

carga que contribuem para a fotocorrente e o número de fótons que atingem a camada fotossensível em cada comprimento de onda, sendo essencial para a caracterização da resposta óptica do dispositivo. O número de cargas geradas por unidade de tempo e por unidade de área é dado pela equação 3.1:

$$N_c = \frac{J_{sc}}{q} \quad (3.1)$$

onde  $J_{sc}$  representa a densidade de corrente de curto circuito, equivalente a corrente gerada apenas pela absorção de fótons sem tensão aplicada, e  $q$  é o valor da carga elétrica elementar. O valor associado ao número de fótons que incide sobre o dispositivo, por unidade de tempo e de área, é dado pela equação 3.2:

$$N_f = \frac{I_\lambda}{\frac{hc}{\lambda}} \quad (3.2)$$

onde Intensidade da fonte ( $I_\lambda$ ), Constante de Planck ( $h$ ), Velocidade da luz no vácuo ( $c$ ) e Comprimento de onda da radiação incidente ( $\lambda$ ). Fazendo então uma relação entre Número de cargas geradas ( $N_c$ ) pelo Número de fótons incidentes ( $N_f$ ), e substituindo os valores das constantes, tem-se a equação 3.3:

$$IPCE(\%) = \frac{N_c}{N_f} = 1240 \frac{J_{sc}}{I_\lambda \lambda} \quad (3.3)$$

O valor 1240 surge através do ajuste das grandezas  $J_{sc}$  em  $\mu A/cm^2$ ,  $I_\lambda$  em  $W/m^2$  e  $\lambda$  em nm, os quais são usualmente utilizados quando há utilização de dispositivos fotovoltaicos orgânicos. Ressalta-se que por haver uma percentagem inclusa no valor final, o resultado do IPCE representa uma medida percentual da eficiência [99-101].

### 3.3.3.2 Curva característica IxV

A curva característica de um OPV, fornece informações de suas propriedades elétricas e seu desempenho. A chamada curva IxV, é a curva característica obtida experimentalmente com a exposição do painel à radiação solar, fornecendo o *input* de tensão elétrica, a qual sofre variações em um determinado intervalo de tempo, junto com a leitura do valor da corrente elétrica para cada instante. Através desta curva determinam-se a corrente de curto circuito,  $I_{sc}$ , (SC - *Short Circuit*), a (OC - *Open Circuit*), a Potência máxima de saída ( $P_{max}$ ) e o fator de preenchimento.

O fator de preenchimento fornece dados sobre a qualidade da curva, mostrando o quanto a curva IxV está próxima de uma fonte de corrente ideal, representando então a qualidade do OPV em relação ao transporte de cargas entre cada interface. O  $FF$  é obtido através da razão entre a potência máxima de saída e a potência nominal do dispositivo [102], dado pela equação 3.4:

$$FF = \frac{I_{max}V_{max}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (3.4)$$

Observa-se que, quando expressa em termos de corrente e tensão, a definição do fator de preenchimento não depende explicitamente da área ativa do dispositivo, uma vez que a área está implicitamente contida nos valores de corrente. Alternativamente, o  $FF$  pode ser expresso em termos de densidade de corrente, mantendo a mesma forma matemática:

$$FF = \frac{J_{max}V_{max}}{J_{sc}V_{oc}} \quad (3.5)$$

onde  $J = I/A$  é a densidade de corrente e  $A$  representa a área ativa do dispositivo.

A eficiência do dispositivo, a chamada Eficiência de conversão de potência (PCE), é definida pela razão entre a potência elétrica máxima gerada pelo dispositivo e a potência da luz incidente sobre sua área ativa. Dessa forma, pode ser expressa a partir da equação 3.6:

$$PCE = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max}V_{max}}{EA} \quad (3.6)$$

em que  $E$  é a irradiância incidente (em  $W/m^2$ ) e  $A$  é a área ativa do OPV.

Alternativamente, a eficiência pode ser escrita em termos das grandezas normalizadas por área, ou seja, utilizando densidade de corrente e potência incidente por unidade de área, como mostra a equação 3.7.

$$PCE = \frac{J_{max}V_{max}}{P_{in}} = \frac{FFJ_{sc}V_{oc}}{P_{in}} \quad (3.7)$$

Dados os parâmetros essenciais de um OPV, percebe-se que o formato das curvas  $I \times V$ , figura 14, são responsáveis pelos fator de preenchimento e pela eficiência de conversão de potência. Se fossem utilizados dispositivos ideais, sem perdas ou dissipação de energia por efeito Joule, a potência máxima que o dispositivo poderia extrair forneceria um  $FF=1$  ou 100%.

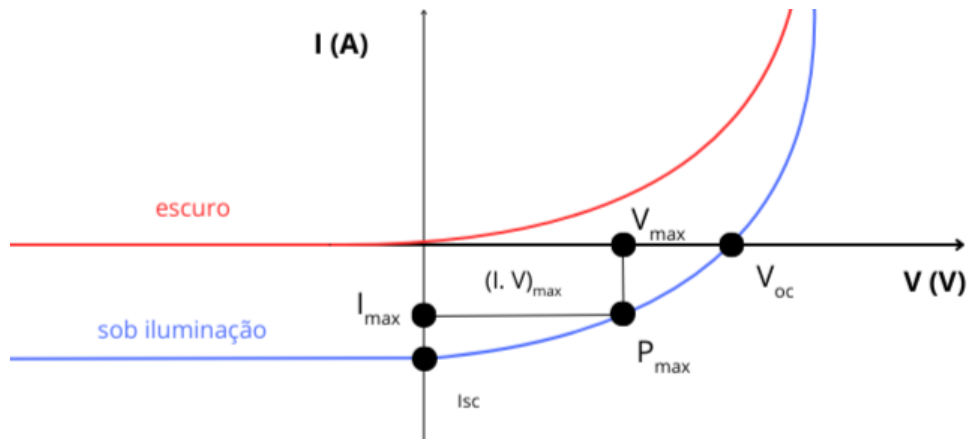


FIGURA 14 – Representação da curva característica de um dispositivo fotovoltaico ideal, no escuro e sob iluminação. Fonte: autoria própria.

A curva no escuro representa a resposta de um diodo retificador, onde há corrente elétrica apenas para tensão direta, o que significa que o eletrodo com a maior função trabalho é positivamente polarizado, enquanto o eletrodo com a menor função trabalho é polarizado negativamente.

### 3.3.4 Caracterização óptica de dispositivos fotovoltaicos

A espectroscopia de absorção na região do ultravioleta-visível (UV-VIS) é uma etapa essencial na caracterização de dispositivos fotovoltaicos orgânicos, pois permite verificar quais comprimentos de onda da radiação solar são absorvidos pelas camadas ativas, avaliar a eficiência da coleta de fótons e correlacionar o desempenho óptico com a posterior resposta elétrica do OPV. Dessa forma, esse tipo de medida fornece informações fundamentais sobre a adequação dos materiais utilizados e sobre o potencial de conversão energética do dispositivo.

Durante o processo de medida, uma fonte emite radiação direcionando-a a um sistema de seleção espectral, formado por um filtro ou monocromador. A função do sistema de seleção espectral é isolar o comprimento de onda que será analisado. Logo, o feixe monocromático resultante incide sobre a amostra, onde parte da energia eletromagnética será absorvida e o restante refletido ou transmitido.

A fração de radiação que efetivamente atravessa a amostra, denominada feixe transmitido, é captada por um fotodetector, que converte a intensidade luminosa ( $I$ ) em sinal elétrico. Esse sinal é processado pelo sistema de dados do espectrofotômetro, responsável por comparar a intensidade do feixe transmitido ( $I$ ) com a intensidade do feixe incidente ( $I_0$ ), medida previamente.

A partir desses valores, calcula-se a absorvância ( $A$ ) ou a transmitância ( $T$ ) da amostra. A absorvância é definida matematicamente pela Lei de Lambert-Beer:

$$A = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) = \varepsilon cl \quad (3.8)$$

onde:

$A$  é a absorvância (adimensional);

$I_0$  é a intensidade do feixe incidente incidente;

$I$  é a intensidade do feixe transmitido;

$\varepsilon$  é o coeficiente de absorção molar;

$c$  é a concentração da espécie absorvente;

$l$  é o caminho óptico da célula (cm).

De forma qualitativa, valores de absorvância próximos de 0,1 – 0,5 são considerados baixos (fraca absorção), enquanto valores entre 0,6 – 1,0 são intermediários. Absorvâncias acima de 1,5 – 2,0 já são elevadas e podem comprometer a linearidade da Lei de Lambert-Beer [103, 104].

O processo de varredura em diferentes faixas de comprimento de onda permite construir um espectro de absorção, onde a absorvância é representada em função do comprimento de onda. Esse espectro é a “assinatura óptica” da amostra, permitindo identificar materiais e correlacionar intensidade de absorção com propriedades estruturais.

O diagrama esquemático representado pela figura 16 descreve a trajetória do feixe de radiação desde a fonte emissora até o fotodetector.

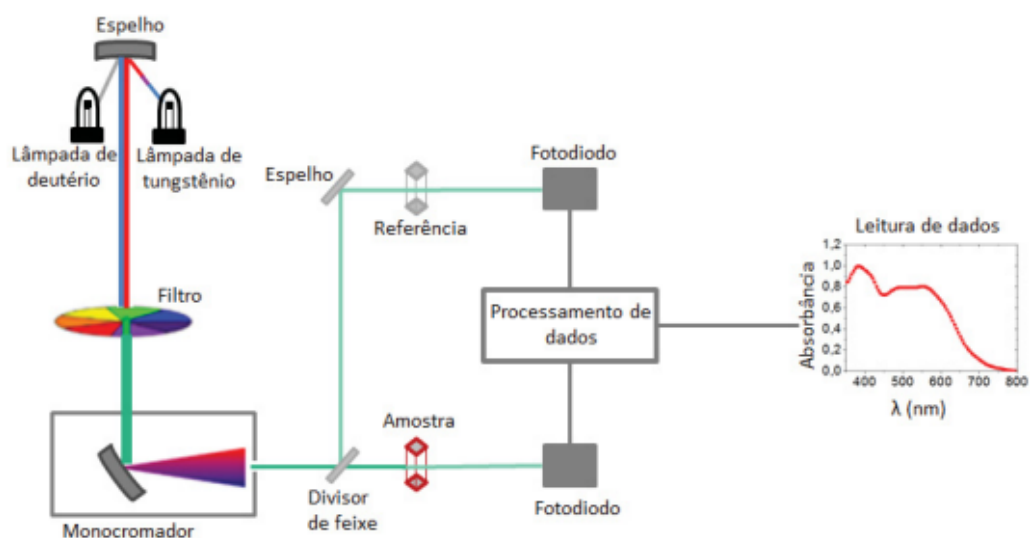


FIGURA 15 – Montagem esquemática do método de funcionamento do equipamento [105].

### 3.4 TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO E DEPOSIÇÃO

A fabricação de dispositivos fotovoltaicos orgânicos pode ser feita a partir da deposição da camada fotogeradora (camada ativa) utilizando as seguintes técnicas:

#### 3.4.1 Spin-coating

Técnica usualmente utilizada em produções de escala laboratorial, está representada na figura 16 e consiste na colocação de um substrato, como o vidro, sobre uma placa rotativa. A seguir, a solução é depositada no substrato, o qual pode estar parado (deposição estática) ou em movimento (deposição dinâmica). A rotação do equipamento gera então a força centrífuga, fazendo com que o excesso da solução seja impulsionado para fora, enquanto a tensão superficial e a viscosidade unem-se formando uma fina película sobre o substrato. Nesse tempo, o solvente evapora, mantendo apenas o material desejado no substrato [106].

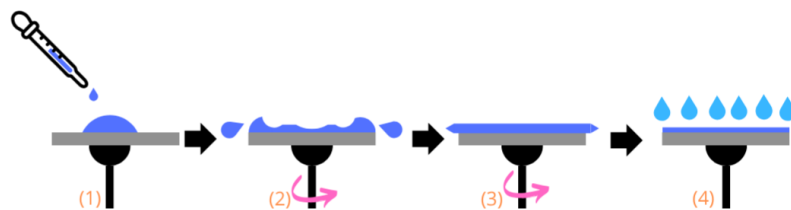


FIGURA 16 – Representação esquemática do processo de deposição de filmes finos por *spin coating*, técnica que permite o controle da espessura do filme por meio da velocidade de rotação e da viscosidade da solução utilizada. O processo ocorre em quatro etapas principais: (1) gotejamento da solução sobre o substrato estacionário; (2) distribuição inicial da solução sobre o substrato, que começa a girar; (3) formação de um filme uniforme pela força centrífuga, enquanto o excesso de solução é expelido e, por fim, (4) secagem e evaporação do solvente, resultando em um filme fino homogêneo. Fonte: adaptado de [107].

#### 3.4.2 Drop-casting

Nesta modalidade, uma determinada quantidade de solução é depositada sobre um substrato, o qual é colocado em um processo de aquecimento, visando evaporar o solvente, como a representação da figura 17, tornando o processo com baixo custo de fabricação. A qualidade e uniformidade do material formado dependem de fatores como o volume e a concentração da solução, a tensão superficial entre a solução e o substrato, além da viscosidade da solução e da variação da temperatura de aquecimento utilizada [106,108].

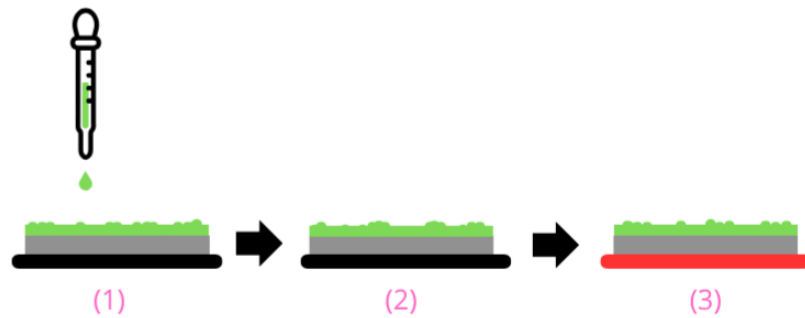


FIGURA 17 – Ilustração do processo de deposição de filmes finos por *drop-casting*, técnica utilizada na fabricação de dispositivos eletrônicos e sensores. O processo ocorre em três etapas: 1) Uma gota da solução contendo o material ativo é depositada manualmente sobre o substrato. 2) A solução permanece em repouso, permitindo que o solvente evapore naturalmente, promovendo a formação do filme. 3) O substrato é aquecido em uma placa térmica para completar a evaporação do solvente e promover o tratamento térmico do filme. Fonte: adaptado de [108].

### 3.4.3 Sputtering

A deposição via *sputtering*, é uma técnica física utilizada para depositar filmes finos. Seu funcionamento ocorre de acordo com a figura 18, partindo do jateamento do material de revestimento com íons de plasma, fazendo com que as partículas removidas entrem na fase gasosa, gerando um vapor. O vapor resultante, se condensa na superfície do substrato, num processo de forte aderência, resultando um revestimento fino. Há três variações da deposição catódica: pulverização catódica magnetron, reativa e de feixe de íons. A primeira variação consiste num processo envolvendo vácuo para se depositar materiais. A segunda, utiliza uma atmosfera gasosa para pulverizar o alvo. E por fim, a técnica de feixe de íons envolve o bombardeio do material alvo por um forte feixe de íons, criando uma fina e uniforme camada sobre o substrato [109,110].

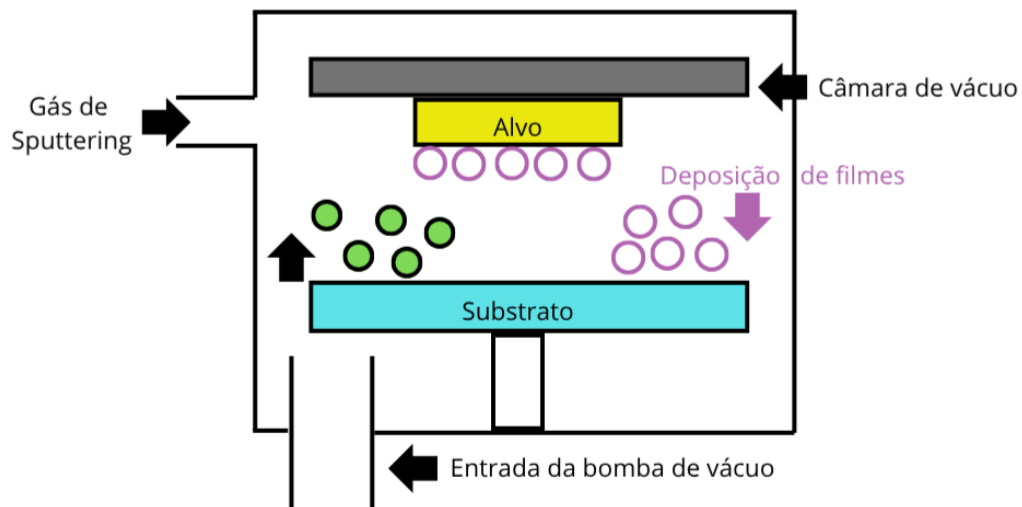


FIGURA 18 – Representação da técnica de *sputtering*, onde pode ocorrer uma deposição uniforme sobre grandes áreas, através da utilização de alvos com medidas de diâmetros maiores, além de apresentar controle com precisão da espessura do material depositado a partir de ajustes de parâmetros de processo. Entretanto, o equipamento utilizado contém alto valor associado, dificultando a utilização da técnica, junto com a desvantagem de que alguns materiais podem sofrer degradação ao se aplicar um bombardeamento de altos valores de energia [111]. Fonte: adaptado de [112].

#### 3.4.4 Evaporação térmica

A evaporação térmica consiste num processo físico utilizado na deposição de filmes finos. Seu funcionamento tem como base aquecer um material em alto vácuo, até que o mesmo evapore e condense sobre um substrato, resultando em um filme fino uniforme, como representado na figura 19 [113]. O processo é realizado em 4 etapas, são elas:

- Evacuação da câmara até pressões abaixo de  $10^{-5}$  Torr, para evitar contaminações das moléculas evaporadas;
- Colocação do material alvo em um cadinho, para então ser aquecido por resistividade, feixe de elétrons ou laser;
- Ao atingir a temperatura de evaporação, as moléculas se "despreendem" e se deslocam até o substrato;
- Os vapores se condensam sobre o substrato, que tipicamente está em temperatura fria, originando uma camada fina com espessura controlada.

Ao controlar fatores como temperatura, pressão e geometria da câmara, consegue obter melhores resultados para a taxa de deposição e uniformidade do filme [114,115].

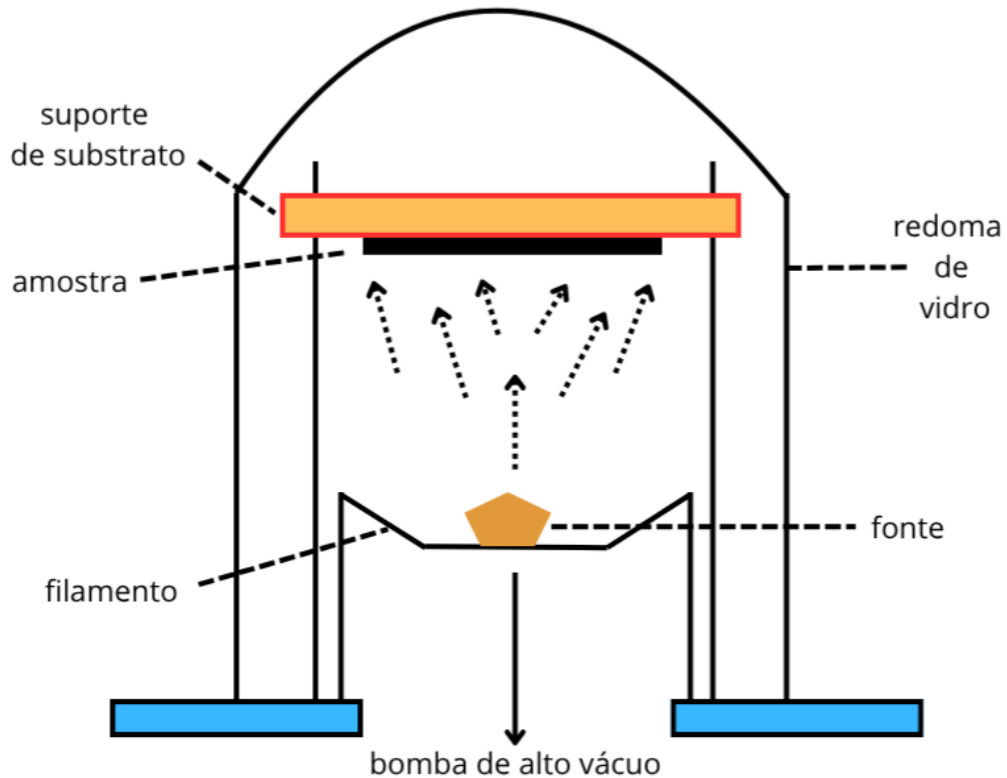


FIGURA 19 – A figura ilustra o processo de funcionamento de uma câmara de evaporação térmica. O processo de deposição ocorre dentro de uma redoma de vidro, que é evacuada por uma bomba de alto vácuo para reduzir a pressão interna e evitar possíveis contaminações durante a deposição. O material que será depositado (representado pela fonte) é aquecido através de um filamento metálico até evaporar. Os átomos ou moléculas evaporados se deslocam em direção ao substrato, onde se condensam e formam um filme fino sobre a amostra. Fonte: adaptado de [116].

### 3.4.5 Slot-die Coating

A operação *slot-die*, é líder no desenvolvimento de OPVs pois permite que a técnica seja altamente escalável, tornando possível a deposição de filmes finos de forma rápida e com uniformidade, acarretando no mínimo desperdício de material. Esse sistema pode ser embutido nas operações *roll-to-roll* (rolo para rolo), permitindo que o processo tenha baixo custo, além de contar com uma alta velocidade de processamento.

A tecnologia *slot-die* é utilizada para realizar a deposição de uma ampla variedade de produtos químicos nos mais diferentes substratos como vidro, metal e polímeros. A qualidade da deposição é obtida ao se dispensar o material sob uma taxa

controlada, enquanto a matriz de revestimento é movida em relação ao substrato, como representado na figura 20 [106, 117].

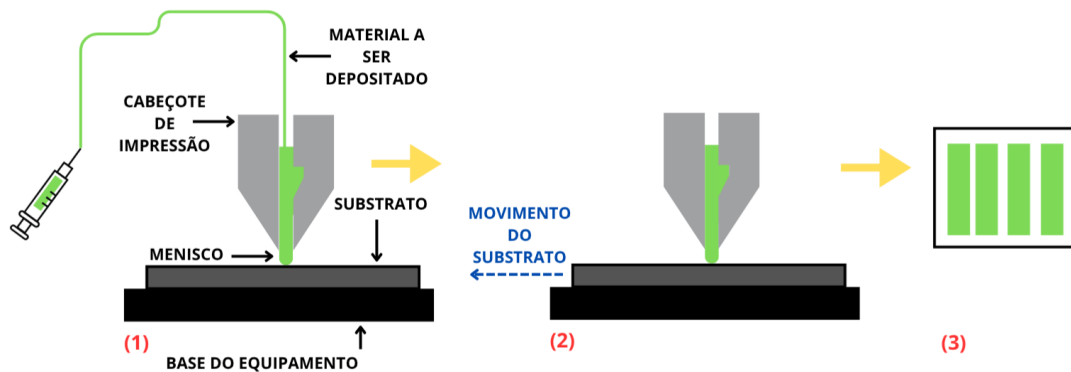


FIGURA 20 – Esquema ilustrativo do processo de deposição de filmes finos por *slot-die coating*, técnica amplamente utilizada na fabricação de OPVs, por permitir alto controle de uniformidade e espessura, além da compatibilidade com processos em escala industrial, como a impressão *roll-to-roll*. 1) Formação do menisco entre o cabeçote e o substrato, com o fluido sendo depositado por uma fenda controlada. 2) Movimento do substrato em relação ao cabeçote, promovendo a deposição uniforme do filme líquido sobre a superfície. 3) Representação do padrão final de recobrimento sobre o substrato, com múltiplas trilhas paralelas de material depositado. Fonte: adaptado de [118].

### 3.5 USO E APLICAÇÕES PRÁTICAS DOS OPVS

#### 3.5.1 Uso comercial no Brasil

No contexto comercial, as tecnologias de primeira e segunda geração carregam a predominância das vendas, mesmo com valores mais baixos para fabricação dos modelos da terceira geração.

Tratando-se do Brasil, a produção de dispositivos fotovoltaicos orgânicos é realizada pela empresa SUNEW, que opera em parceria com o CSEM Brasil. A SUNEW não atua como indústria tradicional, mas como uma empresa derivada do CSEM especializada no desenvolvimento e fabricação de módulos fotovoltaicos orgânicos. Fundada em 2015, na cidade de Belo Horizonte, no CIT SENAI FIEMG - Campus CETEC, a companhia conta com o apoio do Sistema FIEMG (Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais) e possui uma linha de produção em escala piloto e pré-industrial, com infraestrutura e capacidade tecnológica compatíveis com centros de referência internacionais no setor, como os existentes na Europa e no Japão. A fábrica se destaca por possuir um avançado método de impressão, a partir de materiais orgânicos durante a fabricação dos painéis fotovoltaicos [119]. Além de ser uma das maiores representantes das fabricas brasileiras de painéis solares, conta ainda com o destaque por ser responsável pela maior fachada fotovoltaica existente.

Situada no estado de Goiás, em Anápolis, contando com a parceria do grupo CAO (montadora de automóveis das marcas Hyundai e CAO CHERRY), como mostra a figura 21, foram instalados painéis fotovoltaicos orgânicos cobrindo uma área de 850 metros quadrados. O projeto recebeu um investimento de R\$130 milhões e foi implementado pelo Centro de Pesquisas e Eficiência Energética (CPEE). A partir da instalação foi possível que a geração de energia elétrica tivesse um volume suficiente para atender toda a demanda energética do prédio [120].



FIGURA 21 – Fachada do Centro de Pesquisas e Eficiência Energética, localizado em Anápolis (GO), onde foram instalados painéis fotovoltaicos orgânicos cobrindo aproximadamente 850 m<sup>2</sup> da estrutura [122].

### 3.5.2 Aplicações *low-light*

Quando um dispositivo fotovoltaico é utilizado em condições *low-light* de iluminação, significa que o ambiente em questão contém baixa luminosidade disponível. Nesses casos, a intensidade de luz é inferior aos valores padrões de irradiância solar, ou seja, menores que 1000 W/m<sup>2</sup> [22]. Considerando um ambiente iluminado por uma luz de LED de cerca de 300 lux, um dispositivo fabricado a partir de silício cristalino terá uma drástica queda no valor de sua eficiência, enquanto um OPV pode alcançar eficiências notáveis, cerca de 20%, devido às capacidades que serão apresentadas a seguir [121,122]:

- **Eficiência espectral sob baixa luminosidade:**

Os OPVs são fabricados a partir de materiais orgânicos, os quais podem ser ajustados para absorver de forma mais eficiente a luz em espectros específicos e diferentes da luz solar direta. Como por exemplo, as lâmpadas fluorescentes e LEDs utilizados em ambiente interno, que possuem predominância nas faixas de 400-700 nm, tendo seus picos especificados de acordo com o tipo de iluminação. Logo, a absorção seletiva de luz UV torna-se uma vantagem para aplicações internas [123,124].

- **Resistências *shunt* e *série*:**

Quando os dispositivos estão operando sob condições de baixa luminosidade, os valores elevados de resistência *shunt* têm ainda mais importância. Essa resistência minimiza a perda de correntes por caminhos paralelos não desejados, evitando então que a energia se dissipe, influenciando então nos valores da tensão de circuito aberto. Logo, em condições *low-light* a corrente gerada é naturalmente reduzida, e as perdas adicionais ocasionadas por baixa resistência *shunt* comprometem o desempenho do dispositivo. Contudo, a resistência em série, associada as perdas ôhmicas nas camadas condutoras, também influencia nos valores de eficiência, porém com menor intensidade quando considerados baixos valores de irradiância. Assim, em operações eficientes de dispositivos fotovoltaicos orgânicos em ambientes com baixa iluminação, é necessário garantir uma alta resistência *shunt* [125-127].

Logo, devido as características favoráveis dos OPVs, os dispositivos estão sendo utilizados em diferentes aplicações *low-light* como por exemplo dispositivos médicos portáteis [128], além de sistemas de automação doméstica. Contudo, apesar dos avanços tecnológicos, ainda existem desafios técnicos e econômicos a serem superados, é o caso da durabilidade dos dispositivos em ambientes internos e das formas de encapsulamento a serem utilizadas tornando-os mais eficientes [129].

### 3.5.2.1 Desempenho de células fotovoltaicas convencionais em condições de baixa iluminação

As células solares de silício cristalino, representam a tecnologia dominante no mercado fotovoltaico comercial, devido sua alta eficiência sob condições de iluminação solar padrão,  $1000 \text{ W/m}^2$ . Entretanto, sob condições de baixa luminosidade, como em ambientes internos e dias nublados, seu desempenho decai significativamente. Os fatores que causam tais limitações estão relacionados com as propriedades espectrais do material semiconductor, além dos valores da eficiência quântica externa.

Em condições de baixa iluminação, a densidade de fótons incidente é muito menor que os valores obtidos em condições sob iluminação solar, assim ocorre uma redução na geração de pares elétron-buraco. Sabe-se que a eficiência quântica externa de células de silício diminui quando o dispositivo é exposto a comprimentos de onda menores que 500 nm e maiores que 1000 nm, indicando uma faixa espectral útil restrita. Esse tipo de situação é comumente vista em ambientes internos, onde a distribuição espectral de fontes de luz artificiais é deslocada e frequentemente contém menor intensidade nas regiões do espectro onde o silício apresenta maior sensibilidade [130].

Outro fator limitante é relacionado a eficiência de células solares, a qual é prejudicada pela combinação de fatores como menor tensão de circuito aberto, em

baixas intensidades de luz e perdas de resistividade interna. Os valores de  $V_{oc}$  são diretamente dependentes da irradiância, logo, sob luz fraca, ocorre uma queda neste parâmetro de caracterização, afetando o valor da eficiência total do dispositivo [131].

Comparativamente, tecnologias mais recentes como as células solares orgânicas, tendem a apresentar melhor desempenho relativo sob baixa iluminação. Isso ocorre devido as características de melhor absorção em faixas espectrais coincidentes com a luz artificial, e uma menor dependência de irradiância para parâmetros como tensão de circuito aberto e *fill factor*. Para se obter melhores resultados, nos OPVs, por exemplo, a estrutura de *band gap* dos materiais orgânicos pode ser ajustada para otimizar a absorção de valores específicos do espectro de absorção, tornando o dispositivo mais eficiente para aplicações *indoor* e *low-light* [122].

### 3.5.3 Estudo de caso: OPV e o DINE

O grupo de pesquisa DiNE - UFPR, estuda desde os anos 2004, as propriedades elétricas, morfológicas e ópticas de dispositivos fabricados a partir de materiais nanoestruturados. Dentro dos laboratórios são desenvolvidas novas tecnologias como diodos emissores de luz, fotodetectores, transistores, capacitores e as células solares.

As pesquisas coordenadas pela Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Lucimara Stolz Roman utilizam compostos orgânicos combinados com nanotecnologia para a fabricação de OPVs, mantendo escala laboratorial de produção. Diferentemente dos modelos tradicionais fabricados a partir de Silício, o grupo manipula polímeros semicondutores em suas atividades de pesquisa.

Atualmente, está sendo utilizado um equipamento, da marca FOM TECHNOLOGIES, como mostra a figura 22, operando a partir da técnica *slot-die coating*, para realizar o processo de impressão das camadas formadoras de uma célula solar fotovoltaica orgânica. A técnica possibilita a produção de filmes finos com alta qualidade, precisão e possibilidade de torna-los fabricados por larga escala. Dessa forma, há representação de avanços na viabilidade de produção em escala industrial das células solares.



FIGURA 22 – Equipamento da FOM *Technology* presente no laboratório. Fonte: Marcos Solivan Camargo.

- **Estação Tubo de Ensaio [18, 132]**

A cidade de Curitiba conta com um importante marco arquitetônico e urbano, são as estações tubo, projetadas pelo arquiteto e urbanista Abrão Assad [133]. Essa arquitetura se destaca por combinar um design inovador e funcionalidade de utilização.

A combinação do impacto estético e urbano, permitiu que inovações acerca das estações fossem ocorrendo. Uma dessas inovações foi uma pesquisa realizada em parceria com o DiNE, SUNEW, JCHEBLY e a Prefeitura da capital paranaense. As pesquisadoras desenvolveram um projeto onde seriam instalados OPVs na superfície superior das estações tubo, como observado na figura 23. A justificativa para a utilização desses materiais é devido às vantagens associadas, como por exemplo facilidade de instalação, conforto térmico proporcionado, visto que os OPVs possuem a característica de absorver a radiação solar e, ao mesmo tempo, fornecer sombra, reduzindo a incidência direta de calor no ambiente, além da geração de energia limpa e abundante [133,134].

A estação tubo modelo da pesquisa, apelidada carinhosamente de Estação Tubo de Ensaio, está implantada no Centro Politécnico da UFPR, em Curitiba. Nela, os alunos do DiNE puderam realizar um estudo de caso, avaliando as dificuldades e vantagens da aplicação dos painéis no teto externo da estação. Neste modelo foram implantados 28 OPVs no topo e 2 nos vidros laterais.



FIGURA 23 – Estação Tubo de Ensaio situada no Centro Politécnico da UFPR, em Curitiba. A estrutura foi utilizada como modelo experimental para a aplicação de painéis fotovoltaicos orgânicos (OPVs). Fonte: Marcos Solivan Camargo.

O estudo permitiu que fossem analisados em um período de tempo, o desempenho e eficiência dos materiais utilizados, permitindo a identificação de fatores que afetam seu funcionamento, como as variações climáticas do ambiente, sombreamento da área, mudanças sazonais, inclinação da irradiação solar e sujeidade dos painéis.

Esses fatores serviram como base para análise do impacto dos mesmos na produção de energia e eficácia do sistema implantado. Ao final do trabalho, foram identificados aspectos que futuramente devem ser alterados visando otimizar o uso da tecnologia, garantindo maior viabilidade financeira e eficiência energética a longo prazo.

#### • Janelas energéticas

Novamente, o grupo DiNE formulou um projeto com a instalação de OPVs em alguns vidros da fachada do prédio de Exatas (PA) da Universidade Federal do Paraná, campus Centro Politécnico, como mostra a figura 24. Essa implantação é mais uma demonstração de inovação e tecnologia aplicadas ao ambiente urbano e nesse caso, também acadêmico.



FIGURA 24 – Instalação de placas solares orgânicas no prédio PA, no Centro Politécnico da UFPR. Fonte: arquivo DiNE.

Além de possibilitar uma estética diferenciada ao prédio, as janelas energéticas permitem que ocorra geração de energia elétrica proveniente da luz solar, contribuindo para a redução do custo energético do edifício. Na totalidade da instalação, algumas vantagens são verificadas, como por exemplo geração de energia limpa e abundante e conforto térmico ao ambiente interno, mantendo a temperatura agradável aos usuários [132].

Projetos como este, não só ajudam a suprir uma porcentagem da necessidade energética do prédio, mas também colaboram com a sustentabilidade ambiental. Dessa forma, fazem com a Universidade esteja presente em práticas ambientais responsáveis e inovadoras. A partir deste, outros modelos de projetos podem ser implementados, trazendo benefícios para a eficiência energética, além de influenciar positivamente a diversificação dos aspectos estéticos e arquitetônicos.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, os testes realizados para obtenção dos dados elétricos, forneceram valores utilizados para plotar as curvas características necessárias para a determinação da eficiência de um OPV. Foram utilizados dois ambientes diferentes para realização das medidas, laboratório do DiNE 2 e sala de reuniões da Pós-Graduação em Física. Os testes são importantes para que se possa avaliar o desempenho do painel sob condições controladas, permitindo a análise de diferentes parâmetros como a corrente gerada, a tensão e a potência de saída em função da irradiância solar, além de temperatura e outros fatores ambientais.

### 4.1 PAINEL FOTOVOLTAICO ORGÂNICO COMERCIAL

Durante o desenvolvimento do estudo, foi utilizado um OPV pertencente ao grupo de pesquisas DiNE, figura 25, como citado anteriormente. O respectivo painel contém dimensão espacial de 49,8 x 125,6 cm e aproximadamente 1056 cm<sup>2</sup> de camada ativa. Por motivos de propriedade intelectual do fabricante, não se tem dados técnicos sobre quais polímeros e moléculas constituem sua camada ativa.

FIGURA 25 – Painel fotovoltaico orgânico (OPV) utilizado nos experimentos deste estudo, pertencente ao Grupo de Dispositivos Nanoestruturados (DiNE). O módulo apresenta área total de 49,8 x 125,6 cm e área ativa estimada de 1056 cm<sup>2</sup>.  
Fonte: autoria própria.

Além do painel completo, também foi utilizada uma amostra, figura 26, obtida

através do recorte de um painel comercial de mesma composição e lote do exemplar utilizado neste trabalho, para ensaios que exigiam menor escala ou análise destrutiva.



FIGURA 26 – Painel fotovoltaico orgânico (OPV) utilizado nos experimentos deste estudo, pertencente ao Grupo de Dispositivos Nanoestruturados (DiNE). O módulo apresenta área total de  $49,8 \times 125,6$  cm e área ativa estimada de  $1056$  cm<sup>2</sup>.  
Fonte: autoria própria.

## 4.2 POWER BANK

### 1. **Power Bank PINENG**

Como o estudo tem intuito de averiguar se o OPV acoplado sob uma superfície (mesa/bancada) terá condições de carregar um *power bank*, foi utilizado um modelo de carregador portátil como o da figura 27.



FIGURA 27 – *Power bank* da marca PINENG, modelo PN-952. O exemplar possui capacidade de 3,7V e 5000mAh. Fonte: Saravati Materiais Técnicos

O exemplar, conta com capacidade de 5000 mAh e tensão interna de 3,7 V, logo sua energia total é de 18,5 Wh. Embora sua bateria interna seja de 3,7 V, os carregadores portáteis são normalmente carregados via USB, ou seja, com a tensão de carregamento de 5 V e com a corrente de carregamento variando de acordo com o carregador utilizado, podendo ser entre 1 A e 2 A. Considerando um carregamento com tensão de 5 V e corrente de 1 A, em condições ideais, seriam necessários 3,7 h para que a carga fosse completamente carregada. Enquanto em um carregamento com com mesma tensão e corrente de 2A, seria necessário 1,85 h para que a carga fosse completamente recarregada.

## 2. *Power Bank KTS*

Além do modelo apresentado anteriormente, foi utilizado um carregador portátil como o da figura 28.



FIGURA 28 – *Power bank* da marca KTS, modelo KTS-1288. Fonte: J & Y Store.

O modelo, possui capacidade de energia de 1200 mAh e tensão interna de 3,7 V, logo sua energia total é de 4,44 Wh. O dispositivo é carregado via USB, com tensão de saída de 5 V, e corrente de carregamento pode variar de acordo com o carregador utilizado, intercalando entre 1 A e 2 A. Considerando a variação de corrente de carregamento de 1 A e 2A respectivamente, em condições ideais, para que a carga do dispositivo fosse completamente reabastecida, seriam necessários 53,3 min e 26,6 min.

### 4.3 DESENVOLVIMENTOS DOS TESTES *INDOOR*

Os testes realizados para obter dados sobre o funcionamento do painel e, conseqüentemente, sua eficiência, foram conduzidos em dois diferentes ambientes de ensaio: o ambiente de ensaio 1, correspondente ao laboratório do DiNE, e o ambiente de ensaio 2, referente à sala de reuniões do Programa de Pós-Graduação em Física (PPGF).

#### 4.3.1 Ambiente de ensaio 1

O primeiro local, o laboratório de pesquisa do DiNE 2, situado no prédio conhecido por "Espinha de Peixe", bloco II, no Centro Politécnico da UFPR, possui temperatura controlada 24 h por dia, através da utilização de ar condicionado. A figura 29 representa o local e o posicionamento do dispositivo.

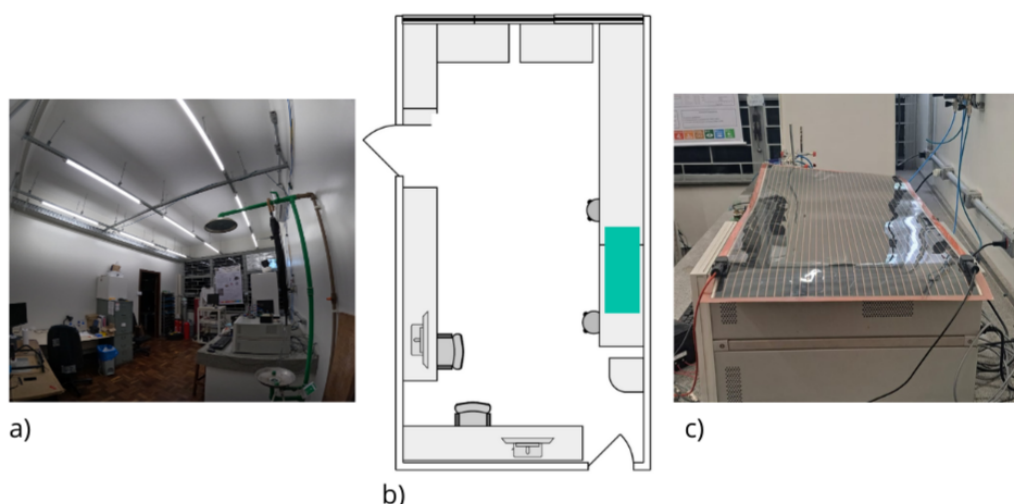


FIGURA 29 – Visão geral e organização do ambiente de ensaio 1. a) Visão geral do laboratório DiNE 2. b) Representação esquemática do posicionamento do OPV no local. c) Posicionamento do painel durante a coleta de dados. Fonte: autoria própria.

A iluminação presente no ambiente é referente ao conjunto de nove lâmpadas instaladas no teto do laboratório. As lâmpadas utilizadas são da marca PHILIPS, modelo 840 Luz Neutra. A potência individual de cada lâmpada é de 18 W, a tensão varia entre

100 V e 240 V, enquanto a corrente é de 160 mA para modelos 127 V e 95 mA para a variação 220 V.

Outros dados técnicos retratam que a vida útil nominal deste modelo é de 25000 horas, sua eficiência luminosa, ou seja, a relação entre a quantidade de luz que ela emite e a energia elétrica que consome é de 102,00 lm/W, enquanto seu fluxo luminoso, que representa a quantidade de luz emitida é de 1850 lm [135].

Para indicar a eficiência com que a energia elétrica é convertida em trabalho útil, toda lâmpada conta com um fator de potência (FP), neste caso o FP é maior que 0,92. Logo, como um valor ideal para o fator de potência seria 1, a lâmpada utilizada está tendo sua energia utilizada de forma eficiente.

#### 4.3.2 Ambiente de ensaio 2

O segundo ambiente escolhido para a coleta de dados sobre o desempenho do painel fotovoltaico comercial em condições *indoor* e de baixa intensidade luminosa, *low light*, foi a sala de reuniões do Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Paraná, localizado no primeiro andar do prédio de Ciências Exatas.

Para a coleta de dados, o OPV comercial foi posicionado em duas diferentes condições dentro da sala de reuniões: no meio da mesa, denominado posição de ensaio 2.1, e na beirada próxima à janela, denominada posição de ensaio 2.2. Em ambas as situações, o dispositivo foi mantido na mesma orientação e posição ao longo de todos os dias de medição. Essa padronização teve como objetivo garantir a reprodutibilidade e a consistência dos dados obtidos.

A figura 30 apresenta uma visão geral do local e dos posicionamentos do painel comercial, durante a coleta de dados.

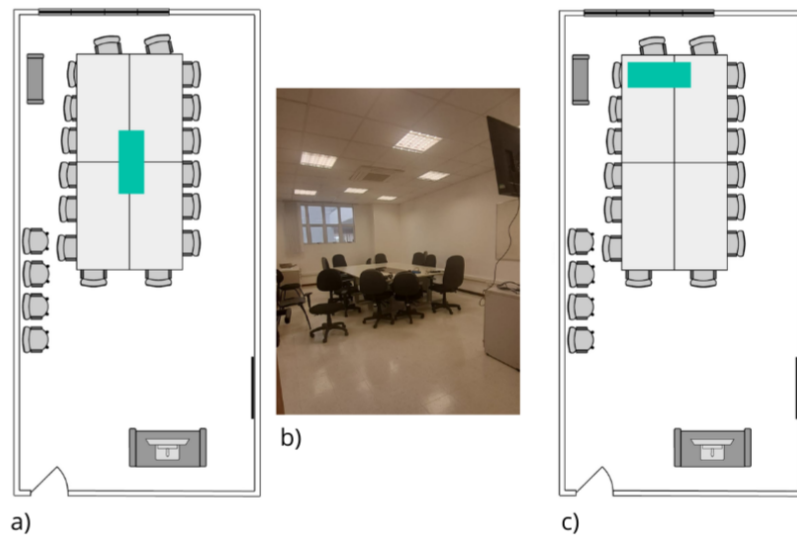


FIGURA 30 – Visão geral e organização do ambiente de ensaio 2. a) e c) Representações esquemáticas das posições de ensaio 2.1 e 2.2, respectivamente. b) Visão geral da sala de reuniões. Fonte: autoria própria.

A escolha desse local é justificada pela alta intensidade de iluminação proporcionada tanto pela iluminação artificial (lâmpadas fluorescentes embutidas no forro) quanto pela entrada de luz natural através das janelas, características que tornam o local um ambiente representativo típico de escritórios e salas de aula. Além disso, embora haja a possibilidade de controle da temperatura por meio de ar-condicionado, o equipamento permaneceu desligado durante os períodos de testes, considerando-se assim, a temperatura ambiente como referência para as análises de dados.

A iluminação da sala é referente ao conjunto de 32 lâmpadas instaladas no teto do local. As lâmpadas utilizadas são da marca PHILIPS, modelo TL5 14W/840 ESSENTIAL. A potência individual da lâmpada é de 14W, e a corrente nominal utilizada é de 0,170 A.

Além dos dados básicos, o fabricante fornece valores sobre a vida útil nominal do modelo, cerca de 15000 horas, sobre a eficiência luminosa, 88 lm/W, e o fluxo luminoso, 1350 lm [136].

#### 4.3.3 Medidas de iluminância

No período de execução dos testes, um luxímetro da marca PHYWE (aparelho utilizado para quantificar a luminância em um certo espaço), figura 31, foi utilizado para medir a iluminância do ambiente. A luminância é um fator utilizado para entender o desempenho do painel, visto que a quantidade de luz disponível é fator influenciante na eficiência de conversão da energia solar. Ao medir a iluminância, pode-se correlacionar os dados de intensidade luminosa com os dados de geração de energia do painel.

FIGURA 31 – Luxímetro PHYWE. O funcionamento baseia-se na captação da intensidade luminosa incidente em seu sensor, possibilitando a correlação entre a quantidade de luz disponível no ambiente e o desempenho do painel fotovoltaico durante os ensaios. Fonte: autoria própria.

#### 4.3.4 Medidas de temperatura

O fator temperatura também foi constantemente monitorado durante os testes, uma vez que essa variável exerce influência sobre o desempenho de dispositivos fotovoltaicos. As variações térmicas podem impactar nos valores de eficiência de conversão de energia, alterando os valores da resposta elétrica dos dispositivos.

Para esse monitoramento, foi utilizado um termômetro de precisão, como mostra a figura 32. Através da sua utilização foi acompanhado em tempo real a temperatura do ambiente durante os testes, garantindo confiabilidades aos dados obtidos e possibilitando correlacionar o desempenho elétrico com as condições térmicas.

FIGURA 32 – Termômetro FLIR TG165 - Imaging IR Thermometer. Seu funcionamento se dá a partir da detecção da energia emitida, transmitida e refletida, do objeto. O aparelho então converte a informação detectada em uma leitura de temperatura, a qual é exibida em seu visor. Fonte: autoria própria.

#### 4.3.5 Medidas de tensão e corrente elétrica

Para a realização das medições elétricas necessárias, foram utilizados dois instrumentos: um multímetro digital e uma fonte de alimentação programável. A partir destes equipamentos, foram obtidos dados como tensão e corrente elétrica no dispositivo testado, além da geração da curva característica  $I \times V$ .

O multímetro digital utilizado é da marca MINIPA, apresentado na figura 33. Esse instrumento multifuncional permite a medição de grandezas elétricas como tensão (voltímetro), corrente (amperímetro) e resistência elétrica (ohmímetro), possibilitando que um único aparelho consiga realizar as principais funcionalidades para análises de circuitos elétricos. A partir do multímetro foram coletados valores de tensão e corrente nominal,  $V_{nom}$  e  $I_{nom}$  respectivamente.

FIGURA 33 – Multímetro digital MINIPA. Seu funcionamento baseia-se na detecção e conversão dos sinais elétricos em valores exibidos no visor digital. Fonte: autoria própria.

Adicionalmente, utilizou-se uma fonte de alimentação da marca AGILENT, modelo E3643A, apresentada na figura 34. Esse equipamento é fundamental para a realização das variações controladas de tensão e corrente durante os ensaios elétricos, possibilitando a construção da curva característica  $I \times V$  do OPV utilizado.

FIGURA 34 – Fonte AGILENT, modelo E3643A. Sua função é fornecer condições controladas de operação e realizar a aquisição precisa dos dados necessários para a análise do desempenho fotovoltaico. Fonte: autoria própria.

A Figura 35 apresenta o diagrama esquemático do circuito experimental utilizado para a medição da corrente elétrica gerada pelo painel fotovoltaico orgânico comercial em operação conjunta com uma fonte externa de alimentação. O sistema é constituído por três elementos principais: a célula fotovoltaica, a fonte de tensão contínua e o amperímetro conectado em série ao circuito.

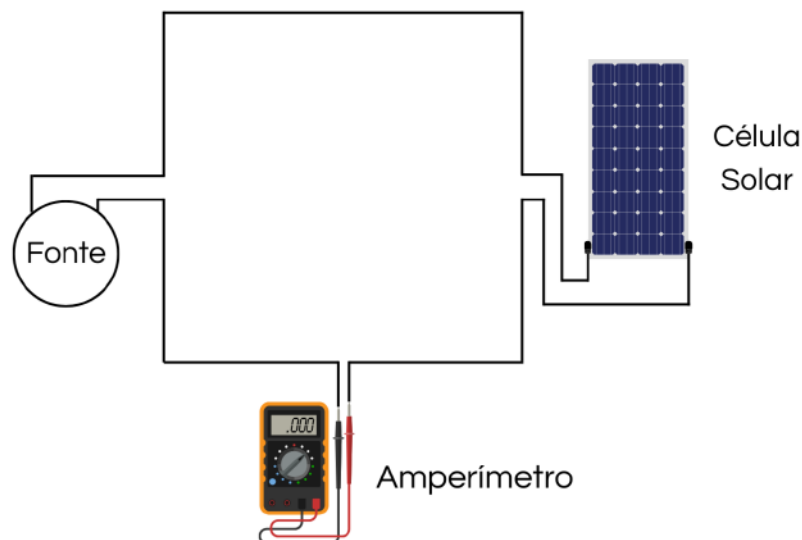


FIGURA 35 – Esquema do circuito experimental utilizado para a medição da corrente elétrica em uma célula solar, com a presença de uma fonte de alimentação auxiliar e um amperímetro conectado em série. O arranjo possibilita a determinação de curvas  $I \times V$ , a análise do ponto de máxima potência e a caracterização da resposta fotoelétrica sob condições controladas de iluminação. Fonte: autoria própria.

Esse arranjo experimental pode ser empregado em diferentes etapas de caracterização da célula fotovoltaica. Uma aplicação relevante é a determinação da curva corrente–tensão ( $I \times V$ ) do dispositivo, fundamental para a extração de parâmetros como a corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ), a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), o ponto de máxima potência e o fator de preenchimento ( $FF$ ).

Outra utilização do circuito está na análise da resposta do dispositivo em condições controladas de iluminação, o que possibilita correlacionar a intensidade luminosa incidente com a densidade de corrente gerada. Esse tipo de estudo é essencial tanto para a comparação de diferentes tecnologias fotovoltaicas (silício cristalino, filmes finos, OPVs, perovskitas etc.) quanto para a avaliação de desempenho em cenários específicos, como aplicações em ambientes internos.

#### 4.3.6 Espectroscopia de absorção uv-vis

Neste estudo, foi utilizado um Fluorog, da marca HORIBA. Trata-se de um fluorímetro acoplado com UV-VIS, o qual está disponível no laboratório do Grupo de Dispositivos Nanoestruturados (DiNE), representado na figura 41.

FIGURA 36 – Fluorog HORIBA (fluorímetro acoplado a espectrofotômetro UV-VIS). Equipamento utilizado para a caracterização óptica de materiais, permitindo a análise de fluorescência e absorbância. O sistema possibilita investigar propriedades espectroscópicas fundamentais para a compreensão do desempenho de dispositivos fotovoltaicos orgânicos. Fonte: autoria própria.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos procedimentos experimentais realizados durante o desenvolvimento deste trabalho, acompanhados das análises e interpretações correspondentes.

### 5.1 EMISSÃO E ABSORÇÃO

#### 5.1.1 Espectro de emissão da lâmpada do laboratório

O gráfico da figura 37, representa o espectro de emissão da lâmpada do laboratório (disponibilizado pelo fabricante), onde o eixo Y indica a intensidade relativa (%) e o eixo X o comprimento de onda ( $\lambda$ ) em nm. Observa-se dois picos de emissão, sendo eles:

- Pico principal 1: Em torno de 435 nm.

Podendo representar um pico no tom azul-violeta. Este comprimento de onda é típico de lâmpadas fluorescentes ou LEDs brancos;

- Pico principal 2: Por volta de 610 nm.

Com formato mais amplo e deslocado para o vermelho-alaranjado. Lâmpadas que simulam a chamada "luz quente" (mais amarelada), e são comumente utilizadas em iluminação ambiente, devido a sua sensação de tornar o ambiente mais confortável visualmente.

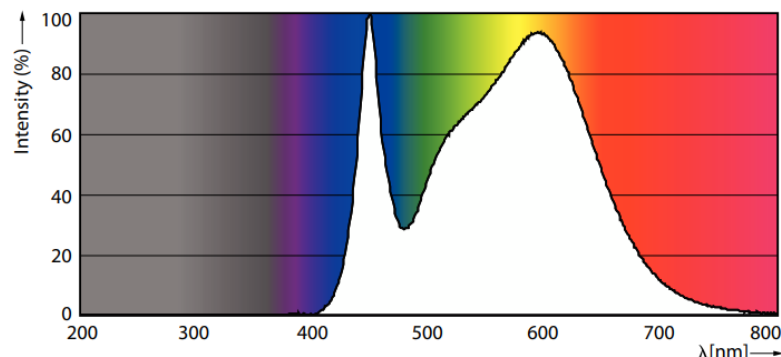


FIGURA 37 – Espectro da distribuição de energia da lâmpada instalada no laboratório [136].

### 5.1.2 Espectro de emissão da lâmpada da sala de reuniões

O gráfico da figura 38, representa o espectro de emissão da lâmpada do laboratório (fornecida pelo fabricante), onde se observa três picos de emissão, sendo:

- Pico principal 1: Aos arredores de 435 nm.

O pico representa a tonalidade azul-violeta. Esse pico é típico de emissão direta de mercúrio (Hg), um dos principais componentes do plasma dentro da lâmpada fluorescente. O mercúrio emite fortemente nessa faixa quando é excitado eletricamente.

- Pico principal 2: Cerca de 550 nm.

O segundo pico representa a tonalidade verde. Esse pico geralmente vem da fluorescência de fósforos verdes ativados pelo UV do mercúrio.

- Pico principal 3: Em torno de 610 nm.

Também proveniente dos fósforos fluorescentes, formulados para complementar a emissão com tons quentes (vermelho-alaranjado), dando um espectro mais equilibrado e agradável.

Entretanto, entre os picos, há regiões com menor emissão, o que significa que a luz não é contínua como a do Sol, mas composta por bandas discretas.

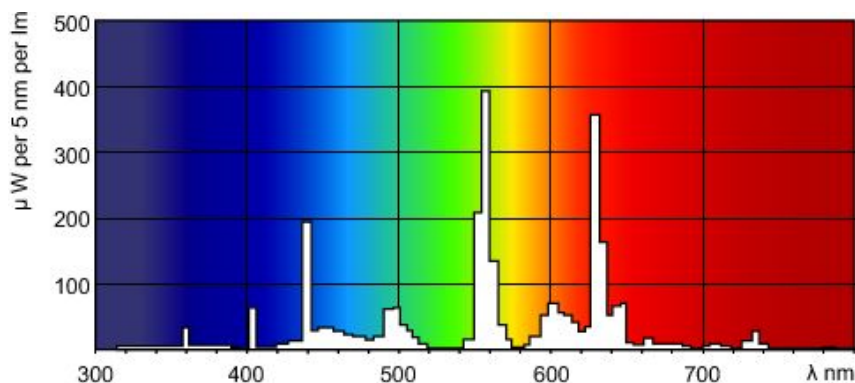


FIGURA 38 – Espectro da distribuição de energia da lâmpada instalada na sala de reuniões [137].

### 5.1.3 Absorção do OPV

A partir de uma amostra, obtida através do recorte de um painel comercial de mesma composição e lote do exemplar utilizado neste trabalho, representada na figura 39, foi realizada a medida de absorvância do OPV comercial utilizado.

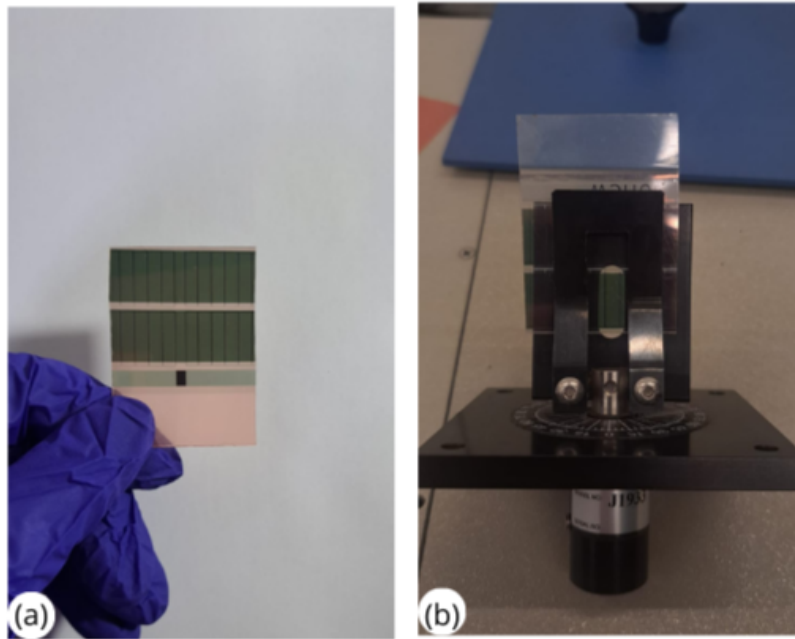


FIGURA 39 – (a) Amostra A0 utilizada para a caracterização de absorvância do material; (b) Posicionamento da amostra no equipamento de medidas.

Neste estudo, diferentes configurações de camadas foram medidas e analisadas individualmente, com o objetivo de compreender o papel de cada uma na absorção do material completo. As medições foram realizadas em um espectrofotômetro de UV-VIS, utilizando o ar como material de referência inicial (branco), atribuindo os resultados obtidos a amostra e suas camadas.

A amostra, A0, do OPV comercial, como mostra a imagem (a) da figura 39, foi inicialmente medida para se obter o espectro de absorção completo, ou seja, com todas as camadas pertencentes. O gráfico obtido está representado pela figura 40.

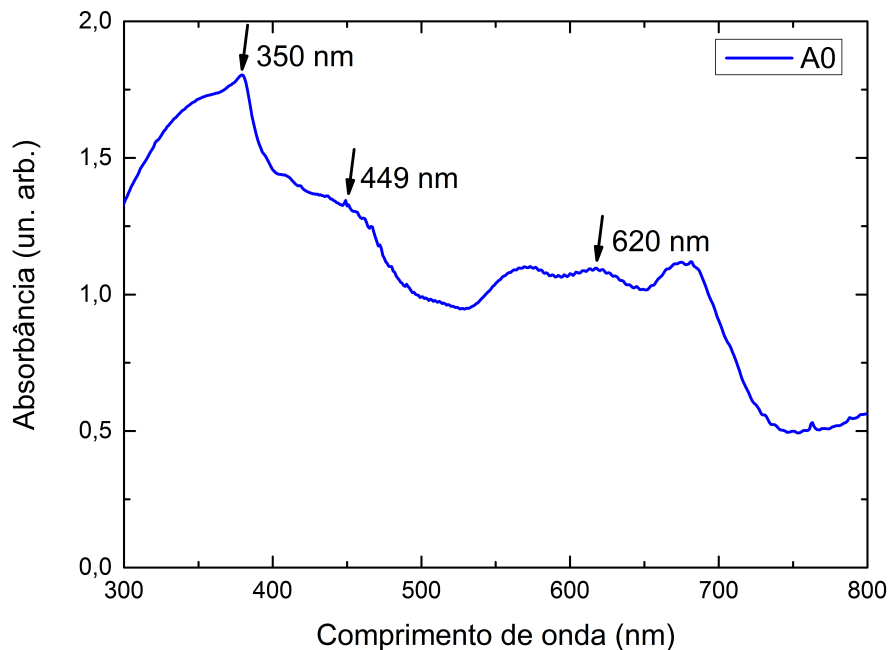


FIGURA 40 – Espectro de absorção do painel comercial utilizado.

A curva do gráfico anterior, indica três picos de absorção, com as seguintes características:

- Pico de absorção 1: Cerca de 350 nm.

O principal pico de absorção representa a faixa onde ocorre maior absorção no ultravioleta, entretanto em ambiente internos, como dentro do laboratório, a luz UV é quase ausente, logo, não há grande contribuição para a geração de corrente elétrica;

- Pico de absorção 2: Em torno de 449 nm.

Nesta posição ocorre uma absorção moderada, sendo seus valores coincidentes com a faixa do azul-verde, onde o intervalo pode conter valores razoáveis de radiação;

- Pico de absorção 3: Entre 620 nm.

A absorção é significativa no vermelho, representada mais especificamente em dispositivos que funcionam sob iluminação de interiores, como por exemplos as lâmpadas. No gráfico 37 pode-se observar que o segundo pico de emissão está localizado nesta área do vermelho.

Para as caracterizações seguintes , foram realizadas medições sucessivas em diferentes estágios de remoção de camadas da amostra, com o objetivo de identificar a contribuição individual de cada uma delas na absorção total do sistema.

Inicialmente, foi retirada da amostra uma película protetora semitransparente de cor laranja, utilizada como camada externa para proteção do material, conforme ilustrado na figura 41. A nova configuração foi denominada A1.

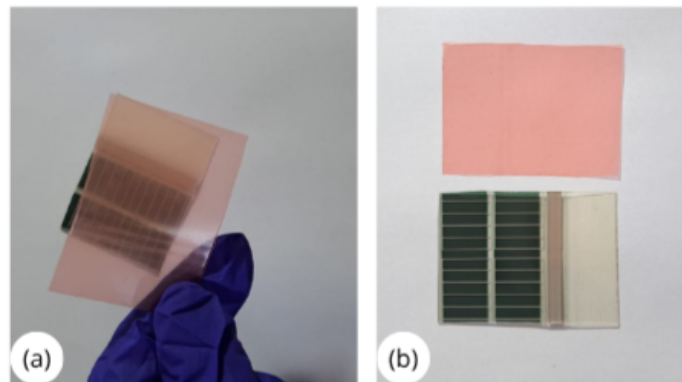


FIGURA 41 – Amostra A1 utilizada para caracterização. (a) Película protetora semitransparente de cor laranja; (b) Película protetora (superior) e amostra do OPV após a retirada da camada de proteção (inferior).

Em seguida, a medição foi realizada na amostra A2, onde, além da remoção da película laranja, foi retirada também uma camada de cola semitransparente em tom amarelado, como mostra a figura 42.

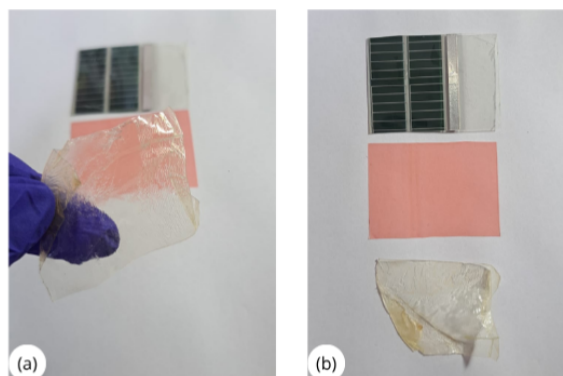


FIGURA 42 – Imagens da preparação da amostra A2. (a) Camada semitransparente amarelada de material colante; (b) Amostra após a retirada das camadas semitransparente laranja e de cola (superior), camada de proteção laranja (meio) e material colante (inferior).

Na próxima medição, correspondente à amostra A3, foi removida uma terceira camada: uma estrutura do tipo "*grid*", semitransparente em tom azulado, formada por marcações visíveis, como mostrado na figura 43.

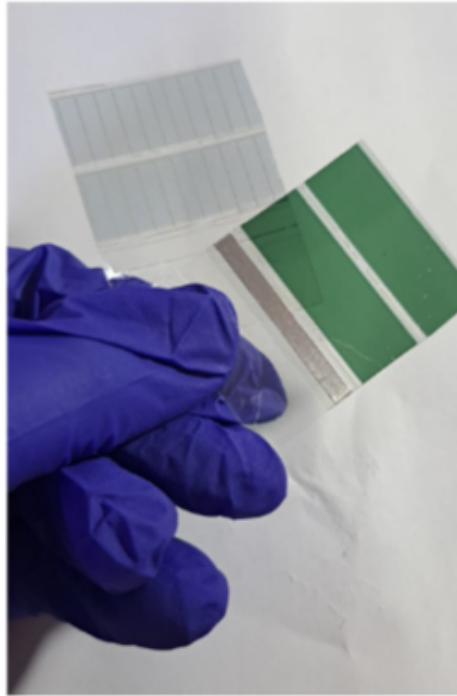


FIGURA 43 – Camada nomeada por "*grid*" retirada da amostra inicial (à esquerda) e amostra A3 do OPV (à direita).

Por fim, na amostra A4, além das camadas já removidas nas etapas anteriores, foi retirada uma última camada transparente fixada diretamente ao substrato.

A análise conjunta dos espectros de absorção das amostras A0 (amostra original), A1, A2, A3 e A4 resultou no gráfico apresentado na figura 44, permitindo avaliar a contribuição relativa de cada camada na absorção óptica total do dispositivo.

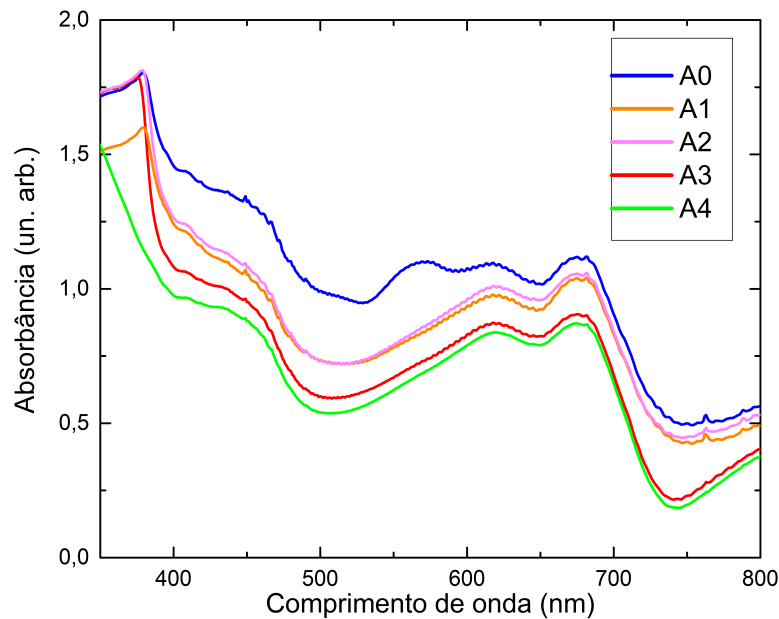


FIGURA 44 – Espectro de absorção conjunto de todas as amostras utilizadas.

TABELA 1 – Camadas estruturais das amostras utilizadas no gráfico da figura 44.

| Amostra | Estrutura   |
|---------|---|
| A0      | todas as camadas  |
| A1      | retirada uma camada<br>(película protetora<br>semitransparente de cor laranja)                |
| A2      | retirada uma camada<br>de cola semitransparente em tom amarelado                              |
| A3      | retirada uma camada do tipo " <code>\textif{grid}</code> "<br>semitransparente em tom azulado |
| A4      | retirada uma camada transparente<br>fixada diretamente ao substrato                           |

Observa-se a partir do gráfico anterior, que as diferentes camadas do OPV interferem na absorção de luz em diferentes comprimentos de onda (200 - 900 nm). A amostra inicial, A0, onde foi realizada medição sob o dispositivo com todas as camadas constituintes, indica alta absorbância nas regiões de 300 nm a 500 nm (UV- violeta) e 550 nm a 750 nm (verde ao vermelho), com picos significativos próximo a 380 nm e 650 nm. Conforme foram sendo retiradas as camadas constituintes, a absorbância total foi diminuindo, mostrando a influência do material que foi removido na absorção de luz pelo OPV.

No entanto, como as diferenças de intensidade absoluta podem mascarar alterações sutis na forma espectral, os mesmos dados foram normalizados em relação

ao valor máximo de absorvância de cada amostra, conforme apresentado na figura 45.

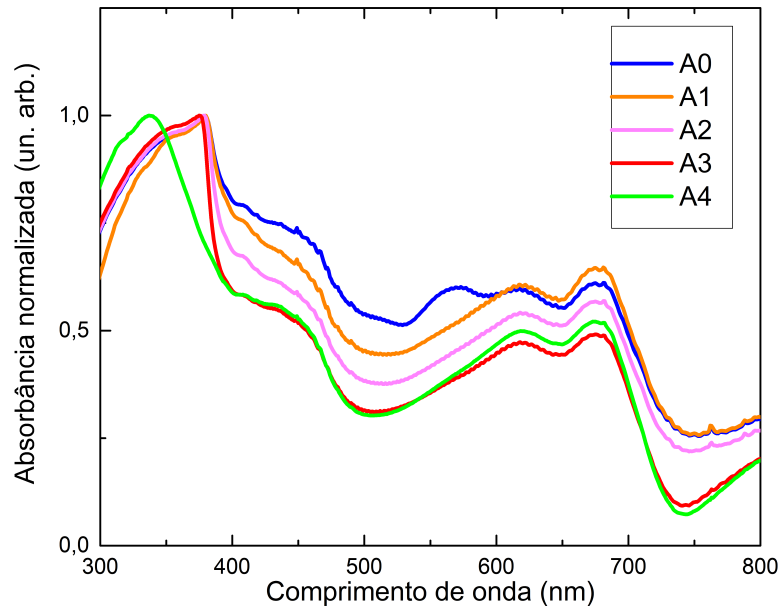


FIGURA 45 – Espectros de absorvância UV-Vis normalizados das amostras A0–A4.

A partir dos espectros normalizados, observa-se que apesar da redução da absorvância absoluta, o perfil espectral das amostras permanece semelhante, com bandas bem definidas nas regiões do azul e do vermelho do espectro visível. Isso indica que a remoção das camadas não altera significativamente os mecanismos de absorção do material ativo, mas afeta predominantemente a intensidade da absorção. Pequenas variações na largura e na posição relativa das bandas podem estar associadas a efeitos de interferência óptica da camada ativa.

#### 5.1.4 Análise de compatibilidade espectral

Ao analisar a compatibilidade espectral dos gráficos 37 e 44 que representam, respectivamente, a emissão da lâmpada utilizada no laboratório e a absorção do painel fotovoltaico orgânico (OPV), verificou-se que a lâmpada possui forte emissão em torno de 435 nm e 610 nm, enquanto o painel orgânico apresenta boa absorção tanto na região do azul (450-500 nm) quanto no vermelho (620-680 nm). Assim, os valores indicam que há uma sobreposição entre a emissão da lâmpada e a absorção do painel, principalmente na região do vermelho, e parcialmente no azul.

A posição do primeiro pico de emissão da lâmpada (435 nm) está em uma faixa onde a absorção do painel começa a decair, podendo limitar a eficiência nesta região. Contudo, o segundo pico da lâmpada está mais amplamente distribuído na

faixa de 600 a 650 nm, coincidindo com o terceiro pico de absorção do painel, o qual é associado a dispositivos que são aplicados em ambientes internos, como as lâmpadas.

Assim, verifica-se que a eficiência do sistema depende da componente vermelha da lâmpada, onde os espectros de absorção e emissão estão mais combinados, resultando em um aproveitamento satisfatório e indicando a viabilidade de aplicação do OPV em condições *indoor*, mais especificamente em ambientes que contenham iluminação dominada pela faixa vermelha, como nas luzes quentes.

No caso da análise dos gráficos 38 e 44, correspondentes a emissão da lâmpada instalada na sala de reuniões e a absorção do OPV, foi observado que há uma coincidência entre os espectros na faixa de 400 a 600 nm. Essa região cobre os principais picos de emissão da lâmpada, coincidindo com a faixa em que o painel comercial apresenta boa capacidade de absorção, incluindo as regiões azul, verde e vermelho-alaranjado.

Entretanto, o OPV analisado possui seu pico máximo de absorção entre 250 e 400 nm, uma região ultravioleta e início do visível, onde a emissão da lâmpada da sala de reuniões é consideravelmente baixa. Isso mostra uma limitação para o aproveitamento da capacidade de absorbância do dispositivo sob essa iluminação artificial, reduzindo a eficiência final mesmo diante de uma compatibilidade espectral.

Além das análises espectrais, os valores de iluminância (quanto da luz visível para o olho humano chega por metro quadrado de superfície) e irradiância (quantidade de potência radiante que ela emite por unidade de área) podem ser avaliados. No laboratório, o valor médio da iluminância é de 263,02 lux. Considerando uma eficiência luminosa média de aproximadamente 102 lm/W, obtém-se uma irradiância média aproximada de 2,58 W/m<sup>2</sup>. De forma semelhante, na sala de reuniões, onde a iluminância média é de 400,50 lux, utilizando a mesma eficiência luminosa, a irradiância disponível é da ordem de 3,93 W/m<sup>2</sup>.

Ao comparar esses valores de irradiância com aqueles observados em um dia de sol com céu limpo, ao meio-dia, tipicamente em torno de 1000 W/m<sup>2</sup>, e com ambientes internos bem iluminados, que usualmente apresentam irradiâncias na faixa de 2 a 10 W/m<sup>2</sup>, observa-se que os valores de 2,58 W/m<sup>2</sup> e 3,93 W/m<sup>2</sup> são significativamente baixos quando comparados à irradiância da luz solar direta. Ainda assim, esses níveis são representativos de condições reais de iluminação artificial em ambientes internos, sendo relevantes para a análise do desempenho de dispositivos fotovoltaicos orgânicos operando sob baixa irradiância.

## 5.2 MEDIDAS *INDOOR*

Durante a realização das medidas de IxV deste trabalho, foram utilizadas duas variações na iluminação ambiente: com as luzes acesas (CLARO) e com as luzes apagadas (ESCURO). As mesmas condições de iluminação foram reaplicadas para todas as coletas de dados. Além disso, todas as medidas foram realizadas dentro o mesmo intervalo de horário, ou seja, entre 11 h e 14 h, com o posicionamento do dispositivo no mesmo local enquanto as medições estavam sendo realizadas. Ressalta-se que cada barra apresentada nos gráficos a seguir, bem como cada curva IxV, corresponde a uma medição independente, realizada sob as condições experimentais previamente descritas.

### 5.2.1 Ambiente de ensaio 1

Inicialmente, para caracterizar o OPV foram geradas as curvas de IxV, para as condições sob iluminação e sem a presença da mesma. O gráfico da figura 46 representa as curva de corrente elétrica em função da tensão elétrica para o exemplar, dentro do laboratório do DiNE 2.

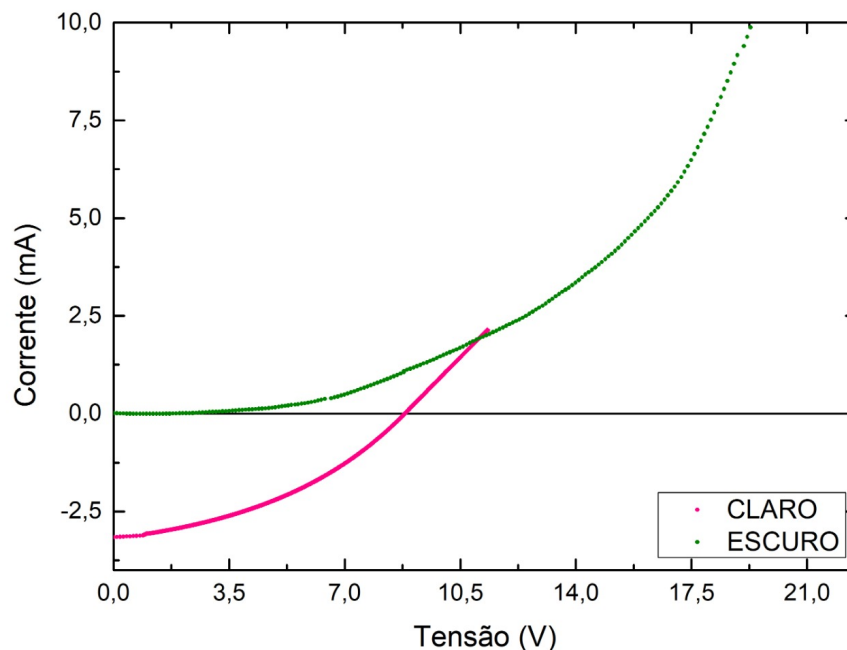


FIGURA 46 – Curvas corrente versus tensão (IxV) do dispositivo fotovoltaico orgânico medido em duas condições de iluminação dentro do laboratório: ambiente claro (luzes acesas) e ambiente escuro (luzes apagadas, com iluminação residual proveniente de frestas e LEDs de equipamentos eletrônicos).

A curva rosa representa o cenário claro, mostrando que a corrente elétrica

começa negativa, indicando operação do OPV sendo um gerador de energia, e cresce de acordo com a tensão, tornando-se então positiva. Tal comportamento é equivalente a teoria quando se trata de painéis fotovoltaicos orgânicos sob iluminação. Os valores característicos do OPV estão demonstrados na tabela 2,

TABELA 2 – Parâmetros elétricos característicos do OPV sob iluminação artificial controlada.

| $ I_{sc} $ (mA) | $V_{oc}$ (V) | $ I_{max} $ (mA) | $V_{max}$ (V) | $P_{max}$ (mW) | FF (%) | PCE  |
|-----------------|--------------|------------------|---------------|----------------|--------|------|
| 3,19            | 7,48         | 2,03             | 5,40          | 10,96          | 45,94  | 4,02 |

Logo, a curva em verde corresponde ao cenário escuro, onde não há presença de iluminação, ou seja, não há geração útil de fotocorrente. Assim, no cenário escuro, diferentemente do cenário claro, não há valores associados para  $V_{oc}$ , enquanto o valor de  $I_{sc}$  é nulo. Desta forma, a corrente positiva e a maior resistência, evidenciam o impacto da baixa iluminação nas características elétricas do dispositivo, resultando na falta de valores para os parâmetro  $FF$  e  $PCE$ , visto que ambos dependem de  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$ . Essas condições mostram que quando não há fótons suficientes para gerar pares elétron-buraco, a curva experimental condiz com a teórica, representando um diodo, como citado na seção 3.3.4.3.

A curva do gráfico de potência representado na figura 47 mostra que para o valor máximo de potência, a tensão é cerca de 5 V, após este ponto a potência começa a decair.

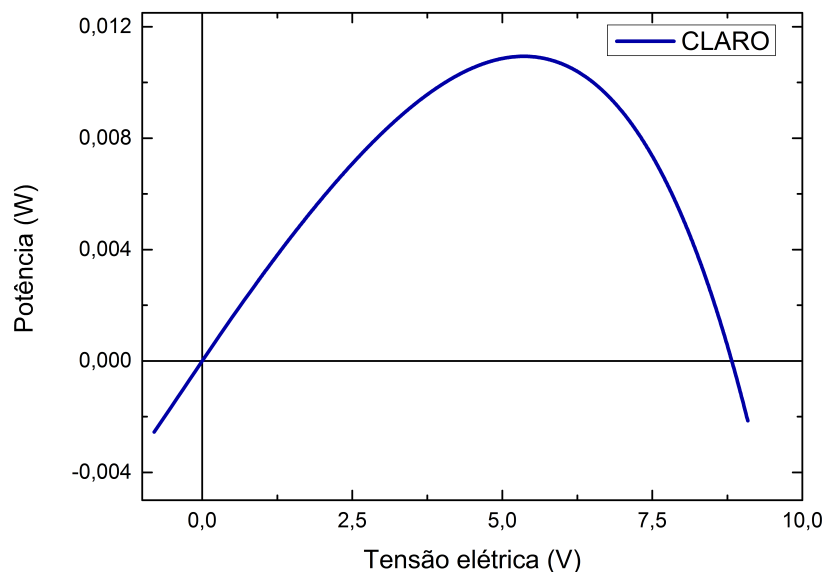


FIGURA 47 – Curva de potência para o painel em ambiente com iluminação artificial ligada.

Além das análises das curvas  $I \times V$ , também foi analisado como a potência nominal varia de acordo com a iluminação. A seguir, nas figuras 48 e 49, tem-se as

curvas geradas para as duas variações de iluminação, luzes acesas e luzes apagadas, respectivamente.

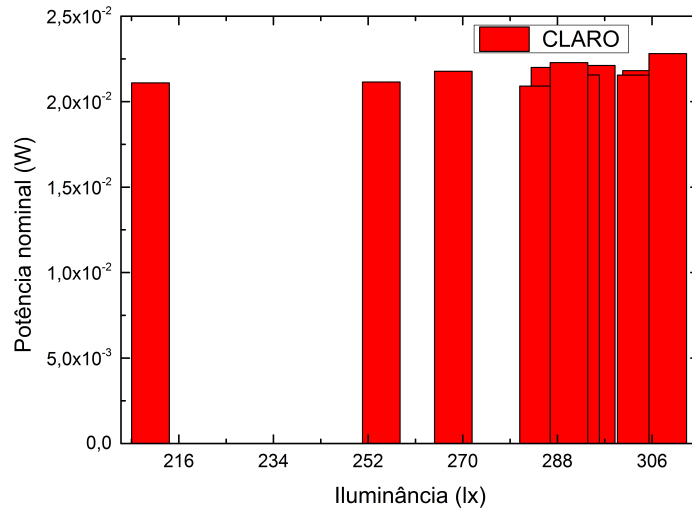


FIGURA 48 – Gráfico da potência nominal pela variação da iluminância.

Para o gráfico da figura 48, tratando-se do ambiente iluminado, os valores de iluminância variam de aproximadamente 210 lx até 309 lx. Os valores da potência nominal no entanto, atingem valores em torno de  $2,1 \times 10^{-2}$  W a  $2,3 \times 10^{-2}$  W. Logo, a curva mostra uma certa estabilidade da potência nominal a partir de aproximadamente 252 lx, indicando que a partir da iluminância média de 250 lx, o painel atinge um efeito platô de rendimento.

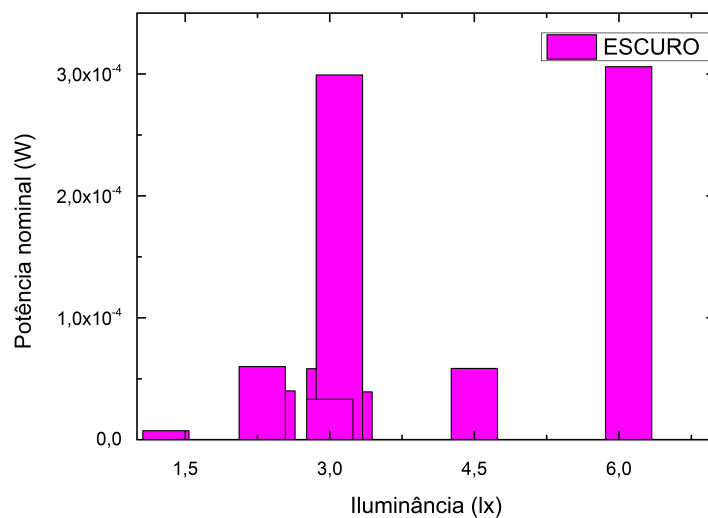


FIGURA 49 – Gráfico da potência nominal pela variação da iluminância.

Na modalidade sem iluminação, o gráfico da figura 49 apresenta iluminância na

faixa de 1,3 lx até 6 lx, valores baixos quando comparados aos obtidos em condições sob iluminação artificial. Da mesma forma, a potência nominal atinge valores baixos, variando aproximadamente de zero até  $3,0 \times 10^{-4}$  W. Assim, a curva demonstra que mesmo sofrendo pequenas variações de iluminância, a potência gerada pelo painel fotovoltaico é notoriamente irrelevante.

Esses valores associados a iluminância são ocasionados por vazamento de luz ambiente, que podem ocorrer através de frestas de portas e janelas, LEDs de outros equipamentos, ou até mesmo reflexos provenientes de outros ambientes das proximidades. Como observado no gráfico 49, os valores de iluminância demonstram que o ambiente não estava totalmente isolado da luz externa, logo, houve um mínimo de luz detectada pelo dispositivo.

Em síntese, observa-se que mesmo em ambientes claros sob luz artificial, o painel apresenta capacidade de gerar energia elétrica. Durante as medições realizadas, a potência máxima registrada foi de 10,96 mW. Considerando as condições de iluminância média de 263,02 lux e irradiância de  $2,58 \text{ W/m}^2$ , essa geração de energia correspondeu a uma eficiência de conversão de potência de 4,02%.

Além da variação da potência nominal em função da iluminância, foram gerados os gráficos das figuras 50 e 51, os quais representam a variação da potência em função da temperatura, para o ambiente claro e escuro, respectivamente.

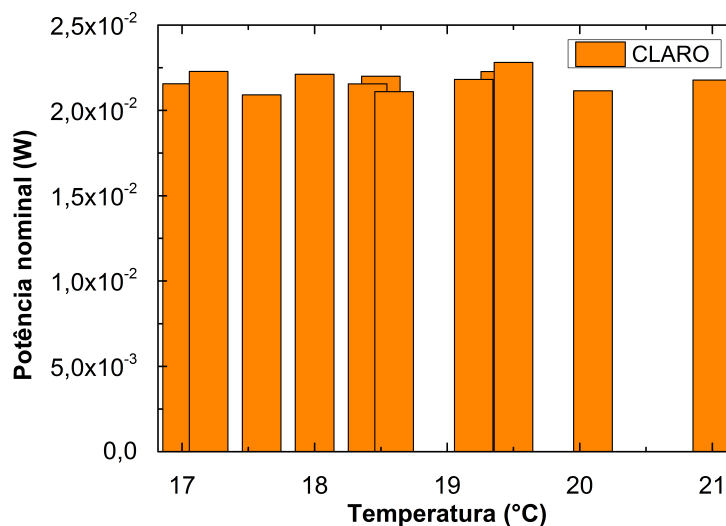


FIGURA 50 – Gráfico de potencia nominal pela variação da temperatura.

Na condição sob iluminação, gráfico da figura 50, os dados indicam que a potência nominal se manteve relativamente estável, oscilando entre  $2,0 \times 10^{-2}$  W e  $2,24 \times 10^{-2}$  W, ao longo de uma faixa de temperatura entre cerca de 17 °C e 21 °C. Assim, apesar das pequenas variações térmicas, observadas durante o experimento,

não foram detectadas mudanças significativas nos valores da potência gerada.

Esse comportamento demonstra que dentro do intervalo analisado, o qual não pode variar para menos que 17 °C e mais que 21 °C, por conta do controle da temperatura local por ar condicionado, o efeito da temperatura sobre o desempenho do dispositivo é minimizado. Assim, a estabilidade de potência observada sugere que para o material e fatores ambientes analisados, as propriedades térmicas do dispositivo desempenham boa tolerância diante as oscilações de temperatura.

Em contrapartida, o gráfico da figura 51 registra valores de potência nominal variando entre  $5,0 \times 10^{-5}$  W a  $3,0 \times 10^{-4}$  W, apresentando uma magnitude inferior a condição sob iluminação. Além disso, nota-se uma maior variação nos valores de potência, mesmo dentro de uma estreita faixa de temperatura. Em alguns pontos, como próximo de 17 °C e 19,5 °C, ocorrem picos isolados de potência, os quais podem ser explicados por fontes residuais de luz ou ruídos experimentais. Assim, a relação entre temperatura e potência gerada em condições de escuro revela-se pouco significativa, visto que na ausência de luz incidente, a geração de corrente elétrica é reduzida, aproximando-se dos limites de ruído do sistema de medição.

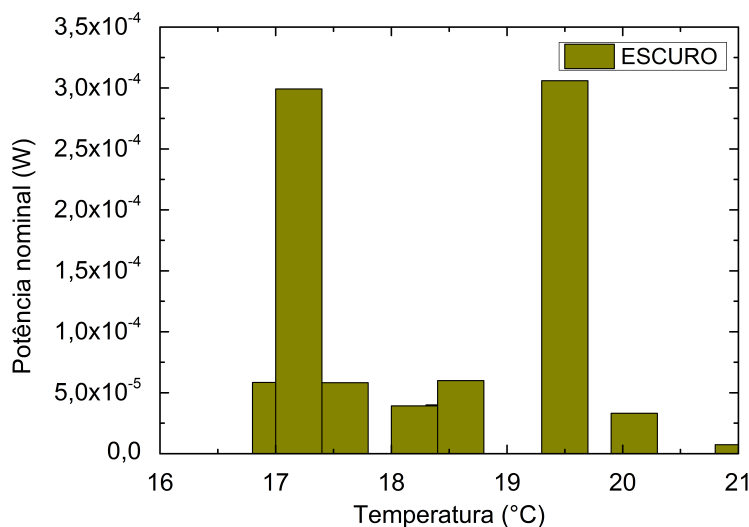


FIGURA 51 – Gráfico de potência nominal pela variação da temperatura.

Finalmente, analisando as curvas geradas de potência nominal em função de iluminância e temperatura, verifica-se que a iluminação ambiente é o principal fator determinante para a geração de potência do OPV em condições *indoor*, sob iluminação artificial. A temperatura ambiente, neste caso dentro da faixa de 17,0 °C a 21,0 °C exerce mínima influência sobre o desempenho elétrico do painel. Logo, com a estabilidade observadas nessas condições, se reforça o potencial de aplicação desses dispositivos em ambientes internos, onde variações térmicas não comprometem

significativamente seu funcionamento.

### 5.2.2 Ambiente de ensaio 2

Novamente, para caracterizar o OPV foram geradas curvas de IxV e de potência, para os dois posicionamentos do painel sobre a mesa da sala de reuniões, posição de ensaio 2.1 e 2.2, meio e beirada, respectivamente. Inicialmente o OPV foi caracterizado a partir das curvas IxV, como mostra a figura 52

FIGURA 52 – Curvas IxV do OPV comercial medido em duas posições 2.1 e 2.2, sobre a mesa de reuniões sob duas condições de iluminação: claro (cortinas abertas e luzes artificiais acesas) e escuro (luzes apagadas e cortinas abertas).

Os valores característicos do OPV, considerando as curvas do gráfico da figura 52 estão demonstrados na tabela 3,

TABELA 3 – Parâmetros elétricos obtidos a partir das medições do OPV sob iluminação artificial, com o dispositivo posicionado na região central e na beirada da mesa de reuniões.

|             | $ I_{sc} $ (mA) | $V_{oc}$ (V) | $ I_{max} $ (mA) | $V_{max}$ (V) | $P_{max}$ (mW) | $FF$ (%) | PCE (%) |
|-------------|-----------------|--------------|------------------|---------------|----------------|----------|---------|
| Posição 2.1 | 5,80            | 9,63         | 3,76             | 5,90          | 22,18          | 39,71    | 5,35    |
| Posição 2.2 | 6,01            | 9,59         | 3,94             | 5,90          | 23,25          | 40,33    | 5,61    |

Observa-se então a partir do gráfico da figura 52 e da tabela 3, que sob condição clara, tanto na posição central quanto na beirada, o dispositivo apresenta um comportamento condizente com o típico funcionamento de dispositivos fotovoltaicos orgânicos sob iluminação artificial. Nestes casos, os valores de corrente obtidos na beirada são ligeiramente superiores aos registrados no centro, possivelmente devido à maior intensidade luminosa, proveniente da proximidade das janelas e do ângulo de incidência da luz natural juntamente com a artificial.

No regime escuro, há uma redução da fotocorrente. Fazendo a comparação entre meio e beirada neste caso, verifica-se que as curvas apresentam comportamento parecido, sugerindo que na ausência da iluminação artificial, a diferença de intensidade luminosa entre as posições se torna menos relevante. Assim, a luz natural proveniente das janelas, com cortinas abertas, aparenta não exercer influência de forma a gerar uma diferença expressiva de corrente entre as duas posições.

De forma geral, os resultados confirmam que o fator determinante para a resposta elétrica do OPV, é a intensidade luminosa. E, que na condição escura, a iluminação residual proveniente da luz natural não é suficiente para produzir variações significativas na fotocorrente entre as posições utilizadas.

Além das curvas de IxV, foram analisadas as curvas de potência nominal em função da iluminância, e da temperatura. Ambas as análises foram realizadas para a condição do meio e da beirada da mesa, e serão apresentadas a seguir.

### 1. Posição de ensaio 2.1

Inicialmente, o gráfico da figura 53 apresenta uma relação entre a potência gerada e o nível de iluminância em ambiente claro.

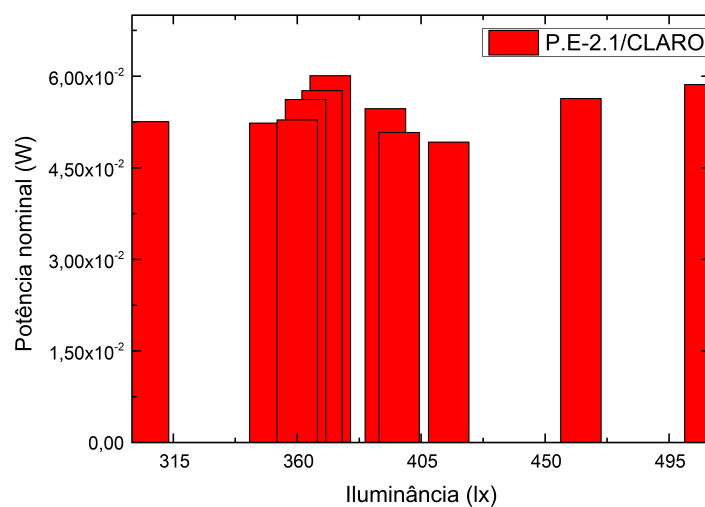


FIGURA 53 – Gráfico de potência nominal pela variação da iluminância em ambiente sob iluminação artificial presente, com o OPV situado no meio da mesa de reuniões.

Considerando a curva da figura 53 observa-se que a iluminância nessa ocasião variou entre 310 lx e 490 lx, enquanto a potência nominal atingiu patamares entre  $4,7 \times 10^{-2} \text{ W}$  e  $6,0 \times 10^{-2} \text{ W}$ . Ou seja, o aumento da potência nominal está diretamente associado ao aumento da iluminância, demonstrando que a relação entre os dois parâmetros é diretamente positivo, quanto maior a iluminância, maior a potência, considerando suas pequenas flutuações.

Em ambiente escuro, onde a iluminação é unicamente proveniente das janelas, observa-se na figura 54 a relação entre potência nominal e iluminância.

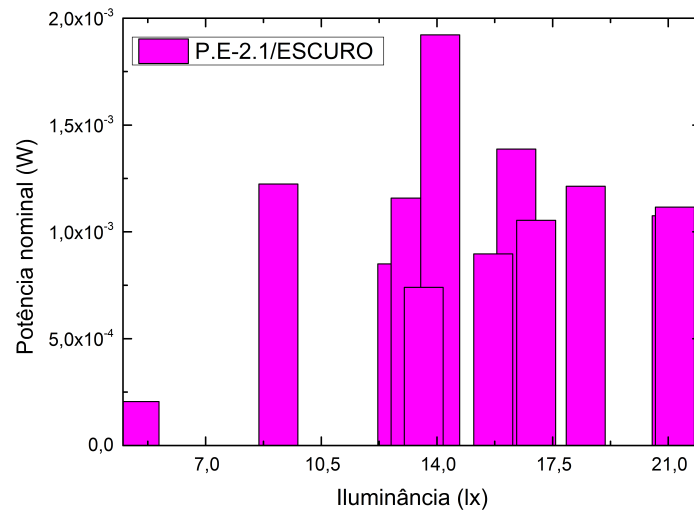


FIGURA 54 – Gráfico de potência nominal pela variação da iluminância, onde não há influência de iluminação artificial. A claridade presente no local é proveniente da iluminação das janelas.

No gráfico anterior observou-se que os valores de iluminância situam-se entre 4 lx e 21 lx, caracterizando um ambiente com baixa luminosidade. Esse valor é cerca de 20 vezes menor quando comparado aos valores obtidos em ambientes sob iluminação artificial ligada. A potência nominal, por sua vez, atingiu níveis reduzidos, dentro da faixa aproximada de  $2,0 \times 10^{-4}$  W e  $1,9 \times 10^{-3}$  W. Logo, é possível verificar que há um aumento sutil da potência de acordo com a variação da iluminância. Entretanto, o valor da escala variável é muito pequeno, não representando valores significativos de eficiência para o dispositivo.

Conseqüentemente, como na análise realizada dentro do laboratório do DiNE 2, na sala de reuniões também foi analisado a influência da temperatura sobre a potência nominal. Os gráficos das figuras 55 e 56, apresentação a variação da potência em função da temperatura, para os ambientes claro e escuro, respectivamente.

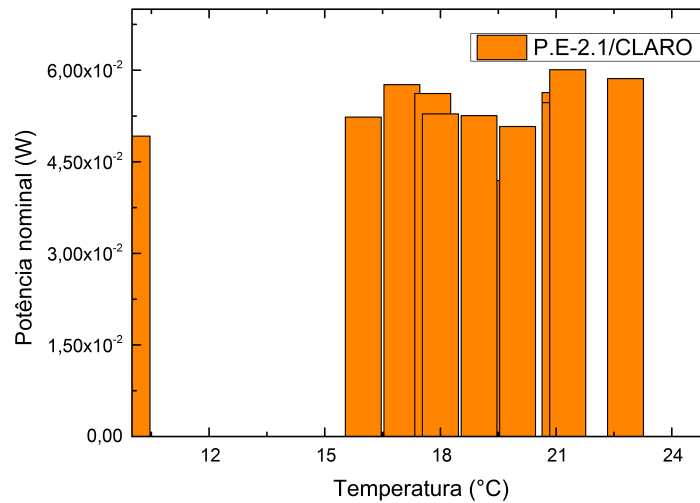


FIGURA 55 – Gráfico de potência nominal pela variação da temperatura, em ambiente sob iluminação artificial presente.

Quando exposto à iluminação artificial acesa, o dispositivo utilizado na faixa de temperatura entre 11 °C e 22 °C, apresentou valores de potência variando de  $4,5 \times 10^{-2}$  W a  $6,0 \times 10^{-2}$  W, indicando um salto expressivo de desempenho quando comparado aos valores obtidos em condições onde não há iluminação artificial. Assim, mesmo com as variações de temperatura, a potência se manteve alta e estável, indicando que a temperatura não é um fator limitante quando a iluminância é adequada.

Em compensação, o gráfico da figura 56 indica que apesar do aumento da temperatura ambiente de aproximadamente 9 °C até 22 °C, a potência gerada pelo OPV permanece em níveis bastantes baixos. Observou-se então uma pequena tendência de crescimento da potência nominal com a elevação da temperatura, no entanto, essa relação não é linear nem suficientemente acentuada para indicar que haja uma forte correlação entre os fatores. Logo, conclui-se que a temperatura, assim como em ambiente iluminado artificialmente, tem pouco impacto significativo para a geração de potência.

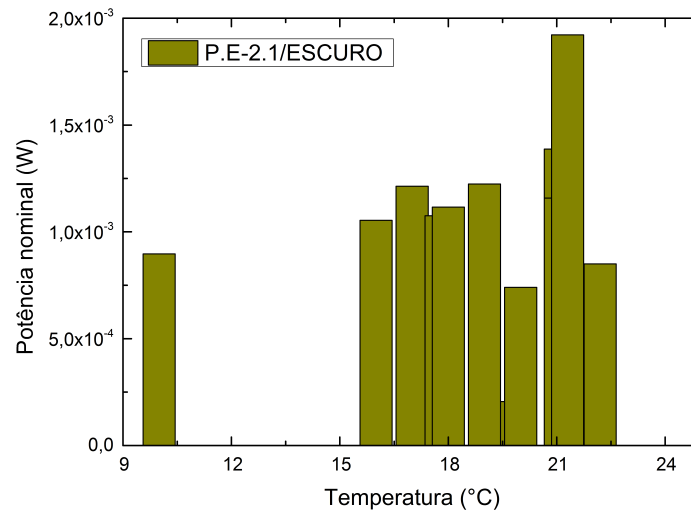


FIGURA 56 – Gráfico de potência nominal pela variação da temperatura, sob influência apenas da iluminação natural do ambiente.

Por fim, a partir dos dados analisados, observou-se que a iluminância é o parâmetro mais influente na potência gerada por dispositivos fotovoltaicos orgânicos. A temperatura, dentro das faixas avaliadas, não se apresenta como um fator limitante significativo, especialmente em condições onde a iluminância é adequada. Em ambientes onde não há iluminação artificial presente, o OPV demonstrou desempenho limitado, com baixos valores de potência. No entanto, sob iluminação artificial acesa, a geração de potência se eleva a patamares mais viáveis para aplicações de baixo consumo energético, como por exemplo carregadores portáteis para ambientes internos.

## 2. Posição de ensaio 2.2

Neste posicionamento, foram analisadas as variações da potência nominal sob influência da iluminância e da temperatura, considerando iluminação artificial acesa e desligada, respectivamente. O gráfico da figura 57, traz a influência da iluminância na potência do dispositivo, em ambiente claro.

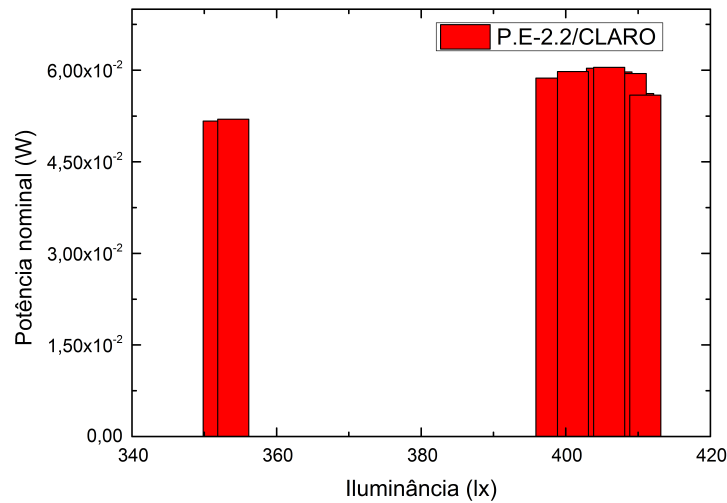


FIGURA 57 – Gráfico de potência nominal pela variação da iluminância em ambiente iluminado, com o OPV situado na beirada da mesa de reuniões.

Como dito anteriormente, o gráfico da figura 57 ilustra a relação entre a iluminância e a potência nominal do dispositivo. A iluminância variou de aproximadamente 345 lx a 410 lx. Os valores obtidos para a potência nominal crescem de acordo com o aumento da iluminância, com picos ao redor de  $6,1 \times 10^{-2}$  W, deixando evidente que houve um melhor aproveitamento da radiação luminosa disponível.

Considerando então um cenário onde não há iluminação artificial desligada, e a claridade é totalmente proveniente das janelas, observa-se que a iluminância varia em torno de 22,5 lx a 34 lx, como mostra o gráfico da figura 58.

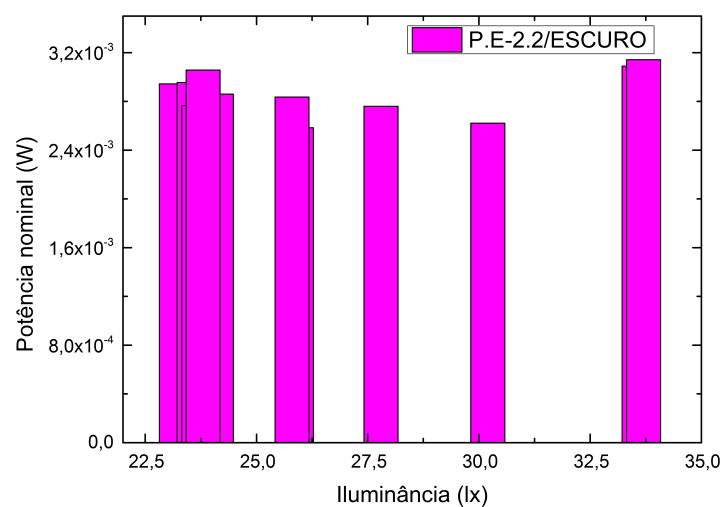


FIGURA 58 – Gráfico de potência nominal pela variação da iluminância em ambiente onde a luz é unicamente proveniente da claridade das janelas, com o OPV situado na beirada da mesa de reuniões.

Como observado no gráfico anterior, a potência nominal não apresentou variações com o aumento da iluminância. Em alguns pontos, mesmo com maior iluminância, a potência se manteve constante ou até mesmo levemente reduzida.

Seguido das análises da influência da iluminância, foram elaboradas curvas que mostram a influência da temperatura na potência nominal no modelo comercial utilizado. Como no gráfico da figura 59, onde observa-se a variação da potência conforme a temperatura se altera, considerando um cenário onde as luzes estão acesas.

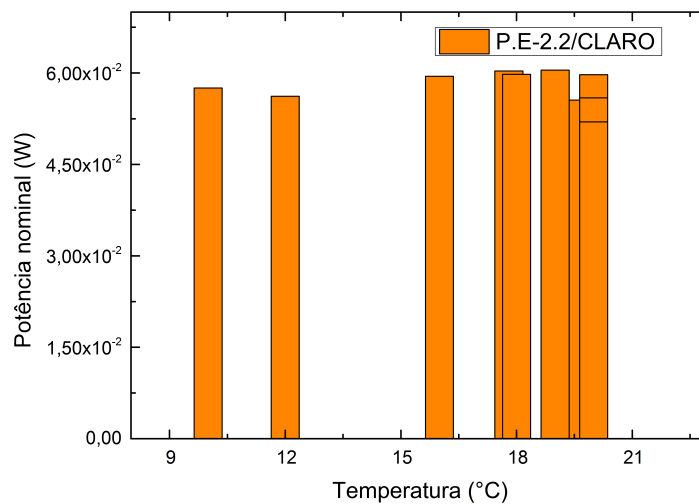


FIGURA 59 – Gráfico de potência nominal pela variação da temperatura, com a iluminação artificial da sala de reuniões ligada, com o OPV na beirada da mesa.

Quando o OPV está posicionado na beirada da mesa de reuniões, ocorre maior incidência de luz, logo, a potência nominal atinge valores superiores, alcançando as casas de  $5,5 \times 10^{-2} \text{ W}$  a  $6,1 \times 10^{-2} \text{ W}$ . Contudo, mesmo com a temperatura variando entre  $9 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ , seus valores tem pouca influência na potência gerada, visto que a potência se mantém praticamente constante ao longo da faixa analisada. Logo, é evidente que há um predomínio da iluminância sobre a temperatura no desempenho do OPV neste cenário.

Porém quando o dispositivo está posicionado sob condições escuras, como no gráfico da figura 60, o intervalo da potência se mantém restrito, na faixa entre aproximadamente  $2,4 \times 10^{-3} \text{ W}$  e  $3,2 \times 10^{-3} \text{ W}$ , mesmo com a variação da temperatura entre  $9 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ .

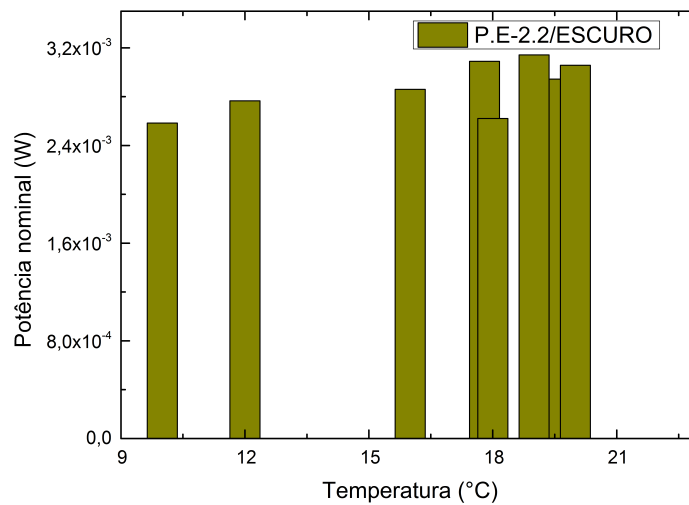


FIGURA 60 – Gráfico da potência nominal pela variação da temperatura, sob iluminação artificial desligada, com o dispositivo situado na beirada da mesa.

Observando então o gráfico anterior, notou-se novamente que ocorre uma tendência de aumento da potência com o acréscimo nos valores da temperatura, no entanto, essa variação é baixa e apresenta dispersões relevantes entre diferentes medições na mesma faixa de temperatura, indicando que pode haver uma instabilidade no comportamento dos dispositivos devido a baixa iluminância incidente sobre o OPV, o que limita a absorção dos fótons independentemente da temperatura.

Assim, a partir da análise do conjunto de dados pertencentes as medidas na beirada da mesa de reuniões, conclui-se que a iluminância é o parâmetro mais relevante na determinação da potência nominal dos OPVs, superando a influência da temperatura nas faixas analisadas. Notou-se também que quando os dispositivos foram posicionados sob influência da iluminação artificial, o desempenho foi cerca de 20 vezes maior ao daqueles analisados no ambiente escuro, mesmo com as mesmas faixas de temperaturas.

Os resultados obtidos reforçam a necessidade de planejamento quanto ao posicionamento estratégico dos exemplares, considerando aplicações de baixa potência em ambientes internos.

### 5.2.3 Síntese dos valores extremos de potência nominal

A tabela 4 apresenta um resumo dos maiores e menores valores de potência nominal registrados em cada ambiente de ensaio. Essa organização permite visualizar de forma comparativa o desempenho do painel nas diferentes condições de iluminação e posicionamento.

TABELA 4 – Valores mínimos e máximos de potência nominal em cada ambiente de ensaio.

| Ambiente / Condição                    | Potência mínima (W)  | Potência máxima (W)   |
|--|----------------------|-----------------------|
| Ambiente de Ensaio 1(claro)            | $2,0 \times 10^{-2}$ | $2,24 \times 10^{-2}$ |
| Ambiente de Ensaio 1(escuro)           | $5,0 \times 10^{-5}$ | $3,0 \times 10^{-4}$  |
| Ambiente de Ensaio-posição 2.1(claro)  | $4,7 \times 10^{-2}$ | $6,0 \times 10^{-2}$  |
| Ambiente de Ensaio-posição 2.1(escuro) | $2,0 \times 10^{-4}$ | $1,9 \times 10^{-3}$  |
| Ambiente de Ensaio-posição 2.2(claro)  | $5,5 \times 10^{-2}$ | $6,1 \times 10^{-2}$  |
| Ambiente de Ensaio-posição 2.2(escuro) | $2,4 \times 10^{-3}$ | $3,2 \times 10^{-3}$  |

Observa-se que os menores valores de potência nominal foram registrados no laboratório em condição de baixa iluminância (ambiente de ensaio 1 – escuro), em que a intensidade luminosa disponível era bastante reduzida. Nessa situação, os valores de potência caíram para a ordem de  $10^{-5}$  a  $10^{-4}$  W, evidenciando a forte dependência do painel com a intensidade da fonte de luz artificial.

Por outro lado, os maiores valores foram verificados na sala de reuniões, sobretudo quando o painel foi posicionado próximo à janela (ensaio 2.2, claro), alcançando valores entre  $5,5 \times 10^{-2}$  e  $6,1 \times 10^{-2}$  W. Esse resultado demonstra a influência direta não apenas da intensidade luminosa artificial, mas também da contribuição adicional da iluminação natural proveniente das janelas. Além disso, o posicionamento do dispositivo mostrou-se um fator determinante: em ambos os locais, quanto maior a proximidade da fonte de luz (lâmpadas ou janelas), maiores foram os valores de potência registrados.

### 5.3 DISCUSSÃO COMPARATIVA ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E A LITERATURA

Neste trabalho, os resultados obtidos nos diferentes ensaios realizados, apontaram valores médios de iluminância da ordem de 263,02 lux no ambiente 1 e 400,50 lux no ambiente 2, correspondendo a irradiâncias estimadas de aproximadamente  $2,58 \text{ W/m}^2$  e  $3,93 \text{ W/m}^2$ , respectivamente. Esses valores encontram-se alinhados com aqueles reportados na literatura para estudos a cerca de ambientes internos sob iluminação artificial do tipo LED, onde iluminâncias na faixa de 200 a 500 lux são adotadas como representativas para escritórios e salas de uso geral [137]. Além disso, diversos artigos científicos trazem níveis de iluminância entre 200 e 1000 lux como condições experimentais para ambientes internos, tratando-se de dispositivos fotovoltaicos [138, 139].

Tratando-se dos resultados obtidos para os parâmetros elétricos, o OPV comercial analisado apresentou tensão de circuito aberto de aproximadamente 5,4 V e 5,9 V, mesmo sob variações de iluminância e posicionamento do dispositivo. Esse comportamento está em concordância com resultados reportados na literatura para células solares orgânicas, nos quais se observa uma baixa dependência da tensão de

circuito aberto com a irradiância, sobretudo em condições de baixa iluminação. Estudos experimentais demonstram que reduções da intensidade luminosa em várias ordens de grandeza resultam em variações relativamente pequenas da tensão de circuito aberto, tipicamente da ordem de dezenas a poucas centenas de milivolts, enquanto a corrente de curto-circuito sofre reduções mais significativas [140, 141].

Em contraste, os valores de corrente de curto-circuito e de corrente máxima apresentaram dependência direta com a iluminância, variando de aproximadamente 2,0 mA a 4,0 mA entre os diferentes ambientes analisados. Tal tendência também é amplamente descrita na literatura, uma vez que a corrente fotogerada permanece proporcional ao fluxo de fótons incidentes, mesmo em dispositivos orgânicos. Esse conjunto de características reforça a adequação dos OPVs para aplicações em ambientes internos, sendo considerado uma das principais vantagens da tecnologia quando comparada a dispositivos fotovoltaicos convencionais sob condições de baixa irradiância [142].

Quanto ao *fill factor*, os valores obtidos neste caso situaram-se entre 39% e 46%, de acordo com a variação do ambiente de ensaio utilizado. Esses valores são compatíveis com dispositivos OPV comerciais avaliados em condições *indoor*, onde os valores do fator de preenchimento estiveram entre 35% e 55%, para OPVs submetidos a iluminâncias entre 200 lux e 1000 lux, sendo tais valores influenciados por fatores como resistência série, recombinação de cargas e espectro da fonte luminosa utilizada [143].

As eficiências de conversão de potência (PCE) estimadas, da ordem de 4% a 6%, encontram-se abaixo dos valores máximos reportados em laboratório para OPVs otimizados *indoor*, que podem ultrapassar 15%. Entretanto, é importante ressaltar que este estudo avaliou um módulo comercial de grande área ativa, aproximadamente 1056 cm<sup>2</sup>, enquanto grande parte da literatura se baseia em células de pequena área, frequentemente menores que 1 cm<sup>2</sup>.

#### 5.4 FUNCIONAMENTO DO *POWER BANK*

Após as devidas análises do funcionamento do OPV no laboratório do DiNE 2, e na sala de reuniões do PPGF (meio e beirada da mesa), e considerando as características dos dois modelos de carregadores portáteis utilizados, foram realizados cálculos para se obter valores estimados do tempo de carregamento dos *power banks*. A estimativa foi realizada a partir da relação entre a energia total armazenada nas baterias e a potência elétrica fornecida pelo dispositivo fotovoltaico orgânico comercial, em cada condição de operação.

Inicialmente, a energia total armazenada em cada *power bank* foi calculada con-

siderando a capacidade nominal e a tensão interna da bateria, conforme a expressão 5.1

$$E = VQ \quad (5.1)$$

em que  $E$  representa a energia armazenada (Wh),  $V$  a tensão interna da bateria (V) e  $Q$  a capacidade elétrica (Ah). Assim, o primeiro modelo, PINENG, que possui capacidade de armazenamento de energia de 5000 mAh, operando a 3,7 V, apresenta uma energia total de aproximadamente 18,5 Wh, enquanto o segundo modelo, KTS, de 1200 mAh armazena cerca de 4,44 Wh.

A potência elétrica fornecida pelos OPVs foi determinada a partir dos valores de tensão e corrente no ponto de máxima potência, ponderados pelo fator de preenchimento,  $FF$ , conforme a equação 5.2.

$$P_{max} = V_{max}I_{max}FF \quad (5.2)$$

Nessa etapa, as correntes foram convertidas de miliampere para ampere e o fator de preenchimento foi considerado adimensional. Dessa forma, pode-se estimar a potência elétrica efetivamente disponível para o processo de carregamento em cada uma das três condições ambientais analisadas.

O tempo necessário para o carregamento foi então obtido pela razão entre a energia fornecida e a potência disponível, de acordo com a equação 5.3:

$$t = \frac{E}{P_{max}} \quad (5.3)$$

A tabela 5, apresenta os tempos estimados para o carregamento de 1% e 100% da carga total dos dois modelos de power bank, considerando as três condições de operação dos OPV.

TABELA 5 – Tempo estimado de carregamento dos modelos de *power bank* PINENG e KTS sob diferentes condições de iluminação e locais de posicionamento dos dispositivos OPV, considerando taxas de carregamento de 1% e 100%.

| Local                                 | Taxa de carregamento | Power bank PINENG | Power bank KTS |
|---------------------------------------|----------------------|-------------------|----------------|
| Ambiente de ensaio 1                  | 1%                   | 36,8 h            | 8,8 h          |
|                                       | 100%                 | 153 dias          | 37 dias        |
| Ambiente de ensaio 2<br>(posição 2.1) | 1%                   | 21,0 h            | 5,0 h          |
|                                       | 100%                 | 87 dias           | 21 dias        |
| Ambiente de ensaio 2<br>(posição 2.2) | 1%                   | 19,7 h            | 4,7 h          |
|                                       | 100%                 | 82 dias           | 20 dias        |

O primeiro modelo, PINENG, com capacidade nominal de 5000 mAh e energia total de 18,5 Wh, apresentou tempos maiores em comparação ao segundo modelo, KTS,

cuja capacidade é de 1200 mAh e energia total de 4,44 Wh. Esta diferença é compatível com as respectivas capacidade de armazenamento de energia dos dispositivos.

Observou-se que o ambiente influencia diretamente o tempo de carregamento. A posição denominada "beirada da mesa" na sala de reuniões proporcionou o menor tempo de carga para ambos os dispositivos. Em contra partida, no laboratório DiNE 2 os tempos foram mais elevados.

Considerando então o carregamento completo, 100%, os tempos aumentam de forma proporcional, alcançando aproximadamente 82 dias para o modelo PINENG e 20 dias para o modelo KTS, no ambiente mais favorável. Tais valores indicam que embora o OPV seja capaz de fornecer energia suficiente para a recarga em ambiente *indoor* e *low-light*, o processo é lento, especialmente para dispositivos com maiores capacidades.

A análise final desses valores mostra que a utilização do OPV para recarga interna de carregadores portáteis pode ser viável como fonte complementar de energia, em aplicações de baixo consumo de energia. Além disso, nota-se a importância do posicionamento do OPV, uma vez que locais com maior eficiência luminosa ou melhor posicionamento para captura de energia reduzem significativamente os tempos de carregamento.

Portanto, a aplicação e uso de OPVs em ambientes internos deve ser planejado considerando a capacidade do dispositivo a ser carregado, as condições de iluminação e o tempo disponível para recarga, visando garantir a eficiência e aplicabilidade do material.

## 6 CONCLUSÕES

Este estudo investigou a viabilidade de utilização de um painel fotovoltaico orgânico (OPV) comercial em ambientes internos com iluminação artificial, buscando compreender o comportamento do dispositivo em condições de baixa luminosidade e sua capacidade de geração energética em cenários reais. Além disso foi avaliada a associação do painel a um sistema de armazenamento de energia, representado por *power banks*, visando propor uma aplicação prática e sustentável da tecnologia.

Os resultados obtidos confirmam a sensibilidade espectral do OPV aos diferentes modelos de luz artificial, além da sua capacidade de geração de energia mesmo em condições de irradiância reduzida. Observou-se que fatores como iluminância e posicionamento físico do painel influenciam diretamente o desempenho elétrico do dispositivo, sendo possível obter curvas características de corrente e potência representativas, mesmo em condições ambientais onde a luz natural é limitada. A boa correspondência entre o espectro de emissão das lâmpadas utilizadas e a faixa de absorção do painel, reforça o potencial de aplicação desta tecnologia em cenário *indoor*.

A proposta prática de associação ao *power bank* demonstrou-se tecnicamente viável em cenários internos, com maiores aplicações para dispositivos com menor capacidade de armazenamento de energia. Ainda que os tempos estimados de carregamento completo sejam extensos, os resultados validam a utilização de OPVs junto de sistemas de baixo consumo energético, contribuindo como uma alternativa sustentável e de baixo impacto ambiental para a geração e armazenamento de energia.

Dessa forma, conclui-se que os painéis fotovoltaicos orgânicos representam uma tecnologia promissora para ambientes internos, com vantagens como leveza, flexibilidade, facilidade de fabricação e adaptabilidade a diferentes superfícies. Apesar dos desafios que existem, como tempo de vida inferior e menor eficiência comparada as tecnologias fotovoltaicas convencionais inorgânicas, como os fotovoltaicos a base de silício, os OPVs apresentam elevado potencial de utilização em soluções inovadoras aplicadas ao mobiliário urbano e portátil, por exemplo. Acima de tudo, este estudo contribui para o avanço do conhecimento na área, oferecendo base científica para futuras pesquisas voltadas à otimização do desempenho dos dispositivos e ao aumento de suas aplicações práticas.

## 6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Essa dissertação contribui para o avanço do conhecimento sobre o desempenho de dispositivos fotovoltaicos orgânicos (OPVs) em ambiente de iluminação artificial, especialmente no contexto de sua aplicação em sistemas de energia. Contudo, ainda há aspectos a serem estudados e avaliados, oferecendo oportunidades promissoras para investigações futuras.

Como continuidade deste trabalho, sugere-se a realização de estudos relacionados à otimização espectral dos dispositivos, com foco na correspondência entre a resposta espectral dos OPVs e o espectro das fontes de luz internas mais utilizadas, como lâmpadas LED e fluorescentes compactas. Assim, experimentos controlados com diferentes configurações de iluminação podem fornecer dados valiosos para o ajuste dos materiais ativos e das disposições das camadas de transporte, visando maximizar a eficiência de conversão em ambientes fechados.

Adicionalmente, propõe-se a implementação de um conjunto de painéis interligados, possibilitando analisar e estimar o que pode ser modificado em relação a quantidade de dispositivos utilizados para melhorar a quantidade de energia gerada e armazenada.

Por fim, recomenda-se a ampliação da pesquisa com abordagens computacionais e modelagens preditivas, permitindo simulações de comportamento dos dispositivos em diferentes cenários de iluminação e carga elétrica.

Logo, os resultados que foram apresentados nesse trabalho representam uma base científica para novos trabalhos, integrando aspectos científicos, tecnológicos e práticos, os quais podem consolidar o papel dos OPVs como uma alternativa sustentável, tecnológica, inovadora e eficiente para aplicações em ambientes internos.

## REFERÊNCIAS

- [1] SMIL, V. Energy and civilization: a history: A history. Londres, England: MIT Press, 2018.
- [2] JONES, N. How to stop data centres from gobbling up the world's electricity. *Nature*, v. 561, n. 7722, p. 163–166, 2018.
- [3] International Energy Agency. Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions. IEA - International Energy Agency. Global EV Outlook, v. 2023, 2023.
- [4] ANDRAE, A.; EDLER, T. On global electricity usage of Communication Technology: Trends to 2030. *Challenges*, v. 6, n. 1, p. 117–157, 2015.
- [5] BELKHIR, L.; ELMELIGI, A. Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of cleaner production*, v. 177, p. 448–463, 2018.
- [6] World Energy Outlook 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. Acesso em: 14 mar. 2025.
- [7] IEA – International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- [8] Climate change 2021: The physical science basis. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 14 mar. 2025.
- [9] FEARNSIDE, P. M. Environmental and social impacts of hydroelectric dams in Brazilian Amazonia: Implications for the aluminum industry. *World development*, v. 77, p. 48–65, 2016.
- [10] Benefits of hydropower. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/water/benefits-hydropower>. Acesso em: 20 mar. 2025.

- [11] BARROS, N. et al. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature geoscience*, v. 4, n. 9, p. 593–596, 2011.
- [12] LEE, B. X. et al. Transforming Our World: Implementing the 2030 Agenda Through Sustainable Development Goal Indicators. *Journal of Public Health Policy*, v. 37, n. S1, p. 13–31, set. 2016.
- [13] 2023 Year in Review: Climate-driven global renewable energy potential resources and energy demand. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/2023-Year-in-Review-Climate-driven-Global-Renewable-Energy-Potential-Resources-and-Energy-Demand>. Acesso em: 14 mar. 2025.
- [14] JACOBSON, M. Z. 100% clean, renewable energy and storage for everything. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2020.
- [15] YIN, H. et al. Designing a ternary photovoltaic cell for indoor light harvesting with a power conversion efficiency exceeding 20%. *Journal of materials chemistry. A, Materials for energy and sustainability*, v. 6, n. 18, p. 8579–8585, 2018.
- [16] SHIN, S.-C. et al. Quaternary indoor organic photovoltaic device demonstrating panchromatic absorption and power conversion efficiency of 10%. *Dyes and pigments: an international journal*, v. 163, p. 48–54, 2019.
- [17] NAM, M. et al. Semi-transparent quaternary organic blends for advanced photovoltaic applications. *Nano energy*, v. 58, p. 652–659, 2019.
- [18] TEMPESTA, A. G. et al. Organic photovoltaic solar panels (OPV) applied to a tubelike bus station. *Brazilian journal of physics*, v. 52, n. 1, 2022.
- [19] ZHOU, Y. et al. A universal method to produce low-work function electrodes for organic electronics. *Science (New York, N.Y.)*, v. 336, n. 6079, p. 327–332, 2012.
- [20] SHIM, J. W. et al. Inverted tandem polymer solar cells with polyethylenimine-modified  $\text{moox/al}_2\text{o}_3$ : Zno nanolaminate as the charge recombination layers. *Advanced Energy Materials*, v. 4, n. 10, 2014.

- [21] KIPPELEN, B.; BRÉDAS, J.-L. Organic photovoltaics. *Energy & environmental science*, v. 2, n. 3, p. 251, 2009.
- [22] STEIM, R. et al. Organic photovoltaics for low light applications. *Solar energy materials and solar cells: an international journal devoted to photovoltaic, photothermal, and photochemical solar energy conversion*, v. 95, n. 12, p. 3256–3261, 2011.
- [23] YOSHIDA, H.; TANAKA, H.; FUJII, A. Organic solar cells for indoor applications: Recent advances and challenges. *ACS Applied Energy Materials*, v. 3, n. 1, p. 3–12, 2020.
- [24] LIN, Y. Recent Progress in Organic Photovoltaics: From Material Design to Device Performance. *Advanced Energy Materials*, v. 13, n. 3, 2023.
- [25] YAO, J. Encapsulation Strategies for Organic Solar Cells: Advances and Challenges. *Solar RRL*, v. 7, n. 2, 2023.
- [26] ZHANG, S.; YE, L.; HOU, J. Development of New Semiconducting Polymers for Organic Photovoltaics. *Materials Today*, v. 42, p. 10–25, 2022.
- [27] LI, Y. et al. Semitransparent organic photovoltaics for building-integrated photovoltaic applications. *Nature reviews. Materials*, v. 8, n. 3, p. 186–201, 2022.
- [28] WANG, J. et al. A new polymer donor enables binary all-polymer organic photovoltaic cells with 18% efficiency and excellent mechanical robustness. *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)*, v. 34, n. 35, p. e2205009, 2022.
- [29] PERLIN, J. *From Space to Earth: The Story of Solar Electricity*. Cambridge: Harvard University Press, 1999.
- [30] VODAPALLY, S. N.; ALI, M. H. A comprehensive review of solar Photovoltaic (PV) technologies, architecture, and its applications to improved efficiency. *Energies*, v. 16, n. 1, p. 319, 2022.
- [31] CHAPIN, D. M.; FULLER, C. S.; PEARSON, G. L. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *Journal of applied physics*, v. 25, n. 5, p. 676–677, 1954.

- [32] SZE, S. M.; NG, K. K. Physics of semiconductor devices: Sze/physics. 3. ed. Chichester, England: Wiley-Blackwell, 2006.
- [33] Martin A. green - Solar Cells Operating Principles Technology and System Applications-Prentice Hall (1982). Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/706552586/Martin-a-Green-Solar-Cells-Operating-Principles-Technology-and-System-Applications-Prentice-Hall-1982>>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- [34] PERLIN, J. Let It Shine: The 6,000-Year Story of Solar Energy. New World Library, 2013.
- [35] Early History of Solar. Disponível em: [http://solarcellcentral.com/history\\_page.html](http://solarcellcentral.com/history_page.html). Acesso em: 10 dez. 2024.
- [36] História e Origem da Energia Solar. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/historia-e-origem-da-energia-solar>. Acesso em: 06 out. 2024.
- [37] GOETZBERGER, A.; HEBLING, C.; SCHOCK, H.-W. Photovoltaic materials, history, status and outlook. Materials science & engineering. R, Reports: a review journal, v. 40, n. 1, p. 1–46, 2003.
- [38] SCHEER, H. The solar economy: Renewable energy for a sustainable global future. Londres, England: Routledge, 2013.
- [39] D. MAYCOCK, P. World Photovoltaic Markets. Em: Practical Handbook of Photovoltaics. [s.l.] Elsevier, 2003. p. 887–912.
- [40] SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 74, p. 590–601, 2017.
- [41] ALAAEDDIN, M. H. et al. Photovoltaic applications: Status and manufacturing prospects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 102, p. 318–332, 2019.

- [42] Raphael, E., Silva, M.N., Szostak, R., Schiavon, M.A., Nogueira, A.F. et al Perovskites solar cells: a new emerging technology. Disponível em: [http://quimicanova.sbq.org.br/detalhe\\_artigo.asp?id=6678](http://quimicanova.sbq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=6678)
- [43] MIAO, F. et al. Dye-sensitized solar cells based on Au/SnS/TiO<sub>2</sub> sensitized by natural dye. *Journal of materials research and technology*, v. 21, p. 704–711, 2022.
- [44] Best research-cell efficiency chart. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency>.  
Acesso em: 10 jul. 2025.
- [45] MOHAMMAD BAGHER, A. Types of solar cells and application. *American journal of optics and photonics*. [s.l: s.n.].
- [46] SHARMA, S.; JAIN, K. K.; SHARMA, A. Solar cells: In research and applications-A review. *Materials sciences and applications*, v. 06, n. 12. p. 1145–1155, 2015.
- [47] JEAN, J. et al. Pathways for solar photovoltaics. *Energy & environmental science*, v. 8, n. 4, p. 1200–1219, 2015.
- [48] FTHENAKIS, V. M.; KIM, H. C.; ALSEMA, E. Emissions from photovoltaic life cycles. *Environmental science & technology*, v. 42, n. 6, p. 2168–2174, 2008.
- [49] STROHBOCK, R. Life Cycle Assessment of Crystalline Silicon Photovoltaic Panels. *Progress in Photovoltaics*, p. 1068–1076, 2017.
- [50] TSANG, M. P.; SONNEMANN, G. W.; BASSANI, D. M. A comparative human health, ecotoxicity, and product environmental assessment on the production of organic and silicon solar cells: Environmental assessment of organic and silicon solar cells. *Progress in photovoltaics*, v. 24, n. 5, p. 645–655, 2016.
- [51] HELGESEN, M.; NIELSEN, T. D.; KREBS, F. C. Roll-to-Roll Fabrication of Polymer Solar Cells. *Polymer Solar Cells. Solar Energy Materials and Solar Cells*, n. 10, p. 1543–1551, 2010.

- [52] IEA - International Energy Agency. Solar PV Global Supply Chains. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains>>. Acesso em: 6 maio. 2025.
- [53] GROSSIORD, N. et al. Degradation mechanisms in organic photovoltaic devices. *Organic electronics*, v. 13, n. 3, p. 432–456, 2012.
- [54] ESPINOSA, N. et al. OPV for mobile applications: an evaluation of roll-to-roll processed indium and silver free polymer solar cells through analysis of life cycle, cost and layer quality using inline optical and functional inspection tools. *Journal of materials chemistry. A, Materials for energy and sustainability*, v. 1, n. 24, p. 7037–7049, 2013.
- [55] GRANATA, G. et al. Recycling of solar photovoltaic panels: Techno-economic assessment in waste management perspective. *Journal of cleaner production*, v. 363, n. 132384, p. 132384, 2022.
- [56] SUN, R. et al. Cost-efficient recycling of organic photovoltaic devices. *Joule*, v. 8, n. 9, p. 2523–2538, 2024.
- [57] FORREST, S. R. The path to ubiquitous and low-cost organic electronic appliances on plastic. *Nature*, v. 428, n. 6986, p. 911–918, 2004.
- [58] SHIRAKAWA, H. et al. Synthesis of electrically conducting organic polymers: Halogen derivatives of polyacetylene, (CH)<sub>x</sub>. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, n. 16, p. 578–580, 1977.
- [59] The Nobel prize in chemistry 2000. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2000/summary/>>. Acesso em: 6 maio. 2025.
- [60] HISTORY OF POLYPYRROLE, E. The First Conducting Organic Polymer September 2015 *Bulletin for the history of chemistry / Division of the History of Chemistry of the. [s.l.] American Chemical Society, [s.d.]*. v. 40
- [61] MACDIARMID, A. G. Polyaniline and polypyrrole: Where are we headed? *Synthetic metals*, v. 84, n. 1–3, p. 27–34, 1997.

- [62] FRIEND, R. H. et al. Electroluminescence in conjugated polymers. *Nature*, v. 397, n. 6715, p. 121–128, 1999.
- [63] DODABALAPUR, A. et al. Organic field-effect bipolar transistors. *Applied physics letters*, v. 68, n. 8, p. 1108–1110, 1996.
- [64] YU, G. et al. Polymer photovoltaic cells: Enhanced efficiencies via a network of internal donor-acceptor heterojunctions. *Science (New York, N.Y.)*, v. 270, n. 5243, p. 1789–1791, 1995.
- [65] KOETSE, M. M. et al. Efficient polymer:polymer bulk heterojunction solar cells. *Applied physics letters*, v. 88, n. 8, p. 083504, 2006.
- [66] BRABEC, C. J. et al. Influence of blend microstructure on bulk heterojunction organic photovoltaic performance. *Chemical Society reviews*, v. 40, n. 3, p. 1185–1199, 2011.
- [67] LIU, Q. et al. 18% Efficiency organic solar cells. *Science bulletin*, v. 65, n. 4, p. 272–275, 2020.
- [68] KALTENBRUNNER, M. et al. Ultrathin and lightweight organic solar cells with high flexibility. *Nature communications*, v. 3, n. 1, p. 770, 2012.
- [69] WANG, Y. et al. Flexible organic optoelectronic devices: Design, fabrication, and applications. *APL photonics*, v. 9, n. 9, 2024.
- [70] KAUSHAL, J. B.; RAUT, P.; KUMAR, S. Organic electronics in biosensing: A promising frontier for medical and environmental applications. *Biosensors*, v. 13, n. 11, p. 976, 2023.
- [71] SMIDT, S. Book review of introduction to bonding and hybridization theory. *Journal of chemical education*, v. 88, n. 1, p. 18–21, 2011.
- [72] CLAYDEN, J.; GREEVES, N.; WARREN, S. *What is organic chemistry? Em: Organic Chemistry*. [s.l.] Oxford University Press, 2012.

- [73] FRANCIS, A.; CAREY, R. J. *Advanced organic chemistry: part A: structure and mechanisms*. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2007.
- [74] MOTT, N. F. Conduction in polar crystals. II. The conduction band and ultra-violet absorption of alkali-halide crystals. *Transactions of the Faraday Society*, v. 34, p. 500, 1938.
- [75] WANNIER, G. H. The structure of electronic excitation levels in insulating crystals. *The Physical review*, v. 52, n. 3, p. 191–197, 1937.
- [76] FRENKEL, J. Some remarks on the theory of the photoelectric effect. *The Physical review*, v. 38, n. 2, p. 309–320, 1931.
- [77] BENATTO, L. et al. Molecular origin of efficient hole transfer from non-fullerene acceptors: insights from first-principles calculations. *Journal of materials chemistry. C, Materials for optical and electronic devices*, v. 7, n. 39, p. 12180–12193, 2019.
- [78] KNUPFER, M. Exciton binding energies in organic semiconductors. *Applied physics. A, Materials science & processing*, v. 77, n. 5, p. 623–626, 2003.
- [79] BÄSSLER, H.; KÖHLER, A. “Hot or cold”: how do charge transfer states at the donor-acceptor interface of an organic solar cell dissociate? *Physical chemistry chemical physics: PCCP*, v. 17, n. 43, p. 28451–28462, 2015.
- [80] LOURENCO JUNIOR, O. D. et al. Células Solares Orgânicas, a Energia que Vem dos. *Polimeros. Rev. Virtual Quim*, v. 2020, n. 3, p. 583–597, [s.d.].
- [81] LI, X.; ZHANG, W.; ZHAO, D. Recent progress in organic solar cells: Materials, devices, and optimization strategies. *Energy & Environmental Science*, v. 13, n. 10, p. 2831–2852, 2020.
- [82] SPANGGAARD, H.; KREBS, F. C. A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics. *Solar energy materials and solar cells: an international journal devoted to photovoltaic, photothermal, and photochemical solar energy conversion*, v. 83, n. 2–3, p. 125–146, 2004.

- [83] BRABEC, C. J.; SARICIFTCI, N. S.; HUMMELEN, J. C. Plastic Solar Cells, *Adv. Adv. Funct. Mater.*, v. 11, 2001.
- [84] J. Nelson, *Organic photovoltaic films*, 6 (2002) 87–95.
- [85] HEREMANS, P.; CHEYNS, D.; RAND, B. P. Strategies for Increasing the Efficiency of Heterojunction Organic Solar Cells: Material Selection and Device Architecture. [s.l: s.n.].
- [86] GÜNES, S.; NEUGEBAUER, H.; SARICIFTCI, N. S. Conjugated polymer-based organic solar cells. *Chemical reviews*, v. 107, n. 4, p. 1324–1338, 2007.
- [87] DEIBEL, C.; DYAKONOV, V. Polymer - fullerene bulk heterojunction solar cells. *Reports Prog. Phys.*, v. 96401, 2010.
- [88] LI, G. et al. High-efficiency solution processable polymer photovoltaic cells by self-organization of polymer blends. *Nature materials*, v. 4, n. 11, p. 864–868, 2005.
- [89] MA, W. et al. Thermally stable, efficient polymer solar cells with nanoscale control of the interpenetrating network morphology. *Advanced functional materials*, v. 15, n. 10, p. 1617–1622, 2005.
- [90] PIVRIKAS, A.; NEUGEBAUER, H.; SARICIFTCI, N. S. Influence of processing additives to nano-morphology and efficiency of bulk-heterojunction solar cells: A comparative review. *Solar energy (Phoenix, Ariz.)*, v. 85, n. 6, p. 1226–1237, 2011.
- [91] YE, L. et al. Quantitative relations between interaction parameter, miscibility and function in organic solar cells. *Nature materials*, v. 17, n. 3, p. 253–260, 2018.
- [92] FAN, B. et al. Correlation of local isomerization induced lateral and terminal torsions with performance and stability of organic photovoltaics. *Journal of the American Chemical Society*, v. 145, n. 10, p. 5909–5919, 2023.
- [93] ZHANG, Y. et al. Current status of outdoor lifetime testing of organic photovoltaics. *Advanced science (Weinheim, Baden-Wurttemberg, Germany)*, v. 5, n. 8, p. 1800434, 2018.

- [94] LÓPEZ-VICENTE, R.; FERNÁNDEZ-CASTRO, J.; ESPINDOLA- RODRIGUEZ, A. Lifetime study of organic solar cells with o-idtbr as non-fullerene acceptor. *Frontiers in Energy Research*, v. 9, 2021.
- [95] ABAT AMELENAN TORIMTUBUN, A. et al. Shelf lifetime analysis of organic solar cells combining frequency and time resolved techniques. *Sustainable Energy & Fuels*, v. 5, n. 24, p. 6498–6508, 2021.
- [96] DESTOUESSE, E. et al. Slot-die processing and encapsulation of non-fullerene based ITO-free organic solar cells and modules. *Flexible and printed electronics*, v. 4, n. 4, p. 045004, 2019.
- [97] JIANG, B.-H. et al. Realizing stable high-performance and low-energy-loss ternary photovoltaics through judicious selection of the third component. *Solar RRL*, v. 5, n. 9, p. 2100450, 2021.
- [98] Yongxi Li, Xiaheng Huang, Kan Ding, Hafiz KM Sheriff Jr, Long Ye, Haoran Liu, Chang- Zhi Li, Harald Ade, and Stephen R Forrest. Non-fullerene acceptor organic photovoltaics with intrinsic operational lifetimes over 30 years. *Nature communications*, 12(1):5419, 2021.
- [99] MALLIARAS, G. G. et al. Photovoltaic measurement of the built-in potential in organic light emitting diodes and photodiodes. *Journal of applied physics*, v. 84, n. 3, p. 1583–1587, 1998.
- [100] SCHARBER, M. C. et al. Design Rules for Donors in Bulk-Heterojunction Solar Cells-Towards 10% Energy-Conversion Efficiency. *Advanced Materials*, v. 18, n. 6, p. 789–794, 2006.
- [101] HARRISON, M. G.; GRÜNER, J.; SPENCER, G. C. W. Analysis of the photocurrent action spectra of MEH-PPV polymer photodiodes. *Physical review. B, Condensed matter*, v. 55, n. 12, p. 7831–7849, 1997.
- [102] Oliveira, F.S. - METODOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO PARA ENSAIOS DE SÉRIES E ARRANJOS FOTOVOLTAICOS DE GRANDE PORTE Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/213523/001117827.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- [103] LAKOWICZ, Joseph R. Principles of fluorescence spectroscopy. 3. ed. Nova Iorque, NY, USA: Springer, 2006.
- [104] SKOOG, Douglas A.; WEST, Donald M.; HOLLER, F. James et al. Fundamentos de Química Analítica: Tradução da 9ª edição norteamericana. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2012. Ebook. ISBN 9788522121373
- [105] BASSI, M. J. Estudo do efeito do tratamento térmico e aditivo na camada ativa de células solares orgânicas na estrutura de heterojunção em volume. 2017. 96 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Setor de Ciências Exatas. Curitiba: [s.n.].
- [106] Dos Santos, T.R.C. - ESTUDO DE UMA INSTALAÇÃO DE DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS ORGANICOS (OPVs) EM MEIO URBANO. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/69220>
- [107] WHAT IS SPIN COATING? Disponível em: <https://www.spincoater.com/what-is-spin-coating.php>  
Acesso em: 01 ago. 2024.
- [108] Métodos de incorporação de óxido de grafeno em membranas poliméricas - XXIX Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP – 2021. Disponível em: <https://www.prp.unicamp.br/inscricao-congresso/resumos/2021P19223A3663305547.pdf>
- [109] GARG, R. et al. Sputtering thin films: Materials, applications, challenges and future directions. Advances in colloid and interface science, v. 330, n. 103203, p. 103203, 2024.
- [110] DEPLA, D.; MAHIEU, S.; GREENE, J. E. Sputter deposition processes. Em: Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings. [s.l.] Elsevier, 2010. p. 253–296.
- [111] TATSCH, P. J. Deposição de Filmes Finos. Disponível em: <https://www.ccs.unicamp.br/cursos/ee941/download/cap11.pdf>.  
Acesso em: 20 mar. 2025.

- [112] DUSSÁN CUENCA, A.; QUIROZ GAITÁN, H. P.; CALDERÓN CÓMBITA, J. A. Nanomateriales que revolucionan la tecnología: perspectivas y aplicaciones en espintrónica. [s.l.] Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias, 2020.
- [113] KAIENBURG, P. et al. Assessing the photovoltaic quality of vacuum-thermal evaporated organic semiconductor blends. *Advanced materials* (Deerfield Beach, Fla.), v. 34, n. 22, p. e2107584, 2022.
- [114] KAIENBURG, P. et al. Vacuum-deposited donors for low-voltage-loss nonfullerene organic solar cells. *ACS applied materials & interfaces*, v. 15, n. 26, p. 31684–31691, 2023.
- [115] LI, Y. et al. Radiation hardness of organic photovoltaics. *Joule*, v. 9, n. 3, p. 101800, 2025.
- [116] TYAGI, P.; LAI, C. W.; JOHAN, M. R. B. Titanium dioxide/graphene composites for dye-sensitized solar cell applications. Em: *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science*. [s.l.] Elsevier, 2022. p. 313–339.
- [117] Slot-die coating. Disponível em: <https://www.fomtechnologies.com/fom-science/technology>. Acesso em: 18 mar. 2025.
- [118] Bassi, M.J. - PROPRIEDADES OPTOELETRÔNICAS DE MATERIAIS ORGÂNICOS APLICADAS EM CÉLULA SOLAR E BIOSSENSOR. Disponível em: <https://docplayer.com.br/215624257-Universidade-federal-do-parana-maiara-de-jesus-bassi.html>
- [119] A mais moderna fábrica de células solares orgânicas do mundo é inaugurada no CIT - Campus CETEC. Disponível em: <https://www7.fiemg.com.br/cit/noticias/detalhe/moderna-fabrica-de-celulas-solares-organicas-no-mundo-e-inaugurada-no-cit---capus-cetec> Acesso em: 01 ago. 2024.
- [120] Caoa instala maior fachada fotovoltaica do mundo em Anápolis. Disponível em: <https://www.automotivebusiness.com.br/pt/posts/noticias/caoa-instala>

-maior-fachada-fotovoltaica-do-mundo-em-anapolis/

Acesso em: 01 ago. 2024.

- [121] LIU, J. et al. Organic photovoltaic cells for low light applications offering new scope and orientation. *Organic electronics*, v. 85, n. 105798, p. 105798, 2020a.
- [122] PARIDA, B.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 3, p. 1625–1636, 2011.
- [123] BALL, M. L. et al. Design of UV-absorbing donor molecules for nearly imperceptible organic solar cells. *ACS energy letters*, v. 7, n. 1, p. 180–188, 2022.
- [124] STEIM, R. et al. Organic photovoltaics for low light applications. *Solar energy materials and solar cells: an international journal devoted to photovoltaic, photothermal, and photochemical solar energy conversion*, v. 95, n. 12, p. 3256–3261, 2011.
- [125] HOU, X. et al. Indoor application of emerging photovoltaics—progress, challenges and perspectives. *Journal of materials chemistry. A, Materials for energy and sustainability*, v. 8, n. 41, p. 21503–21525, 2020.
- [126] CUI, Y.; HONG, L.; HOU, J. Organic photovoltaic cells for indoor applications: Opportunities and challenges. *ACS applied materials & interfaces*, v. 12, n. 35, p. 38815–38828, 2020.
- [127] QIN, D.; QIU, M.; ZHAN, X. Determining shunt resistances via modeling the photovoltaic performance of organic solar cells. *Journal of materials chemistry. A, Materials for energy and sustainability*, v. 12, n. 25, p. 15063–15070, 2024.
- [128] ZAKAI, F. M. et al. Smart indoor organic photovoltaic cells for controlling health monitoring sensors: harnessing sustainable energy solutions for efficient sensing systems. (F. Berghmans, I. Zergioti, Eds.) *Optical Sensing and Detection VIII. Anais...SPIE*, 2024.
- [129] KIM, S. et al. Recent progress in solar cell technology for low-light indoor applications. *Current alternative energy*, v. 3, n. 1, p. 3–17, 2019.

- [130] CHANDER, S. et al. A study on spectral response and external quantum efficiency of mono-crystalline silicon solar cell. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2015.
- [131] LITZENBURGER, B. et al. Low light performance of solar cells and modules. *Cells to Systems*, 2014.
- [132] Estação "Tubo de Ensaio". Disponível em: <https://dineufpr.wixsite.com/dineufpr/pesquisa>  
Acesso em: 15 set. 2024.
- [133] Urban Planning in Curitiba. Disponível em: <https://www.scientificamerican.com/magazine/sa/1996/03-01/>  
Acesso em: 15 set. 2024.
- [134] Estação-tubo serve como laboratório sobre comportamento de painéis solares orgânicos. Disponível em: [https://www.ufpr.br/portalufpr/noticias/estacao-tubo-de-ensaio-fisica-paineis-solares/?fbclid=IwAR22BZUTLyyLD0UzGYpX54aSlGzRPbS\\_VbeG4rYovR4BfswUmwplZVCj1o4](https://www.ufpr.br/portalufpr/noticias/estacao-tubo-de-ensaio-fisica-paineis-solares/?fbclid=IwAR22BZUTLyyLD0UzGYpX54aSlGzRPbS_VbeG4rYovR4BfswUmwplZVCj1o4)  
Acesso em: 15 set. 2024.
- [135] Dados técnicos da lâmpada PHILIPS Disponível em: [https://www.lighting.philips.com.br/api/assets/v1/file/Signify/content/929001999872\\_EU.pt\\_BR.PROF.FP/Localized\\_commercial\\_leaflet\\_929001999872\\_pt\\_BR.pdf](https://www.lighting.philips.com.br/api/assets/v1/file/Signify/content/929001999872_EU.pt_BR.PROF.FP/Localized_commercial_leaflet_929001999872_pt_BR.pdf)  
Acesso em: 15 abr. 2025.
- [136] 14 W G5 Cool white Linear fluorescent tube. Disponível em: [https://www.lighting.philips.com.br/prof/lampadas-e-lampadas-tubulares-convencionais/lampadas-fluorescentes-e-iniciadores/t15/t15-essential-he-super-80/927925984058\\_EU/product](https://www.lighting.philips.com.br/prof/lampadas-e-lampadas-tubulares-convencionais/lampadas-fluorescentes-e-iniciadores/t15/t15-essential-he-super-80/927925984058_EU/product)  
Acesso em: 5 jun. 2025.
- [137] MATHEWS, I.; KING, P.J.; STAFFORD, F.; FRIEL, I. Indoor photovoltaics: Materials, challenges, and opportunities. *Joule*, v. 3, n. 6, p. 1415-1436, 2019.
- [138] LEE, Chihyung et al. Over 30% efficient indoor organic photovoltaics enabled by morphological modification using two compatible non-fullerene acceptors. *Advan-*

ced Energy Materials, v. 12, n. 22, p. 2200275, 2022.

- [139] YAN, J. et al. Efficient organic photovoltaics under different indoor illumination levels. *Science Advances*, v. 8, n. 18, eabn8061, 2022.
- [140] KOSTER, L. J. A. et al. Light intensity dependence of open-circuit voltage of polymer:fullerene solar cells. *Applied Physics Letters*, v. 86, n. 12, p. 123509, 2005.
- [141] DES DOKTORGRADES DER TECHNISCHEN FAKULTÄT DER ALBERT-LUDWIGS-, Dissertation Zur Erlangung. Organic photovoltaics for indoor and high-voltage applications. Acesso em: 8 jan. 2026.
- [142] RYU, Hwa Sook et al. Recent progress in indoor organic photovoltaics. *Nanoscale*, v. 12, n. 10, p. 5792–5804, 2020.
- [143] RYU, Shinyoung et al. Light intensity dependence of organic solar cell operation and dominance switching between Shockley-Read-Hall and bimolecular recombination losses. *Scientific Reports*, v. 11, n. 1, p. 16781, 2021.