

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR

CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E
NUCLEARES

JANIS JOPLIM BEZERRA GALDINO

**ESTUDO DA GERAÇÃO DE ENERGIA EM CÉLULAS ORGÂNICAS A PARTIR DA
ILUMINAÇÃO SIMULTÂNEA DE AMBAS AS FACES**

Recife

2018

JANIS JOPLIM BEZERRA GALDINO

**ESTUDO DA GERAÇÃO DE ENERGIA EM CÉLULAS ORGÂNICAS A PARTIR DA
ILUMINAÇÃO SIMULTÂNEA DE AMBAS AS FACES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Fontes Renováveis de Energia.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Olga de Castro Vilela

Coorientador: Prof^o. Dr. Naum Fraidenraich

Recife

2018

Catálogo na fonte

Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

- G149e Galdino, Janis Joplim Bezerra.
Estudo da geração de energia em células orgânicas a partir da
iluminação simultânea de ambas as faces. / Janis Joplim Bezerra
Galdino. - Recife, 2018.
95 f. : il., figs., gráfs., tabs.
- Orientadora: Profa. Dra. Olga de Castro Vilela.
Coorientador: Prof. Dr. Naum Fraidenraich.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e
Nucleares, 2018.
Inclui referências, apêndice e anexo.
1. Engenharia de energia. 2. Módulos fotovoltaicos orgânicos. 3.
Iluminação simultânea. 4. P3HT:PCBM. 5. Energia renovável. I.
Vilela, Olga de Castro, orientadora. II. Fraidenraich, Naum,
coorientador. III. Título.

CDD 621.042 (22. ed.)

UFPE
BDEN/2018-36

JANIS JOPLIM BEZERRA GALDINO

**ESTUDO DA GERAÇÃO DE ENERGIA EM CÉLULAS ORGÂNICAS A PARTIR DA
ILUMINAÇÃO SIMULTÂNEA DE AMBAS AS FACES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovada em: 27/07/2018

BANCA EXAMINADORA:

Prof^a. Dr^a. Olga de Castro Vilela (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Elielza Moura de Souza Barbosa (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Dr. Diego Bagnis (Examinador Externo)
CSEM-Brasil

Prof^o. Dr. Luis Arturo Gómez Malagón (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Ao longo deste trabalho, recebi o apoio de muitas pessoas, que direta e indiretamente me ajudaram a concluir a minha dissertação, de modo que não posso deixar de agradecê-las por suas contribuições ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

Primeiramente, agradeço a Deus pelas oportunidades e dificuldades, e pela força pra enfrentá-las.

À minha família, em especial aos meus pais Vânia e Marcos e aos meus irmãos Ícaro e Jeniffer, por estarem ao meu lado em todas as situações.

À minha orientadora Olga Vilela, por me receber com muito carinho como sua aluna e me guiar no caminho acadêmico, sempre escutando minhas dúvidas com atenção e acolhendo meus problemas, direcionando-me da melhor forma.

Ao meu coorientador Naum Fraidenraich, por dividir comigo um pouco da sua brilhante experiência e por suas sugestões e ideias.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) pelo suporte financeiro.

A todos os funcionários da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), principalmente aos professores e técnicos do Departamento de Energia Nuclear (DEN) e do Centro de Energias Renováveis (CER), com quem pude conviver ao longo do mestrado e da graduação.

Aos técnicos do laboratório de Fontes Alternativas de Energia (Grupo FAE), em especial, Rinaldo, e aos alunos da graduação do curso de Engenharia de Energia que me ajudaram na execução dos experimentos desta pesquisa.

A todos os professores que participaram da banca dos Seminários I e II e da Defesa, por suas contribuições e sugestões, que enriqueceram o trabalho.

Ao Centro de Inovações CSEM-Brasil, em especial, Rodrigo Vilaça e Diego Bagnis, pelo fornecimento dos módulos orgânicos, pela disposição em tirar minhas dúvidas e por terem me recebido muito bem nas instalações do CSEM-Brasil, ajudando-me a compreender um pouco mais sobre o processo de fabricação e as características dos módulos OPV deste estudo.

A Valentin, por todo seu carinho e cuidado, a todos os meus amigos e à Cia Lírica no Ar, por serem meu refúgio.

RESUMO

As células fotovoltaicas orgânicas (OPV) vem apresentando um crescente destaque por possuírem um grande potencial de produção de baixo custo devido a sua produção mais simplificada em relação à tecnologia convencional. Além disso, os módulos OPV são leves, finos e semitransparentes, ampliando as suas aplicações comerciais. Por serem semitransparentes, as células OPV podem gerar energia a partir de qualquer uma de suas faces, porém somente uma é utilizada para esse fim, sendo a outra parcialmente coberta por um eletrodo metálico. Neste estudo, foi proposto iluminar simultaneamente ambas as faces de um módulo OPV comercial de estrutura PET/ITO/ETL/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag analisando a sua geração de corrente e potência. Para isso, foram estudadas as características elétricas nos sentidos de iluminação frontal (pelo ITO) e traseira (pelo eletrodo de Ag) através da obtenção de curvas características, curvas no escuro, monitoramento de geração em operação contínua, ajuste à Equação de Shockley e estudo da corrente fotogerada. Dois módulos OPV comerciais com mesma estrutura e diferentes tamanhos foram utilizados para investigar a influência do aumento da área das células na sua performance. Os experimentos foram realizados em condições reais de temperatura e irradiância e o efeito dessas variáveis ambientais na geração elétrica dos módulos também foi estudado. Além disso, um modelo óptico de multicamadas foi desenvolvido para analisar as componentes incidente, absorvida, refletida e transmitida da luz em cada camada do módulo. A geração com iluminação simultânea e uniforme foi obtida utilizando um concentrador solar V-trough, posicionando o módulo verticalmente entre os espelhos. Foi encontrado que o verso do módulo tem potencial de produzir 60% da energia que é gerada pelo lado frontal. Dentre os 40% de redução de geração elétrica pela parte traseira, 23,5% é proveniente do sombreamento causado pelo eletrodo. Segundo o modelo óptico, não há diferenças significativas entre a energia que incide na camada ativa nos sentidos de iluminação frontal e traseira, mostrando que existem perdas associadas a outros mecanismos. Através da iluminação simultânea de ambas as faces, foi obtido que a produção de corrente aumentou cerca de 60% em relação ao lado frontal, porém a potência aumentou somente 46%. No experimento de iluminação simultânea, o módulo atingiu temperaturas elevadas (acima de 60°C), diminuindo o potencial de acréscimo da produção de energia. Neste estudo, foi verificado um aumento considerável na produção energética de um módulo OPV comercial, aproveitando a sua semitransparência.

Palavras-chave: Módulos Fotovoltaicos Orgânicos. Iluminação Simultânea. P3HT:PCBM. Energia Renovável.

ABSTRACT

Organic photovoltaic cells (OPVs) have been increasing in importance because they have a high potential for low-cost production, due to their simplified fabrication compared to conventional technology. In addition, OPV modules are light, thin and semi-transparent, expanding their commercial applications. Because of their semitransparency, OPV cells can generate energy by illumination of any of their faces, but only one is used for this purpose, the other part is partially covered by a metallic electrode. In this study, simultaneous illumination of both sides of a commercial OPV module of PET/ITO/ETL/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag structure is studied, and current and power generation is analyzed at this condition. In order to do this, the electrical characteristics in the frontal and rear illumination directions were studied by obtaining characteristic and dark current curves, monitoring the generation in continuous operation, modeling the Shockley Equation and studying the photogenerated current. Two commercial OPV modules with the same structure and different sizes were used to investigate the influence of the cell area on their performance. The experiments were carried out under real conditions of temperature and irradiance, and the effect of these environmental variables on the electric generation of the modules was also studied. Moreover, a multilayer optical model was developed to analyze the incident, absorbed, reflected and transmitted components of light in each layer of the module. The generation with simultaneous and uniform illumination was obtained using a V-trough solar concentrator, positioning the module vertically between the mirrors. It was found that the back of the module has the potential to produce 60% of the energy that is generated by the front side. 23.5% of the 40% decrease in power generation exhibited by the back side is due to the shading caused by the metallic electrode. According to the optical model, there are no significant differences between the energy that reaches the active layer in the front and rear lighting directions. Therefore, there are losses associated with other mechanisms. Through the simultaneous illumination of both sides, current production raised by approximately 60% compared to the front side, but power increased by only 46%. In the simultaneous illumination experiment, the module reached high temperatures (above 60°C), reducing the potential to enhance energy production. In this study, a considerable gain in the energy production of a commercial OPV module was verified by taking advantage of its semitransparency.

Keywords: Organic Photovoltaic Modules. Simultaneous Illumination. P3HT:PCBM. Renewable Energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Circuito equivalente de um módulo fotovoltaico tradicional.....	18
Figura 2 – Curva no escuro de um módulo fotovoltaica ideal.....	19
Figura 3 – Curva característica de um módulo solar e seus principais pontos de interesse.	20
Figura 4 – Influência das resistências a) em série e b) paralelo na curva I-V.	21
Figura 5 – Processos do surgimento do éxciton, difusão do éxciton no material, dissociação do éxciton e coleta de cargas pelos eletrodos. Os subíndices D e A indicam material doador e aceitador de elétrons, respectivamente.	24
Figura 6 – Heterojunção a) de bicamada e b) em volume.	25
Figura 7 – Estrutura química do P3HT e PCBM.	27
Figura 8 – Camadas de uma célula orgânica convencional e seus respectivos níveis energéticos.	29
Figura 9 – a) Arranjo invertido de células orgânicas e b) energias de HOMO e LUMO de cada interface.	29
Figura 10 – Espectro de absorção do P3HT, PCBM e P3HT:PCBM.....	30
Figura 11 – Estrutura de uma célula OPV tandem.	30
Figura 12 – Técnica rolo-a-rolo.....	32
Figura 13 – Número de artigos publicados relacionados a células OPV.....	33
Figura 14 – Eficiência de conversão em potência do OPV e outros filmes finos.	33
Figura 15 – Comportamento da a) tensão e b) fator de forma com a variação na espessura da camada ativa PCBM:P3HT com iluminação pelo Au e ITO.....	35
Figura 16 – Densidade óptica de células de ITO/ZnO dopado com Al/PCBM:P3HT/PEDOT:PSS/Ag com 10 mm ² e iluminação pelo Au e ITO.	35
Figura 17 – Eficiência quântica externa com o comprimento de onda de células de ITO/ZnO dopado com Al/PCBM:P3HT/PEDOT:PSS/Ag com e sem o uso de espelho no eletrodo de Ag.	36
Figura 18 – Design do módulo OPV orientado verticalmente em formato cilíndrico proposto por Yambem et al.	37
Figura 19 – Comportamento dos parâmetros a) I_{cc} , b) V_{oc} , c) Eficiência e fator de forma com a concentração solar.	38
Figura 20 – Módulo 1 (P3HT) a) frente e b) verso.....	42
Figura 21 – Módulo 2 (P3HT) a) frente e b) verso.....	42

Figura 22 – Imagens fotografada e processada de uma célula gradeada do módulo.....	43
Figura 23 – Configuração do experimento.	43
Figura 24 – Fonte de tensão bipolar KEPCO utilizada nos experimentos.	44
Figura 25 – Datalogger Campbell utilizado para o armazenamento de dados.	44
Figura 26 – Curvas ideal e real de um diodo e as regiões onde prevalecem os fenômenos de recombinação (a), de corrente de difusão (b), de alta injeção (c), do efeito da resistência em série (d) e dos defeitos na superfície (e).	46
Figura 27 – Fluxo da radiação em uma célula de 7 camadas.	50
Figura 28 – Feixe de luz incidindo numa superfície.	51
Figura 29 – Camadas do módulo OPV utilizadas no modelo.	53
Figura 30 – Espectroradiômetro HR-4000 UV VIS utilizado nos experimentos.	54
Figura 31 – Condições do ensaio para obtenção da transmitância do módulo OPV em diferentes inclinações.	54
Figura 32 – Esquema da luz refletida incidindo normalmente na cavidade V de ângulo de abertura de 45°.	56
Figura 33 – Esquema do ensaio de iluminação simultânea com o <i>V-trough</i>	57
Figura 34 – Análises que podem ser realizadas a partir dos dados gerados nos experimentos.	58
Figura 35 – Curvas características dos módulos a) Tipo 1 e b) Tipo 2 para aproximadamente 1000 W/m ² e 49°C.	60
Figura 36 – Sentido da corrente no módulo OPV.	61
Figura 37 – Eficiência média e sua dispersão em função da irradiância dos módulos a) Tipo 1 e b) Tipo 2.	62
Figura 38 – Espectros de massa de ar 2 da irradiância global, direta e difusa de um dia típico de céu claro.	63
Figura 39 – Variação da densidade de corrente de curto circuito com a irradiância para os módulos a) Tipo 1 e b) Tipo 2.	64
Figura 40 – Variação da tensão de circuito aberto com a irradiância para os módulos a) Tipo 1 e b) Tipo 2.	64
Figura 41 – Variação da potência máxima por área com a irradiância para os módulos a) Tipo 1 e b) Tipo 2.	65
Figura 42 – Fator de forma com a irradiância para os módulos a) Tipo 1 e b) Tipo 2.	65

Figura 43 – Comportamento dos parâmetros característicos do módulo Tipo 1 com a temperatura (a) V_{oc} ; (b) I_{cc} ; (c) Fator de Forma; (d) Eficiência.....	66
Figura 44 – a) Curva característica e b) de potência do módulo Tipo 1 frente e verso a 51°C e irradiância média de 992 W/m ²	68
Figura 45 – a) Curva característica e b) de potência do módulo 1 frente e verso a 37°C e irradiância média de 453 W/m ²	68
Figura 46 – a) Curva característica e b) de potência do módulo 1 frente e verso a 35°C e irradiância média de 358 W/m ²	69
Figura 47 – Comparação entre corrente e potência gerada para as faces a) e b) frontal e c) e d) traseira do módulo Tipo 1.....	72
Figura 48 – Perfil da irradiância e eficiência ao longo do dia para as datas a) 16/05/2017, b) 17/05/2017 para a parte frontal e c) 27/04/2017 e d) 04 e 05/05/2017 para a parte traseira.	73
Figura 49 – Curvas no escuro para os módulos a) Tipo 1 e b) Tipo 2 nas temperaturas alcançadas.....	74
Figura 50 – Curvas iluminada, no escuro e fotogerada para o módulo a) Tipo 1 e b) Tipo 2..	75
Figura 51 – Corrente fotogerada e seu ajuste à equação de Hecht para os módulos a) Tipo 1 e b) Tipo 2.	76
Figura 52 – Transmitâncias do módulo Tipo 1 medida e simulada e o erro absoluto entre elas.	77
Figura 53 – Modificador do ângulo de incidência calculado a partir do modelo óptico e de dados experimentais.....	77
Figura 54 – Espectro solar AM 1.5 e os espectros simulados da energia absorvida pela camada ativa e da transmitância do módulo Tipo 1.....	78
Figura 55 – Simulação das parcelas da energia absorvida em cada camada do módulo Tipo 1.	79
Figura 56 – Simulação dos espectros da energia absorvida em cada camada do módulo Tipo 1 a) frente e b) verso.	80
Figura 57 – Curva característica para o módulo Tipo 1 com iluminação simultânea das faces com o V-trough com 45° de abertura.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estrutura e área das células OPV e o tipo de refletor dos trabalhos mencionados.	39
Tabela 2 – Dimensões dos módulos em estudo.....	41
Tabela 3 – Materiais que compõe cada camada e suas espessuras.....	53
Tabela 4 – Parâmetros elétricos e ambientais da curva característica do módulo Tipo 1 e Tipo 2.	60
Tabela 5 – Valores das resistências em série (R_s) e paralelo (R_{sh}), do fator de idealidade do diodo (m) e da corrente de saturação (I_0) para os módulos Tipo 1 e Tipo 2 a partir da curva I-V.....	61
Tabela 6 – Parâmetros elétricos do módulo Tipo 1 frente e verso a 51°C e irradiância média de 992 W/m ² e a diferença percentual entre eles.....	67
Tabela 7 – Parâmetros elétricos do módulo Tipo 1 frente e verso a 37°C e irradiância média de 453 W/m ² e a diferença percentual entre eles.....	68
Tabela 8 – Parâmetros elétricos do módulo 1 frente e verso a 35°C e irradiância média de 358 W/m ² e a diferença percentual entre eles.....	69
Tabela 9 – Valores estimados das resistências em série e paralelo, do fator de idealidade do diodo e corrente de saturação reversa para o verso do módulo Tipo 1.	70
Tabela 10 – Irradiância difusa na frente e no verso do módulo 1 para as condições de temperatura e irradiância das curvas características.....	71
Tabela 11 – Radiação e a produção de energia total e a eficiência média diária com iluminação pelo ITO e pelo eletrodo de Ag do módulo Tipo 1 funcionando continuamente.....	72
Tabela 12 – Valores estimados da corrente de saturação reversa e do fator de idealidade do diodo para os módulos Tipo 1 e Tipo 2.	74
Tabela 13 – Valores do produto $\mu\tau_{vida}$ para os módulos Tipo 1 e Tipo 2.....	76
Tabela 14 – Parâmetros elétricos para o Módulo Tipo 1 com iluminação simultânea das faces com o V-trough com 45° de abertura.	81

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	CONCEITOS PRELIMINARES	18
2.1	Célula fotovoltaica tradicional	18
2.2	Células orgânicas	22
2.2.1	Funcionamento das células orgânicas.....	22
2.2.2	Materiais utilizados.....	26
2.2.3	Tempo de vida e degradação	30
2.2.4	Potencial das células orgânicas.....	31
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	34
4	MATERIAL E MÉTODOS	41
4.1	Origem e características dos módulos	41
4.1.1	Área Gradeada	42
4.2	Curvas características	43
4.3	Curvas no escuro e corrente fotogerada.....	45
4.4	Funcionamento em tensão fixa	47
4.5	Modelagem e extração de parâmetros	48
4.6	Experimentos ópticos	49
4.6.1	Modelo óptico analítico	49
4.6.2	Dados ópticos experimentais	53
4.7	Geração simultânea de eletricidade	55
4.8	Análise dos dados.....	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1	Área gradeada.....	59
5.2	Parâmetros da curva característica	59
5.2.1	Diferenças entre tamanhos	59
5.2.2	Diferenças no sentido da iluminação	67
5.3	Operação contínua.....	71
5.4	Curva no escuro e fotocorrente	73
5.5	Características ópticas	76
5.6	Geração simultânea	80
6	CONCLUSÕES.....	83
	REFERÊNCIAS	85

APÊNDICE A – MODELO ÓPTICO	92
ANEXO A – ERROS DE INSTRUMENTAÇÃO.....	95

1 INTRODUÇÃO

Aumentar a participação de fontes renováveis na matriz energética é um objetivo mundial a fim de diminuir o impacto ambiental causado pela geração de energia por meio de fontes tradicionais de origem fóssil. A tecnologia solar se mostra como uma alternativa devido ao seu grande potencial, já que a energia incidente proveniente do sol na superfície terrestre em um ano é muito superior à demanda energética global durante esse mesmo período. Porém, os dispositivos para conversão em energia útil permitem apenas o uso de uma fração muito pequena do total disponível da radiação solar. Um dos principais meios de conversão é a célula fotovoltaica que transforma a energia solar diretamente em eletricidade (DUFFIE; BECKMAN, 1980). Essa tecnologia tem se tornado cada vez mais acessível à medida que há uma maior difusão no mercado. Existem muitos tipos de células fotovoltaicas em escala comercial e de pesquisa, a mais comum é a de silício cristalino, que é comercializada em forma de módulos fotovoltaicos rígidos com eficiência para geração de eletricidade média em torno de 15% (LUQUE; HEGEDUS, 2003).

As células orgânicas fotovoltaicas (OPV) são alvo de estudos pois sua fabricação é potencialmente mais barata em relação à tecnologia solar de células inorgânicas cristalinas, já que utilizam o método de impressão rolo-a-rolo (*roll-to-roll*), que permite produzir módulos fotovoltaicos de diferentes tamanhos, inclusive de grandes áreas, sem a necessidade de condições mais restritivas, como na produção de módulos de silício cristalino, que necessita de temperaturas bastante elevadas e ambiente extremamente limpo (BRIAN; MARK, 2003). Além disso, as células orgânicas podem ser compostas por materiais flexíveis, leves e semitransparentes, ampliando suas aplicações para diferentes áreas comerciais, principalmente em energia solar integrada a edificações e eletrônicos portáteis. Porém, por não possuir estrutura cristalina, as células orgânicas possuem uma menor mobilidade de carga, diminuindo bastante sua eficiência de conversão (WOHRLE; MEISSNER, 1991). Outro ponto importante que difere as duas tecnologias é que, nas células orgânicas, a absorção de fótons não gera diretamente um par de cargas livres separadas, mas um par elétron-lacuna eletricamente ligado, que facilita a recombinação sem produção útil de eletricidade (PROCTORA, 2013).

A eficiência das células orgânicas vem crescendo significativamente ao longo dos últimos anos, tendo atingido, em laboratório, valores em torno de 11% (NREL, 2014). Entretanto, quando se considera a transferência de tecnologia do laboratório para a indústria, e o recente desenvolvimento dessas células, o cenário atual é de módulos com eficiências bem menores, da ordem de 3% a 6% (módulos comerciais). Portanto, para aumentar a

comercialização de módulos de célula orgânica, é fundamental procurar maneiras para melhorar a sua eficiência (HOPPE; SARICIFTCI, 2004).

Por estar em fase de desenvolvimento científico, novas tecnologias de células orgânicas são produzidas e é fundamental estudar suas características e seu comportamento em operação. Neste trabalho, módulos OPV comerciais de diferentes tamanhos foram caracterizados em condições outdoor (situações reais de irradiância, temperatura, umidade, etc) com o objetivo de analisar a influência das variáveis ambientais (temperatura e irradiância) e das dimensões do módulo em seus parâmetros elétricos e na geração de energia.

As características ópticas do módulo OPV foram estudadas através da sua transmitância, analisando o efeito do ângulo de incidência da radiação solar. Com a finalidade de estudar o caminho percorrido pela luz dentro do módulo, um modelo óptico de multicamadas também foi desenvolvido.

Além disso, por serem semitransparentes, foi observada a possibilidade de geração de energia nas duas faces do módulo OPV individualmente (LIN et al., 2012; YAMBEM et al., 2012; KRANTZ et al., 2013; KUWABARA et al., 2014; CARDOZO, 2017; BOUTHINON et al., 2018). Porém, a geração bifacial ainda é pouco explorada na literatura para módulos OPV. A partir disso, procura-se, então, uma maneira de aproveitar a produção energética de ambos os lados do módulo simultaneamente. Para isso, neste trabalho, foi investigada a geração de energia utilizando um dispositivo óptico de cavidade tipo V (*V-trough*) que permite iluminar uniformemente ambas as faces do módulo com vistas a maximizar a sua produção energética.

2 CONCEITOS PRELIMINARES

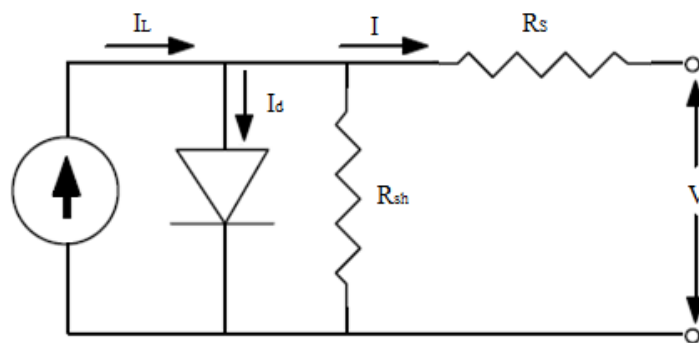
2.1 Célula fotovoltaica tradicional

Para compreender melhor o funcionamento dos módulos orgânicos, é importante inicialmente entender alguns conceitos acerca da tecnologia fotovoltaica convencional.

Do ponto de vista elétrico, um módulo solar ideal pode ser retratado por um gerador de corrente em paralelo com o diodo. Porém, seu comportamento real está sujeito a perdas devido à recombinação dos portadores de carga, defeitos na estrutura e resistências em série (R_s) e paralelo (*shunt*, R_{sh}) existentes em sua configuração.

A resistência em série é proveniente do próprio material semicondutor, dos contatos metálicos e suas conexões com a célula. Já a resistência em paralelo é originada por falhas na estrutura da célula e impurezas, que podem causar um caminho interno para corrente de fuga (GREEN, 1982). As imperfeições do semicondutor podem ser caracterizadas através de um parâmetro chamado coeficiente de idealidade do diodo (m), que indica o quão próximo do ideal ($m=1$) está o seu comportamento. O circuito elétrico equivalente de um módulo solar real está mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Circuito equivalente de um módulo fotovoltaico tradicional.



Fonte: Adaptada de Pinho e Galdino (2014).

A corrente de saída de um módulo fotovoltaico, I , é dada pela corrente fotogerada, I_L , diminuída das correntes que passa pelo diodo, I_d , e pela resistência em paralelo. O comportamento da corrente de saída do módulo é descrito pela Equação de Shockley, mostrada na Equação 1.

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{(V+IR_s)}{mV_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

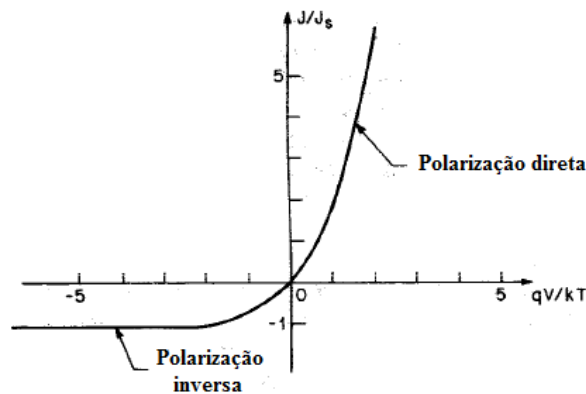
Onde V_T é a tensão térmica dada pela Equação 2, I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo, V é tensão de saída do módulo fotovoltaico, q é a carga elementar e T é a temperatura da célula em K.

$$V_T = n \frac{kT}{q} \quad (2)$$

Onde n é quantidade de células em série do módulo.

Quando o módulo não está recebendo iluminação, ele não gera corrente e se comporta apenas como um diodo. A Figura 2 mostra a curva no escuro de um módulo fotovoltaico ideal.

Figura 2 – Curva no escuro de um módulo fotovoltaica ideal.



Fonte: Adaptada de Sze (1981).

O gráfico que descreve a corrente e a tensão de saída de um módulo solar sob iluminação é conhecido como curva característica (ou curva I-V) e é mostrado na Figura 3.

É possível observar alguns pontos importantes do módulo fotovoltaico na curva I-V. São eles (PINHO; GALDINO, 2014):

- Voltagem de circuito aberto, V_{oc} : É obtida quando não há corrente circulando no módulo e é a máxima tensão de saída. A Equação 3 mostra a sua fórmula, derivada da Equação 1, fazendo $I=0$ e considerando o valor R_{sh} muito grande.

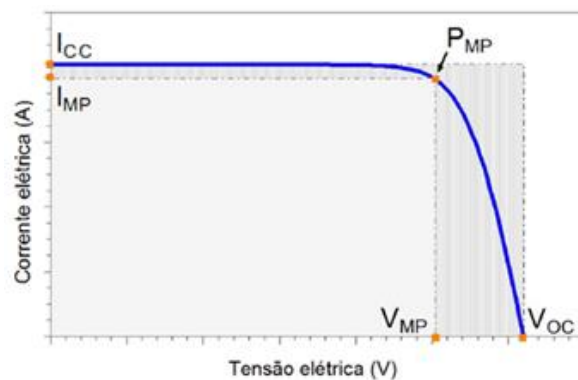
$$V_{oc} = mV_T \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (3)$$

- Voltagem de máxima potência, V_{mp} : É aquela correspondente ao ponto onde se tem a maior potência elétrica fornecida pelo módulo fotovoltaico.
- Corrente de curto-circuito, I_{cc} : É obtida quando não há tensão nos terminais do módulo fotovoltaico, ou seja, curto-circuitando a sua saída. É a máxima corrente gerada pelo módulo e pode ser dada pela Equação 4, também derivada da Equação 1, fazendo $V=0$ e considerando R_{sh} muito grande.

$$I_{cc} = I_L - I_0 \left(e^{\frac{IR_s}{mV_T}} - 1 \right) \quad (4)$$

- Corrente de máxima potência, I_{mp} : É aquela correspondente ao ponto onde se tem a maior potência elétrica fornecida pelo módulo fotovoltaico.
- Ponto de máxima potência, P_{mp} : Onde o produto da corrente pela tensão (potência) produzidas pelo módulo é máximo.

Figura 3 – Curva característica de um módulo solar e seus principais pontos de interesse.



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

A partir desses pontos, pode-se determinar duas características importantes de um módulo fotovoltaico, o fator de forma, FF, e a sua eficiência, η . O fator de forma é a razão entre as áreas formadas pelos retângulos de lados com dimensões iguais a I_{mp} e V_{mp} e a I_{cc} e V_{oc} , como mostra a Equação 5.

$$FF = \frac{I_{mp}V_{mp}}{I_{cc}V_{oc}} \quad (5)$$

A eficiência do módulo fotovoltaico é a relação entre a máxima potência que ela poderá gerar pela potência solar que chega na sua superfície. Equação 6 mostra a fórmula da eficiência de um módulo fotovoltaico.

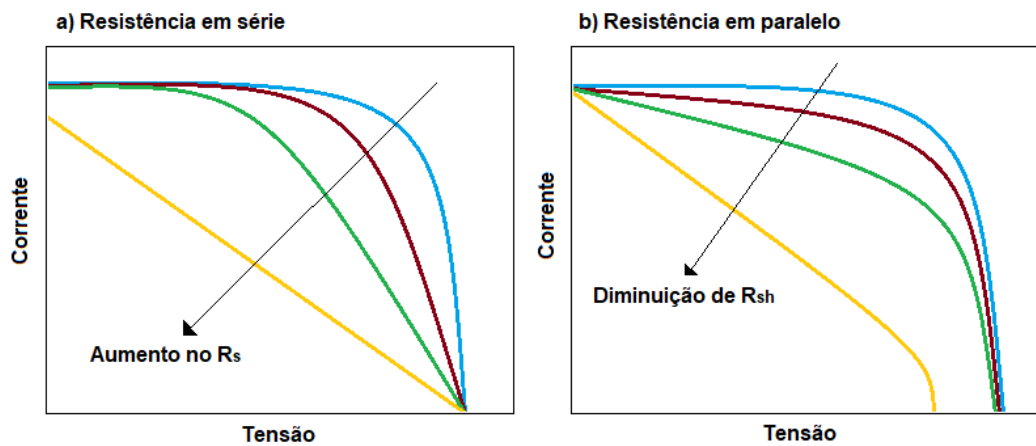
$$\eta = \frac{I_{cc}V_{oc}FF}{A \cdot I_{col}} \quad (6)$$

Onde A é a área da superfície do módulo e I_{col} é a irradiância solar incidente sobre ele.

Existem algumas variáveis que são capazes de alterar o formato e a amplitude da curva I-V de um módulo fotovoltaico. Alguns desses fatores são intrínsecos ao próprio módulo, como as resistências em série e paralelo, e outros são provenientes de condições ambientais, como a temperatura e a irradiância solar.

A Figura 4 mostra a influência das resistências em série e paralelo na curva I-V.

Figura 4 – Influência das resistências a) em série e b) paralelo na curva I-V.



Fonte: Adaptada de Pinho e Galdino (2014).

O aumento da resistência em série acarreta na redução da corrente de curto-circuito e do fator de forma, porém não há efeitos na tensão de circuito aberto. Para valores muito altos da resistência em série, a curva característica se torna uma reta com inclinação igual ao inverso do valor de R_s .

À medida que a resistência em paralelo decresce, o valor da tensão de curto circuito e o fator de forma diminuem, mas não há influência na corrente de curto-circuito. Para valores muito elevados da resistência em paralelo, a curva característica perde a semelhança com a de um diodo e se aproxima de uma reta com inclinação igual ao inverso de R_{sh} .

A temperatura influencia bastante na curva característica do módulo fotovoltaico. Em um módulo convencional, apesar de elevar a corrente, seu aumento ocasiona uma redução na potência de saída por causar uma diminuição acentuada na tensão.

A irradiância também é um fator muito importante para potência gerada pelo módulo fotovoltaico. A corrente de curto circuito tem uma relação de proporcionalidade direta com a irradiância, enquanto que a tensão de circuito aberto possui uma variação logarítmica.

Por ser afetada pelas variáveis ambientais de temperatura e irradiância, para se comparar a performance de diferentes módulos fotovoltaicos, é necessário estabelecer valores de referência para as medições de curvas características e extração de parâmetros.

O conceito do circuito elétrico equivalente representado matematicamente pela Equação de Shockley é amplamente empregado em células fotovoltaicas convencionais. Apesar de ele apresentar algumas limitações devido às diferenças entre o funcionamento de células orgânicas e inorgânicas (detalhadas na Seção 2.2), ele também é bastante empregado para modelar parâmetros em células orgânicas com resultados satisfatórios (JAIN; KAPOOR, 2005; GIEBINK et al., 2010a; GIEBINK et al., 2010b; CHONG et al., 2016).

2.2 Células orgânicas

2.2.1 Funcionamento das células orgânicas

O interesse na utilização de materiais poliméricos para a geração de energia fotovoltaica foi despertado pela descoberta da condutibilidade em polímeros por Shirakawa et al. (1977). Nesse estudo, eles mostraram que a condutibilidade do polímero poliacetileno pode variar de isolante até condutor através da manipulação do seu nível de oxidação. Anteriormente a esse trabalho, os materiais poliméricos eram considerados apenas isolantes e essa descoberta expandiu as aplicações dos polímeros orgânicos, conferindo aos cientistas responsáveis o prêmio Nobel de química em 2002 (HEEGER, 2001; ABDELHAMID et al., 2015). A manipulação de polímeros condutores permite a sintetização de materiais com diferentes propriedades, ampliando as possibilidades de matéria-prima para a fabricação de células OPV.

Os semicondutores orgânicos são formados por polímeros ou pequenas moléculas, sendo constituídos principalmente de carbono. A ligação atômica dominante é a ligação p e o que mantém as moléculas unidas é a força de van der Waals. Esses aspectos estruturais conferem aos semicondutores orgânicos as suas características de flexibilidade e leveza (CHOY, 2013). Fazendo uma analogia com os semicondutores inorgânicos, nas células orgânicas, as bandas de valência e condução podem ser entendidas como o orbital molecular ocupado de mais alta energia (HOMO, *Highest Occupied Molecular Orbital*), e o orbital molecular não ocupado de mais baixa energia (LUMO, *Lowest Unoccupied Molecular Orbital*), respectivamente. As bandas de energia dos orbitais estão relacionadas aos diferentes estados de hibridização das ligações p, e o HOMO e LUMO são os orbitais ligante p e antiligante p*. A diferença entre as energias do HOMO e do LUMO é a energia de gap (E_g) (RAND; RICHTER, 2014).

Para que o efeito fotovoltaico aconteça nas células orgânicas, são necessários dois tipos de materiais, um doador e outro aceitador de elétrons. Ao absorver um fóton, toda a molécula se excita e gera um éxciton, um par elétron-lacuna, que continua unido pela força Coulomb existente entre as partículas devido à baixa constante dielétrica dos semicondutores orgânicos (CHOY, 2013). O éxciton, então, precisa se difundir ao longo do material até encontrar a interface entre os materiais doador e aceitador de elétrons. Para que o éxciton se dissocie, é preciso que a diferença de energia entre o LUMO do aceitador e do doador seja menor que a energia de ligação do éxciton (0,1 a 1,4 V), fornecendo um caminho energeticamente favorável para que o elétron se transfira de um material para outro (do doador para o aceitador de elétron), separando as cargas, que seguem para os eletrodos (SCHARBER; SARICIFTCI, 2013). A Figura 5 ilustra simplificada o processo de formação do éxciton até a coleta das cargas pelos eletrodos.

No mecanismo de coleta de carga pelos eletrodos, é importante que as funções-trabalho do ânodo e do cátodo sejam semelhantes às energias do HOMO do doador e do LUMO do aceitador, respectivamente. A função-trabalho está relacionada com a barreira potencial que os portadores de carga devem superar para se libertarem de um material. Assim, ao se igualar as funções-trabalho, os portadores de carga terão mais facilidade em se deslocar por diferentes materiais. Se isso acontecer, os contatos são ditos ôhmicos (RAND; RICHTER, 2014). Caso a barreira energética seja alta, ocorrerá um acúmulo de carga na interface anterior aos eletrodos, prejudicando a transferência de cargas (SCHARBER; SARICIFTCI, 2013).

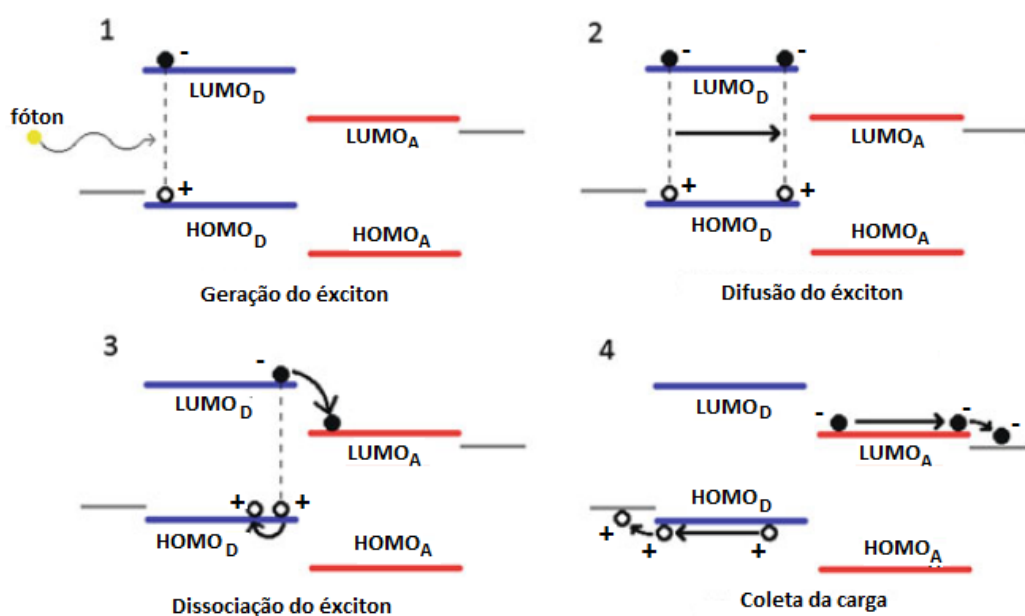
Quando se tem um contato ôhmico entre o ânodo e o cátodo, o V_{oc} está relacionado com a energia do gap (ELUMALAI; UDDIN, 2016). Scharber et al. (2006) encontraram empiricamente uma relação entre o V_{oc} e as energias do LUMO do aceitador e HOMO do doador,

estudando um grande número de materiais diferentes. A Equação 7 mostra essa relação empírica.

$$qV_{oc} = E_g - 0,3 \quad (7)$$

O valor 0,3 na Equação 7 representa as perdas que ainda não estão bem esclarecidas no meio científico (ELUMALAI; UDDIN, 2016).

Figura 5 – Processos do surgimento do éxciton, difusão do éxciton no material, dissociação do éxciton e coleta de cargas pelos eletrodos. Os subíndices D e A indicam material doador e aceitador de elétrons, respectivamente.



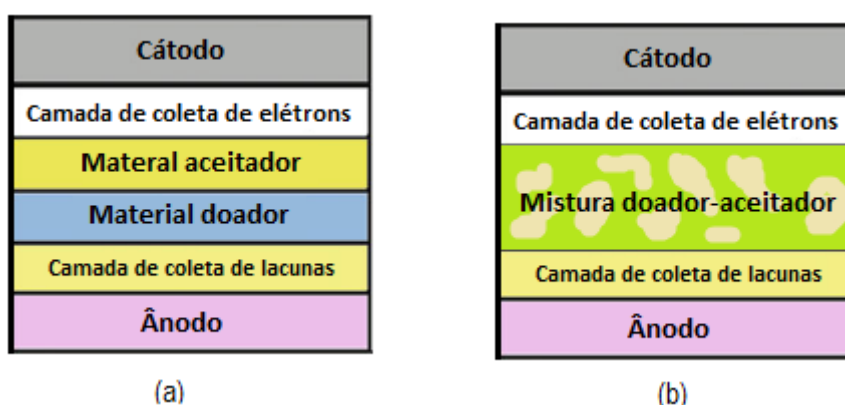
Fonte: Adaptada de Choy (2013).

Os materiais doador e aceitador de elétrons formam a camada ativa da célula orgânica, também chamada de heterojunção. Além disso, a camada ativa é comumente revestida por materiais que facilitem o deslocamento das cargas para os eletrodos. Por fim, em toda sua superfície, é colocado um envoltório transparente para preservar sua integridade física e proteger da umidade.

A primeira célula orgânica de heterojunção foi estruturada por Tang em 1986 na forma de duas camadas com interfaces bem delimitadas (TANG, 1987). Porém, o comprimento de difusão do éxciton, distância percorrida por ele ao longo da camada ativa, é muito baixo em materiais orgânicos, na ordem de dezenas de nanômetros, conferindo a ele um tempo de vida

muito curto, provocando bastante recombinações de éxcitons formados longe da interface doador-aceitador. No silício cristalino, esse valor é da ordem de micrômetros (GÜNES et al., 2007). Com isso, verificou-se que, para aumentar a eficiência de dissociação do éxciton, era preciso diminuir a espessura da camada ativa. Entretanto, essa diminuição também reduz a absorção de fótons. A forma encontrada para balancear esse ponto, foi a criação da heterojunção em volume, que consiste na mistura dos materiais doador e aceitador, fazendo com que a área de interação entre os materiais não esteja bem demarcada. Desse modo, foi possível desenvolver uma camada ativa com espessura de 100 a 200 nm, permitindo, de maneira simultânea, boas condições para absorção de fótons e dissociação de éxcitons (YU et al., 1995). A Figura 6 mostra uma célula orgânica de heterojunção de bicamada (6a) e em volume (6b).

Figura 6 – Heterojunção a) de bicamada e b) em volume.



Fonte: Adaptada de Choy (2013).

Um dos pontos principais que diferenciam as células OPV é a formação do éxciton com uma alta energia de ligação em relação às células inorgânicas. Por isso, outros mecanismos de recombinação passam a acontecer nas células OPV. Os principais processos de recombinação e seus impactos no funcionamento das células OPV ainda estão em debate no meio científico, porém pode-se classificá-los em dois tipos principais, geminada e bimolecular. A recombinação bimolecular abrange todos os processos que envolvem a recombinação elétrons e lacunas já dissociados do éxciton e é causada principalmente pela baixa mobilidade de carga dos semicondutores orgânicos e pela formação de armadilhas (*traps*) na camada ativa (SERVAITES et al., 2011; RAND; RICHTER, 2014). A recombinação geminada consiste no processo em que o par elétron-lacuna ainda em forma de éxciton relaxa e se recombina. Esse mecanismo vem sendo associado com a redução da fotocorrente e sua dependência com o

campo elétrico interno e, conseqüentemente, com a tensão aplicada na célula OPV (BLOM et al., 2007; MARSH et al., 2010).

Idealmente, a corrente fotogerada é constante. Seu valor é dado pela subtração da curva no escuro pela iluminada. Em células inorgânicas, essa consideração é bastante próxima da realidade, porém, nos dispositivos fotovoltaicos orgânicos isso não ocorre. Portanto, o deslocamento da curva no escuro pela soma de um valor constante de corrente não corresponde à curva iluminada da célula OPV, como é dado pela Equação de Shockley e obtido em dispositivos fotovoltaicos convencionais. Por isso, para uma melhor compreensão do funcionamento da célula orgânica, é importante o uso de outros modelos que endereçam adequadamente a corrente fotogerada.

2.2.2 Materiais utilizados

As células solares poliméricas alcançaram um maior espaço em relação às pequenas moléculas por apresentarem técnicas de processamento mais simplificadas e serem mais eficientes na dissociação de éxcitons (ABDULRAZZAQ et al., 2013).

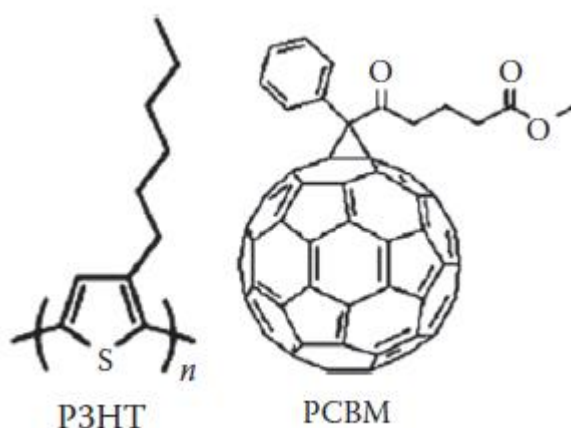
O fulereno (C_{60}) e seus derivados são os materiais que predominam como aceitador de elétrons. Sariciftci et al. (1992) descobriram o uso do C_{60} como um material com boa afinidade para elétrons, mostrando uma rápida dissociação de éxciton. Além disso, os fulerenos também possuem uma ótima condutibilidade, favorecendo o deslocamento dos elétrons até o cátodo, muitas vezes sem a necessidade de uma camada extra para coleta de elétrons. Para ser misturado ao doador, o fulereno é normalmente processado em solução, dissolvido em clorobenzeno (CB) ou diclorobenzeno (DCB) e acrescido de um éster, formando o éster metílico do ácido [6,6]-fenil- C_{61} -butírico ($PC_{60}BM$). Um outro derivado, o $PC_{70}BM$, também vem despertando interesse por possuir uma absorção maior no espectro do visível, porém seu processo de fabricação requer uma maior purificação, encarecendo-o. O valor da energia de LUMO dos materiais $PCBM$ são da ordem de -4,0 V e estudos vem sendo realizados para modificar a sua estrutura de modo a aumentar essa energia, como uma maneira de expandir também o V_{oc} (CHOY, 2013).

O poli(3-hexiltiofeno) (P3HT) é o polímero mais estudado atualmente como material doador de elétrons. Ele é uma classe do poli(3-alkiltiofeno) que apresenta uma alta

regioregularidade¹, apresentando valores de energia dos orbitais HOMO e LUMO de -5,2 e -3,2 V, respectivamente. Os motivos para a grande utilização desse material são suas propriedades de semicristalinidade, boa mobilidade de lacunas e estabilidade na formação da heterojunção. Além disso, pode-se conseguir com o P3HT um número de massa molar médio que melhore o deslocamento de cargas (CHOY, 2013).

A Figura 7 mostra a estrutura química do P3HT e PCBM, materiais mais utilizados na camada ativa do OPV.

Figura 7 – Estrutura química do P3HT e PCBM.



Fonte: Adaptada de Rand e Richter (2014).

Para atingir um contato ôhmico entre os eletrodos, as funções-trabalho deles devem estar relacionadas com a energia do HOMO do doador e LUMO do aceitador. O ânodo deve ter uma alta função-trabalho enquanto que o cátodo deve ter esse valor baixo. O óxido de índio-estanho (ITO) é utilizado normalmente como ânodo, porém, por sua função-trabalho ter valor por volta de -4,5 e -4,7 eV, que está entre os valores energéticos do HOMO e LUMO dos materiais mais utilizados, sua polaridade pode ser mudada para coletar tanto elétrons como lacunas. O ITO é bastante empregado como eletrodo transparente por suas propriedades elétricas e ópticas. Ele apresenta uma transmitância de mais de 90% da luz visível e uma resistência em folha bem baixa, próximo de 10 Ω/sq , quando tem uma espessura na ordem de 100 a 200 nm (QIAO, 2013). Entretanto, existem muitas desvantagens no uso do ITO. Uma delas é a escassez e a toxicidade do elemento índio, elevando o seu preço. Além disso, o ITO também possui baixa flexibilidade e custos de processamento alto, tornando-o o material mais

¹ Um polímero é regioregular quando suas unidades repetitivas derivam do mesmo isômero ou monômero.

caro na fabricação de células orgânicas atualmente. Todos esses problemas provocam o surgimento de pesquisas para a descoberta outros eletrodos transparentes, flexíveis e eficientes (INGANÄS, 2011).

Como cátodo, o alumínio (Al) vem sendo muito utilizado pois possui uma função-trabalho de -4,3 eV, valor próximo ao da energia de LUMO do PCBM, além de ser bastante acessível e abundante. Uma desvantagem do seu uso é a falta de estabilidade que ele causa por se difundir na camada ativa no processo de deposição, causando reações químicas indesejáveis. Para evitar isso, alguns materiais são colocados na interface, como o cálcio e o bário (CHOY, 2013). O subóxido de titânio (TiO_x) possui energias de condução e valência de -4,4 e -8,1 eV, respectivamente, e tem ganhado destaque como camada de deslocamento de elétrons (ETL, *Electron Transport Layer*) por conseguir uma boa transferência de elétrons e ser um bloqueador de lacunas. Outras propriedades interessantes do TiO_x são transparência, não-toxicidade, possibilidade de processamento em gel e bom bloqueio a oxigênio e umidade, servindo como proteção extra à camada ativa (KIM et al, 2016).

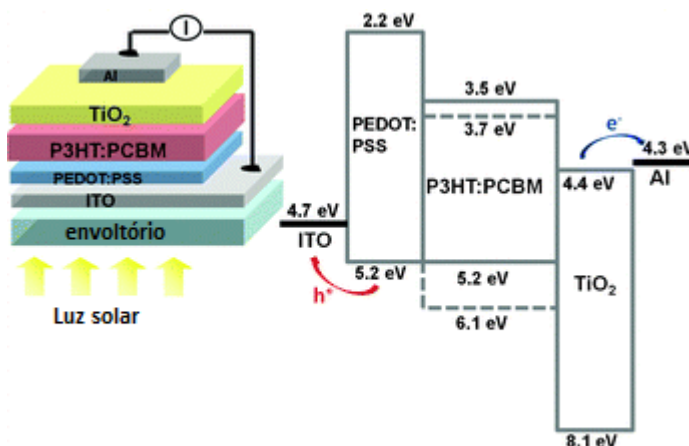
Entre a camada ativa e o ânodo, é comum existir mais uma interface para facilitar o deslocamento de lacunas (HTL, *Hole Transport Layer*) e aumentar a função-trabalho do eletrodo, melhorando a transferência de carga. O poli(3,4-etilenodioxítiofeno):poli(estireno sulfonado) (PEDOT:PSS) é o polímero mais usado para esse fim por apresentar boa propriedade elétrica e alta transparência para luz visível. Sua condutividade elétrica depende da razão entre PEDOT e PSS, para uma razão molar de PEDOT:PSS de 1:2,5, seu valor é 1 S/cm, enquanto que para 1:6, a condutividade cai para 10^{-3} S/cm (QIAO, 2013).

Como substrato para as células é comum utilizar o vidro ou um polímero plástico, como o polietileno tereftalato (PET).

A Figura 8 mostra as camadas de uma célula orgânica convencional e os valores de energia de HOMO e LUMO ou condução e valência associados a cada um dos níveis.

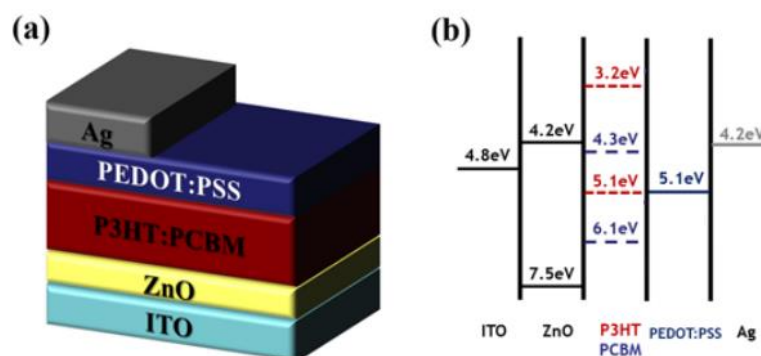
Uma nova configuração também vem sendo muito produzida: as células orgânicas invertidas, que utilizam o ITO como cátodo e a prata (Ag) como ânodo. Elas ganharam espaço devido a problemas de estabilidade relacionados com a degradação do ITO pelo PEDOT:PSS e por melhorar o processo de deposição de camadas na fabricação. O óxido de zinco (ZnO) é amplamente empregado como ETL quando o ITO atua como cátodo (RAND; RICHTER, 2014). Outros estudos mostram a substituição do PEDOT:PSS pelo trióxido de molibdênio (MoO_3) nesse arranjo invertido como uma boa alternativa, porém ela ainda não está muito difundida (KIM et al., 2016). A Figura 9 mostra o arranjo invertido de células orgânicas (a) e as energias de HOMO e LUMO de cada interface (b).

Figura 8 – Camadas de uma célula orgânica convencional e seus respectivos níveis energéticos.



Fonte: Adaptada de Kim et al (2016).

Figura 9 – a) Arranjo invertido de células orgânicas e b) energias de HOMO e LUMO de cada interface.



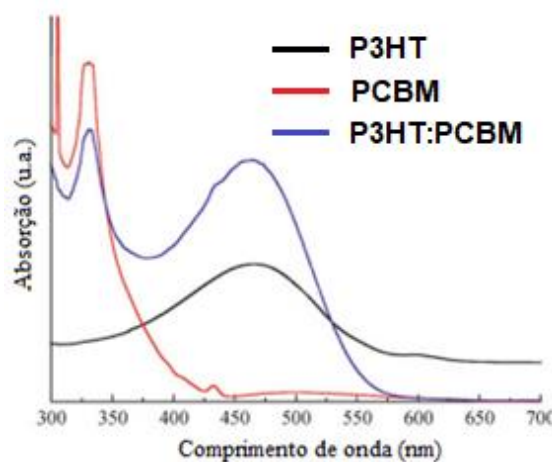
Fonte: Adaptada de Kim et al (2016).

Os semicondutores orgânicos possuem valores altos de coeficiente de absorção, na ordem de 10^5 cm^{-1} , que é cerca de 1000 vezes maior que a do silício inorgânico. Isso possibilita a produção de camadas ativas com espessuras muito finas, entre 50 e 200 nm, mas com uma boa eficiência de absorção de fótons (GÜNES et al, 2007). Apesar disso, uma das grandes barreiras no aumento da eficiência de geração de eletricidade é espectro de absorção limitado dos materiais da heterojunção. Tanto o P3HT como o PCBM não apresentam bons coeficientes de absorção na faixa do infravermelho, absorvendo apenas na faixa de 380 a 670 nm do espectro solar (YUE et al., 2011), como mostra a Figura 10, deixando de aproveitar um grande quantidade de energia.

Uma maneira de solucionar o problema de limitação do espectro de absorção é desenvolver uma camada ativa com menor energia do gap, fazendo com que fótons de menor

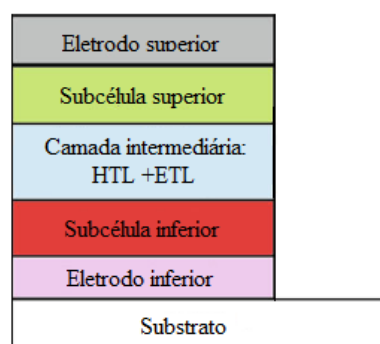
energia (na região do infravermelho) também sejam absorvidos. Porém, como a diminuição na energia do gap implica na redução do valor do V_{oc} e, conseqüentemente, da eficiência de conversão em potência. O que vem se fazendo, entretanto, é a combinação de duas camadas ativas, construindo uma célula OPV de multijunção ou tandem, mostrada na Figura 11. O desafio dessa configuração é conectar as subcélulas, que podem estar interligadas em série ou em paralelo, pois uma camada ativa pode limitar a tensão (ligação paralelo) ou corrente (ligação série) do sistema (AMERI; BRABEC, 2013).

Figura 10 – Espectro de absorção do P3HT, PCBM e P3HT:PCBM.



Fonte: Adaptada de Yue et al (2011)

Figura 11 – Estrutura de uma célula OPV tandem.



Fonte: Adaptada de Choy (2013).

2.2.3 Tempo de vida e degradação

As células orgânicas ainda não apresentam uma alta estabilidade como a dos materiais inorgânicos fotovoltaicos até o momento. Porém, por estar em desenvolvimento, ainda há uma

intensa busca por novos materiais e processos para aprimorar seu funcionamento. Um dos pontos mais importantes a ser estudado para a melhora do desempenho da tecnologia OPV é o tempo de vida.

A degradação do módulo OPV se dá por distintos mecanismos e altera bastante a sua performance ao longo do tempo, afetando os seus parâmetros elétricos. Um dos processos está relacionado com as propriedades químicas e é provocado pela exposição a vapor d'água e oxigênio, que causam a formação de uma camada isolante devido à oxidação das superfícies metálicas do eletrodo afetando também a camada ativa. Este fenômeno ocorre com módulo submetido a iluminação ou não, mesmo se ele não estiver em operação (TRESS, 2014). Uma forma de minimizar os efeitos da degradação química é um bom encapsulamento do módulo, para protegê-lo da oxidação. Além disso, é importante minimizar quantidade de oxigênio e vapor d'água durante o processo de fabricação, para que não haja contaminação no módulo. A degradação química também ocorre com a exposição à radiação ultravioleta (UV), que, por ser bastante energética, quebra de ligações moleculares, criando reações indesejadas entre as camadas da célula. Ainda, a luz UV intensifica a ação do oxigênio na oxidação de compostos orgânicos (JØRGENSEN et al., 2008). Para reduzir esse efeito, um filme de barreira é utilizado para envolver os módulos com o objetivo de protegê-los contra a radiação UV.

O efeito da degradação química pode ter efeito ainda mais pronunciado em células OPV que contenham o PEDOT:PSS, devido à natureza hidrofóbica do PSS, que tende a absorver a umidade do ar, provocando uma diminuição na condutividade da camada de transporte de lacunas e uma aceleração na oxidação do cátodo. Além do mais, sob incidência de luz, o PEDOT:PSS também reage com o material doador, degenerando a camada ativa (RAND; RICHTER, 2014).

A degradação física do módulo afeta a sua morfologia ao longo do tempo. Os materiais orgânicos podem se difundir espacialmente e mudar sua estrutura, principalmente sob o efeito de altas temperaturas, deteriorando o desempenho do módulo (JØRGENSEN et al., 2008).

2.2.4 Potencial das células orgânicas

As células solares podem ser divididas em 3 gerações. A primeira é a do silício cristalino, que é tecnologia que ainda domina grande parte do mercado de energia fotovoltaica, com mais de 80% de participação comercial, por apresentarem boas eficiências e serem estáveis. Porém, sua produção implica numa grande quantidade de energia e material, o que

encarece seu custo. Além disso, os módulos de silício cristalino são confeccionados em estruturas rígidas (LUQUE; HEGEDUS, 2003).

A segunda geração está relacionada com as primeiras tecnologias de filmes finos, como células de silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe) e cobre-índio-gálio-selênio (CIGS). Como vantagens, elas trouxeram um menor consumo de material e energia na fabricação, por utilizarem temperaturas mais baixas no seu processamento. Ainda, há a possibilidade de se obter boa flexibilidade nos seus módulos, ampliando as aplicações comerciais. Entretanto, problemas sérios de estabilidade afetam o seu desempenho (LUQUE; HEGEDUS, 2003).

As células OPV estão na terceira geração de tecnologia fotovoltaica e, em comparação com as outras duas, têm a mais baixa utilização de material e energia em seu processamento, com métodos de fabricação que permitem produção em larga escala, com diferentes formatos e áreas. O processo comumente utilizado para a fabricação é o rolo-a-rolo ou *roll-to-roll*, que usa técnicas de impressão a rolo para depositar as camadas em forma de solução em um substrato, controlando vários parâmetros como velocidade, temperatura e espessura das interfaces (KREBS et al, 2010). A Figura 12 mostra um exemplo de técnica *roll-to-roll*.

Figura 12 – Técnica rolo-a-rolo.



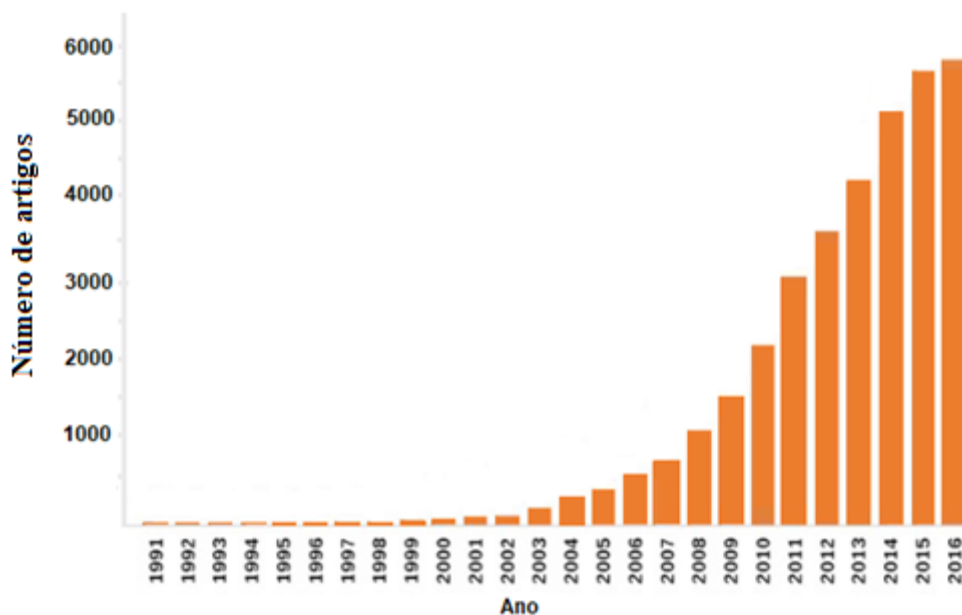
Fonte: Krebs et al (2010).

Outro importante ponto para as células OPV é a diversa quantidade de materiais e técnicas que podem ser usados, o que faz com que haja um grande número de estudos na área (XIAO et al., 2017). A Figura 13 mostra o aumento nas publicações científicas relacionadas a células solares poliméricas.

A extensa quantidade de estudos e o amplo potencial das células OPV em produção de baixo custo impulsionam a resolução dos entraves para a popularização da sua comercialização, que são a baixa eficiência e o curto tempo de vida. Apesar disso, pode-se observar na Figura 14 o crescimento acentuado em eficiência de conversão em potência das células orgânicas em

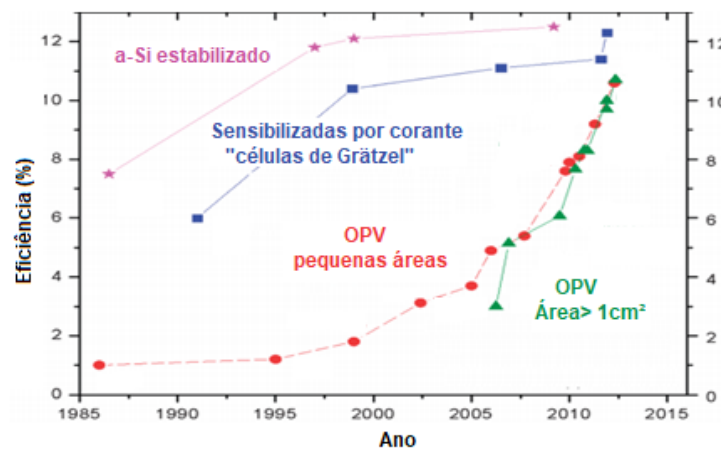
relação a outros filmes finos, ressaltando a enorme capacidade da tecnologia OPV de popularização.

Figura 13 – Número de artigos publicados relacionados a células OPV.



Fonte: Adaptada de Xiao et al. (2017).

Figura 14 – Eficiência de conversão em potência do OPV e outros filmes finos.



Fonte: Adaptado de orgworld.de.

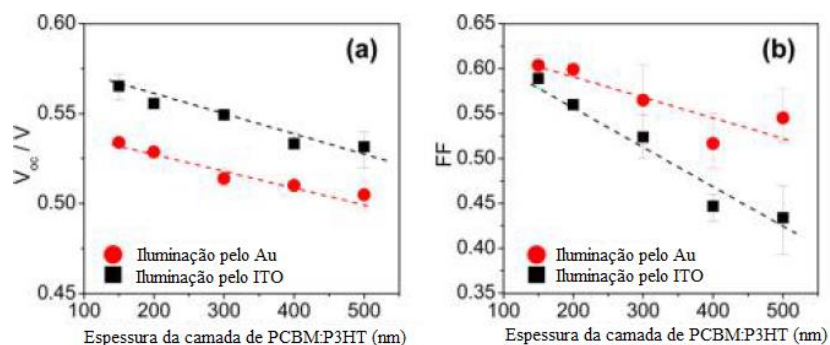
3 REVISÃO DE LITERATURA

A busca pelo aumento da eficiência de módulos fotovoltaicos orgânicos leva a pesquisas em diferentes áreas, sendo uma das mais importantes o aproveitamento da luz incidente. A semitransparência das células é um fator que pode aumentar suas aplicações, porém ela pode implicar numa restrição de absorção do espectro solar. Um outro ponto importante da semitransparência em módulos orgânicos é que ambos os seus lados podem gerar eletricidade, porém somente um é preferencialmente escolhido para essa função, subutilizando o outro. Diversas maneiras estão sendo estudadas de modo a usufruir dessa propriedade.

Dois estudos foram realizados por Kuwabara et al. (2014a) em relação à geração de eletricidade a partir de ambas superfícies do módulo. Em uma das análises, foram utilizadas células com estrutura ITO/ZnO/PCBM:P3HT/PEDOT:PSS/Au e área de 1 cm², variando os tipos de PEDOT e a área de cobertura do eletrodo Au. Encontrou-se que, quando aplicada iluminação traseira, a potência elétrica teve seu valor bastante reduzido em relação à incidência de luz pelo ITO, devido à diminuição de área ativa causada pela obstrução provocada pelo eletrodo de Au. Porém, os valores de eficiência foram semelhantes para iluminação frontal e traseira. Ainda, comparando as diferentes áreas de cobertura de Au, verificou-se, no caso das células estudadas, que a maior potência é obtida quando há de 15 a 25% de área ocupada pelo eletrodo.

Em outro estudo, Kuwabara et al. (2014b) analisaram células de mesma estrutura, porém com diferentes espessuras de camada ativa, variando-a entre 150 a 500 nm. Parâmetros como V_{oc} , FF e eficiência de conversão de fótons para corrente foram averiguados, aplicando-se iluminação a partir do ITO ou do Au. Em um de seus resultados, foi observado que, para todas as espessuras da camada ativa, o valor do FF foi mais alto iluminando a célula pelo eletrodo Au, apesar de se ter obtido um valor menor de V_{oc} , como mostra a Figura 15. Isso se deve ao fato de que, nesse sentido de incidência de luz, as lacunas têm um menor caminho a ser percorrido até chegar no PEDOT:PSS, diminuindo a probabilidade de recombinação. Além disso, diferentes efeitos de filtro óptico foram verificados dependendo do sentido da iluminação, fortalecendo a necessidade de um estudo mais profundo sobre as particularidades das formas de incidência de luz na célula.

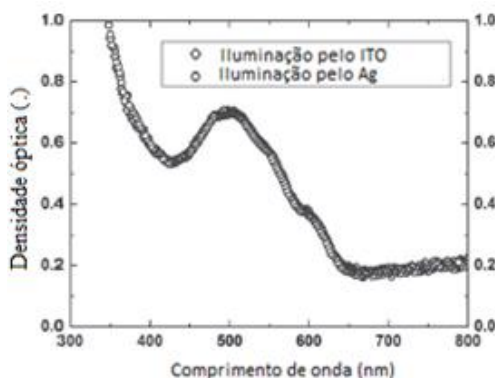
Figura 15 – Comportamento da a) tensão e b) fator de forma com a variação na espessura da camada ativa PCBM:P3HT com iluminação pelo Au e ITO.



Fonte: Adaptada de Kuwabara et al (2014b).

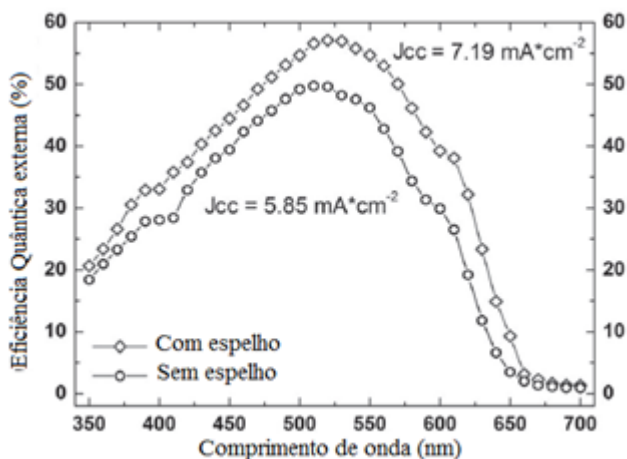
Em contrapartida, Krantz et al. (2013) não encontraram nenhuma diferença significativa nas propriedades ópticas entre a iluminação frontal e traseira de células de 10 mm² e 1 cm² constituídas também de ITO/ZnO dopado com Al/PCBM:P3HT/PEDOT:PSS/Ag, como mostra a Figura 16. Foram utilizados nanofios de prata de diferentes espessuras para aumentar a transparência da célula e foi constatado que o valor da densidade de corrente de curto circuito (J_{cc}) diminuía conforme a transparência aumentava, pois o próprio eletrodo de Ag funciona como uma superfície refletora e colabora com o aprisionamento da luz na célula, aumentando a absorção de fótons. Como um modo de reafirmar isso, foi utilizado um espelho externo e verificou-se que a densidade de corrente e a eficiência quântica aumentaram ao refletir de volta luz para célula, como pode se observar na Figura 17. Além disso, os parâmetros V_{oc} , FF, eficiência e J_{cc} apresentaram valores semelhantes comparando as duas formas de iluminação utilizando os nanofios como eletrodo.

Figura 16 – Densidade óptica de células de ITO/ZnO dopado com Al/PCBM:P3HT/PEDOT:PSS/Ag com 10 mm² e iluminação pelo Au e ITO.



Fonte: Adaptada de Krantz et al (2013).

Figura 17 – Eficiência quântica externa com o comprimento de onda de células de ITO/ZnO dopado com Al/PCBM:P3HT/PEDOT:PSS/Ag com e sem o uso de espelho no eletrodo de Ag.



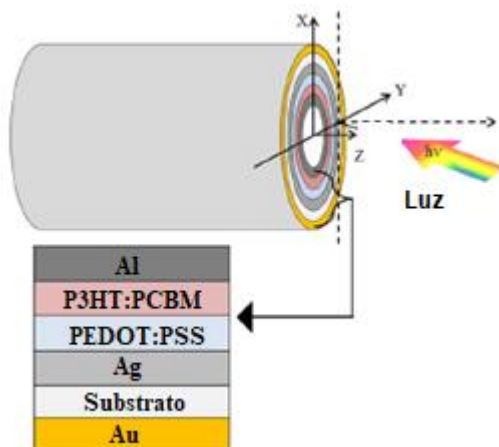
Fonte: Adaptada de Krantz et al (2013).

Lin et al. (2012) atingiram melhoras na eficiência entre 15 a 65% em células de 2-{[7-(5-N,N-ditolylaminotiofeno-2-yl)-2,1,3-benzotiadiazol-4-yl]metileno}malononitrilo (DTDCTB) e fulerenos (C_{60} e C_{70}) como camada ativa, através do uso de espelhos acoplados no cátodo ou ânodo e iluminação frontal ou traseira. Como eletrodos, foram utilizados o ITO como ânodo e Ag como cátodo, e, em ambos, foi adicionado MoO_3 . Foi observado também um aumento na densidade de corrente de curto circuito e na tensão de circuito aberto quando foram utilizados os espelhos, atingindo um valor máximo de 3,71% de eficiência com o uso de C_{70} como fulereno, iluminação traseira e espelho no cátodo (um ganho de aproximadamente 15% em comparação a não utilização de espelho). Um ganho de mais 65% em eficiência foi obtido devido a reflexão do espelho para células com C_{60} , iluminação frontal e espelho no ânodo, passando de 1,08 a 1,81% de eficiência. Além disso, foi realizado um estudo óptico da transmitância das camadas da célula e da espessura dos eletrodos para analisar seus efeitos na transparência e eficiência. Esses resultados, porém, foram obtidos com células de área de 5 mm², com uma espessura da camada ativa muito fina (na ordem de dezenas de nanômetros) e desenvolvidas em laboratório com técnicas mais restritivas, como deposição à vácuo.

Um outro design de módulos orgânicos foi proposto por Yambem et al. (2012), que desenvolveram uma estrutura orientada verticalmente em formato cilíndrico, em que cada camada do módulo fosse depositada de forma anelar, como mostra a Figura 18. A célula era formada por P3HT:PCBM como camada ativa, com eletrodos de Al (parte central do cilindro) e Au com uma superfície refletora (anel mais externo do cilindro). A densidade de corrente de curto-circuito foi medida para vários ângulos de incidência da luz e comparada com a de um

módulo planar. Foram obtidos valores mais altos de J_{cc} com o design cilíndrico, devido à superfície refletora acoplada no Au, que promove mais caminhos para a luz atravessar a camada ativa e ser absorvida.

Figura 18 – Design do módulo OPV orientado verticalmente em formato cilíndrico proposto por Yambem et al.



Fonte: Adaptada de Yambem et al (2014).

O impacto nas características elétricas da colocação de camadas de cristais de fotônicos² refletores no eletrodo de Ag numa célula de poli[N-9"-heptadecanol-2,7-carbazole-alt-5,5-(4',7'-di-2-tienil-2',1',3'-benzotiadiazol)] (PCDTB):PC₇₀BM com 0,064 cm² foi analisado por Yu et al. (2013). Foram comparadas células com 0 a 8 camadas de WO₃ (óxido de tungstênio):Ag:WO₃, que funcionam como superfície refletora. A maior quantidade de camadas proporcionou uma maior absorção, por aprisionar a luz. Outro ponto analisado foi como o ângulo de incidência afeta na eficiência de conversão de fótons em corrente e em J_{cc} . Foram encontrados menores valores de densidade de corrente à medida que o ângulo de incidência aumentava e diferentes curvas de eficiência de conversão de fótons em corrente com comprimento de onda para cada valor de ângulo de incidência foram traçadas, mostrando a dependência do ângulo de incidência nas propriedades ópticas dos cristais de WO₃.

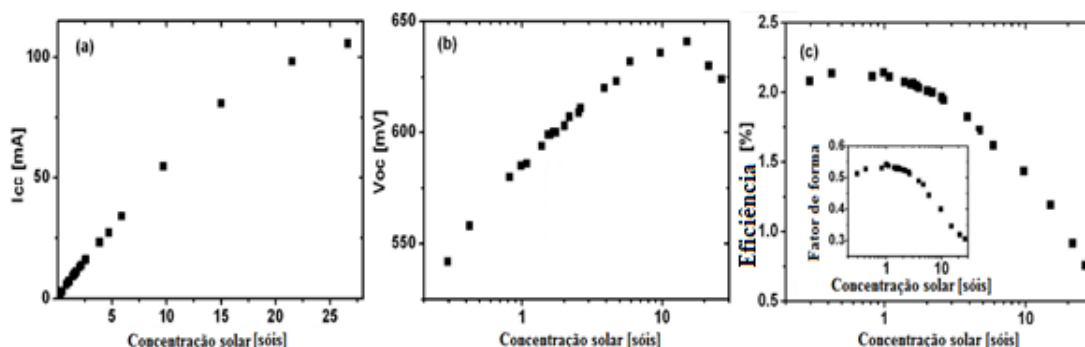
Em relação à iluminação das faces, Bouthinon et al. (2018) encontraram diferenças na eficiência quântica externa quando a luz incidia na parte frontal e traseira de células de PET/Ag/PEDOT:PSS/PBDTTT:PCBM/ETL/ITO/PET com diferentes espessuras de camada ativa (350 a 850 nm). Esse resultado foi justificado por reações fotoinduzidas com oxigênio

² Cristais fotônicos são nanomateriais capazes de manipular a luz devido ao seu padrão estrutural periódico.

contaminante na célula, formando armadilhas (*traps*), aumentando a recombinação, principalmente quando a célula é iluminada no verso (no sentido do PEDOT:PSS). Esse estudo mostra que há outros fenômenos físicos, além da óptica, que provocam discrepâncias entre as gerações com iluminação frontal ou traseira.

Além de superfícies refletoras, uma outra maneira de modificar a forma como a luz incide no módulo é através da concentração solar, podendo ou não aumentar a irradiância recebida pelas células solares. Tromholt et al. (2010) estudaram os efeitos da concentração solar em células de 1 cm² de estrutura ITO/ZnO/PCBM:P3HT/PEDOT:PSS/Ag. Utilizando uma fibra óptica ou um minidisco solar, variando a concentração solar de 0,2 a 27 sóis, as características do OPV foram analisadas. A Figura 19 mostra o comportamento de V_{oc} , I_{cc} , eficiência e fator de forma com a concentração. Foi observado que, até 10 sóis, I_{cc} apresenta uma relação linear com a concentração e V_{oc} possui uma dependência logarítmica. Após esse valor, o V_{oc} começa a decair devido ao aumento de temperatura. Além disso, há um pequeno crescimento nos valores de eficiência e no fator de forma até 0,5 sol e eles se mantiveram constantes numa concentração entre 0,5 e 2,5 sóis, em que, logo em sequência, começaram a decrescer significativamente por causa das perdas ôhmicas devido ao aumento da corrente.

Figura 19 – Comportamento dos parâmetros a) I_{cc} , b) V_{oc} , c) Eficiência e fator de forma com a concentração solar.



Fonte: Adaptada de Tromholt et al (2010).

Em um outro estudo, Tromholt et al. (2011) mostraram que, ao ser exposta a altas concentrações (maior que 50 sóis), as células de mesma estrutura da análise anterior apresentaram uma alta degradação em relação ao seu desempenho inicial a 1 sol, porém, ao ser submetida a um período de descanso no escuro, elas possuem a capacidade de se recuperar quase completamente. Ressaltando que a análise da degradação por concentração solar deve ser mais estudada.

Pode-se notar que a análise do aproveitamento da semitransparência do OPV se deu com o uso de superfícies refletoras muitas vezes acopladas no próprio eletrodo na produção da própria célula. Porém, muitos dos métodos utilizados para a fabricação são de alto custo e aplicáveis somente ao desenvolvimento de células de áreas muito pequenas (na ordem de milímetros quadrados).

No presente trabalho, são utilizados módulos voltados a uso comercial fabricados utilizando o método mais simplificado, o *roll-to-roll*, possuindo uma área maior que 70 cm², o que implica numa diminuição de performance em relação aos fabricados em laboratório. Os módulos utilizados têm estrutura das células comerciais mais comuns, ITO/ETL/PCBM:P3HT/PEDOT:PSS/Ag, e as propriedades de um deles em condições reais de radiação solar de ambos os lados já foram estudadas por Cardozo (2017), que mostrou que a iluminação pelo lado traseiro do módulo fornece uma eficiência de 1,44% e uma potência máxima de 11,6 mW (com irradiância de 1115,8 W/m²), enquanto que, por incidência frontal, esses valores são de 2,14% e 16,7 mW (com irradiância de 1086 W/m²). Isso mostra a possibilidade de um ganho de aproximadamente 70% em energia produzida pelo mesmo módulo sob o mesmo estado de iluminação.

A Tabela 1 mostra a estrutura, a área das células OPV e o tipo de refletor dos trabalhos mencionados que aproveitaram ambos os lados da célula através da utilização de dispositivos refletores.

Tabela 1 – Estrutura e área das células OPV e o tipo de refletor dos trabalhos mencionados.

Autores	Estrutura	Área	Refletor
Krantz et al.	ITO/ ZnO+Al/ P3HT:PCBM/ PEDOT:PSS/	10 mm ² e	Eletrodo
	Ag	1cm ²	Ag
Lin et al.	ITO/ MoO ₃ / DTDCTB:Fulereo/ Fulereo/	5 mm ²	Espelho
	Batofenantrolina(Bphen)/ Ag/ MoO ₃		
Yambem et al.	Al/ P3HT:PCBM/ PEDOT:PSS/ Ag/	-	Au
	Polietileno naftalato (PEN)/ Au		
Yu et al	ITO/ TiO ₂ / PCDTBT:PC70BM/ WO ₃ / Ag/	0,064 cm ²	Cristais
	WO ₃ / Fluoreto de lítio (LiF)		fotônicos WO ₃

Fonte: própria.

A proposta do presente trabalho é aproveitar a semitransparência de módulos OPV comerciais para aumentar a geração de energia elétrica, iluminando simultaneamente ambos os

lados através do dispositivo óptico de cavidade em V. Diferentemente dos estudos mencionados, que utilizaram superfícies refletoras que reaproveitavam a luz que incide por um lado após ela ter passado por todas as camadas da célula solar, o que implica que uma grande quantidade de fótons já foi absorvida ou bloqueada, o que se propõe aqui é que as duas faces sejam submetidas à radiação solar ao mesmo tempo, recebendo o espectro solar sem que haja interferência uma na outra, utilizando uma concentração solar baixa.

Propõe-se utilizar uma configuração óptica do tipo *V-trough* e analisar as características elétricas e ópticas dos módulos OPV para aprofundar o conhecimento sobre a geração de corrente no efeito fotovoltaico em células orgânicas a partir da condição de iluminação simultânea. Aumentar a eficiência dos módulos OPV é uma questão crucial para o seu crescimento e consolidação no mercado da energia solar e isso pode ser alcançado fazendo o uso de uma área ativa subutilizada para aumentar a sua produção de eletricidade.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Diferente da maioria dos estudos de diferença no sentido da iluminação em células OPV mostrados na Seção 3 (LIN et al, 2012; YAMBEM et al, 2012; KRANTZ et al, 2013; YU et al., 2013; KUWABARA et al., 2014a; KUWABARA et al., 2014b; BOUTHINON et al., 2018), os ensaios realizados neste trabalho foram outdoor, ou seja, em condições naturais de iluminação. Os experimentos foram feitos no laboratório do Grupo de Fontes Alternativas de Energia (FAE) da UFPE, localizado na cidade do Recife (Pernambuco), com latitude de 08° 03' 14" sul e longitude de 34° 52' 52" oeste. Os equipamentos utilizados juntamente com suas precisões e erros de medição são mostrados na Tabela 1-AA do Anexo A.

Os experimentos realizados têm como objetivo analisar as características de geração de eletricidade nas duas faces do módulo orgânico, investigando os fatores que afetem a sua eficiência de conversão em potência, como diferentes condições de iluminação e temperatura. Ainda, foram analisados os efeitos das dimensões do módulo na geração de energia. Além do mais, um estudo óptico foi realizado para entender as interações da luz com as diferentes camadas do OPV.

A observação conjunta de parâmetros elétricos e ópticos das células OPV permitem um entendimento mais profundo sobre o fenômeno de geração de eletricidade.

4.1 Origem e características dos módulos

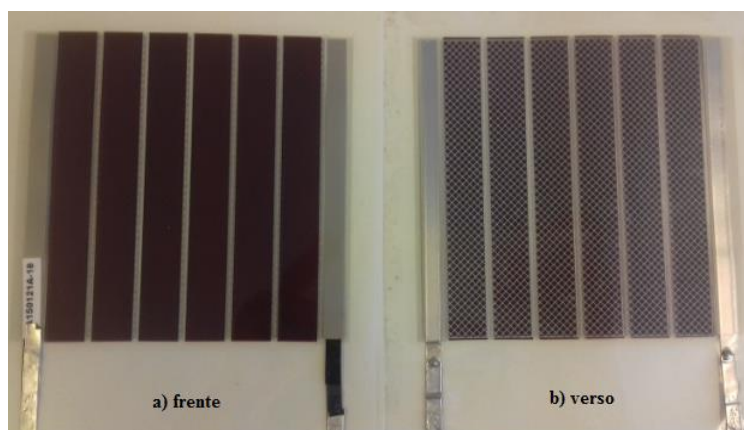
No total, serão estudados dois diferentes módulos fotovoltaicos orgânicos comerciais. Eles têm estrutura invertida PET/IMI (ITO+Metal+ITO)/ETL/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag. A característica que os distinguem é o tamanho. Por motivos de sigilo industrial, não há informações sobre o material que compõe o ETL (camada de transporte de elétrons). Os módulos são compostos por 6 células em série de mesma largura porém diferente comprimento. A Tabela 2 mostra as dimensões e a área ativa dos módulos em estudo. As Figuras 20 e 21 mostram os 2 módulos utilizados nos experimentos.

Tabela 2 – Dimensões dos módulos em estudo.

Módulo	Dimensões	Área ativa	Área da célula
1	10 x 10 cm	72 cm ²	12 cm ²
2	10 x 30 cm	288 cm ²	48 cm ²

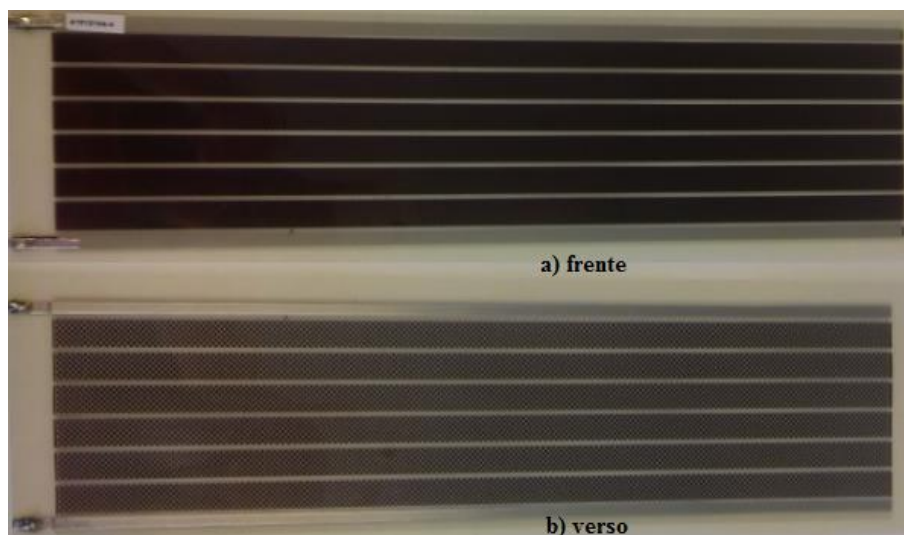
Fonte: própria.

Figura 20 – Módulo 1 (P3HT) a) frente e b) verso.



Fonte: própria.

Figura 21 – Módulo 2 (P3HT) a) frente e b) verso.



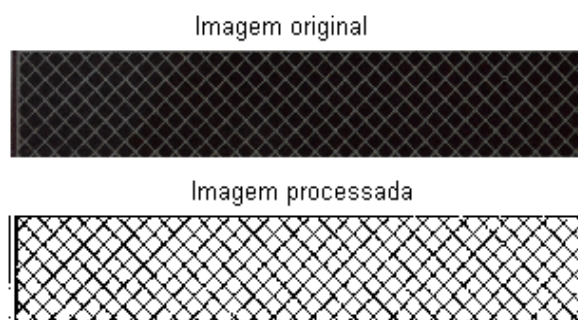
Fonte: própria.

4.1.1 Área Gradeada

Grande parte dos experimentos foi efetuada em ambos os lados do módulo. Para analisar as perdas reais causadas pela grade no lado inverso do módulo, é preciso saber com exatidão a área coberta pelo eletrodo de prata.

Foi obtida uma imagem do lado inverso do módulo através de uma fotografia e ela foi processada aplicando-se um filtro Sobel, separando-se os pixels de maior e menor brilho. Desse modo, foi possível calcular a área gradeada do lado inverso do módulo. A Figura 22 mostra as imagens fotografada e processada de uma célula.

Figura 22 – Imagens fotografada e processada de uma célula gradeada do módulo.



Fonte: própria.

4.2 Curvas características

A curva característica mostra a relação entre tensão e corrente de saída do módulo fotovoltaico. Ela é descrita habitualmente pela Equação de Shockley. Como ela é dependente da temperatura e irradiância, mudanças nessas duas variáveis irão acarretar em diferentes curvas. Portanto, para extrair uma boa curva característica, é necessário que a temperatura e a irradiância se mantenham praticamente constantes durante o processo.

Para facilitar a execução dos experimentos, os módulos foram colocados em molduras de PVC com conectores elétricos, onde foram soldados os terminais dos módulos. Essa estrutura é, então, colocada em um aparato metálico para garantir que o módulo permanecesse fixo. A Figura 23 mostra a configuração do ensaio.

Figura 23 – Configuração do experimento.



Fonte: Cardozo (2017).

Utilizou-se uma fonte de tensão bipolar KEPCO, mostrada a Figura 24, para traçar as curvas I-V. Com o módulo conectado à fonte, a voltagem é alterada de modo que a tensão do

módulo variasse de zero até a voltagem de circuito aberto (e, ao mesmo tempo, a corrente variasse de I_{sc} até zero), sempre que a irradiância e temperatura se mantiveram constantes.

Figura 24 – Fonte de tensão bipolar KEPCO utilizada nos experimentos.



Fonte: própria.

As variáveis ambientais também foram monitoradas e medidas. Um piranômetro da marca LI-COR foi utilizado para medir a irradiância global e mantido no mesmo plano do módulo, sensores de temperatura LM35 mediram as temperaturas do módulo e ambiente. O sensor de temperatura ficou posicionado na parte central do módulo. Além disso, também foram obtidos dados de radiação direta e difusa.

Todos os dados são armazenados no datalogger Campbell, mostrado na Figura 25, e posteriormente coletados para análise.

Figura 25 – Datalogger Campbell utilizado para o armazenamento de dados.



Fonte: própria.

A partir da curva característica, pôde-se encontrar os parâmetros principais de um módulo fotovoltaico. Os valores de V_{oc} e I_{cc} foram tirados exatamente da curva, nos pontos que mais aproximam de $I=0$ e $V=0$, respectivamente. As grandezas V_{mp} , I_{mp} e P_{max} foram obtidas

através de um ajuste polinomial da curva de potência por tensão com o intuito de minimizar os erros das medidas com pequenas variações na irradiância.

4.3 Curvas no escuro e corrente fotogerada

Algumas das características da célula fotovoltaica podem ser analisadas ao se estudar sua curva no escuro, ou seja, quando não há iluminação e, conseqüentemente, nem geração de corrente. Nessa condição, a célula fotovoltaica funciona como uma carga e pode-se, então, verificar as características do semicondutor de sua origem, como fator de idealidade do diodo e corrente de saturação.

Para a obtenção das curvas no escuro, o módulo foi totalmente coberto de forma que não houve nenhuma iluminação sobre ele. A fonte de tensão KEPCO foi utilizada para injetar corrente no módulo e, manualmente, foram tiradas medidas de tensão e corrente nos terminais do módulo. As medidas foram realizadas através de dois multímetros conectados em série e em paralelo com o módulo para obter valores de corrente e tensão, respectivamente.

As curvas no escuro foram obtidas com o módulo em temperatura ambiente e também submetido a aquecimento. Para elevar sua temperatura, um soprador térmico de ar foi utilizado para alcançar temperaturas em torno de 50°C.

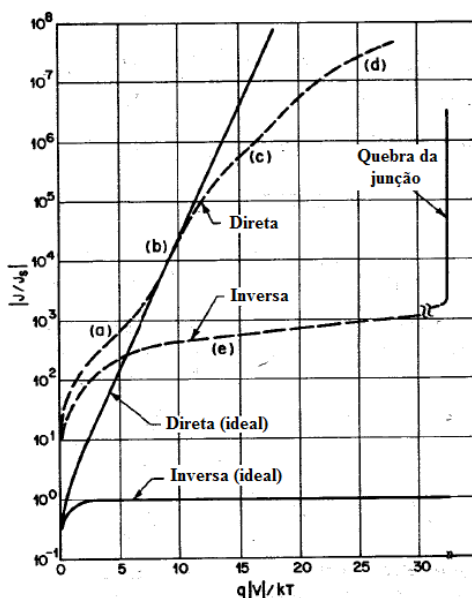
A curva no escuro de um diodo real apresenta as regiões que estão relacionadas aos fenômenos de recombinação, de corrente de difusão, de alta injeção, do efeito da resistência em série e dos defeitos na superfície (SZE, 1981), que não existem num diodo ideal, como pode ser visto na Figura 26. O coeficiente de idealidade do diodo está relacionado principalmente com a região de recombinação, porém podem existir mais de um coeficiente associado a outras regiões para uma mesma célula (modelo de dois diodos) (YORDANOV et al, 2010).

Como não há geração de corrente e considerando que a resistência em série tem valor muito pequeno e a shunt muito alto, pôde-se obter, a partir da Equação de Shockley, uma aproximação para os cálculos do fator de idealidade local e da corrente de saturação, mostrados nas Equações 8 e 9, respectivamente.

$$m_{local} = \frac{1}{\left(\frac{d \ln I}{dV}\right)} \cdot \frac{1}{V_t} \quad (8)$$

$$I = I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \quad (9)$$

Figura 26 – Curvas ideal e real de um diodo e as regiões onde prevalecem os fenômenos de recombinação (a), de corrente de difusão (b), de alta injeção (c), do efeito da resistência em série (d) e dos defeitos na superfície (e).



Fonte: Adaptada de Sze (1981).

Para a obtenção do coeficiente de idealidade do diodo, traçou-se uma curva do logaritmo natural da corrente em função da tensão e a ajustou a um polinômio. Ao calcular a derivada polinomial da equação de ajuste, é possível obter o valor local do fator de idealidade através da expressão mostrada na Equação 8. Os pontos de inflexão da curva da derivada do polinômio de ajuste representam as regiões associadas com o coeficiente de idealidade. Então, utilizando esses pontos na Equação 8, pôde-se obter os coeficientes de idealidade do diodo.

A corrente de saturação foi obtida fazendo um ajuste exponencial da curva I-V no escuro, como mostra a Equação 9.

Subtraindo a curva característica da curva no escuro, obtém-se a corrente fotogerada. Diferentemente do que ocorre na célula fotovoltaica convencional, foi observado que, para a tecnologia OPV, a soma da curva no escuro com um valor constante de corrente fotogerada (aproximadamente o valor de I_{cc}) não resulta na curva I-V. Isso se deve a uma forte dependência do valor da corrente fotogerada com a tensão. A relação entre a corrente fotogerada e a tensão está associada com a distância que os portadores de carga percorrem no campo elétrico interno (comprimento de deriva), que é menor ou está na mesma ordem de grandeza que a espessura

da camada ativa. Essa distância é dada pelo produto do tempo de vida (τ_{vida}) do portador de carga e sua mobilidade (μ) (TRESS, 2014).

A densidade de fotocorrente J_{foto} foi modelada de acordo com a Equação de Hecht , mostrada na Equação 10, derivada para descrever a fotocorrente em cristais isolantes.

$$J_{foto} = \frac{2qG\mu\tau_{vida}(V_{bi} - V)}{L} \left(1 - e^{-\frac{L^2}{2\mu\tau_{vida}(V_{bi}-V)}} \right) \quad (10)$$

Onde:

$$G = \frac{J_{cc}}{qL}$$

Onde q é a carga elementar, L é a espessura da camada ativa e V_{bi} é a tensão de circuito aberto por célula.

A partir desse ajuste, foi possível obter uma estimativa sobre o valor do produto τ_{vida} por μ .

4.4 Funcionamento em tensão fixa

O módulo Tipo 1 foi submetido a uma análise de produção diária de energia em ambas as faces através do experimento em tensão fixa. O objetivo desse ensaio é simular o funcionamento contínua em condições reais de operação, comparando a produção de energia dos diferentes módulos em ambas as faces.

Por não possuir um seguidor de máxima potência (MPPT) para pequenos dispositivos, Cardozo (2017) verificou a voltagem de potência máxima média do módulo Tipo 1 pelas suas curvas características e, utilizando a fonte KEPCO, propôs-se fixar o valor de 2,5 V como a tensão de operação. Deve-se notar que o valor de V_{mp} varia com a irradiância e temperatura e, neste experimento, e 2,5 V representa seu valor médio.

Nesses ensaios, o módulo foi deixado ao ar livre na estrutura da Figura 23 por 2 dias (por cada face) e foram coletados dados com frequência de 1 minuto pelo datalogger Campbell.

A produção total de energia, E_{tot} , pôde ser calculada a partir da Equação 11.

$$E_{tot} = \Delta t \cdot \sum_{n=1}^{2880} P_{inst,n} \quad (11)$$

Onde $P_{inst,n}$ é a potência fornecida pelo módulo no minuto n , Δt é o intervalo de tempo no qual são realizadas as medidas de potência e 2880 é a quantidade de dados minutais coletados em 2 dias de experimento.

A partir da energia total produzida e radiação recebida durante os dois dias de funcionamento, calculou-se também a eficiência média de operação do módulo em tensão fixa (η_{tf}), demonstrada pela Equação 12.

$$\eta_{tf} = \frac{E_{tot}}{H_{tot}} \quad (12)$$

Onde H_{tot} é a radiação total recebida no módulo em 2 dias de operação.

A eficiência média de operação em tensão fixa apresentará um valor menor em relação a eficiência de conversão em potência máxima (Equação 6) por seu valor não corresponder sempre ao de V_{mp} . O valor fixo de tensão muitas vezes pode subestimar a potência máxima que poderia ser gerada pelo módulo.

4.5 Modelagem e extração de parâmetros

A equação de Shockley é amplamente utilizada para modelar a relação entre tensão e corrente na curva característica de células orgânicas. Porém, por ela ser uma equação recursiva, para extrair parâmetros através dessa expressão, são necessários processos iterativos de resolução.

Neste trabalho, foi seguido o procedimento utilizado por Jain e Kapoor (2005), que empregou a função de W Lambert, com o objetivo explicitar o valor da corrente na Equação de Shockley, facilitando a resolução.

A Equação 13 mostra o princípio da função W de Lambert (CUBAS et al., 2014).

$$X = Y \cdot e^Y \Leftrightarrow Y = W(X) \quad (13)$$

Pode-se modelar a equação de Shockley para a curva característica através da Equação 14, explicitando o valor da corrente.

$$I = \frac{-V + \left(-W_{-1} \left(\frac{R_S I_0 R_{sh} e^{\frac{R_{sh}(R_S I_L + R_S I_0 + V)}{m V_T (R_S + R_{sh})}}}{m R_S V_T + m R_{sh} V_T} \right) + \frac{R_{sh}(R_S I_L + R_S I_0 + V)}{m V_T (R_S + R_{sh})} \right) V_T}{R_S} \quad (14)$$

A corrente fotogerada I_L é obtida como mostra a Equação 15.

$$I_L = \frac{R_{sh} + R_S}{R_{sh}} I_{cc} \quad (15)$$

Com a simplificação obtida por meio da função de Lambert, foi então realizado um ajuste não linear da curva característica à Equação 14 com base no método dos mínimos quadrados, em que foram obtidos os valores das resistências R_s , R_{sh} , do coeficiente de idealidade do diodo m e da corrente de saturação reversa I_0 . Essa operação foi feita utilizando o software matemático MATLAB 2016.

Os parâmetros I_{cc} e tensão térmica V_T foram obtidos a partir dos dados próprias curvas características.

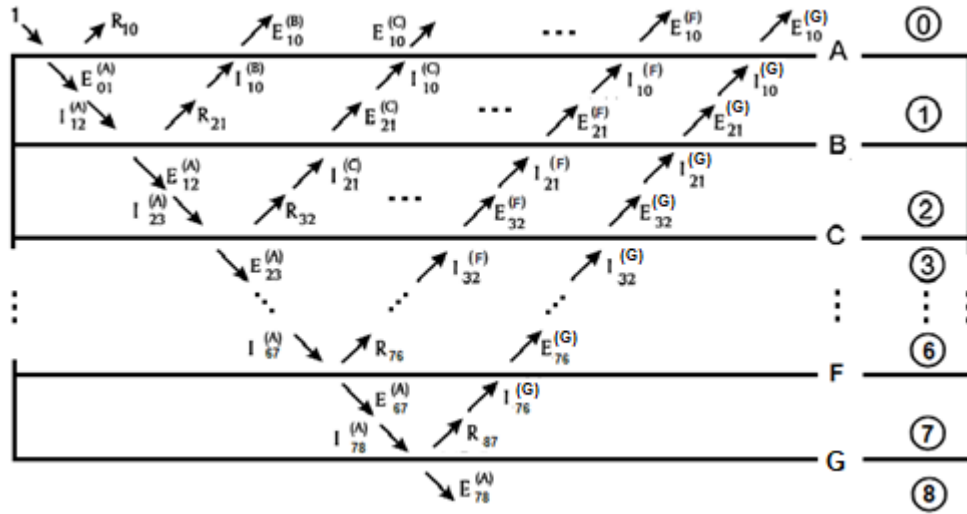
4.6 Experimentos ópticos

4.6.1 Modelo óptico analítico

Para uma melhor compreensão do caminho óptico percorrido pela luz ao entrar na célula OPV, foi elaborado um modelo óptico para analisar a interação da radiação nas diferentes camadas do módulo. O método proposto por Fraidenraich e Vilela (2000) foi utilizado neste estudo para calcular, para cada camada do módulo, a quantidade de energia absorvida e transmitida. Eles desenvolveram uma metodologia que se baseia no balanço de energia dos componentes incidente, refletido e transmitido do fluxo de radiação nas interfaces, estabelecendo relações entre eles através das propriedades ópticas de cada camada.

A partir da conservação de energia em cada interface, cria-se um conjunto de equações que tem como variáveis a energia transmitida em cada interface no sentido inicial de propagação da luz. A Figura 27 mostra o fluxo da radiação considerando uma célula com 7 camadas. As letras I , E e R designam os componentes incidente, transmitido e refletido da luz, respectivamente.

Figura 27 – Fluxo da radiação em uma célula de 7 camadas.



Fonte: Adaptada de Fraidenraich e Vilela (2000).

O sobrescrito contém a letra referente à interface de origem do fluxo e os subscritos numéricos indicam o sentido da luz. A variável I_{21}^C se refere à luz incidente proveniente da interface C na direção da camada 2 para 1, por exemplo. A Equação 16 mostra um exemplo da aplicação do balanço de energia na interface F.

$$I_{67}^A + I_{76}^G - R_{76} - E_{67}^A - E_{76}^G = 0 \quad (16)$$

As propriedades ópticas de cada camada são aplicadas a fim de simplificar as equações geradas. As componentes refletida e transmitida estão relacionadas com a incidente através do coeficiente de reflexão de cada interface; enquanto que a componente incidente está associada com a transmitida da interface anterior através do coeficiente de transmitância do meio entre as interfaces. As Equações 17 a 20 exemplificam as relações ópticas entre as componentes da luz para a interface F.

$$I_{67}^A = \tau_6 * E_{56}^A \quad (17)$$

$$R_{76} = r_F * I_{67}^A = r_F * \tau_6 * E_{56}^A \quad (18)$$

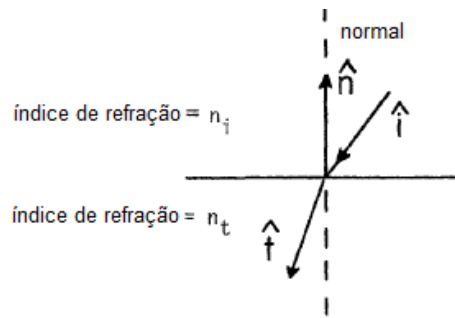
$$I_{76}^G = \tau_7 * R_{87} = \tau_7 * r_G * I_{78}^A = \tau_7 * r_G * \tau_7 * E_{67}^A = \tau_7^2 * r_G * E_{67}^A \quad (19)$$

$$E_{76}^G = (1 - r_F) * I_{76}^G = (1 - r_F) * \tau_7^2 * r_G * E_{67}^A \quad (20)$$

Onde τ_6 e τ_7 são a transmitância das camadas 6 e 7 e r_F e r_G são os coeficientes de reflexão das interfaces F e G, respectivamente.

As propriedades ópticas dos materiais foram calculadas a partir dos seus índices de refração e coeficientes de extinção. As Equações 21 a 28 mostram como foram calculados os coeficientes de reflexão e transmitância das camadas com base na Figura 28 (RABL, 1985).

Figura 28 – Feixe de luz incidindo numa superfície.



Fonte: Adaptada de Rabl (1985).

Aplicando a Lei de Snell na superfície, tem-se:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (21)$$

Onde θ é o ângulo do raio com a normal à superfície e os subscritos i e t se referem aos raios incidente e transmitido, respectivamente.

Os componentes paralelos e perpendiculares da reflexão, $r_{\parallel}$ e $r_{\perp}$, respectivamente podem ser calculados, para $\theta_i \neq 0$:

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_t - \theta_i)}{\tan^2(\theta_t + \theta_i)} \quad (22)$$

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_t - \theta_i)}{\sin^2(\theta_t + \theta_i)} \quad (23)$$

Por fim, o coeficiente de reflexão r da superfície é:

$$r = \frac{1}{2}(r_{\parallel} + r_{\perp}) \quad (24)$$

Para $\theta_i = 0$, faz-se diretamente:

$$r = \left(\frac{\frac{n_t}{n_i} - 1}{\frac{n_t}{n_i} + 1} \right)^2 \quad (25)$$

Para obter a transmitância do meio, foi calculado o coeficiente de absorção α utilizando o coeficiente de extinção K do material.

$$\alpha = 1 - e^{(-Kl)} \quad (26)$$

Onde l é o comprimento do caminho percorrido pela luz, calculado utilizando a espessura do material, d .

$$l = \frac{d}{\cos\theta_t} \quad (27)$$

Por fim, a transmitância do meio é dada por:

$$\tau = 1 - \alpha \quad (28)$$

Algumas informações acerca do módulo OPV utilizado neste estudo que são importantes para o modelo óptico, como as espessuras das camadas e o material que compõe o ETL, não foram divulgadas por motivos de sigilo industrial. Porém, foram feitas aproximações considerando os módulos comerciais mais comuns na literatura. O modelo teve como base um módulo OPV com 8 camadas, dispostas como mostra a Figura 29. Como o eletrodo de prata cobre somente uma parte da célula, primeiramente utilizou-se o modelo sem ele (com 7 camadas apenas) e, posteriormente, acrescentou-se o percentual da sua cobertura. A Tabela 3 apresenta os materiais empregados no modelos e suas espessuras.

Figura 29 – Camadas do módulo OPV utilizadas no modelo.

Fonte: própria.

Tabela 3 – Materiais que compõe cada camada e suas espessuras.

Camada	Material	Espessura
Filme de Barreira	PET	60 μm
Substrato	PET	120 μm
Eletrodo transparente	IMI	120 nm
ETL	ZnO	8 nm
Camada ativa	P3HT:PCBM	350 nm
HTL	PEDOT:PSS	350 nm
Eletrodo	Ag	200 μm

Fonte: própria.

4.6.2 Dados ópticos experimentais

A transmitância do módulo Tipo 1 em diferentes condições foi medida através do espectroradiômetro HR-4000 UV VIS da marca Ocean Optics, mostrado na Figura 30, utilizando fibra óptica com 3900 μm de diâmetro e calibrado com lâmpadas de halogênio e deutério. O equipamento possui um intervalo de operação de 300 a 900 nm de comprimento de onda.

Os dados de transmitância foram coletados do módulo Tipo 1 completo e foram posteriormente utilizados para verificar a validade do modelo óptico analítico desenvolvido neste trabalho.

Figura 30 – Espectrorradiômetro HR-4000 UV VIS utilizado nos experimentos.



Fonte: oceanoptics.com.

Para estudar o efeito do ângulo de incidência da luz, dois parâmetros foram calculados: a eficiência óptica e o modificador do ângulo de incidência. Para isso, foram coletados os valores de transmitância do módulo Tipo 1 nos ângulos de incidência da luz de 0, 10, 20, 30, 40, 50 e 60°. Esse ensaio foi realizado com a própria radiação solar em condições de céu claro, como visto na Figura 31.

Figura 31 – Condições do ensaio para obtenção da transmitância do módulo OPV em diferentes inclinações.



Fonte: própria.

A eficiência óptica foi calculada a partir da Equação 29 (RABL, 1985).

$$\eta_{\text{óptica}} = \alpha * \tau = \frac{Q}{I_{\text{col}}} * \frac{E}{I_{\text{col}}} = \left(1 - \frac{E}{I_{\text{col}}}\right) * \frac{E}{I_{\text{col}}} \quad (29)$$

Onde I_{col} é o total de energia que incide no módulo, calculado integrando o espectro incidente, Q e E são a quantidade de energia absorvida e transmitida pelo módulo, respectivamente, obtidas através dos dados.

O modificador do ângulo de incidência $K_{mod}(\theta)$ relaciona as eficiências ópticas dos feixes que incide normal e com um ângulo θ de incidência, como mostra a Equação 30 (RABL, 1985).

$$K_{mod}(\theta) = \frac{\alpha(\theta)\tau(\theta)}{\alpha(0)\tau(0)} \quad (30)$$

O modificador do ângulo de incidência pode ser ajustado em função do ângulo θ de acordo com a Equação 31 para coletores planos (THOMAS et al., 1982):

$$K_{mod}(\theta) = -b_0 \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right) + 1 \quad (31)$$

Onde b_0 é a declinação da curva e indica as perdas por reflexão com o ângulo de incidência.

Além de calculados com dados experimentais, a eficiência óptica e o modificador do ângulo de incidência também foram obtidos através das saídas (energia absorvida e transmitida pelo módulo) do modelo óptico desenvolvido neste trabalho.

4.7 Geração simultânea de eletricidade

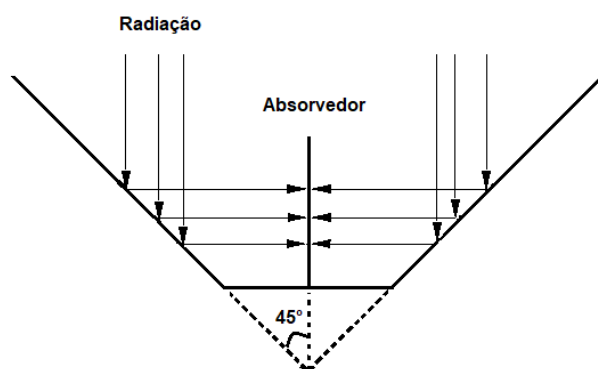
Para fazer com que o módulo produza simultaneamente, é preciso que ele receba iluminação nos dois lados ao mesmo tempo. Existem várias configurações possíveis para que isso ocorra. Porém, um ponto importante que precisa ser respeitado é a uniformidade de iluminação. Como as células estão interligadas em série dentro do módulo, caso haja uma diferença na distribuição de radiação entre elas, a que estiver menos iluminada irá limitar a produção de corrente, dissipando energia em forma de calor e formando pontos quentes.

Além disso, como a eficiência do OPV começa a decair com valores de concentração altos (Tromholt et al, 2010), não é vantajoso usar um aparato de superfícies refletoras que atrapalhe na produção de energia.

O dispositivo óptico empregado neste trabalho foi um concentrador de cavidade em V (*V-trough*), por fornecer baixas concentrações e garantir a uniformidade na distribuição da radiação ao longo das células. Esse concentrador é formado por dois espelhos planos com uma certa inclinação, formando um aparato em formato de V quando se interceptam e o absorvedor fica posicionado entre os espelhos. Normalmente, quando é utilizado para sistemas fotovoltaicos, o módulo fica na posição horizontal (FRAIDENRAICH, 1994). Neste estudo, ele foi utilizado de uma maneira não convencional, em que o absorvedor está posicionado verticalmente entre os espelhos, com o objetivo de iluminar de maneira uniforme e simultânea ambas as faces do módulo OPV. A concentração, nesse caso, não é a finalidade do experimento.

Para garantir iluminação uniforme no absorvedor vertical, o ângulo de abertura utilizado nesse experimento foi 45° . Portanto, a radiação que chega normal à cavidade V será refletida e irá também incidir normalmente no módulo OPV, como mostra a Figura 32. A partir dessa configuração, pode-se observar que o *V-trough* ilumina de maneira uniforme e simultânea o absorvedor.

Figura 32 – Esquema da luz refletida incidindo normalmente na cavidade V de ângulo de abertura de 45° .



Fonte: própria.

Os espelhos possuem 48 cm de largura por 45 cm de altura. O módulo Tipo 1 foi posicionado verticalmente dentro do *V-trough* e dois solarímetros Licor mediram a irradiância recebida em cada uma das suas faces. Utilizando a fonte de tensão KEPCO e o sistema de aquisição de dados Campbell, foram obtidas curvas características para analisar os parâmetros elétricos do módulo nessas condições. A eficiência de conversão em potência é obtida levando em consideração a irradiância que incide nas duas superfícies. A temperatura do módulo OPV foi medida com o uso de um termômetro digital infravermelho da marca Minipa MT-320.

Como mencionado na Seção 2.2, os sistemas de concentração *V-trough* funcionam com um certo intervalo de aceitação angular. Por conta disso, fez-se necessário direcionar o *V-trough* para alinhá-lo com a radiação direta sempre que preciso. Na Figura 33, pode-se observar o esquema do ensaio de iluminação simultânea com o *V-trough*.

Figura 33 – Esquema do ensaio de iluminação simultânea com o *V-trough*.



Fonte: própria.

4.8 Análise dos dados

A partir de todos os experimentos práticos descritos acima, foram gerados dados de diferentes parâmetros. Com base neles, foram feitas diversas análises comparando os efeitos que uma ou mais variáveis podem causar em outra. A Figura 34 mostra um esquema das diferentes análises feitas com os experimentos realizados.

Como há módulos de tamanhos diferentes, a influência do aumento das dimensões na fabricação dos módulos é um fator que foi observado de acordo com os experimentos de extração de parâmetros elétricos.

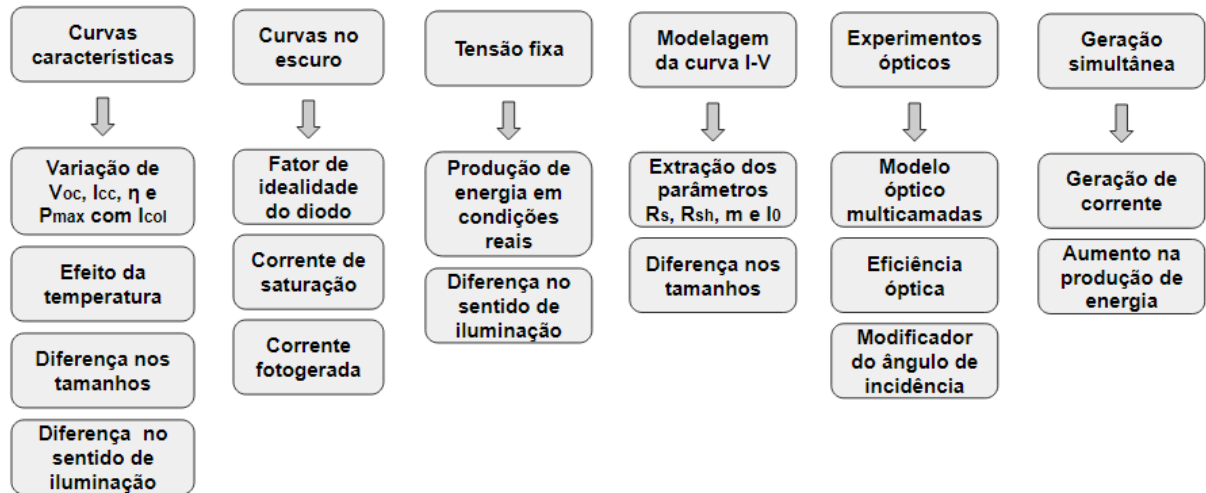
A partir da curva no escuro, pôde-se obter parâmetros relacionados ao semicondutor orgânico, além de extrair informações acerca da corrente fotogerada.

Os efeitos das variáveis ambientais sobre os parâmetros dos módulos foram averiguados utilizando os dados da curva característica, onde se pode estudar as variações de V_{oc} , I_{cc} , η e P_{max} com a temperatura e irradiância.

Os dados de transmitância e absorbância foram utilizados para calcular a eficiência óptica dos materiais estudados, analisando, a partir do cálculo do modificador do ângulo de incidência, o efeito da inclinação do módulo na sua performance óptica. Além disso, através do

modelo óptico, pôde-se obter uma ideia do caminho percorrido da luz ao longo das camadas do módulo.

Figura 34 – Análises que podem ser realizadas a partir dos dados gerados nos experimentos.



Fonte: própria.

Para verificar a produção de energia com iluminação em ambas as faces dos módulos, os dados do experimento de geração simultânea foram comparados com os dados de caracterização e funcionamento de cada superfície do módulo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção, serão apresentados os principais resultados do trabalho para os módulos OPV utilizados. Primeiramente, as características elétricas e as diferenças entre os tamanhos e o sentido de iluminação (frontal e traseira) serão discutidos. Depois, os resultados dos modelos e dos experimentos ópticos serão analisados. Por fim, a geração com iluminação simultânea de ambas as faces será discutida.

5.1 Área gradeada

Como resultado do processamento de imagem da área gradeada das células do módulo, obteve-se que a área coberta pelo eletrodo de prata representa um valor de 23,4% de toda a área ativa do módulo.

A área sombreada irá diminuir a irradiância incidente no verso do módulo. Como a corrente é diretamente proporcional a irradiância, espera-se perdas devido ao sombreamento da mesma ordem de grandeza (23,4%).

5.2 Parâmetros da curva característica

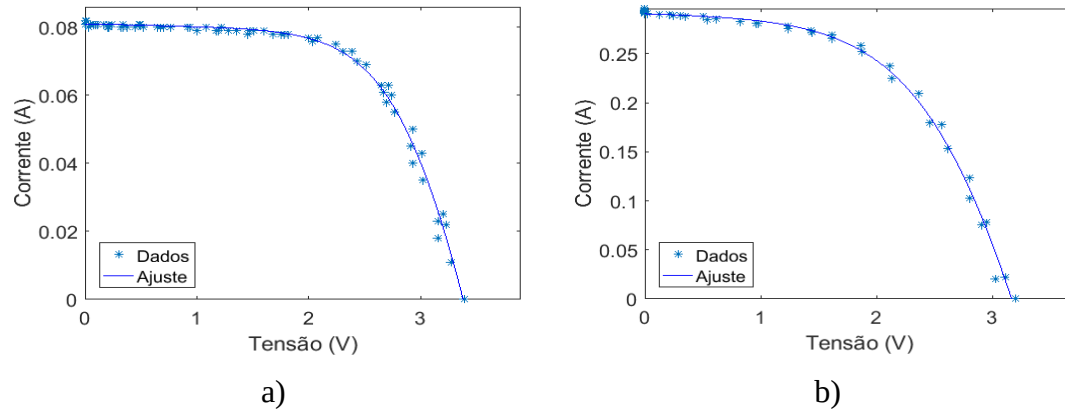
5.2.1 Diferenças entre tamanhos

A Figura 35 mostra as curvas características outdoor para os módulos do Tipo 1 e Tipo 2 em condições ambientais semelhantes (irradiância em torno de 1000 W/m^2 e temperatura do módulo aproximadamente 49°C). Os parâmetros elétricos relativos às curvas dos módulos Tipo 1 e Tipo 2 são encontrados na Tabela 4, juntamente com as condições ambientais no momento do experimento, como os valores de irradiância, temperaturas ambiente (T_{amb}) e do módulo (T), ângulo de incidência da radiação (θ) e a radiação difusa (I_{difusa}).

A partir desses resultados, pode-se notar que o módulo Tipo 2 apresenta um pior desempenho em todos os parâmetros elétricos obtidos. Apesar das diferenças entre as radiações difusa e os ângulos de incidência também apresentarem influência, esse comportamento se justifica majoritariamente pelo aumento do tamanho do módulo. Um acréscimo de 3 vezes na área acarretou numa queda de cerca de 13% no fator de forma e 27% na eficiência com relação ao módulo Tipo 1. A influência das dimensões das células OPV foi analisada por Krebs *et al.* (2010). Nesse estudo, foi mostrado que o aumento do comprimento da célula OPV traz como

consequência um maior número de defeitos e erros de impressão durante a sua fabricação no processo *roll-to-roll*. Portanto, células menores tendem a possuir um melhor desempenho.

Figura 35 – Curvas carcterísticas dos módulos a) Tipo 1 e b) Tipo 2 para aproximadamente 1000 W/m² e 49°C.



Fonte: própria

Tabela 4 – Parâmetros elétricos e ambientais da curva característica do módulo Tipo 1 e Tipo 2.

Parâmetros	Tipo 1	Tipo 2
V_{oc} (V)	3,396±0,004	3,160±0,003
I_{cc} (mA)	81,00±0,09	293,0±0,3
J_{cc} (mA/cm ²)	1,12±0,09	1,0±0,3
P_{max} (mW)	172,1±0,3	508,0±0,8
$P_{max}/\text{área}$ (mW/cm ²)	2,4±0,3	1,8±0,8
V_{mp} (V)	2,446±0,003	2,130±0,002
I_{mp} (mA)	70,34±0,08	237,0±0,3
J_{mp} (mA)	0,98±0,08	0,8±0,3
FF (%)	62,6±0,1	54,5±0,1
η (%)	2,4±0,1	1,76±0,09
I_{col} (W/m ²)	1000±50	1002±50
T (°C)	48,7±0,5	49,0±0,5
θ (°)	18,7	30,4
T_{amb} (°C)	30,7±0,5	30,8±0,5
I_{difusa} (W/m ²)	105±5	218±11

Fonte: própria.

Através dos valores estimados das resistências em série (R_s) e paralelo (R_{sh}), do fator de idealidade do diodo (m) e corrente de saturação reversa (I_0) obtidos com o ajuste da curva I-V

à equação de Shockley e mostrados na Tabela 5, também é possível perceber a influência do aumento das dimensões do módulo na sua performance.

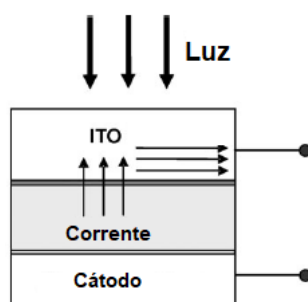
Tabela 5 – Valores das resistências em série (R_s) e paralelo (R_{sh}), do fator de idealidade do diodo (m) e da corrente de saturação (I_0) para os módulos Tipo 1 e Tipo 2 a partir da curva I-V.

Parâmetro	Tipo 1	Tipo 2
R_s (Ω)	5	2
R_{sh} (Ω)	900	180
m (.)	1,55	1,78
I_0 (A)	$2,0 \times 10^{-7}$	$6,5 \times 10^{-6}$

Fonte: própria.

Os valores da resistência em série são da mesma ordem de grandeza para os dois módulos, não sofrendo alterações significativas com o aumento da área. A resistência em série está relacionada com as resistências das próprias camadas da célula, dos eletrodos e dos contatos e é ideal que seu valor seja o mais próximo de zero possível. Dos componentes da célula OPV, o ITO é o mais dominante na resistência em série total do módulo (SERVAITES et al., 2010). Apesar do aumento da área, a espessura e a largura das células dos módulos Tipo 1 e Tipo 2 são iguais. Como a corrente flui no sentido da espessura e da largura da célula, e não do seu comprimento, como mostra a Figura 36, o aumento da área ocasionado pelo alongamento do módulo não influenciou na resistência em série do módulo.

Figura 36 – Sentido da corrente no módulo OPV.



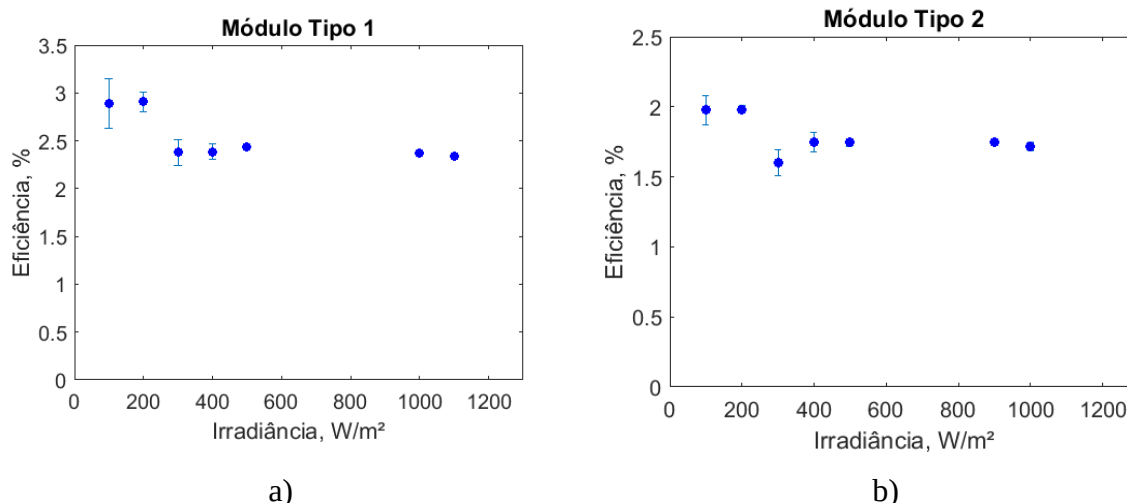
Fonte: adaptada de Servaites et al. (2010).

A resistência em paralelo está associada a defeitos na estrutura do módulo e impurezas, que podem causar um caminho interno para corrente de fuga, e o ideal é que ela possua um valor bastante elevado (GREEN, 1982). Pode-se notar na Tabela 5 que o módulo Tipo 2 tem

um valor bastante menor de resistência em paralelo em comparação ao módulo Tipo 1. Como mencionado anteriormente, o aumento do tamanho da célula traz como consequência um maior número de erros de impressão e isso interfere diretamente nos valores de resistência em paralelo dos módulos. Ainda, o aumento nos valores do coeficiente de idealidade do diodo e a diminuição de I_0 também refletem na menor qualidade da estrutura do semiconductor orgânico.

No total, foram obtidas em torno de 170 curvas I-V para o módulo do Tipo 1 e 60 para o módulo Tipo 2 em diferentes condições de temperatura, irradiância, umidade e ângulo de incidência da radiação. A temperatura dos módulos variaram de 35 a 55°C. A Figura 37 mostra a eficiência média e sua dispersão em função da irradiância.

Figura 37 – Eficiência média e sua dispersão em função da irradiância dos módulos a) Tipo 1 e b) Tipo 2.



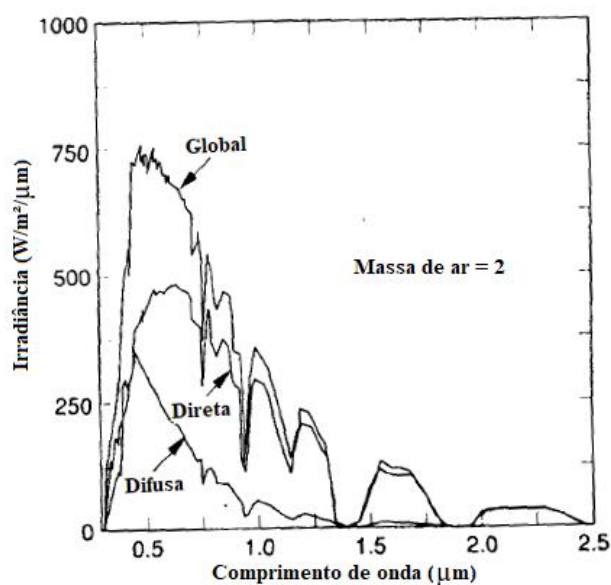
Fonte: própria.

Os pontos de alta irradiância (acima de 800 W/m²) possuem baixa dispersão devido às condições ambientais semelhantes em que os módulos estavam sujeitos. Geralmente, para esses valores de irradiância, as medidas eram realizadas num horário entre 11h e 14h com o céu limpo. Enquanto que as medidas de baixa irradiância eram normalmente feitas com o céu nublado ou parcialmente nublado, levando à diferentes temperaturas. Além disso, alguns pontos apresentam baixa dispersão por possuírem uma baixa quantidade de dados disponíveis.

É possível notar através da Figura 37 que, para ambos os módulos, a eficiência tende a cair com o aumento da irradiância. Neste estudo, as medidas de baixa irradiância estão relacionadas à radiação difusa. Uma possível justificativa para esse fenômeno é que o espectro de absorção da camada ativa P3HT:PCBM (Figura 10) e o espectro da radiação difusa são mais

compatíveis, uma vez que fótons de comprimentos de onda acima de 550 nm não são bem absorvidos pela camada ativa. Como o espectro de irradiância direta fornece bastante energia também em comprimentos de onda que não serão absorvidos pela camada ativa, a radiação difusa se torna mais eficiente. Esse comportamento já foi mostrado no estudo de Cardozo (2017) para o módulo do Tipo 1. A Figura 38 mostra um exemplo dos espectros de irradiância global, direta e difusa de um dia típico de céu claro, onde se pode observar que o espectro da radiação difusa é mais concentrado em regiões de baixo comprimento de onda.

Figura 38 – Espectros de massa de ar 2 da irradiância global, direta e difusa de um dia típico de céu claro.

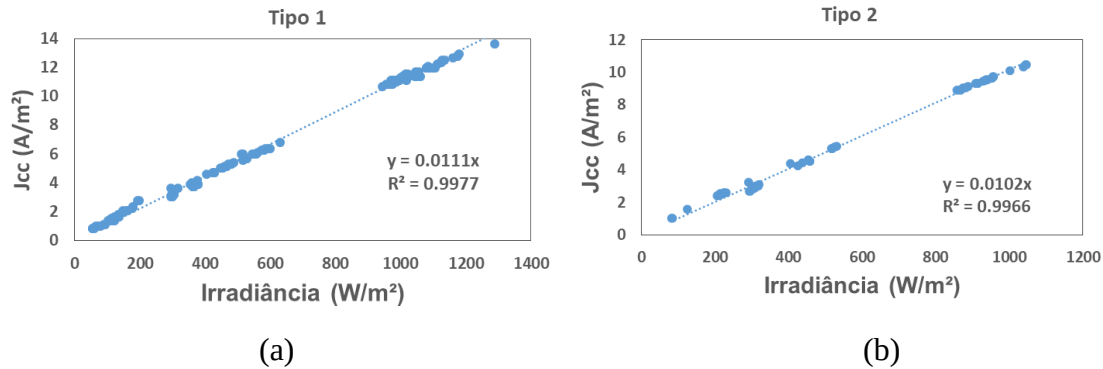


Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman (1980).

Além da eficiência, outros parâmetros elétricos foram avaliados com a irradiância a partir dos ensaios outdoor. As Figuras 39 a 42 mostram as variações com a irradiância da densidade de corrente de curto circuito, da tensão de circuito aberto, da potência máxima por área do módulo e do fator de forma, respectivamente, para os módulos Tipo 1 e Tipo 2.

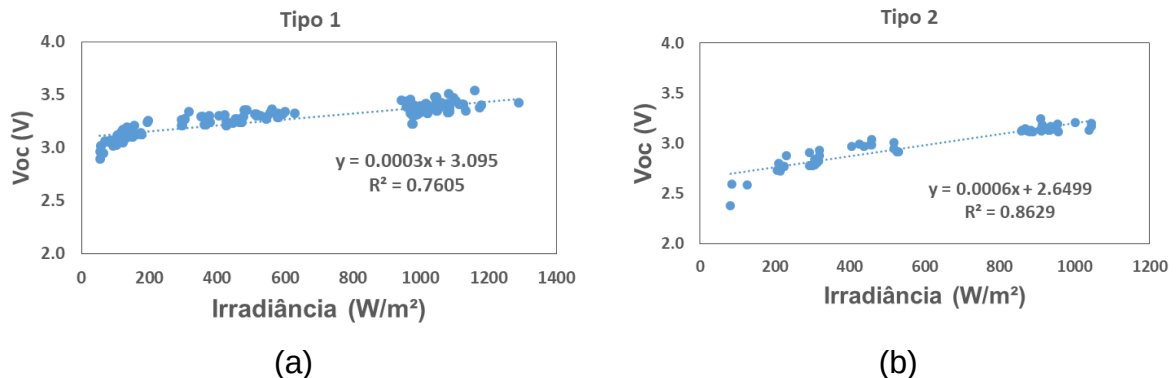
Pode ser observado na Figura 39 que a densidade de corrente de curto-circuito apresenta uma relação linear com a irradiância na faixa medida para ambos os módulos. Comportamento similar também pode ser visto nas células e módulos inorgânicos, como o de silício. Isso ocorre pois a corrente de curto-circuito é proporcional à quantidade de fótons absorvidos. Tromholt et al. (2010) mostraram que esse comportamento deixa de ser linear para valores elevados de irradiância (concentração de 10 sóis para o módulo OPV estudado) devido à intensificação das taxas de recombinação.

Figura 39 – Variação da densidade de corrente de curto circuito com a irradiância para os módulos a) Tipo 1 e b) Tipo 2.



Fonte: própria.

Figura 40 – Variação da tensão de circuito aberto com a irradiância para os módulos a) Tipo 1 e b) Tipo 2.

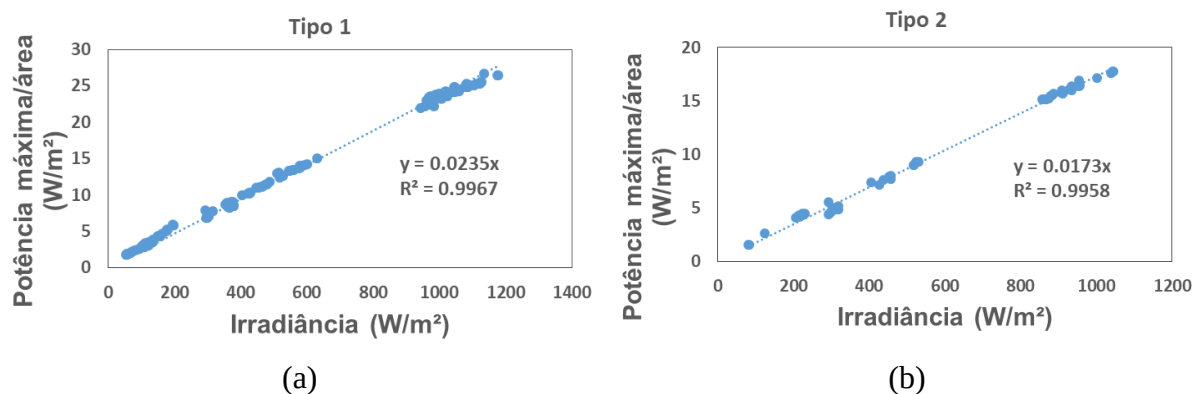


Fonte: própria.

Verifica-se na Figura 40 que os valores de V_{oc} têm uma tendência de aumento bastante sutil com a irradiância para ambos os módulos e que a tensão de circuito aberto do módulo Tipo 1 é levemente maior do que a do Tipo 2, com valores variando em sua maioria entre 3 e 3,5 V e entre 2,5 e 3,3 V, respectivamente. Essa é uma característica intrínseca dos materiais componentes das células e está diretamente relacionada com a energia do gap dos materiais da camada ativa. Conforme comentado anteriormente, a queda de tensão entre os módulos do Tipo 1 e Tipo 2 é resultado do aumento das dimensões e consequente introdução de defeitos.

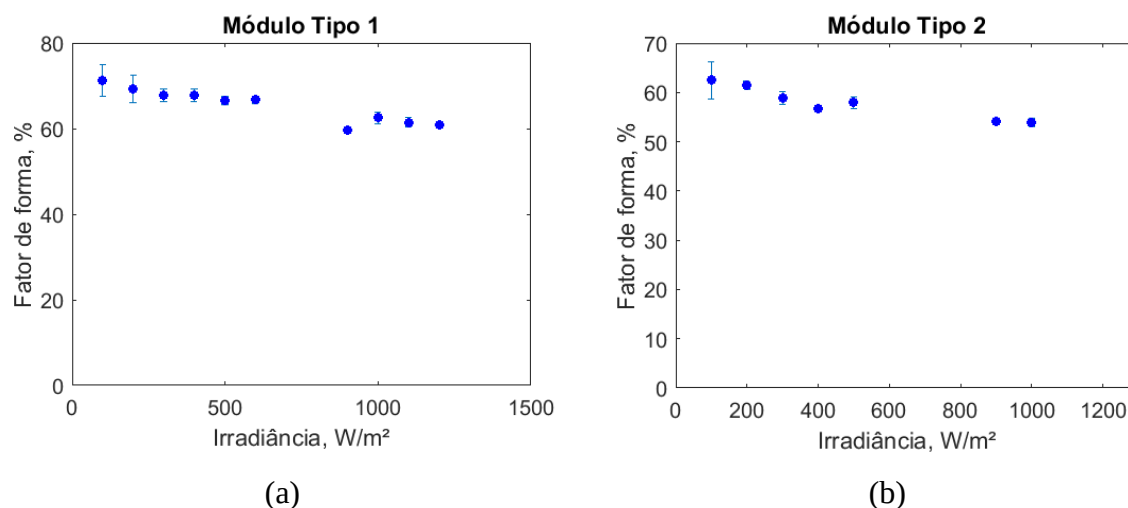
Através da Figura 41, pode-se notar um comportamento linear da potência máxima gerada por área com a irradiância incidente para ambos os módulos para as faixas de valores de irradiância medidas. Isso se deve ao aumento praticamente linear da corrente em função da irradiância, enquanto que a tensão não apresenta grandes variações.

Figura 41 – Variação da potência máxima por área com a irradiância para os módulos a) Tipo 1 e b) Tipo 2.



Fonte: própria.

Figura 42 – Fator de forma com a irradiância para os módulos a) Tipo 1 e b) Tipo 2.



Fonte: própria.

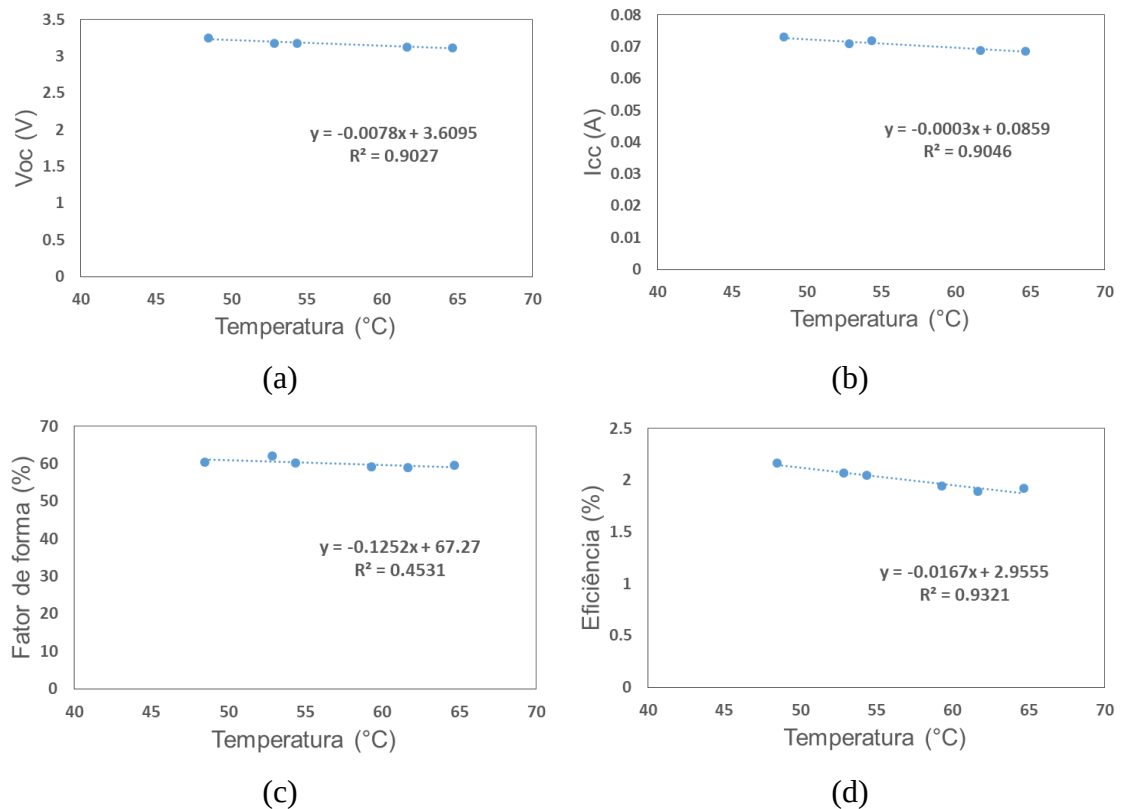
Na Figura 42, é possível observar que o fator de forma apresentou uma queda com o aumento da irradiância. Essa diminuição pode ser entendida por motivo similar ao do comportamento da eficiência, que os módulos apresentam uma melhor performance no espectro da radiação difusa.

É importante ressaltar que, para os ensaios outdoor realizados neste estudo, não foi possível isolar completamente o efeito de uma variável ambiental sob os parâmetros elétricos dos módulos OPV. Sendo assim, os resultados mostrados para a variação com a irradiância também podem ter sido influenciados pela temperatura, ângulo de incidência da radiação, umidade do ar, velocidade do vento e outros aspectos atmosféricos. Apesar disso, a interferência

dessas variáveis não sobrepõe o efeito dominante da variação da irradiância na faixa de valores utilizados, com os resultados mostrando fenômenos já conhecidos na literatura.

Para analisar o efeito da temperatura, foram analisadas curvas características com irradiâncias bastante próximas (entre 929 W/m² e 946 W/m²), de modo a neutralizar o valor desta variável nos resultados. Alguns valores de temperatura foram alcançados mediante aquecimento com um soprador térmico de ar. O comportamento em relação à temperatura dos parâmetros I_{cc} , V_{oc} , FF e η são mostrados na Figura 43.

Figura 43 – Comportamento dos parâmetros característicos do módulo Tipo 1 com a temperatura (a) V_{oc} ; (b) I_{cc} ; (c) Fator de Forma; (d) Eficiência.



Fonte: própria.

Nos ensaios outdoor realizados, os resultados obtidos com o aumento da temperatura indicam uma pequena redução em todos os parâmetros. Vale ressaltar que o módulo OPV normalmente não atinge temperaturas tão altas, como 60°C, isso foi possível nesse experimento com o auxílio do soprador térmico de ar.

Embora alguns estudos mostrem um coeficiente positivo para corrente de curto circuito (COUTINHO et al., 2015), essa tendência de queda para módulos semelhantes ao Tipo 1 é

relatada na literatura para altas temperaturas e é justificada pela diminuição na condutividade do material causada por mudanças na estrutura do P3HT (CHIRVASE et al., 2003).

Chirvase et al. (2003) mostraram que para as células de P3HT:PCBM, os parâmetros elétricos V_{oc} , I_{cc} , FF e eficiência se comportam de diferentes maneiras de acordo com a faixa de temperatura para uma incidência de iluminação de 1000 W/m^2 . Para a faixa de temperatura analisada neste estudo (aproximadamente entre 47 a 62°C), todos os parâmetros elétricos investigados pelos autores apresentam também uma redução com a temperatura.

Foi constatado também que os módulos OPV Tipo 1 e Tipo 2 apresentam uma baixa inércia térmica. Por serem bastante finos, pequenas alterações na irradiância e velocidade do vento ocasionavam uma mudança em suas temperaturas.

5.2.2 Diferenças no sentido da iluminação

Em relação aos parâmetros extraídos das curvas I-V, foram comparados os resultados obtidos do módulo Tipo 1 com iluminação pelo ITO (lado frontal) e pelo eletrodo de Ag (lado traseiro), quando as temperaturas e as irradiâncias médias fossem similares. As Tabelas 6 a 8 mostram os parâmetros V_{oc} , I_{cc} , V_{mp} , I_{mp} , P_{max} , FF e eficiência do módulo Tipo 1 frente e verso e a diferença percentual entre eles para três condições de temperatura e irradiância.

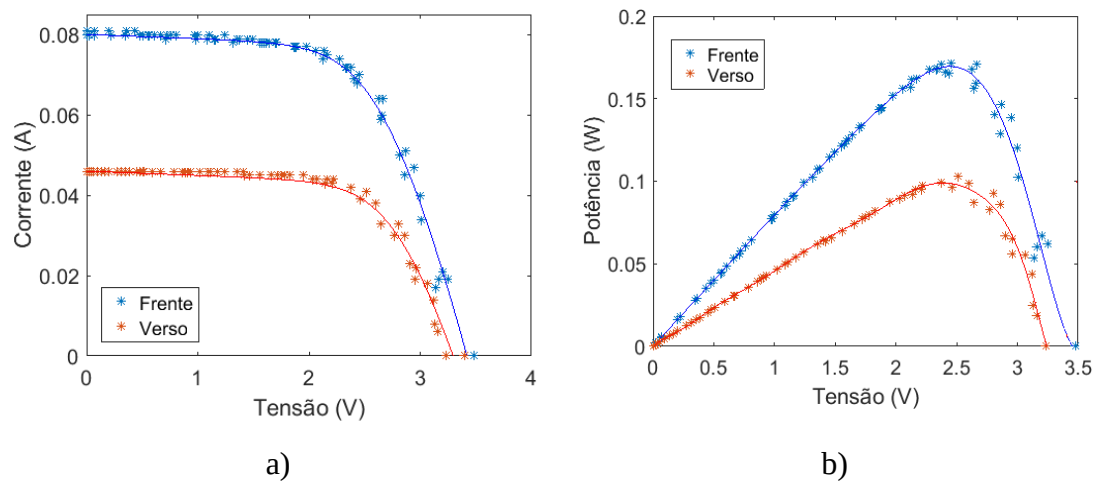
As Figuras 44 a 46 mostram as curvas características e de potência do módulo Tipo 1 com iluminação pelo ITO e pelo eletrodo de Ag quando submetidos às mesmas condições ambientais de temperatura e irradiância média. Nas Tabelas 6 a 8, pode-se verificar os parâmetros elétricos correspondentes a essas curvas e as diferenças obtidas entre as iluminações frontal e traseira.

Tabela 6 – Parâmetros elétricos do módulo Tipo 1 frente e verso a 51°C e irradiância média de 992 W/m^2 e a diferença percentual entre eles.

	Temperatura 51°C e Irradiância 992 W/m^2						
	$V_{oc} \text{ (V)}$	$I_{sc} \text{ (mA)}$	$V_{mp} \text{ (V)}$	$I_{mp} \text{ (mA)}$	$P_{max} \text{ (mW)}$	FF (%)	η (%)
Frente	$3,345 \pm 0,004$	$80,00 \pm 0,08$	$2,462 \pm 0,003$	$68,35 \pm 0,08$	$168,2 \pm 0,1$	$62,9 \pm 0,1$	$2,4 \pm 0,1$
Verso	$3,244 \pm 0,004$	$46,00 \pm 0,05$	$2,500 \pm 0,003$	$40,17 \pm 0,04$	$100,4 \pm 0,1$	$67,3 \pm 0,1$	$1,41 \pm 0,07$
Diferença (%)	-3,13	-42,50	1,41	-41,18	-40,36	7,07	-40,36

Fonte: própria.

Figura 44 – a) Curva característica e b) de potência do módulo Tipo 1 frente e verso a 51°C e irradiância média de 992 W/m².



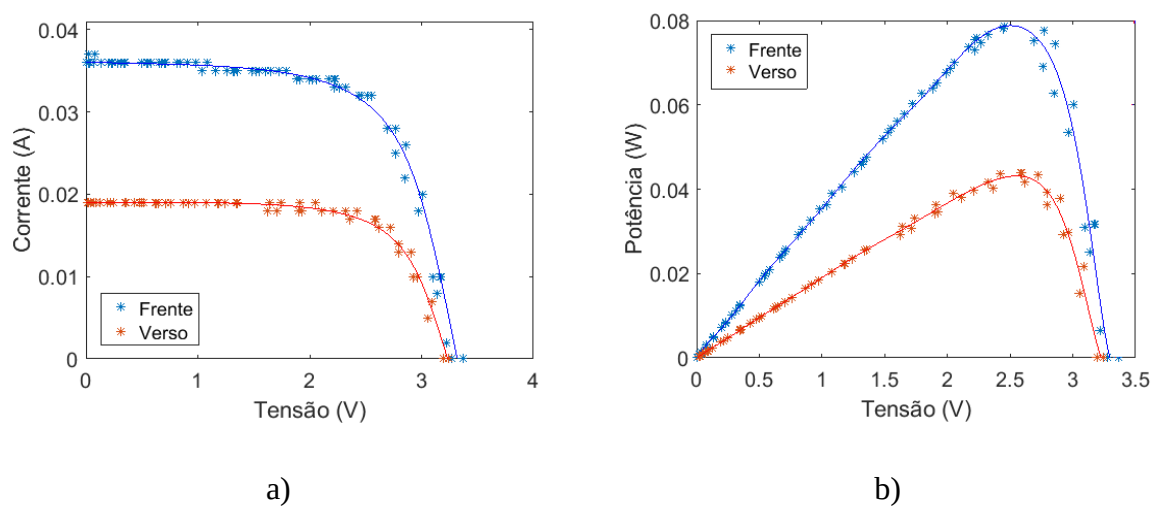
Fonte: própria.

Tabela 7 – Parâmetros elétricos do módulo Tipo 1 frente e verso a 37°C e irradiância média de 453 W/m² e a diferença percentual entre eles.

Temperatura 37°C e Irradiância 453 W/m ²							
	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA)	V _{mp} (V)	I _{mp} (mA)	P _{max} (mW)	FF (%)	η (%)
Frente	3,270±0,004	36,00±0,04	2,559±0,003	31,49±0,03	80,6±0,1	68,4±0,2	2,5±0,1
Verso	3,195±0,004	29,00±0,02	2,567±0,003	17,25±0,02	44,28±0,07	72,9±0,2	1,36±0,07
Diferença %	-2,38	-47,22	0,31	-45,22	-45,05	6,66	-44,98

Fonte: própria.

Figura 45 – a) Curva característica e b) de potência do módulo 1 frente e verso a 37°C e irradiância média de 453 W/m².



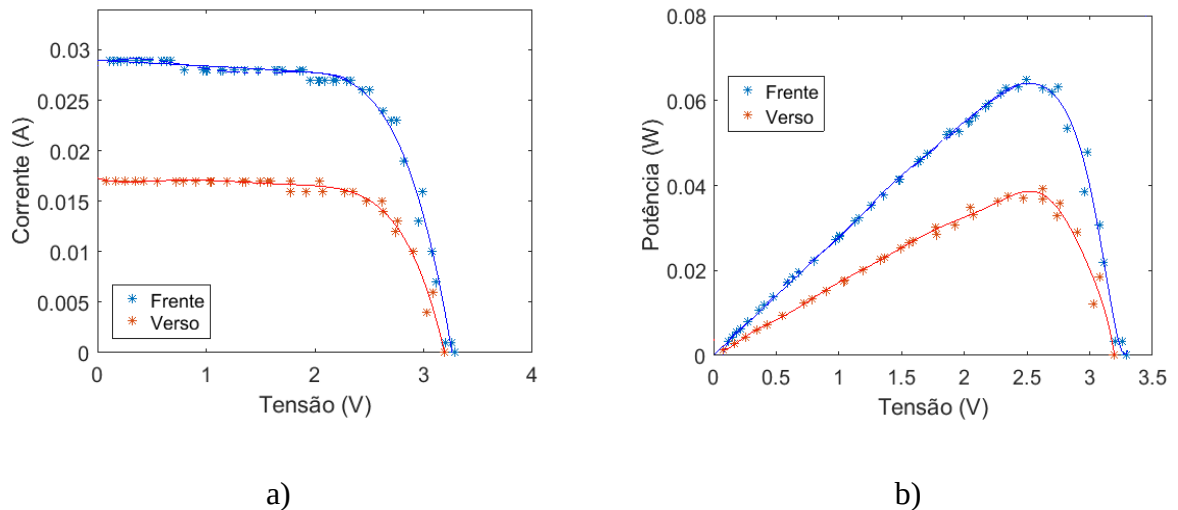
Fonte: própria.

Tabela 8 – Parâmetros elétricos do módulo 1 frente e verso a 35°C e irradiância média de 358 W/m² e a diferença percentual entre eles.

Temperatura 35°C e Irradiância 358 W/m ²							
	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA)	V _{mp} (V)	I _{mp} (mA)	P _{max} (mW)	FF (%)	η (%)
Frente	3,291±0,004	29,00±0,03	2,567±0,003	25,53±0,03	65,5±0,1	68,7±0,1	2,5±0,1
Verso	3,20±0,004	17,00±0,02	2,545±0,003	15,11±0,02	38,44±0,06	70,8±0,2	1,49±0,07
Diferença (%)	-2,92	-41,38	-0,86	-40,83	-41,33	3,08	-41,33

Fonte: própria.

Figura 46 – a) Curva característica e b) de potência do módulo 1 frente e verso a 35°C e irradiância média de 358 W/m².



Fonte: própria.

Pode-se notar que há uma diminuição significativa (em torno de 40%) nas correntes de curto-circuito e máxima potência com a iluminação traseira. Consequentemente, a eficiência de conversão em potência no lado inverso também caiu proporcionalmente com a corrente. Com o sombreamento de área provocado pelo eletrodo de Ag, esperava-se uma perda mínima de aproximadamente 23% (total de área coberta), já que a corrente varia diretamente com a irradiância. Porém, foi observado quase o dobro, indicando que, na iluminação traseira, outros mecanismos de perda ocorrem e eles são responsáveis por cerca de metade do decréscimo na corrente. Como o módulo foi desenvolvido para produzir eletricidade somente na sua parte frontal, há outros fatores que podem influenciar na redução acentuada da corrente com iluminação traseira.

A Tabela 6 pode ser considerada a mais representativa, pois reproduz as médias de 2 e 3 medições de curvas I-V para iluminação frontal e traseira, respectivamente. A variação na

tensão é bem baixa e pode estar relacionada com erros nas medições e extração dos parâmetros das curvas I-V, provocado por baixas variações na irradiância e temperatura. O fator de forma apresentou um pequeno aumento com iluminação pelo eletrodo de Ag, resultado semelhante ao encontrado por Kuwabara et al. (2014b), que justificaram o aumento em FF com iluminação traseira devido a uma maior facilidade da lacuna em atingir o PEDOT:PSS.

Na Tabela 9, pode-se observar os valores estimados das resistências em série e paralelo, do fator de idealidade do diodo e corrente de saturação reversa obtidos com o ajuste da curva I-V à equação de Shockley para o verso do módulo Tipo 1.

Tabela 9 – Valores estimados das resistências em série e paralelo, do fator de idealidade do diodo e corrente de saturação reversa para o verso do módulo Tipo 1.

R_s (Ω)	5
R_{sh} (Ω)	1800
m (.)	1,60
I_0 (A)	$2,0 \times 10^{-7}$

Fonte: própria.

Comparando os resultados da Tabela 9 com os valores encontrados para o lado frontal (Tabela 5), tem-se que, com a iluminação pelo eletrodo de Ag, a resistência em paralelo apresentou um valor significativamente mais elevado. Esse resultado pode também estar associado com a melhora no fator de forma nesse sentido de iluminação.

A eficiência com iluminação traseira é cerca de 60% da com iluminação frontal, o que representa a possibilidade de aumento de produção de energia nessa mesma proporção. Essa perspectiva foi verificada com o experimento de geração simultânea de eletricidade.

Outros aspectos podem influenciar na diferença entre os parâmetros elétricos mostrados nas Tabelas, como o ângulo de incidência da luz e a quantidade de radiação difusa. O ângulo de incidência pode alterar a quantidade de radiação que chega à região ativa da célula, podendo causar mais reflexões da luz. Os efeitos do ângulo de incidência foram melhor analisados na Seção 5.5, em que a eficiência óptica e o modificador do ângulo de incidência foram calculados para o módulo Tipo 1. Como já mencionado na Seção 5.2.1, o efeito de uma maior radiação difusa influencia positivamente na performance do módulo Tipo 1. Com o objetivo de analisar melhor o efeito dessas variáveis, a Tabela 10 mostra a irradiância difusa e o ângulo de incidência da luz na frente e no verso do módulo Tipo 1 para as condições de temperatura e irradiância média referentes às curvas I-V mostradas nas Figuras 44 a 46.

Tabela 10 – Irradiância difusa na frente e no verso do módulo 1 para as condições de temperatura e irradiância das curvas características.

Condições ambientais	Condição 1:		Condição 2:		Condição 3:	
	Temperatura 51°C e Irradiância 992 W/m ²		Temperatura 37°C e Irradiância 453 W/m ²		Temperatura 35°C e Irradiância 358 W/m ²	
Lado	Frente	Verso	Frente	Verso	Frente	Verso
Radiação difusa (W/m²)	100	128	165	146	134	214
Ângulo de incidência	24,3°	23,9°	41,9°	45,2°	44,2°	31,5°

Fonte: própria.

Nota-se na Tabela 10 que somente as curvas I-V para a condição 3 apresenta uma diferença mais expressiva na radiação difusa e no ângulo de incidência da luz. Apesar disso, ainda não é perceptível, a partir dos dados das Tabelas 6 a 8, a influência direta dessas variáveis na geração.

5.3 Operação contínua

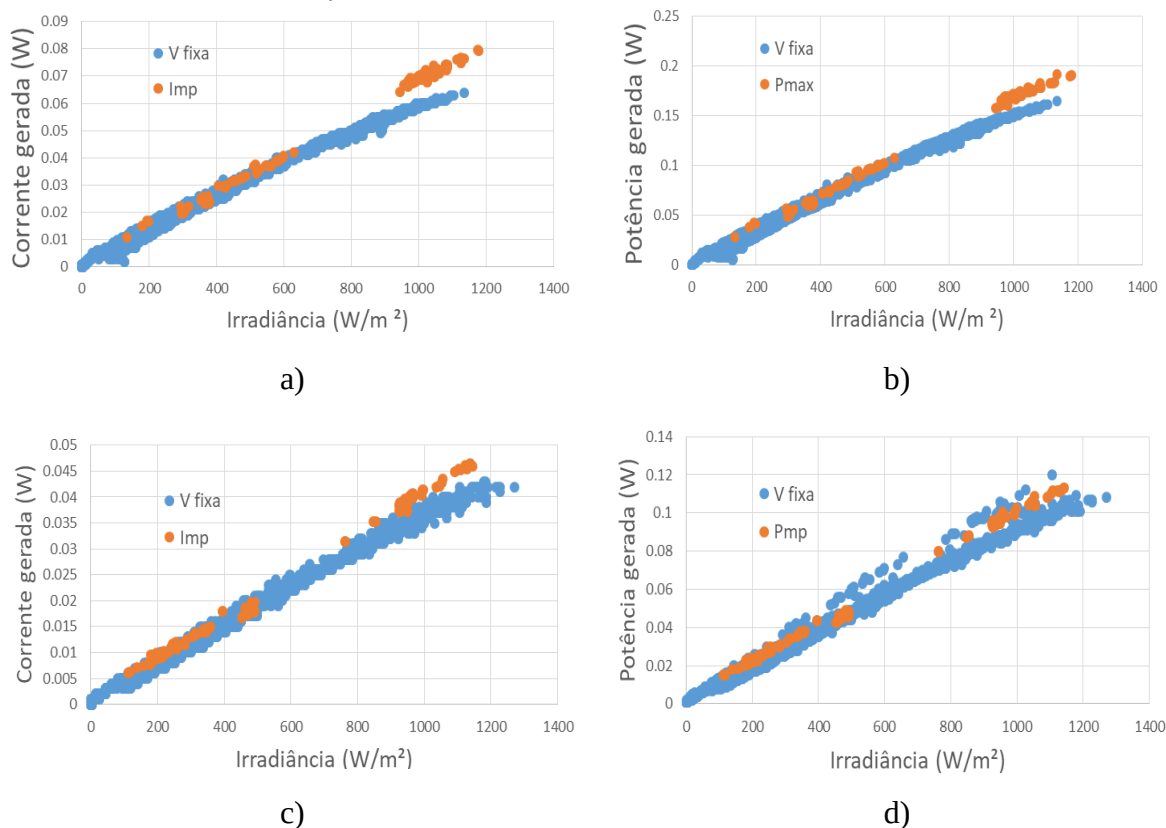
A geração do módulo Tipo 1 funcionando continuamente com iluminação frontal ou traseira foi analisada através dos resultados desse ensaio. Em momentos distintos, as faces do módulo foram expostas por 2 dias inteiros, a parte frontal entre os dias 15 e 17 de maio de 2017, e a traseira nos dias 27 de abril, 4 e 5 de maio de 2017.

Como um meio de verificar a validade do uso da voltagem fixa de 2,5 V como tensão de máxima potência, utilizou-se os dados de máxima potência provenientes das curvas I-V, em que foram comparadas a corrente e a potência gerada nessas duas situações. A Figura 47 mostra o resultado dessas comparações para a frente e o verso do módulo Tipo 1.

Pode-se observar pela Figura 47 que para irradiância abaixo de 600 W/m², os valores de potência e corrente geradas estão de acordo com o obtidos para a máxima potência. Porém, para irradiâncias mais altas (maiores que 800 W/m²), a tensão de 2,5V se afasta do V_{mp} , fazendo com que o módulo gere menos. Como tanto a corrente e a potência são menores, isso implica que o valor de V_{mp} , para essa região, é inferior a 2,5V.

A Tabela 11 mostra a radiação e a produção de energia total e a eficiência média diária com iluminação pelo ITO e pelo eletrodo de Ag do módulo Tipo 1 funcionando continuamente.

Figura 47 – Comparação entre corrente e potência gerada para as faces a) e b) frontal e c) e d) traseira do módulo Tipo 1.



Fonte :própria.

Tabela 11 – Radiação e a produção de energia total e a eficiência média diária com iluminação pelo ITO e pelo eletrodo de Ag do módulo Tipo 1 funcionando continuamente.

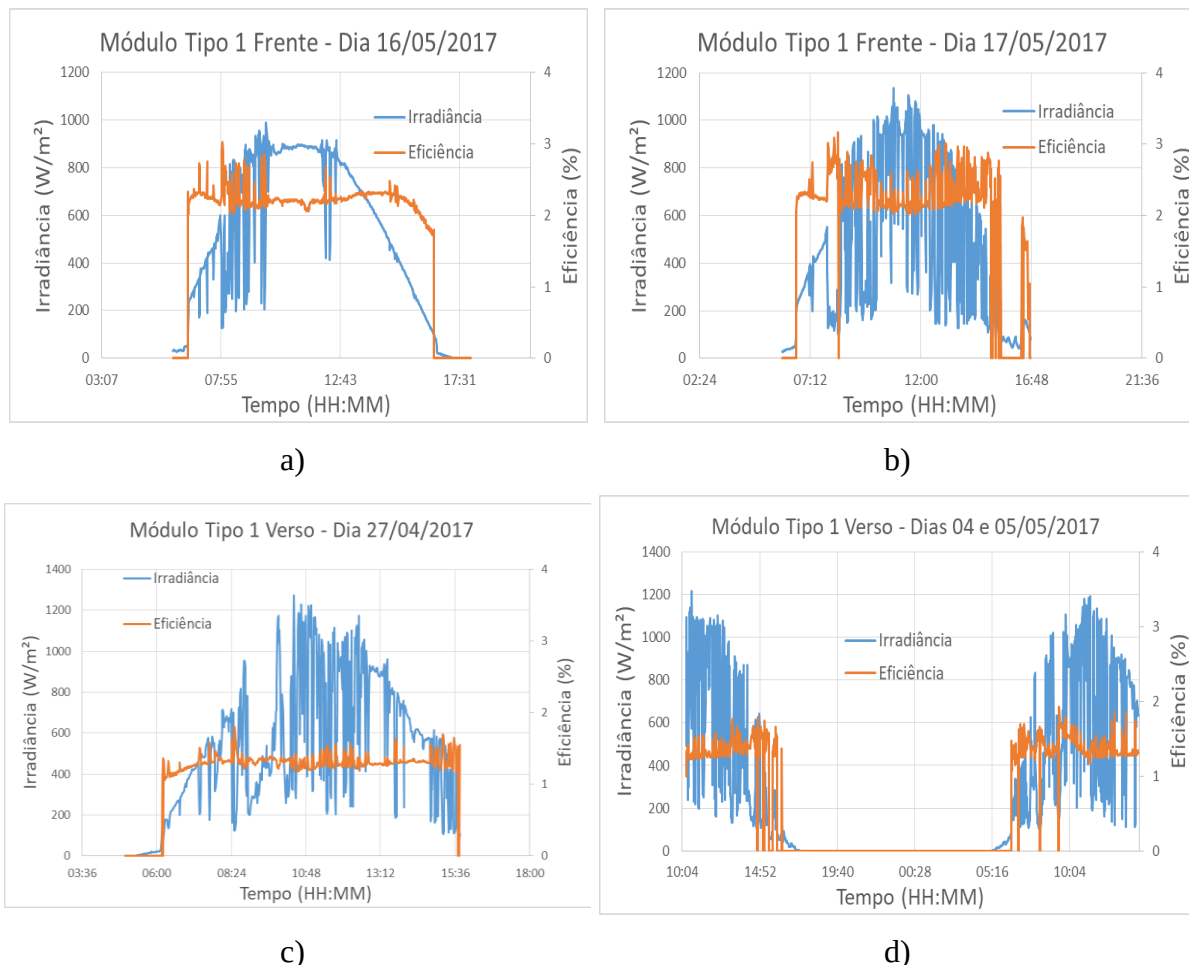
Sentido de iluminação	Radiação Total	Produção de energia	Eficiência média
ITO	84,3 Wh	1,85 Wh	2,19 %
Ag	43,4 Wh	0,57 Wh	1,32 %

Fonte: própria.

O perfil de geração diária para as faces do módulo Tipo 1 pode ser observado a partir da Figura 48, que mostra a eficiência e a irradiância ao longo dos dias analisados.

Nota-se na Figura 48 que a eficiência tende a se manter constante ao longo do dia em um valor um pouco maior que 2% para a parte frontal e um pouco menor que 1,5% para a traseira. Observando os valores de eficiência da Tabela, tem-se uma queda de aproximadamente 40% da parte traseira em relação a frontal. Essa mesma redução foi verificada nos resultados das curvas I-V na Seção 5.2.2 deste trabalho.

Figura 48 – Perfil da irradiância e eficiência ao longo do dia para as datas a) 16/05/2017, b) 17/05/2017 para a parte frontal e c) 27/04/2017 e d) 04 e 05/05/2017 para a parte traseira.



Fonte: própria.

5.4 Curva no escuro e fotocorrente

Foram obtidas as curvas no escuro para os módulos Tipo 1 e Tipo 2 submetidos a duas condições distintas: temperatura de um ambiente refrigerado e sob aquecimento. As temperaturas alcançadas foram de aproximadamente 24 °C e 44°C e 27°C e 45°C para os módulos Tipo 1 e Tipo 2, respectivamente.

Com o ajustes exponencial da curva no escuro e polinomial do logaritmo natural da corrente da curva no escuro, pôde-se estimar os valores da corrente de saturação reversa e do fator de idealidade do diodo, mostrados na Tabela 12. A Figura 49 mostra as curvas no escuro para os módulos Tipo 1 e Tipo 2 nas temperaturas alcançadas.

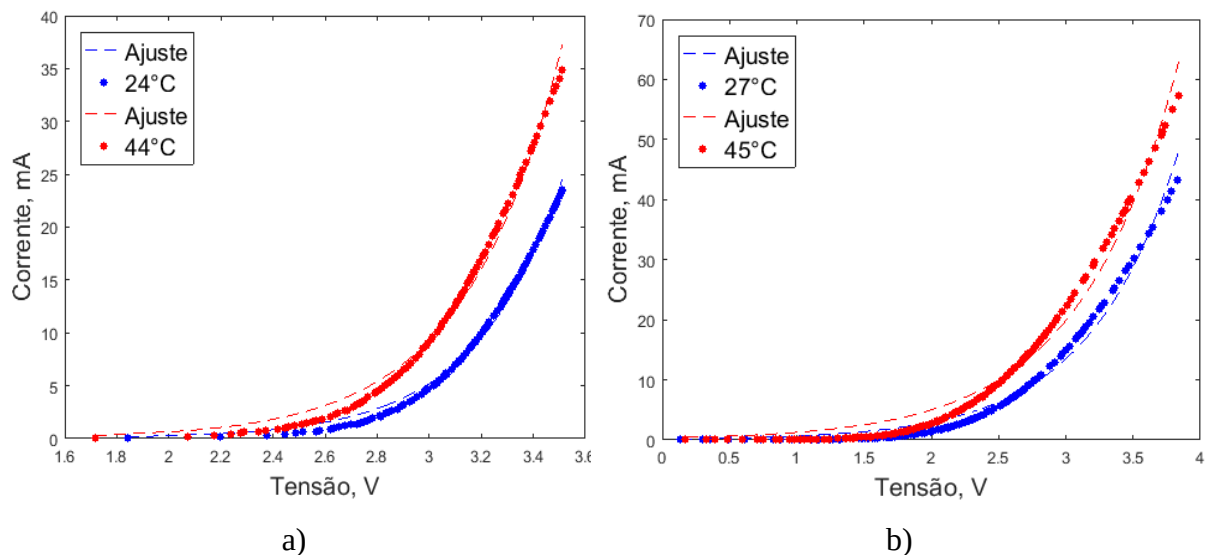
Tabela 12 – Valores estimados da corrente de saturação reversa e do fator de idealidade do diodo para os módulos Tipo 1 e Tipo 2.

	Tipo 1		Tipo 2	
	24°C	44°C	27°C	45°C
I_0 (A)	$5,7 \times 10^{-7}$	$2,7 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-4}$	$3,2 \times 10^{-4}$
m (.)	1,6	3,4	2,1	2,3

Fonte: própria.

Os erros quadráticos médios foram calculados para os ajustes exponenciais e, para todas as 4 curvas, seu valor foi menor que 2%. Os valores do coeficiente de idealidade do diodo e corrente de saturação reversa refletem as características do semiconductor orgânico. Waldauf et al. (2004) encontraram valores semelhantes para I_0 (7 e 32×10^{-6} mA/cm²) para células de P3HT:PCBM utilizando um modelo similar, que utiliza a Equação de Shockley adicionada de um fator de corrente fotogerada. Como está relacionada com a corrente de difusão da célula fotovoltaica, o acréscimo na temperatura aumenta a corrente de saturação reversa (GREEN, 1982).

Figura 49 – Curvas no escuro para os módulos a) Tipo 1 e b) Tipo 2 nas temperaturas alcançadas.



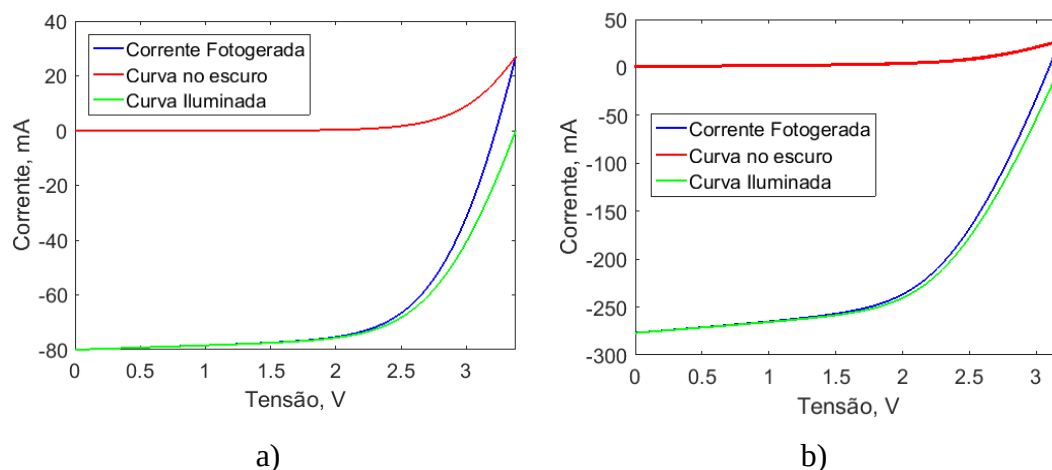
Fonte: própria.

O coeficiente de idealidade do diodo apresentou valores diferentes dos encontrados no ajuste da curva iluminada (Seção 5.2.1 – Tabela 5). Essa diferença foi reportada por Kirchartz

et al. (2013) que associou aos efeitos distintos das resistências em série e paralelo na curva no escuro e iluminada.

A corrente fotogerada foi encontrada subtraindo da curva no escuro a curva iluminada. Para isso, as duas curvas precisam ser obtidas à mesma temperatura. A Figura 50 mostra as curvas iluminada, no escuro e fotogerada para os módulos Tipo 1 a 44 °C e Tipo 2 a 45°C.

Figura 50 – Curvas iluminada, no escuro e fotogerada para o módulo a) Tipo 1 e b) Tipo 2.



Fonte: própria.

Pode-se observar que a corrente fotogerada não é constante e sua curva apresenta forma muito semelhante à da iluminada. Diferentemente dos módulos cristalinos, a corrente fotogerada é dependente da voltagem. Isso ocorre devido às recombinações geminativas (relacionadas à energia de ligação do éxciton) e ao comprimento de deriva dado pelo produto do tempo de vida (τ_{vida}) pela mobilidade de carga (μ) (TRESS, 2014; CRANDALL, 1982). Para analisar melhor essas propriedades, foi realizado o ajuste de Hecht e os resultados são mostrados na Figura 51 e na Tabela 13.

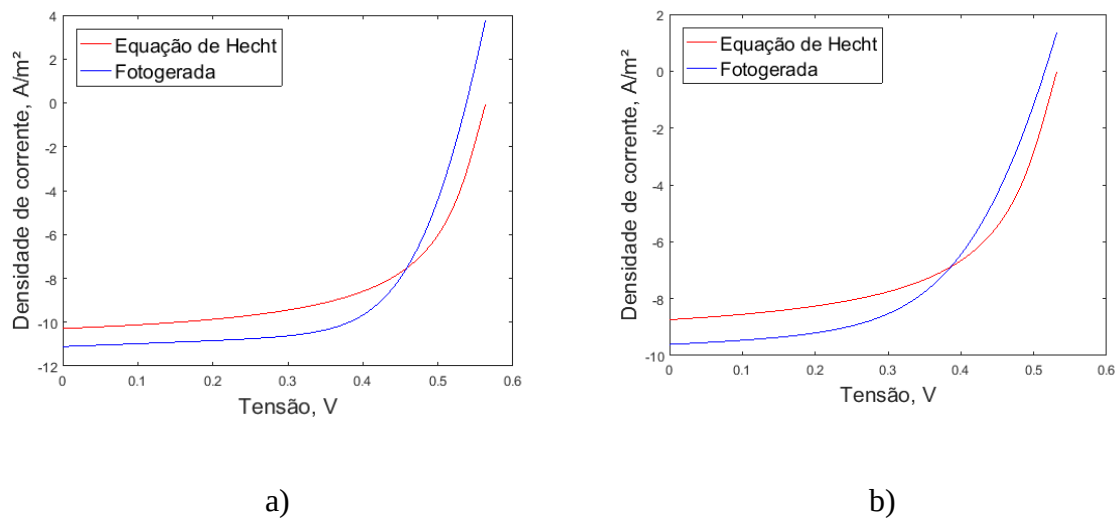
Apesar de visualmente o ajuste não representar bem a curva da corrente fotogerada, os erros médios quadráticos foram baixos, próximos de 1%. De acordo com Crandall (1982), a equação de Hecht se adequa melhor a curvas com baixa intensidade de iluminação, o que não foi o caso das curvas I-V utilizadas neste estudo. Porém, os valores do produto $\mu\tau_{\text{vida}}$ são bastantes similares aos encontrados na literatura para o P3HT:PCBM (WALDAUF et al., 2004; STREET; SCHOENDORF, 2010). Ambos os módulos apresentaram valores semelhantes de $\mu\tau_{\text{vida}}$ utilizando esse ajuste.

Tabela 13 – Valores do produto $\mu\tau_{\text{vida}}$ para os módulos Tipo 1 e Tipo 2.

Módulo	$\mu\tau_{\text{vida}}$ (cm ² /V)
Tipo 1	$3,5 \times 10^{-9}$
Tipo 2	3×10^{-9}

Fonte: própria.

Figura 51 – Corrente fotogerada e seu ajuste à equação de Hecht para os módulos a) Tipo 1 e b) Tipo 2.



Fonte: própria.

5.5 Características ópticas

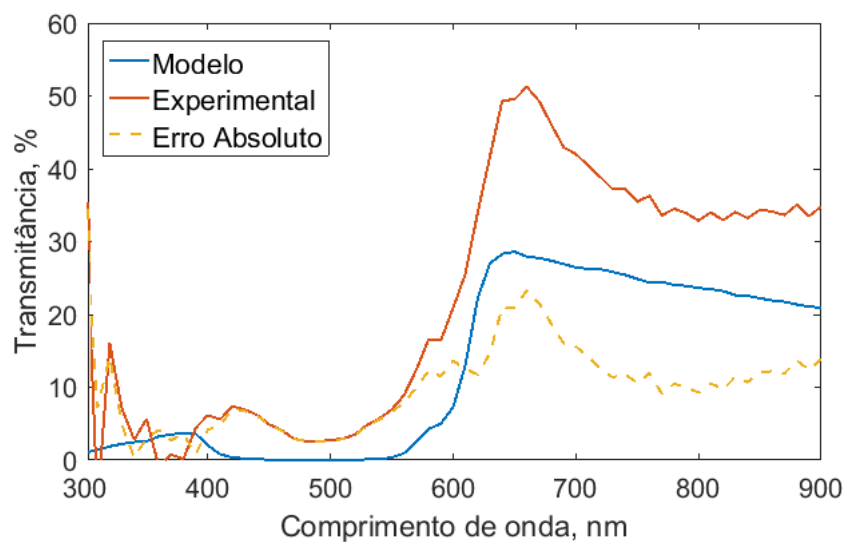
Os valores de transmitância para o módulo Tipo 1 experimentais e simulados pelo modelo óptico desenvolvido neste trabalho foram confrontados, como mostra a Figura 52, e o erro absoluto entre eles foi calculado.

O resultado do modelo tende a subestimar a transmitância do módulo Tipo 1 e considera que ele absorve mais energia do que mostra os dados experimentais. Contudo, o erro absoluto se manteve em torno de 10%, atingindo valores mais altos na faixa de comprimento de onda entre 600 e 700 nm. O modelo será utilizado como uma aproximação do módulo real, porém, vale salientar que ele foi desenvolvido com dados disponíveis na literatura para uma célula típica de P3HT:PCBM, não correspondendo necessariamente ao módulo utilizado nos ensaios.

Analisando os dados experimentais de transmitância, tem-se que os valores de eficiência óptica variou de 18,8 % para 12,4% de 0° para 60° de ângulo de incidência da luz. Além disso, observou-se que o efeito do ângulo de incidência na eficiência óptica se torna bastante

expressivo a partir de 30°, em que o valor da eficiência óptica cai cerca de 10% em relação à incidência normal.

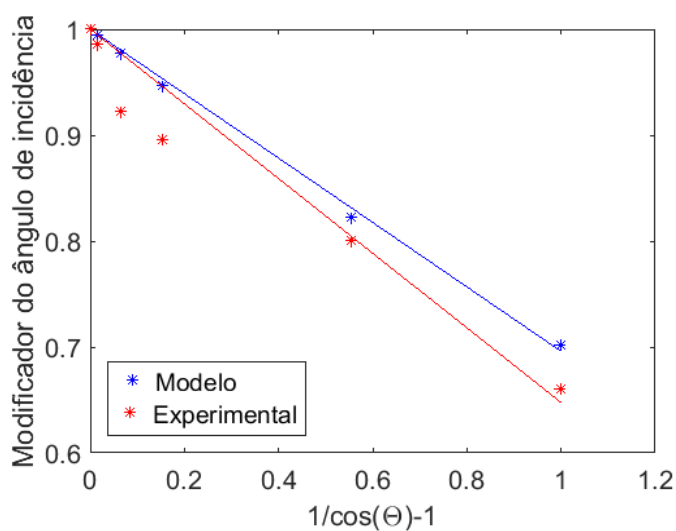
Figura 52 – Transmitâncias do módulo Tipo 1 medida e simulada e o erro absoluto entre elas.



Fonte: própria.

A Figura 53 apresenta os resultados dos ensaios de obtenção de transmitância para diferentes ângulos de incidência da luz através do modificador do ângulo de incidência.

Figura 53 – Modificador do ângulo de incidência calculado a partir do modelo óptico e de dados experimentais.



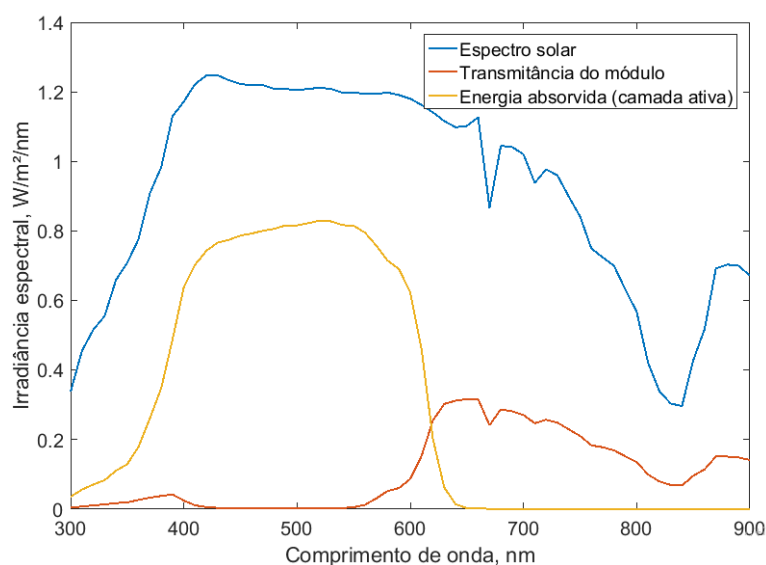
Fonte: própria.

Os valores de declinação da curva do modificador do ângulo de incidência b_0 foram de 0,30 e 0,35 para os resultados gerados pelo modelo e pelos dados experimentais, respectivamente, mostrando que no módulo real há mais perdas por reflexão com o ângulo de incidência do que havia sido simulado no modelo.

Com o uso do modelo óptico, foi possível fazer uma aproximação das energias transmitidas e absorvidas por cada camada da célula OPV do módulo Tipo 1. As Figuras 54 a 56 mostram os resultados dessa análise utilizando como entrada o espectro solar AM 1.5.

A Figura 54 mostra o espectro da energia absorvida na camada ativa e transmitida pelo módulo Tipo 1 sob iluminação do espectro solar AM 1.5 obtidos através do modelo óptico. Pode-se observar que a energia absorvida pela camada ativa se concentra basicamente entre os comprimentos de onda de 400 a 600 nm, que é a faixa de maior absorção do P3HT:PCBM (Figura 10). Além disso, pela simulação, o módulo transmite uma parcela considerável de energia a partir do comprimento de onda de 600 nm e isso explica a sua coloração avermelhada.

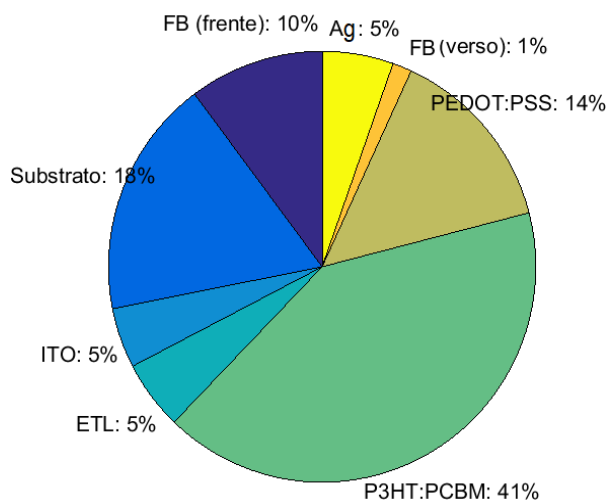
Figura 54 – Espectro solar AM 1.5 e os espectros simulados da energia absorvida pela camada ativa e da transmitância do módulo Tipo 1.



Fonte: própria.

A Figura 55 apresenta a simulação das parcelas de energia absorvida por cada camada. A partir dela, pode-se ver que a camada ativa é responsável pela maior parte da energia absorvida por todo módulo, mas que o PEDOT:PSS e o substrato também têm grande participação no processo de absorção.

Figura 55 – Simulação das parcelas da energia absorvida em cada camada do módulo Tipo 1.



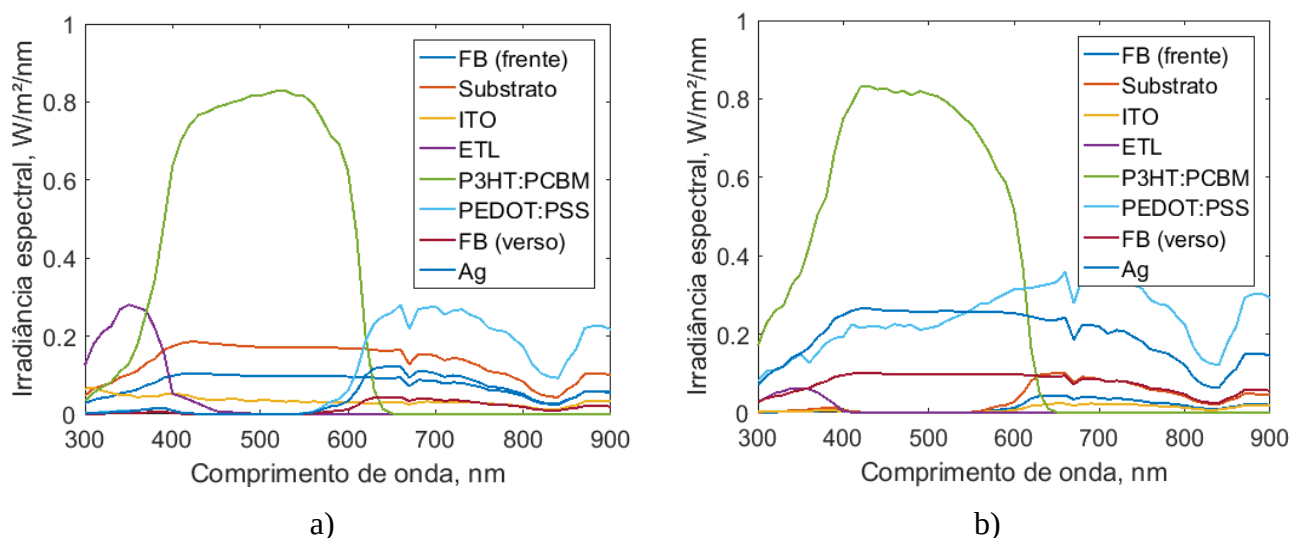
Fonte: própria.

O modelo óptico também foi utilizado para simular a diferença entre o caminho percorrido na luz com incidência frontal ou traseira. A Figura 56 mostra os espectros da energia absorvida por camada para dos dois sentidos de iluminação (frente e verso), onde se pode discriminar a participação da cada material na absorção de energia. Observa-se que os materiais que compõem as outras camadas da célula OPV interferem muito pouco na absorção de energia na camada ativa, atuando em diferentes faixas de comprimento de onda. Comparando os dois sentidos de iluminação, observa-se que, com iluminação traseira, há um aumento na absorção do eletrodo de Ag e do PEDOT:PSS. Além disso, a camada ativa passa a absorver também na faixa de radiação UV, o que será prejudicial a longo prazo, acelerando sua degradação.

Através do modelo com o espectro solar AM 1.5 como entrada, foi estimada a quantidade de energia que incide na camada ativa com iluminação frontal e traseira. Foi encontrado que chega cerca de 27% menos radiação com iluminação traseira ($120,0 \text{ W/m}^2$) em relação à frontal ($163,9 \text{ W/m}^2$), causada principalmente pelo sombreamento da grade de prata. Esse resultado está de acordo com o estudo de Bouthinon et al. (2018), que mostra que as diferenças ópticas entre a iluminação frontal e traseira não são suficientes para explicar as diferenças de geração entre essas faces. Neste estudo, a eficiência do verso do módulo Tipo 1 corresponde à 60% da parte frontal.

Resultados mais detalhados sobre o modelo óptico estão descritos no Apêndice A.

Figura 56 – Simulação dos espectros da energia absorvida em cada camada do módulo Tipo 1 a) frente e b) verso.



Fonte: própria.

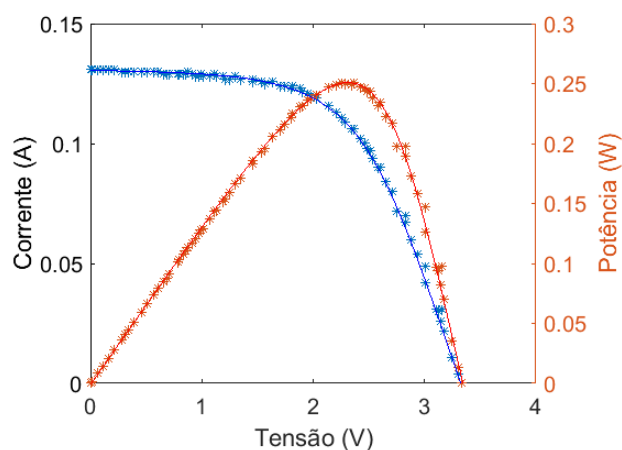
5.6 Geração simultânea

Nos estudos que utilizavam espelho acoplado no eletrodo (LIN et al, 2012; YAMBEM et al, 2012; KRANTZ et al, 2013; YU et al., 2013), é possível reaproveitar somente a luz que não foi absorvida pela célula e, considerando a região do espectro onde há maior absorção pelo P3HT:PCBM (400 a 600 nm), essa parcela que é transmitida e refletida é bem reduzida. A iluminação simultânea realizada neste trabalho analisou a geração sem que haja interferência de um lado sobre o outro com o uso do dispositivo de concentração *V-trough* e o mesmo ângulo de incidência da radiação para as duas faces. O resultado dos experimentos pode ser observado através da Tabela 14 e da Figura 57.

Comparando a Tabela 14 com os dados do módulo Tipo 1 da Tabela 4, tem-se que a geração com iluminação simultânea de ambas as faces realmente conseguiu aumentar a produção de energia do módulo. Em relação à iluminação convencional (frontal), as correntes de curto circuito e de máxima potência obtiveram o aumento mais expressivo, cerca de 60%, correspondendo aproximadamente ao adicional gerado pelo verso do módulo (Seção 5.2.2). Porém, a potência não aumentou na mesma proporção, apresentando um acréscimo de cerca de 46%. Além disso, as tensões de circuito aberto e máxima potência sofreram uma leve diminuição e o fator de forma caiu 8% em relação à iluminação frontal. A queda na eficiência (em torno de 26%) já era esperada, já que foram consideradas as áreas da frente e do verso (incluindo a parte gradeada) do módulo para o seu cálculo. Levando em consideração a

eficiência do verso do módulo Tipo 1 apresentada na Tabela 6 (1,41 % para uma irradiância média de 992 W/m²) e fazendo uma média com o valor para a parte frontal, encontra-se o valor de 1,88%, valor 5% maior do que o encontrado com iluminação simultânea.

Figura 57 – Curva característica para o módulo Tipo 1 com iluminação simultânea das faces com o V-trough com 45° de abertura.



Fonte: própria.

Tabela 14 – Parâmetros elétricos para o Módulo Tipo 1 com iluminação simultânea das faces com o V-trough com 45° de abertura.

Temperatura (°C)	61,0±0,5
I_{col} Frente (W/m²)	952±48
I_{col} Verso (W/m²)	1012±51
V_{oc} (V)	3,336±0,004
I_{cc} (mA)	131,0±0,1
P_{max} (mW)	251,4±0,4
I_{mp} (mA)	110,2±0,1
V_{mp} (V)	2.280±0,002
FF (%)	57.5±0,1
η (%)	1.78±0,06

Fonte: própria.

Com o uso do concentrador *V-trough*, foi alcançada uma temperatura elevada do módulo, maior que 60°C, e uma alta irradiância (aproximadamente 2000 W/m² considerando a incidência nas duas faces). Como mostrado nos resultados da análise da temperatura (Seção 5.2.1 – Figura 43) e também no trabalho de Chirvase et al. (2003), os parâmetros elétricos do módulo de P3HT:PCBM tendem a cair em altas temperaturas, isso pode ter influenciado nos resultados da iluminação simultânea de modo que a potência não aumentou o quanto era esperado (60%). Além disso, o módulo Tipo 1 apresenta uma redução da eficiência com o

aumento da irradiância (Seção 5.2.1 – Figura 37), o que também pode ter afetado a geração de energia no *V-trough*. A corrente é diretamente proporcional à irradiância e esse efeito pode ter prevalecido sob a redução com a temperatura, fazendo com que seu valor aumentasse numa proporção maior do que o da potência com iluminação simultânea.

6 CONCLUSÕES

Os módulos OPV foram alvo deste estudo pelo seu promissor potencial de baixo custo, devido à uma maior simplicidade de fabricação, e diversidade de aplicações, conferidas a eles por suas características de leveza, flexibilidade e semitransparência. Porém, para entrar em competição com outras tecnologias fotovoltaicas, ainda é preciso melhorar a eficiência e o tempo vida.

Por estar em fase de desenvolvimento científico, poucos são os trabalhos direcionados a módulos de fabricação comercial. Neste estudo, foram utilizados dois módulos de mesma estrutura com camada ativa P3HT:PCBM e tamanhos diferentes e foram analisadas as suas características de geração de energia em condições naturais de iluminação (outdoor) e com ausência de luz (curva no escuro). Com isso, foram obtidas informações em relação às variáveis ambientais de temperatura e irradiância e ao semicondutor orgânico.

O objetivo principal deste trabalho foi analisar a geração de energia com iluminação simultânea de ambas as faces do módulo de modo a aproveitar a sua semitransparência para produzir mais potência elétrica. Essa análise foi realizada com o uso do concentrador *V-trough* e comparada com as gerações obtidas com iluminação frontal e traseira. Apesar de ser transparente, cerca de 23,5% do verso do módulo é coberto por uma grade metálica de Ag (um dos eletrodos), que provoca sombreamento quando iluminado nesse lado.

Comparando os diferentes sentidos de iluminação, obteve-se que o verso do módulo representa em torno 60% da parte frontal em relação à potência, correntes de curto circuito e máxima potência e à eficiência. Esse valor é menor do que o esperado tirando o efeito do sombreamento pela grade metálica (75%), mostrando que há diferenças significativas entre os sentidos de iluminação na geração de energia. O modelo óptico desenvolvido neste estudo mostrou que não há distinções entre a energia que incide na camada ativa com iluminação frontal ou traseira considerando o sombreamento da grade metálica, levando a conclusão que existem outros fenômenos físicos responsáveis por essa discrepância, como reações fotoinduzidas distintas com sentidos de iluminação diferentes.

Ao se iluminar ambos os lados simultaneamente, foi observado que somente as correntes de curto circuito e máxima potência aumentaram na mesma proporção que o obtido nos resultados da comparação de geração de energia em cada uma das faces. Com o uso do *V-trough*, a eficiência reduziu 26% e o fator de forma 8% em relação à iluminação frontal. Essa diminuição na eficiência se deve ao fato de ter se considerado a área da parte frontal e traseira (incluindo a grade metálica) para o cálculo desse parâmetro. A potência aumentou 46%, porém

o verso do módulo tinha potencial para produzir 60% da parte frontal. Uma possível justificativa para isso foi a temperatura atingida durante o experimento do *V-trough*. Por concentrar irradiância nas duas faces simultaneamente, a temperatura do módulo atingiu valores muito mais altos do que em operação normal (60°C com concentração e 45% funcionando a uma temperatura ambiente em torno de 30°C). Isso pode ter provocado uma diminuição nos parâmetros, afetando o valor da potência gerada e do fator de forma.

A geração de energia iluminando simultaneamente os dois lados do módulo ainda precisa ser melhor investigada, buscando estudar os fenômenos físicos que ocasionam a redução dos parâmetros na iluminação traseira em relação à frontal, como as reações fotoinduzidas com oxigênio contaminante. O dispositivo *V-trough* desenvolvido neste estudo foi uma maneira de iluminar uniformemente as células do módulo de maneira que os dois lados recebam irradiância semelhantes. O seu uso, porém, não implica diretamente numa aplicação prática, mas sim, em um pontapé inicial para os estudos de aproveitamento da semitransparência de módulos OPV com iluminação simultânea de ambos os lados, mostrando que é possível aumentar a produção de eletricidade sem mudanças nas suas configurações de fabricação.

A diferença entre a geração com iluminação pelo ITO (frente) e pelo eletrodo de Ag (verso) ainda precisa ser melhor investigada, analisando os fenômenos físicos responsáveis pela geração de corrente e seu aproveitamento. Para trabalhos futuros, essa questão pode ser aprofundada, juntamente com um modelamento mais adequado da fotocorrente. Ainda, o modelo óptico desenvolvido neste estudo pode ser aprimorado e utilizado para propor melhorias na estrutura dos módulos OPV, visando o aumento da eficiência óptica e a redução das perdas por reflexão.

REFERÊNCIAS

ABDELHAMID, M. E.; O'MULLANE, A. P.; SNOOK, G. A. Storing energy in plastics: a review on conducting polymers & their role in electrochemical energy storage. *RSC Advances*, v. 5, n. 15, p. 11611-11626, 2015.

ABDULRAZZAQ, O. A.; SAINI, V.; BOURDO, S.; DERVISHI, E.; BIRIS, A. S. Organic Solar Cells : A Review of Materials, Limitations, and Possibilities for Improvement. *Particulate Science and Technology*, v. 31, p. 427–442, 2013.

AMERI, T.; LI, N.; BRABEC, C. J. Highly Efficient Organic Tandem Solar Cells: A Follow Up. *Energy and Environmental*, v. 6, p. 2390–2413, 2013.

BLOM, P. W.; MIHAILETCHI, V. D.; KOSTER, L. J. A.; MARKOV, D. E. Device physics of polymer: fullerene bulk heterojunction solar cells. *Advanced Materials*, v. 19, n. 12, p. 1551-1566, 2007.

BOUTHINON, B.; CLERC, R.; VERILHAC, J.; RACINE, B.; GIROLAMO, J.; JACOB, S.; LIENHARD, P.; JOIMEL, J.; DHEZ, O.; REVAUX, A. On the front and back side quantum efficiency differences in semi-transparent organic solar cells and photodiodes. *Journal of Applied Physics*, v. 123, n. 12, p. 125501, 2018.

BRIAN, A. G.; MARK, C. H. Comparing organic to inorganic photovoltaic cells: Theory, experiment, and simulation. *Journal of Applied Physics*, v.93, nº 16, p. 3605-3614, 2003.

CARDOZO, O. D. F. Caracterização de parâmetros físicos e elétricos de módulos solares orgânicos em condições reais de radiação solar. Dissertação de mestrado, Programa de Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

CHIRVASE, D.; CHIGUVARE, Z.; KNIPPER, M.; PARISI, J.; DYAKONOV, V.; HUMMELEN, J. Temperature dependent characteristics of poly (3 hexylthiophene)-fullerene based heterojunction organic solar cells. *Journal of Applied Physics*, v. 93, n. 6, pp. 3376-3383, 2003.

CHONG, K. K.; KHLIYABICH, P. P.; HONG, K. J., REYES-MARTINEZ, M.; RAND, B. P.; LOO, Y. L. Comprehensive method for analyzing the power conversion efficiency of organic solar cells under different spectral irradiances considering both photonic and electrical characteristics. *Applied Energy*, v. 180, p. 516-523, 2016.

CHOY, W. C. H. *Introduction to Organic Solar Cells*. Springer London, p. 7-43, 2013.

COUTINHO, D. Estudos sobre fotogeração, efeitos de interfaces e de transporte de portadores em células solares orgânicas. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2015.

CRANDALL, R. Transport in hydrogenated amorphous silicon p-i-n solar cells. *Journal of Applied Physics*, v. 53, n. 4, p. 3350-3352, 1982.

CUBAS, J.; PINDADO, S.; MANUEL, C. Explicit expressions for solar panel equivalent circuit parameters based on analytical formulation and the Lambert W-function. *Energies*, v. 7, n. 7, p. 4098-4115, 2014.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, 2^a ed, p. 3-15, 1980.

ELUMALAI, N. K.; UDDIN, A. Open circuit voltage of organic solar cells: an in-depth review. *Energy & Environmental Science*, v. 9, p. 391–410, 2016.

FRAIDENRAICH, N. Estudo teórico-experimental de um sistema fotovoltaico acoplado a concentradores tipo V. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994.

FRAIDENRAICH, N.; VILELA, O. Exact Solutions for multilayer optical structures: Application to PV modules. *Solar energy*, v. 69, n. 5, p. 357-362, 2000.

GIEBINK, N. C.; WIEDERRECHT, G. P.; WASIELEWSKI, M. R.; FORREST, S. R. Ideal diode equation for organic heterojunctions. I. Derivation and application. *Physical Review B*, v. 82, n. 15, p. 155305, 2010.

GIEBINK, N. C.; WIEDERRECHT, G. P.; WASIELEWSKI, M. R.; FORREST, S. R. Ideal diode equation for organic heterojunctions. II. The role of polaron pair recombination. *Physical Review B*, v. 82, n. 15, p. 155306, 2010.

GREEN, M. A. *Solar Cells: operating principles, technology, and system applications*. Prentice Hall, p 13-37, 1982.

GÜNES, S.; NEUGEBAUER, H.; SARICIFTCI, N. S. Conjugated polymerbased organic solar cells. *Chemistry Reviews*, v. 107, n. 4, p. 1324–1338, 2007.

HEEGER, A. J. Semiconducting and metallic polymers: the fourth generation of polymeric materials (Nobel lecture). *Angewandte Chemie International Edition*, v. 40, n. 14, p. 2591-2611, 2001.

HOPPE, H.; SARICIFTCI, N. S. Organic solar cells: An overview. *Journal of Materials Research*, v. 19, n. 7, p. 1924–1945, 2004.

INGANÄS, O. Organic photovoltaics: avoiding indium. *Nature Photonics*, v. 5, n. 4, p. 201-202, 2011.

JAIN, A.; KAPOOR, A. A new approach to study organic solar cell using Lambert W-function. *Solar energy materials and solar cells*, v. 86, n. 2, p. 197-205, 2005.

JØRGENSEN, M.; NORRMAN, K.; KREBS, F. Stability/degradation of polymer solar cells. *Solar energy materials and solar cells*, v. 92, n. 7, p. 686-714, 2008.

KIM, J. H.; PARK, E. K.; KIM, J. H.; CHO, H. J.; LEE, D. H.; KIM, Y. S. Improving charge transport of P3HT: PCBM organic solar cell using MoO₃ nanoparticles as an interfacial buffer layer. *Electronic Materials Letters*, v. 12, n. 3, p. 383-387, 2016.

KIRCHARTZ, T.; DELEDALLE, F.; TULADHAR, P.; DURRANT, J.; NELSON, J. On the differences between dark and light ideality factor in polymer: fullerene solar cells. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, v. 4, n. 14, pp. 2371-2376, 2013.

KRANTZ, J.; STUBHAN, T.; RICHTER, M.; SPALLEK, S.; LITZOV, I.; MATT, G. J.; SPIECKER, E.; BRABEC, C. J. Spray-coated silver nanowires as top electrode layer in semitransparent P3HT: PCBM-based organic solar cell devices. *Advanced Functional Materials*, v. 23, n. 13, p. 1711-1717, 2013.

KREBS, F. C.; TROMHOLT, T.; JÖRGENSEN, M. Upscaling of polymer solar cell fabrication using full roll-to-roll processing. *Nanoscale*, v. 2, n. 6, p. 873–886, 2010.

KUWABARA, T.; OMURA, Y.; YAMAGUCHI, T.; TAIMA, T.; KOHSHIN, T.; HIGASHIMINE, K.; VOHRA, V.; MURATA, H. Factors affecting the performance of bifacial inverted polymer solar cells with a thick photoactive layer. *The Journal of Physical Chemistry C*, v. 118, n. 8, p. 4050-4055, 2014.

KUWABARA, T.; KATORI, S.; ARIMA, K.; OMURA, Y.; YAMAGUCHI, T.; TAIMA, T.; TAKAHASHI, K. Development of bifacial inverted polymer solar cells using a conductivity-controlled transparent PEDOT: PSS and a striped Au electrode on the hole collection side. *Japanese Journal of Applied Physics*, v. 53, n. 2S, p. 02BE07, 2014.

LIN, H. W.; CHEN, Y. H.; HUANG, Z. Y.; CHEN, C. W.; LIN, L. Y.; LIN, F.; WONG, K. T. Highly efficient bifacial transparent organic solar cells with power conversion efficiency greater than 3% and transparency of 50%. *Organic Electronics*, v. 13, n. 9, p. 1722-1728, 2012.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley and Sons, p 11-14, 2003.

MARSH, R. Alex; HODGKISS, Justin M.; FRIEND, Richard H. Direct Measurement of Electric Field-Assisted Charge Separation in Polymer: Fullerene Photovoltaic Diodes. *Advanced Materials*, v. 22, n. 33, p. 3672-3676, 2010.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY – NREL. Photovoltaic Research – Efficiency Chart. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart-20180716.jpg>>. Acesso em: 25 de maio de 2018.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. Rio de

Janeiro: CEPEL, 2014.

PROCTORA, C. M.; KUIKA M.; NGUYENA T. Q. Charge carrier recombination in organic solar cells. *Progress in Polymer Science*, v. 38, p 1941 – 1960, 2013.

QIAO, Q. Organic Solar Cells. *Journal of Chemical Information and Modeling*, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2013.

RABL, A. Active solar collectors and their applications. Oxford University Press on Demand, pp. 114-125, 1985.

RAND, B.; RICHTER, H. Organic Solar Cells: Fundamentals, Devices, and Upscaling. Taylor and Francis Group, p. 3-49, 2014.

SARICIFTCI, N. S.; SMILOWITZ, L.; HEEGER, A. J.; WUDL, F. Photoinduced electron transfer from a conducting polymer to buckminsterfullerene. *Science*, p. 1474-1476, 1992.

SCHARBER, M. C.; SARICIFTCI, N. S. Efficiency of bulk-heterojunction organic solar cells. *Progress in Polymer Science*, v. 38, n. 12, p. 1929-1940, 2013.

SCHARBER, M. C.; MÜHLBACHER, D.; KOPPE, M.; DENK, P.; WALDAUF, C.; HEEGER, A. J.; BRABEC, C. J. Design rules for donors in bulk-heterojunction solar cells—towards 10% energy-conversion efficiency. *Advanced Materials*, v. 18, n. 6, p. 789-794, 2006.

SERVAITES, J.; YEGANEH, S.; MARKS, T.; RATNER, M. Efficiency enhancement in organic photovoltaic cells: consequences of optimizing series resistance. *Advanced Functional Materials*, v. 20, n. 1, p. 97-104, 2010.

SHIRAKAWA, H.; LOUIS, E. J.; MACDIARMID, A. G.; CHIANG, C. K.; HEEGER, A. J. Synthesis of electrically conducting organic polymers: halogen derivatives of polyacetylene, (CH)_x. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, v. 16, p. 578-580, 1977.

STREET, R.; SCHOENDORF, M.; ROY, A.; LEE, J. Interface state recombination in organic solar cells. *Physical Review B*, v. 81, n. 20, p. 205307, 2010.

SZE, S. M. Physics of semiconductor devices. John Wiley and Sons, p.63-133, 1981.

TANG, C. Organic electroluminescent diodes. Applied Physics Letters, v. 51, n. 12, p. 913-915, 1987.

THOMAS, W.; DAWSON, A.; WAKSMAN, D.; STREED, E. Incident Angle Modifiers for Flat-Plate Solar Collectors: Analysis of Measurement and Calculation Procedures. Journal of Solar Energy Engineering, v. 104, n. 4, pp. 349-357, 1982.

TRESS, W. Organic Solar Cells: Theory, Experiment, and Device Simulation. Springer, v. 208, pp. 100-146, 2014.

TROMHOLT, T.; KATZ, E. A.; HIRSCH, B.; VOSSIER, A.; KREBS, F. C. Effects of concentrated sunlight on organic photovoltaics. Applied Physics Letters, v. 96, n. 7, p. 073501, 2010.

TROMHOLT, T.; MANOR, A.; KATZ, E. A.; KREBS, F. C. Reversible degradation of inverted organic solar cells by concentrated sunlight. Nanotechnology, v. 22, n. 22, p. 225401, 2011.

WALDAUF, C.; SCHILINSKY, P.; HAUCH, J.; BRABEC, C. Material and device concepts for organic photovoltaics: towards competitive efficiencies. Thin Solid Films, v. 451, pp. 503-507, 2004.

WOHRLE, D.; MEISSNER, D. Organic Solar Cells. Advanced Materials, v. 3, n. 3, p. 129-138, 1991.

XIAO, F.; LI, C.; SUN, J.; ZHANG, L. Knowledge domain and emerging trends in organic photovoltaic technology: A scientometric review based on CiteSpace analysis. Frontiers in chemistry, v. 5, p. 67, 2017.

YAMBEM, S. D.; LIAO, K. S.; CURRAN, S. A. Enhancing current density using vertically oriented organic photovoltaics. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 101, p. 227-231,

2012.

YORDANOV, G. H.; MIDTGARD, O. M.; SAETRE, T. O. Two-diode model revisited: Parameters extraction from semi-log plots of IV data. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference. 2010.

YU, G.; GAO, J.; HUMMELEN, J.C.; WUDL, F.; HEEGER, A. J. Polymer photovoltaic cells—enhanced efficiencies via a network of internal donor–acceptor heterojunctions. *Science*, v. 270, n. 5243, p. 1789, 1995.

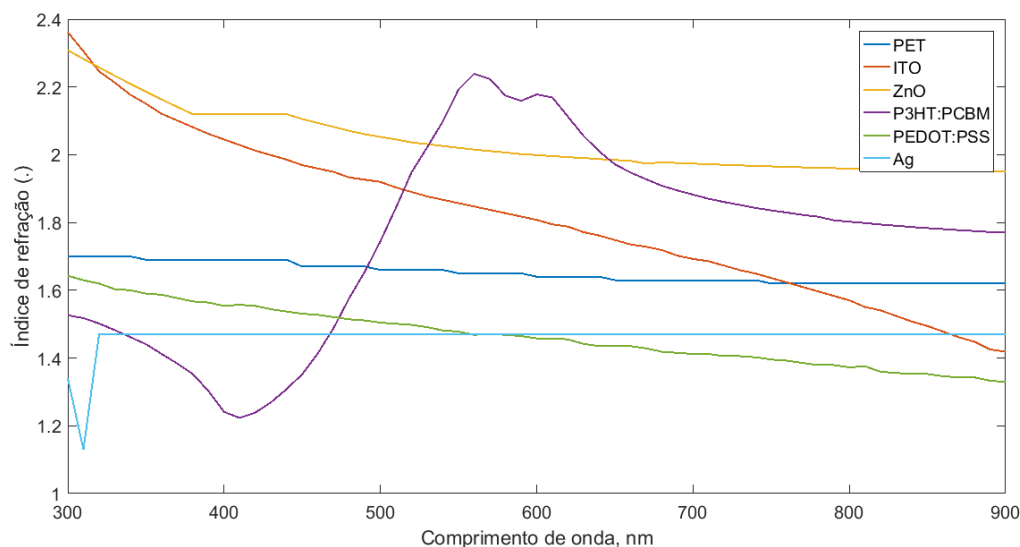
YU, W.; SHEN, L.; SHEN, P.; LONG, Y.; SUN, H.; CHEN, W.; RUAN, S. Semitransparent polymer solar cells with 5% power conversion efficiency using photonic crystal reflector. *ACS applied materials & interfaces*, v. 6, n. 1, p. 599-605, 2013.

YUE, G.; WU, J.; XIAO, Y.; LIN, J.; HUANG, M. Flexible solar cells based on PCBM / P3HT heterojunction. *Frontiers of Optoelectronics in China*, v. 4, n. 1, p. 108–113, 2011.

APÊNDICE A – MODELO ÓPTICO

A Figura 1-A mostra os valores dos índices de refração dos materiais utilizados para desenvolver o modelo óptico neste trabalho.

Figura 1-A - Índices de refração dos materiais do modelo óptico.



Fonte: própria.

Resultados mais detalhados do modelo óptico são apresentados nas Tabelas 1-A a 4-A, onde estão os percentuais de energia absorvida e transmitida por cada camada, e incidente e refletida por cada interface do módulo Tipo 1 para os ângulos de incidência θ de 0, 10, 20, 30, 40, 50 e 60°.

Tabela 1-A - Percentuais de energia absorvida por cada camada do módulo Tipo 1 para os ângulos de incidência θ de 0, 10, 20, 30, 40, 50 e 60°.

Camada	$\theta=0^\circ$	$\theta=10^\circ$	$\theta=20^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$
Filme de barreira	0,0826	0,0830	0,0843	0,0862	0,0886	0,0907	0,0910
Substrato	0,1453	0,1460	0,1479	0,1508	0,1543	0,1571	0,1567
ITO	0,0366	0,0367	0,0370	0,0374	0,0379	0,0381	0,0375
ZnO	0,0420	0,0420	0,0421	0,0420	0,0418	0,0413	0,0398
P3HT:PCBM	0,3340	0,3336	0,3323	0,3298	0,3254	0,3174	0,3024
PEDOT:PSS	0,1145	0,1149	0,1160	0,1178	0,1199	0,1216	0,1213
Ag	0,0436	0,0433	0,0425	0,0410	0,0390	0,0363	0,0329
Filme de barreira	0,0118	0,0118	0,0118	0,0117	0,0115	0,0113	0,0109

Fonte: própria.

Tabela 2-A - Percentuais de energia incidente em cada camada do módulo Tipo 1 para os ângulos de incidência θ de 0, 10, 20, 30, 40, 50 e 60°.

Camada	$\theta=0^\circ$	$\theta=10^\circ$	$\theta=20^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$
Filme de barreira	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Substrato	0,8594	0,8590	0,8574	0,8540	0,8470	0,8321	0,7994
ITO	0,7179	0,7168	0,7133	0,7071	0,6967	0,6792	0,6471
ZnO	0,6791	0,6779	0,6742	0,6675	0,6567	0,6390	0,6077
P3HT:PCBM	0,6352	0,6340	0,6303	0,6236	0,6130	0,5959	0,5661
PEDOT:PSS	0,2930	0,2922	0,2898	0,2856	0,2794	0,2703	0,2555
Ag	0,0437	0,0434	0,0425	0,0410	0,0390	0,0364	0,0330
Filme de barreira	0,1311	0,1302	0,1276	0,1233	0,1172	0,1093	0,0991

Fonte: própria.

Tabela 3-A - Percentuais de energia refletida em cada interface do módulo Tipo 1 para os ângulos de incidência θ de 0, 10, 20, 30, 40, 50 e 60°.

Interface	$\theta=0^\circ$	$\theta=10^\circ$	$\theta=20^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$
A	0,0607	0,0607	0,0610	0,0624	0,0672	0,0802	0,1134
B	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
C	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032
D	0,0030	0,0030	0,0029	0,0029	0,0029	0,0029	0,0029
E	0,0093	0,0093	0,0093	0,0092	0,0092	0,0093	0,0093
F	0,0064	0,0064	0,0064	0,0063	0,0063	0,0064	0,0065
G	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007
H	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
I	0,0069	0,0068	0,0067	0,0066	0,0068	0,0075	0,0097

Fonte: própria.

Tabela 4-A - Percentuais de energia transmitida por cada interface do módulo Tipo 1 para os ângulos de incidência θ de 0, 10, 20, 30, 40, 50 e 60°.

Interface	$\theta=0^\circ$	$\theta=10^\circ$	$\theta=20^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$
A	0,9404	0,9404	0,9400	0,9386	0,9339	0,9211	0,8885
B	0,8594	0,8590	0,8574	0,8540	0,8470	0,8321	0,7994
C	0,7147	0,7136	0,7102	0,7040	0,6936	0,6761	0,6441
D	0,6762	0,6750	0,6713	0,6647	0,6539	0,6362	0,6049
E	0,6259	0,6247	0,6210	0,6144	0,6038	0,5867	0,5568
F	0,2866	0,2858	0,2835	0,2794	0,2732	0,2639	0,2491
G	0,1741	0,1729	0,1694	0,1636	0,1555	0,1450	0,1315
H	0,1306	0,1297	0,1271	0,1227	0,1166	0,1088	0,0986
I	0,1124	0,1116	0,1091	0,1049	0,0989	0,0906	0,0789

Fonte: própria.

Onde as letras A, B, C, D, E, F, G, H e I representam as interfaces ar/filme de barreira, filme de barreira/substrato, substrato/ITO, ITO/ZnO, ZnO/P3HT:PCBM, P3HT:PCBM/PEDOT:PSS, PEDOT:PSS/Ag, Ag/filme de barreira e filme de barreira/ar, respectivamente.

Pode-se observar através das Tabelas 1-A e 4-A a influência do ângulo de incidência da luz na quantidade de energia que atinge a camada ativa e, conseqüentemente, na geração de eletricidade do módulo. É possível notar uma maior reflexão à medida que o ângulo de incidência aumenta.

ANEXO A – ERROS DE INSTRUMENTAÇÃO

Todas as medidas experimentais têm um erro associado. Na Tabela 1-AA, estão listados todos os equipamentos utilizados nos experimentos, as suas resoluções, as variáveis medidas e os seus respectivos erros de medição.

Tabela 1-AA – Equipamentos utilizados nos experimentos e as variáveis medidas, juntamente com as suas resoluções e erros associados.

Instrumentos	Fabricante e modelo	Variável	Resolução	Erro mais offset
Sistema de aquisição de dados	Campbell - CR100	-	0,33 μ V	0,06% + 0,08 mV
Piranômetro	LI-COR LI-200R	Irradiância	-	5%
Sensor de temperatura	Texas Instruments - LM35	Temperatura	0,5 $^{\circ}$ C	0,5 $^{\circ}$ C
Termômetro infravermelho	Minipa - MT-320A	Temperatura	1 $^{\circ}$ C	1 $^{\circ}$ C
Espectroradiômetro	Ocean Optics - HR4000	Irradiância espectral	-	0,10%
Fonte de tensão	KEPCO- BOP 200-1	Tensão	6 mV	0.05% da tensão máxima
		Corrente	0.03 mA	0.05% da corrente máxima

Fonte: páginas dos fabricantes Campbell^{3,4}, Ocean Optics⁵, KEPCO⁶, Casa do Soldador⁷ e Texas Instruments⁸.

³ Disponível em: <<https://www.campbellsci.com.br/cr1000>> Acesso em abr. 2018.

⁴ Disponível em: <<https://www.campbellsci.com.br/li190sb-l>> Acesso em abr. 2018.

⁵ Disponível em: <<https://www.oceanoptics.com/product/hr4000-custom>> Acesso em abr. 2018.

⁶ Disponível em: <<https://www.kepcopower.com/bit-bop.htm>> Acesso em abr. 2018.

⁷ Disponível em: <https://www.casadosoldador.com.br/files/products_attachments/179/MT-320A.pdf> Acesso em abr. 2018.

⁸ Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>> Acesso em abr. 2018.