

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

AVALIAÇÃO QUALITATIVA DOS PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DE UM MÓDULO
FOTOVOLTAICO ORGÂNICO (OPV) COMERCIAL

por

Raíssa Tavares Cabral

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenharia de Energia.

Porto Alegre, dezembro de 2016.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Engenharia de Energia

**AVALIAÇÃO QUALITATIVA DOS PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DE UM MÓDULO
FOTOVOLTAICO ORGÂNICO (OPV) COMERCIAL**

por

Raíssa Tavares Cabral

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRA DE ENERGIA
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Letícia Jenisch Rodrigues

Banca examinadora:

Prof. Dr. Arno Krenzinger (DEMAT / UFRGS)

M. Sc. Fernando Schuck de Oliveira (PROMEC / UFRGS)

Prof^a. Dr^a. Letícia Jenisch Rodrigues (DEMEC / UFRGS)

Porto Alegre, 09 de dezembro de 2016.

Cabral, R. T. **Avaliação Qualitativa dos Parâmetros Característicos de um Módulo Fotovoltaico Orgânico (OPV) Comercial**. 2016. 28f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

O trabalho avalia um módulo fotovoltaico orgânico (composto por dez células em série) comercialmente disponível. As avaliações são realizadas para três inclinações do módulo (30°, 45° e 90°) e para três cores de fundo distintas fixadas ao suporte (branco, preto e metalizado) em condições reais de utilização – exposição direta ao sol. Sob iluminação natural, são traçadas as curvas características, identificados os parâmetros elétricos característicos (V_{OC} , I_{SC} , P_{MP} , V_{MP} , I_{MP}) e calculadas a eficiência e o fator de forma para todas as configurações de ensaio *outdoor* e para um caso específico, obtendo os dados através do simulador solar do Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PALAVRAS-CHAVE: curva característica de módulo fotovoltaico orgânico, eficiência de módulo fotovoltaico orgânico, OPV, parâmetros característicos de módulo fotovoltaico orgânico.

Cabral, R. T. **Qualitative Evaluation of the Characteristic Parameters of an Organic Photovoltaic Module (OPV) Commercial**. 2016. 28f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

The work evaluates an organic photovoltaic module (composed by ten cells in series) commercially available. The evaluations are performed for three inclinations of the module (30°, 45° and 90°) and three different background colors fixed to the support (white, black and metallic) in real conditions of use - direct exposure to the sun. Under natural light, the characteristic curves are plotted, the characteristic electrical parameters are identified (V_{OC} , I_{SC} , P_{MP} , V_{MP} , I_{MP}) and the efficiency and form factor are calculated for all outdoor test configurations and for a specific case, obtaining the data through the solar simulator of the Solar Energy Laboratory (LABSOL) at Federal University of Rio Grande do Sul.

KEYWORDS: Characteristic curve of organic photovoltaic module, efficiency of organic photovoltaic module, OPV, characteristic parameters of organic photovoltaic module.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
3.1. Efeito fotovoltaico	3
3.2. Curva característica de células fotovoltaicas (Curva I-V)	3
3.3. Corrente de Curto Circuito (I_{SC}) e Tensão de Circuito Aberto (V_{OC}).....	3
3.4. Máxima potência (P_{MP}), Tensão de máxima potência (V_{MP}) e Corrente de máxima potência (I_{MP}).....	3
3.5. Eficiência	3
3.6. Fator de Forma (FF)	4
3.7. Hora Solar	4
3.8. Células fotovoltaicas orgânicas.....	5
3.8.1 Características	5
3.8.2 Exemplos de aplicações.....	5
3.8.3 Produção e funcionamento.....	5
4. CASO DE ESTUDO	7
4.1 Escopo	7
4.2 Suporte.....	8
5. METODOLOGIA	10
5.1 Determinação das Curvas Características e obtenção dos Parâmetros Característicos	10
5.1.1 Exposição solar direta (<i>outdoor</i>).....	10
5.1.2 Análise dos parâmetros utilizando o Simulador Solar	12
5.1.3 Conversor carregador de celular	12
6. RESULTADOS	14
6.1. Hora solar	14
6.2. Curvas características I-V e P-V	14
6.2.1 Inclinação 30°	15
6.2.2 Inclinação 45°	16
6.2.3 Inclinação 90°	17
6.2.4 Simulador.....	19
6.3 Parâmetros característicos	19
6.4 Teste do <i>kit</i> – carregador de smartphone.....	20
6.5 Análise das Incertezas.....	21
7. CONCLUSÕES	22
7.1 Discussão.....	22
7.2 Trabalhos futuros.....	22
8. REFERÊNCIAS.....	24

1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda de energia elétrica e a crescente preocupação ambiental sobre as questões energéticas são importantes fatores para o reforço dos estudos acerca da diminuição da utilização de recursos não renováveis, como petróleo e carvão mineral na geração de energia elétrica. O uso de fontes renováveis, tais como hidrelétrica, eólica, solar e biomassa são fundamentais tanto pelas questões ambientais, quanto para a diversificação das fontes da matriz energética.

O Brasil é um dos países com maior índice de radiação solar do mundo, tendo esse potencial ainda muito pouco explorado. Segundo o Balanço Energético Nacional do ano de 2015 (BEN, 2015), a produção de energia elétrica através da energia solar fotovoltaica representava 0,011% do total da potência instalada. Os estudos para a melhoria da eficiência das células, assim como o desenvolvimento de novas tecnologias para o aproveitamento da irradiação solar na obtenção de energia e programas governamentais de incentivo à instalação de sistemas fotovoltaicos interligados à rede (geração distribuída) poderão impulsionar o crescimento da participação da energia solar na matriz energética nacional.

O presente trabalho teve como motivação o estudo de uma tecnologia relativamente nova, ainda pouco conhecida e estudada no país, conhecida como OPV (do inglês, *Organic Photovoltaic*) visando conhecer melhor suas características elétricas e suas possíveis formas de utilização. Devido à sua diversidade de aplicação, principalmente pelas suas características de translucidez e flexibilidade, torna-se atrativo o estudo de implementação de células fotovoltaicas orgânicas para a geração de energia elétrica em áreas com uma grande incidência solar, até então não aproveitada – como o vidro de janelas, por exemplo.

Assim, foi realizada a avaliação de módulos fotovoltaicos orgânicos (OPV) comerciais, traçando as curvas características para diferentes inclinações e cores de fundo fixadas a seu suporte, obtendo seus parâmetros característicos. Os testes mencionados foram realizados em meio externo sob iluminação natural. Também foi levantada a curva I-V do módulo no simulador solar do LABSOL. Ao final foi testada a possibilidade de carregar a bateria de um celular com um *kit* comprado do mesmo fabricante, transformando-o em um carregador portátil.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No estudo de Emmott *et al.*, 2015, é feita uma análise técnico-econômica de uma estufa solar fotovoltaica com a escolha de materiais OPV. É analisado o impacto da seletividade espectral dos materiais semitransparentes das células OPV no crescimento das plantas, além da comparação de desempenho dos dispositivos OPV com outras tecnologias, como o silício cristalino opaco com cobertura parcial.

Lunt e Bulovic, 2011, mostram os resultados de eficiência de células fotovoltaicas orgânicas com diferentes percentuais de transparência das células e diferentes níveis ópticos de interferência de radiação infravermelha. Os autores sugerem sua aplicação em janelas para a geração de energia para alimentação de dispositivos eletrônicos, mantendo boa iluminação natural no ambiente.

Matsumoto, 2013, testou novos processos de fabricação e novos materiais para a construção de células fotovoltaicas orgânicas, a fim de aumentar a sua eficiência quântica. O estudo concluiu que todas as modificações físico-químicas feitas mostraram resultados positivos em relação aos dispositivos padrão fabricados e comercializados até então.

Yamamoto, 2014, fez a caracterização de dispositivos fotovoltaicos orgânicos de dois tipos de estruturas distintas: heterojunção em bicamada e heterojunção de volume. O conceito de heterojunção dá-se pela combinação de dois materiais com propriedades elétricas diferentes e são opções desenvolvidas para aumentar a eficiência dos dispositivos frente aos constituídos por apenas um material fotossensível. Foram estudadas as propriedades ópticas e elétricas de vários polímeros que constituem os dois tipos de estruturas.

Coutinho, 2015, fez o estudo das propriedades elétricas de uma célula fotovoltaica orgânica de heterojunção de volume. Sua caracterização é feita mantendo-se uma irradiação constante com variação de temperatura, constatando que a medida que a temperatura aumenta (de 100 K a 340 K) há também um aumento da corrente de curto circuito, do fator de forma e da eficiência da célula, apenas ocorrendo um decréscimo de sua tensão de circuito aberto.

Cardozo *et al.*, 2016, realizou a caracterização de módulos fotovoltaicos orgânicos em condições reais de operação (exposto diretamente ao sol e sem controles climáticos), observando o comportamento de seus parâmetros característicos em função da irradiação e da temperatura.

Gasparin, 2009, desenvolveu um sistema gerenciado por um programa de computador em linguagem *Visual Basic*® para traçar a curva característica I-V (corrente *versus* tensão) de módulos fotovoltaicos. O sistema desenvolvido encontra-se no LABSOL e foi utilizado no presente trabalho para a obtenção das curvas características do módulo fotovoltaico orgânico estudado, quando exposto à radiação solar.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é a conversão direta da energia radiante em energia elétrica associada a uma corrente elétrica e a uma diferença de potencial. Foi observado pela primeira vez por Edmond Becquerel em 1839, ao notar que uma célula eletroquímica apresentava uma diferença de potencial em seus terminais ao ser exposta à luz. A unidade fundamental desse processo de conversão é a célula fotovoltaica, produzida por material semicondutor (silício, na maioria das vezes).

3.2. Curva característica de células fotovoltaicas (Curva I-V)

A curva corrente *versus* tensão (também conhecida como curva I-V) mostra a representação característica da saída de dispositivos fotovoltaicos. Através dela pode-se obter os parâmetros elétricos característicos da célula ou do módulo que se deseja avaliar. As influências dos níveis de temperatura e de irradiância incidentes nos dispositivos podem ser facilmente visualizadas através do traçado das curvas características para as diferentes condições a serem analisadas.

3.3. Corrente de Curto Circuito (I_{SC}) e Tensão de Circuito Aberto (V_{OC})

A corrente de curto circuito (I_{SC}) é a máxima corrente elétrica que o módulo pode produzir quando a tensão em seus terminais é nula ($V = 0$). Tensão de circuito aberto (V_{OC}) é a máxima tensão obtida nos terminais do módulo (ou célula) quando não há circulação de corrente ($I = 0$).

3.4. Máxima potência (P_{MP}), Tensão de máxima potência (V_{MP}) e Corrente de máxima potência (I_{MP})

A curva de potência em função da tensão (conhecida como curva P-V) pode ser determinada a partir dos dados da curva I-V através do produto corrente-tensão. O pico da curva P-V (quando $dP/dV = 0$) é identificada como ponto de máxima potência, P_{MP} . Seu par I-V correspondente é denominado de corrente de máxima potência (I_{MP}) e tensão de máxima potência (V_{MP}) e pode ser retirado do gráfico P-V.

3.5. Eficiência

Eficiência é o parâmetro que define quão efetivo é o dispositivo na conversão de energia solar em energia elétrica. É definida pela razão entre a potência máxima produzida pela célula (ou módulo) e a energia incidente sobre ela.

$$\eta = \frac{P_{MP}}{G \times A} \times 100 \quad (3.1)$$

Na qual:

η – Eficiência [%];

P_{MP} – Máxima potência gerada [W];

G – Irradiância incidente [W/m²];

A – Área da célula (ou módulo) [m²].

Neste trabalho foram calculadas duas eficiências: a eficiência do módulo, considerando sua área total, e a eficiência das células considerando apenas a área efetivamente utilizada na conversão de energia das dez células em série. O cálculo da eficiência das células é importante devido à fácil customização da impressão dos módulos orgânicos e mostra a importância de maximizar sua área útil de conversão na fabricação.

3.6. Fator de Forma (FF)

O Fator de Forma é a relação entre a máxima potência e o produto da tensão de circuito aberto e da corrente de curto circuito do módulo, sendo um parâmetro útil na determinação da qualidade das células e módulos fotovoltaicos. Quanto menores forem as perdas resistivas dos dispositivos fotovoltaicos, mais próxima da forma retangular será sua curva I-V e maior o valor do Fator de Forma. As gerações fotovoltaicas tradicionais apresentam Fator de Forma na ordem de 65% a até valores superiores a 80%, dependendo da tecnologia (Pinho e Galdino, 2014). O FF é definido por

$$FF = \frac{V_{MP} \times I_{MP}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (3.2)$$

Na qual:

V_{MP} – Tensão de máxima potência [V];

I_{MP} – Corrente de máxima potência [A];

V_{OC} – Tensão de circuito aberto [V];

I_{SC} – Corrente de curto circuito [A].

3.7. Hora Solar

A hora solar (também chamada de tempo solar verdadeiro – TSV) é o tempo especificado em todas as relações envolvendo a posição do sol em um determinado momento e está baseado no movimento angular aparente do sol através do céu. Para a conversão da hora oficial do local para a hora solar é necessário aplicar dois fatores de correção: o primeiro considera a diferença de longitudes entre o meridiano do observador e o meridiano padrão no qual a hora oficial está baseada; o segundo se dá pela Equação do Tempo, a qual se relaciona com a inclinação do eixo da Terra com relação ao plano e à excentricidade de sua órbita (Krenzinger, 2010).

A relação da hora solar com a hora oficial é dada por

$$TSV - T_o = 4(L_{st} - L_{loc}) + E_t \quad (3.3)$$

Na qual:

T_o – Hora oficial;

L_{st} – Longitude padrão do fuso [graus];

L_{loc} – Longitude local [graus];

E_t – Equação do Tempo [min].

Os dois fatores apresentam respostas dadas em minutos. É importante observar que quando há vigência do horário de verão no local, deve ser descontada 1h da hora oficial antes de se realizar a correção.

3.8. Células fotovoltaicas orgânicas

Uma célula fotovoltaica orgânica ou OPV (abreviatura para *Organic Photo Voltaic*) é um tipo de célula solar de polímero que usa a eletrônica orgânica, para absorção de luz e transporte de carga na produção de eletricidade pelo efeito fotovoltaico. O produto pode cobrir estruturas e objetos, possibilitando a geração de energia em qualquer superfície que receba luz do sol. São classificadas como tecnologia solar fotovoltaica de terceira geração e trazem novos tipos de aplicação, não desejando substituir as células de silício tradicionais.

3.8.1 Características

Abaixo são citadas algumas características apresentadas pelos fabricantes da tecnologia.

- Flexível e leve;
- Translúcido;
- Reciclável;
- Menos dependente do ângulo de incidência solar que as células de silício tradicionais;
- Customizável: pode-se variar cores, formas e tamanhos.

3.8.2 Exemplos de aplicações

- Imóveis: janelas, paredes, telhas fotovoltaicas;
- Eletrônicos: carregador portátil de baterias de celular;
- Mobiliário urbano: pontos de ônibus, estacionamentos;
- Automóveis: teto de carros com filmes OPV;
- Estufa agrícola: com cobertura de plástico com OPV.

3.8.3 Produção e funcionamento

É utilizada a técnica de produção por processo de impressão em rolo – *roll-to-roll* – utilizando baixas temperaturas, o que demanda baixo consumo energético. A impressão é feita a partir da deposição de tinta polimérica em um substrato de plástico maleável, sendo esse método adaptado de processos utilizados na indústria têxtil e gráfica (Sunew,2016).

A Figura 3.1 abaixo mostra a configuração básica de uma célula fotovoltaica orgânica, possuindo um semicondutor polimérico entre duas camadas de eletrodos com diferentes

funções. Nos módulos aqui estudados, a camada de vidro mostrada na figura é substituída por plástico maleável.

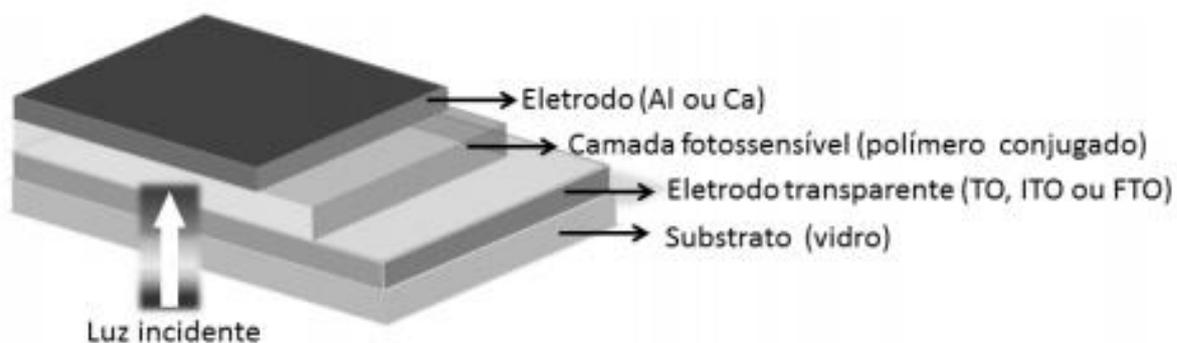


Figura 3.1 - Estrutura sanduíche de um dispositivo fotovoltaico composto por um polímero conjugado como camada fotossensível. Fonte: Yamamoto, 2014.

4. CASO DE ESTUDO

4.1 Escopo

Este trabalho consistiu em avaliar um arranjo de células fotovoltaicas orgânicas comercialmente disponíveis, apresentando os seguintes estudos:

- Obtenção das curvas características para diferentes inclinações e cores de fundo fixadas ao suporte de madeira, identificando seus parâmetros característicos - exposição direta ao sol;
- Obtenção das curvas características e identificação dos parâmetros de um caso único ensaiado no simulador solar;
- Cálculo da eficiência dos módulos (utilizando a área total e área das células) - exposição direta e simulador solar;
- Cálculo do Fator de Forma – exposição direta e simulador solar;
- Carregamento de um celular (*smartphone*) com o *kit* comprado do mesmo fabricante.
- Análise dos resultados

O módulo utilizado para as avaliações do presente trabalho possui dimensões de 56 cm x 30,5 cm e é mostrado na Figura 4.1.

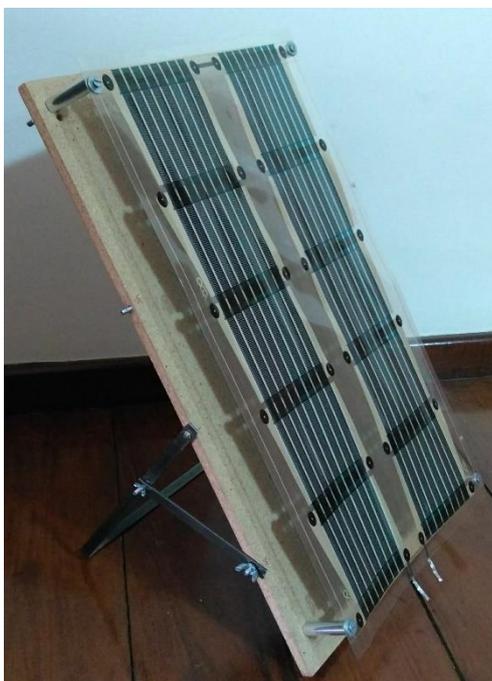


Figura 4.1 – Módulo montado no suporte.

Como já é conhecido, para uma utilização mais eficiente dos módulos fotovoltaicos, eles devem estar orientados em direção à Linha do Equador, devendo suas faces estarem voltadas ao Norte Verdadeiro, no caso de instalações localizadas no hemisfério Sul. Logo, todas as medidas aqui apresentadas foram realizadas com os módulos orientados para o Norte.

Os ensaios foram feitos para diferentes inclinações dos módulos (30°, 45° e 90°) a fim de avaliar a menor dependência à inclinação das células orgânicas em comparação aos módulos fotovoltaicos de silício convencional – característica amplamente divulgada pelos fabricantes da tecnologia. Além da mudança da inclinação, também foram avaliadas três diferentes cores de fundo (preta, branca e metalizada) fixadas ao suporte de madeira a fim de verificar a influência da reflexão da irradiação na parte posterior das células frente à sua geração de energia.

Além dos ensaios sob iluminação natural, também foram obtidos os dados para o traçado das curvas características através do simulador solar do LABSOL. O teste foi realizado sem a utilização do suporte construído, estando o módulo fixado diretamente a uma placa branca.

Percebendo o significativo percentual de área do módulo não aproveitada para a conversão de energia, considerou-se importante a avaliação do cálculo da eficiência em duas partes: eficiência total e eficiência das células. Para a obtenção da eficiência total foi utilizada a área total do módulo (0,1708 m²) e para a eficiência de célula foi utilizada apenas a área que compreende as dez células que compõe o módulo (0,0776 m²).

Todas as medidas aqui apresentadas para os testes sob iluminação natural foram realizadas no dia 04/11/2016 no LABSOL, localizado no Campus do Vale na cidade de Porto Alegre-RS. Os ensaios foram realizados entre as 09h59min e 10h44min (horário solar verdadeiro) em um dia de céu limpo.

4.2 Suporte

Para a realização dos testes foi necessária a confecção de um suporte para que os módulos ficassem esticados e houvesse facilidade na sua manipulação para a troca dos ângulos de ensaio. O suporte é construído em madeira com separadores entre a chapa de madeira e o módulo, possibilitando a convecção natural. Ele também possui suportes de metal ajustáveis aos ângulos desejados.

Na confecção do suporte foram usadas placas de MDP (*Medium Density Particleboard*) de 12 mm de espessura com dimensões de 58 cm x 32,5 cm. O espaçamento entre a madeira e o módulo é feito com 4 tubos de alumínio de 5 cm de comprimento presos à placa de MDP e ao módulo por parafusos de 90 mm x 5 mm, arruelas e porcas do tipo borboleta, na parte de trás da madeira, para melhor fixação dos parafusos. A montagem do suporte é mostrada na Figura 4.2.



Figura 4.2 – Vista lateral do suporte.

5. METODOLOGIA

O trabalho consistiu em, a partir dos testes realizados, obter as curvas características do módulo em diferentes condições de inclinação e cor de fundo em condições reais de operação (meio externo, exposição direta ao sol) e via simulador solar.

5.1 Determinação das Curvas Características e obtenção dos Parâmetros Característicos

5.1.1 Exposição solar direta (*outdoor*)

A determinação das curvas características é essencial para a análise do desempenho elétrico das células, podendo-se assim conhecer a influência da irradiação solar e da temperatura frente à sua capacidade de geração de energia. Para a obtenção da curva é necessário que se faça uma varredura de tensão na célula, desde o ponto de curto circuito (I_{SC}) (quando $V = 0$), até o valor de tensão de circuito aberto V_{OC} (quando $I = 0$).

Para traçar as curvas foi utilizado o sistema desenvolvido na dissertação de mestrado de Gasparin, 2009, que se encontra no LABSOL, sendo as medidas de temperatura do módulo realizadas por uma câmera termográfica ao invés dos sensores utilizados na referência. Devido à baixa corrente dos módulos orgânicos, foi trocada a resistência *shunt* de 130 mV/A por uma de 1000 mV/A, com o objetivo de diminuir os ruídos gerados nas medidas. A vantagem da utilização deste sistema é a garantia da simultaneidade das medidas dos pares I-V obtidos, sendo esta condição essencial para a determinação das curvas. Os equipamentos utilizados no sistema de obtenção dos dados são listados abaixo. A descrição completa do sistema encontra-se na seção 4.2 do referido trabalho:

- Fonte bipolar KEPCO - BOP 100-10MG - Utilizada para polarizar as células com os diversos valores de tensão de varredura;
- Multímetro Agilent 3458A - Medidas de tensão e corrente para a obtenção da curva;
- Multímetro Agilent 34410A - Medidas de tensão para determinação da irradiância;
- Microcomputador e conversor USB - GPIB - Gerenciador do sistema;
- Célula de referência com resistor *shunt* - Medida da irradiância solar;
- Câmera termográfica auto ajustável FLIR - Medida de temperatura.

As configurações utilizadas no programa foram:

Tensão inicial: - 2 V

Tensão final: 60 V

Célula de referência: 30,775 mV / 1000W/m²

Shunt: 1000 mV/A

Tempo por medida: 400 μ s

Número de medidas: 500

Tempo total: 200 ms

Como pode ser observado nas configurações do sistema utilizado, a varredura das tensões inicia-se com polarização inversa (tensão negativa) visto que

para a obtenção completa da curva característica I-V são necessários valores de tensão inferiores a 0 para definir o ponto de curto circuito, pois é necessário compensar a queda de tensão associada à resistência série, fios e conexões, até valores de tensão superiores ao ponto de circuito aberto. (Gasparin, 2009).

O sistema grava um arquivo com extensão .dat contendo os seguintes dados: número da medida, tensão, corrente e irradiância. O arquivo pode ser aberto em planilhas eletrônicas para a geração dos gráficos desejados, cálculo dos parâmetros elétricos ou quaisquer outras manipulações de dados pertinentes.

Como a irradiância sofre pequenas alterações dentro dos 200 ms de medida (sendo suas variações inferiores a 1% em todos os ensaios aqui apresentados), os dados de corrente foram corrigidos para o valor exato mais próximo à média das irradiâncias medidas através de

$$I_{corr} = \frac{G_{corr} \times I_{med}}{G_{med}} \quad (4.1)$$

Na qual,

I_{corr} – Corrente corrigida [A];

I_{med} – Corrente medida [A];

G_{corr} – Irradiância de correção [W/m²];

G_{med} – Irradiância medida [W/m²].

A Figura 5.1 a seguir apresenta um exemplo de medição de temperatura de uma das células do módulo durante os testes utilizando a câmera termográfica. Nota-se que devido ao gradiente de temperaturas apresentada no módulo, ficou difícil especificar a temperatura exata do ensaio. O horário correto da medida em questão é 11h08min (horário local de Porto Alegre – horário de verão) do dia 04/11/2016, sendo 06h08min um erro de configuração da câmera.

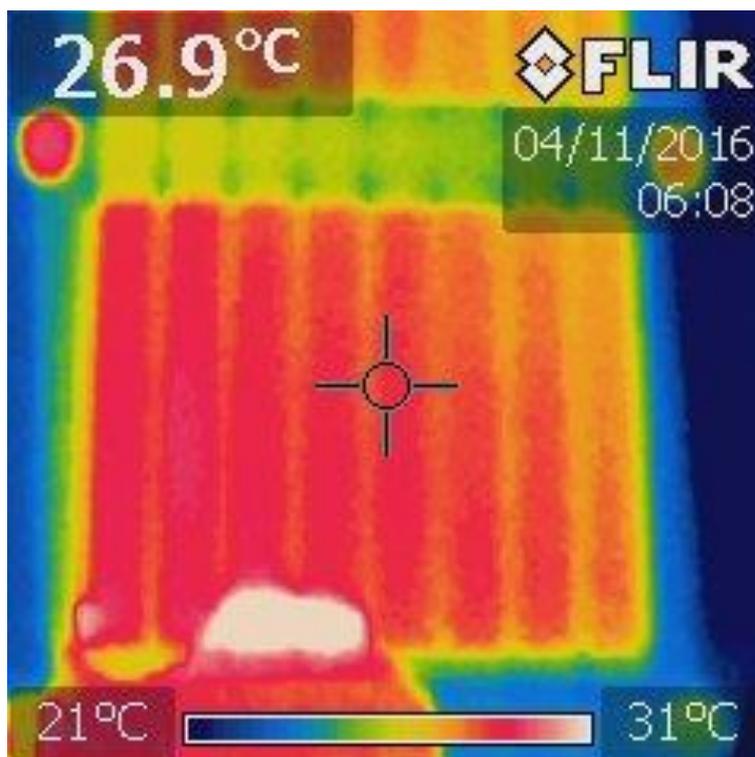


Figura 5.1 – Medida de temperatura com a câmera termográfica.

5.1.2 Análise dos parâmetros utilizando o Simulador Solar

Além da utilização do sistema proposto por Gasparin, 2009, foi levantada a curva I-V do módulo no simulador solar do LABSOL (modelo PASAN SunSim 3C). O simulador é utilizado para a caracterização de módulos fotovoltaicos submetidos à certificação junto ao Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade de Tecnologia (INMETRO), dentro do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). Foram obtidos os dados do módulo orgânico através do simulador com o objetivo de comparar seu comportamento entre o ensaio com o *flash* de 10 ms de duração e a exposição contínua ao sol. O teste foi realizado com o módulo fixado diretamente a um fundo branco, sem a utilização do suporte construído para os ensaios *outdoor*.

5.1.3 Conversor carregador de celular

Foi comprado juntamente com os módulos, como parte de um *kit*, um dispositivo conversor CC/CC, feito particularmente para células fotovoltaicas orgânicas ligadas em série. Possui uma saída USB (do inglês, *Universal Serial Bus*) e sua faixa de potências é ideal para o carregamento de *smartphones*, pequenos dispositivos, sensores, entre outros. Ele possui duas entradas paralelas para os dois módulos OPV e um controlador do ponto de máxima potência (em inglês, *Maximum Power Point Control* – MPPC) o qual busca maximizar a potência extraída dos módulos. As especificações do dispositivo são mostradas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Especificações da placa. Fonte: Fabricante

Parâmetro	Intervalo
Faixa de tensão de entrada DC (V_{OC}) [V]	8 – 66
Faixa de tensão DC na faixa MPP (V_{MPP}) [V]	8 – 42
Nº de portas paralelas	2
Máxima corrente de saída [A]	1,5
Máxima tensão de saída [V]	5,2
Potência nominal de saída [W]	3
Massa [g]	15
Dimensões da placa [mm]	50x40x12

A Figura 5.2 mostra a placa conversora com os cabos conectados às suas duas portas paralelas e a saída USB.

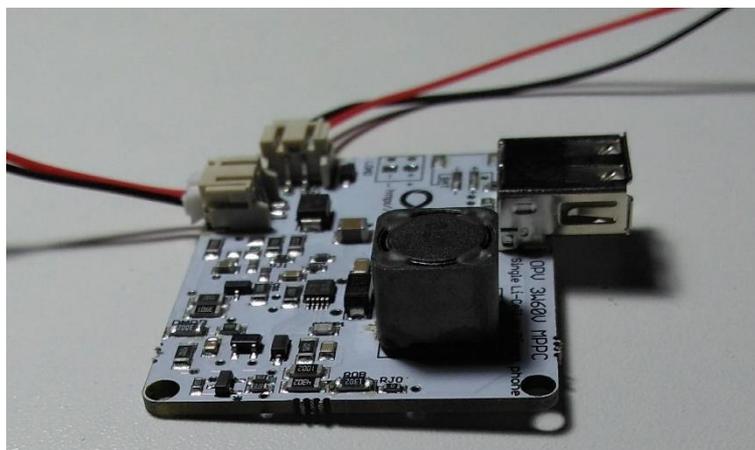


Figura 5.2 – Placa conversora.

6. RESULTADOS

6.1. Hora solar

Utilizando a Equação 3.3 foi realizado o cálculo da conversão da hora oficial local para o Tempo Solar Verdadeiro (TSV) para a apresentação dos ensaios. Os dados de longitude de Porto Alegre são: $L_{st} = 45^\circ$ Oeste e $L_{loc} = 51^\circ$ Oeste. A Equação do tempo para o dia 04/11/2016 resultou em 16,0 minutos. Frente à vigência do horário de verão na referida data, os cálculos resultaram na subtração de 1h08min ao horário local para a obtenção do TSV (a 1h refere-se à subtração devido ao horário de verão e os 8 minutos correspondem aos resultados dos cálculos de conversão). A Tabela 6.1 apresenta a irradiância, horário local e TSV para cada ensaio realizado.

Tabela 6.1 – Irradiação e horário das medições

Configuração	G [W/m²]	Hora local horário de verão	TSV
Metal 30°	945	11h30min	10h22min
Branco 30°	988	11h50min	10h42min
Preto 30°	914	11h07min	09h59min
Metal 45°	902	11h34min	10h26min
Branco 45°	930	11h48min	10h40min
Preto 45°	876	11h13min	10h05min
Metal 90°	318	11h35min	10h27min
Branco 90°	340	11h52min	10h44min
Preto 90°	340	11h17min	10h09min

6.2. Curvas características I-V e P-V

As Figuras de 6.1 a 6.9 mostram as curvas I-V e P-V dos testes realizados em condições reais de operação (exposição direta ao sol) para as três inclinações ensaiadas e suas três respectivas cores de fundo fixadas ao suporte. A Figura 6.10 apresenta as mesmas curvas para o teste realizado no simulador solar do Laboratório de Energia Solar da UFRGS. Todos os gráficos apresentam a mesma escala em seus eixos a fim de verificar o comportamento das curvas, principalmente frente aos diferentes níveis de irradiância incidente.

6.2.1 Inclinação 30°

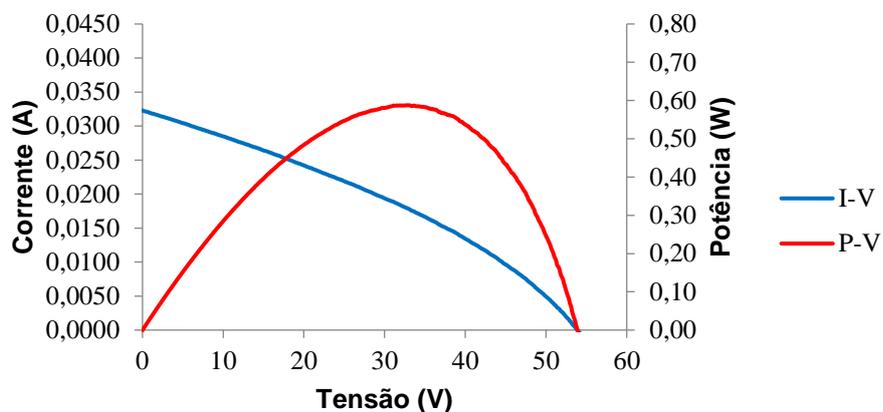


Figura 6.1 – Fundo branco com inclinação 30° e temperatura de célula de aproximadamente 31 °C.

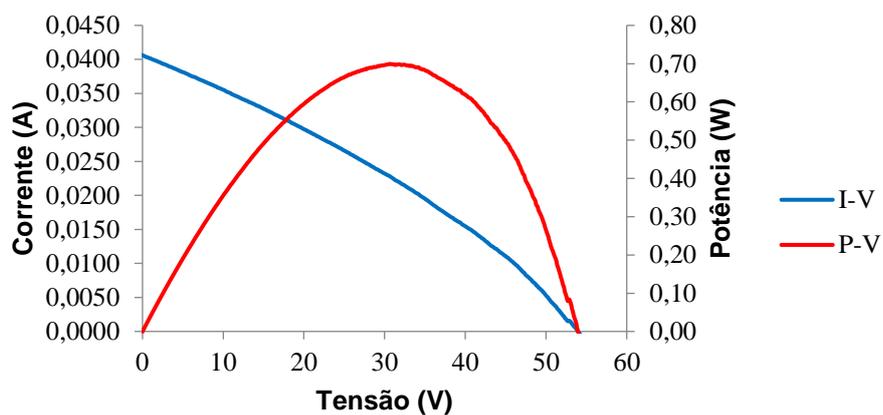


Figura 6.2 – Fundo metálico com inclinação 30° e temperatura de célula de aproximadamente 28 °C.

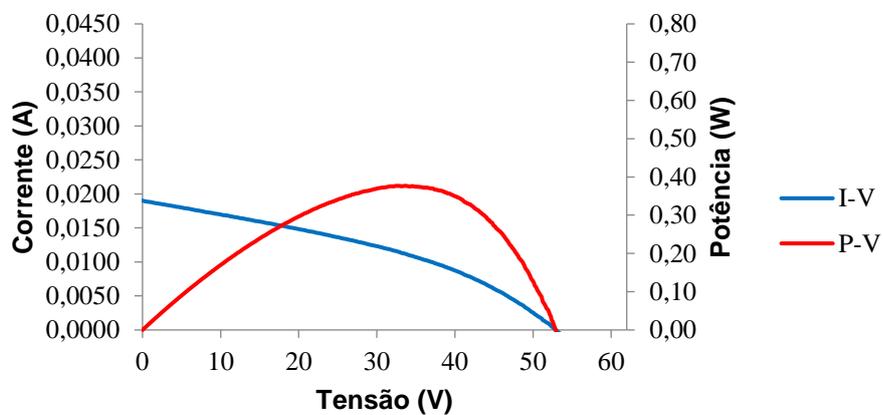


Figura 6.3 – Fundo preto com inclinação 30° e temperatura de célula de aproximadamente 28 °C.

Analisando as curvas com inclinação de 30° percebe-se que as tensões de circuito aberto para as três cores de fundo se mantêm em aproximadamente 53 V. Sendo a corrente de curto circuito da configuração com fundo metálico maior que o dobro do fundo preto (sendo a corrente do fundo branco, intermediária), tem-se o indicativo da resposta positiva do módulo à irradiação recebida também do seu lado posterior devido à reflexão no suporte, como era esperado quando se optou pela troca das cores de fundo fixadas ao suporte para os testes.

6.2.2 Inclinação 45°

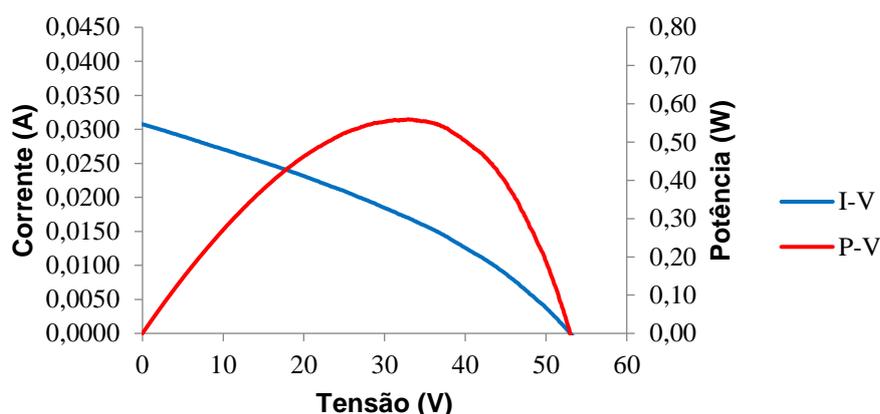


Figura 6.4 – Fundo branco com inclinação 45° e temperatura de célula de aproximadamente 29 °C.

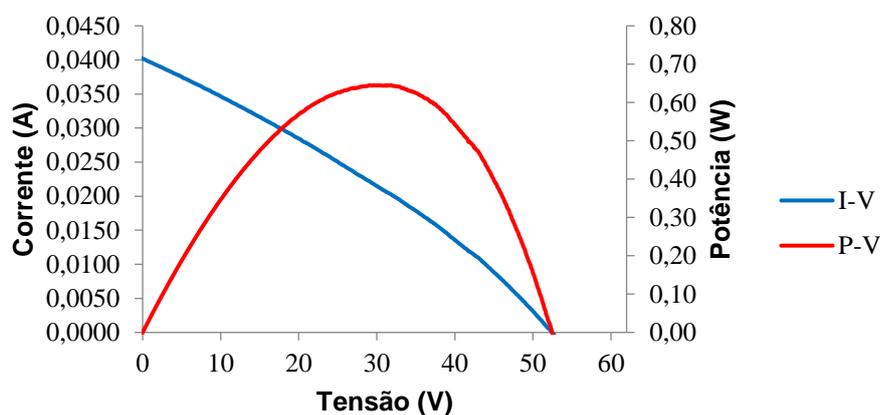


Figura 6.5 – Fundo metálico com inclinação 45° e temperatura de célula de aproximadamente 32 °C.

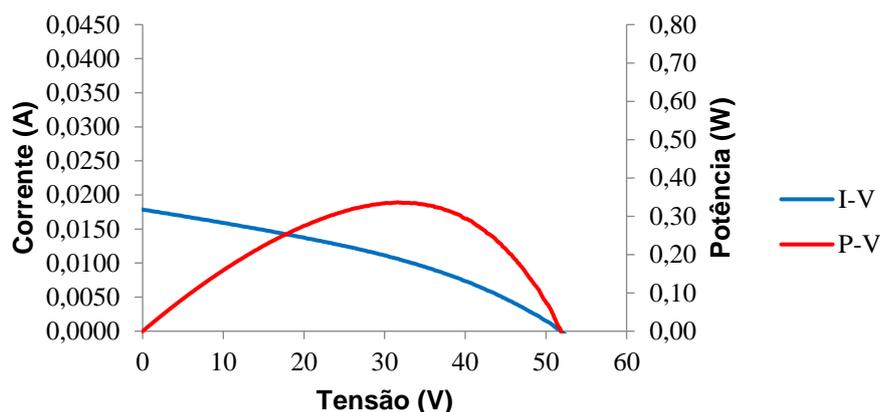


Figura 6.6 – Fundo preto com inclinação 45° e temperatura de célula de aproximadamente 29 °C.

Para a inclinação de 45° a tensão de circuito aberto é mantida na mesma faixa da inclinação de 30°, aproximadamente 52 V, para todas as cores de fundo. As diferenças entre valores de corrente de curto circuito também se mantém. Conforme mencionado anteriormente, o Fator de Forma é a relação entre a máxima potência e o produto da tensão de circuito aberto e da corrente de curto circuito do módulo. Além disso, quanto menores forem as perdas resistivas dos dispositivos fotovoltaicos, mais próxima da forma retangular será sua curva I-V e maior o valor do Fator de Forma. Utilizando esta informação e observando as Figuras 6.4 a 6.6, chega-se à conclusão de que a configuração com o fundo preto apresenta o maior Fator de Forma entre as três cores de fundo ensaiadas.

6.2.3 Inclinação 90°

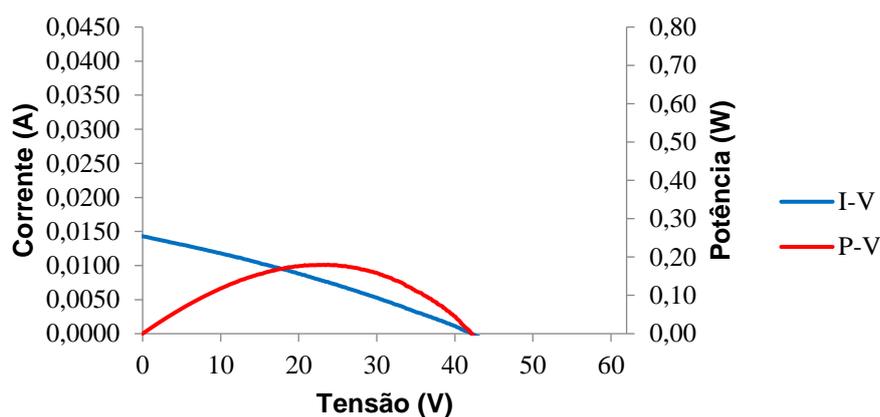


Figura 6.7 – Fundo branco com inclinação 90° e temperatura de célula de aproximadamente 43 °C.

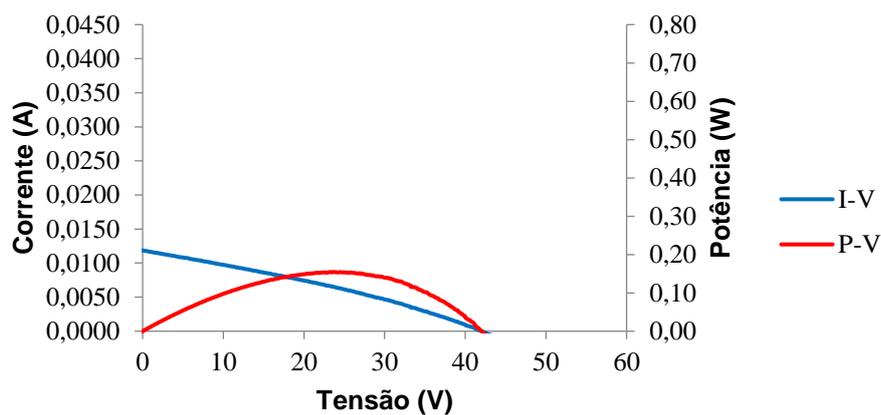


Figura 6.8 – Fundo metálico com inclinação 90° e temperatura de célula de aproximadamente 40 °C.

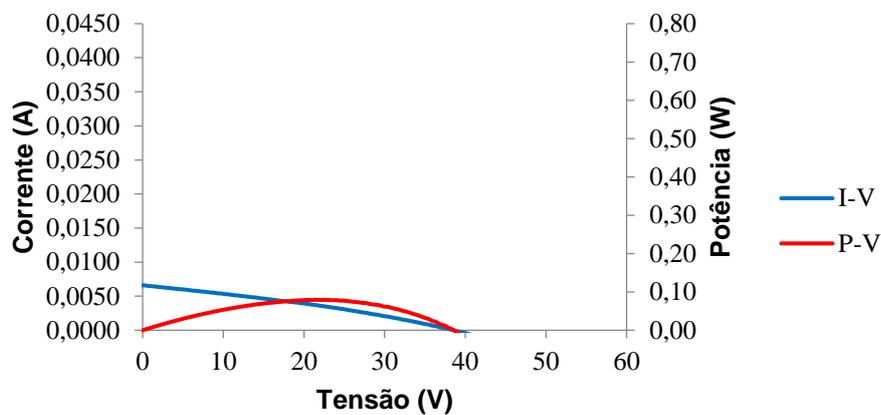


Figura 6.9 – Fundo preto com inclinação 90° e temperatura de célula de aproximadamente 33 °C.

A inclinação de 90° foi utilizada com a finalidade de ensaiar o módulo na posição de uma janela, uma provável aplicação de um OPV. As tensões de circuito aberto ficaram próximas a 40 V e as correntes de curto circuito diminuíram significativamente com a grande diminuição da irradiância incidente no módulo, devido à inclinação.

6.2.4 Simulador

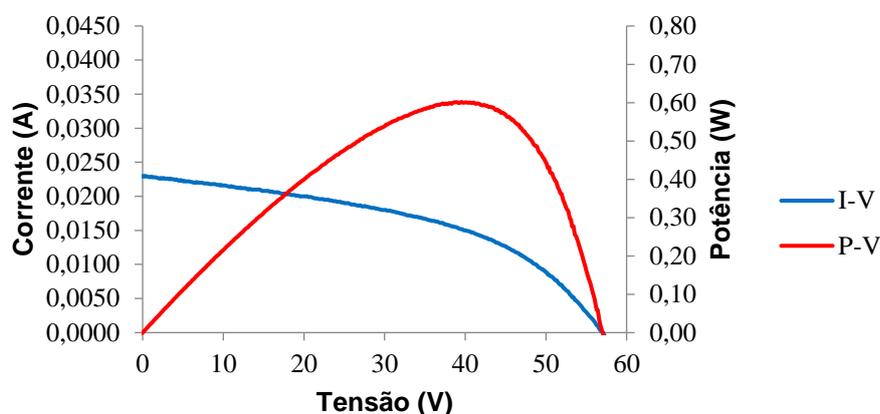


Figura 6.10 – Teste no simulador solar.

A utilização do simulador solar possibilita um maior controle de temperatura nos testes, diferentemente dos ensaios realizados com exposição ao sol. Os resultados obtidos no simulador apresentam as maiores tensões de circuito aberto e de máxima potência e o maior Fator de Forma entre todos os testes. Visto que o ensaio foi realizado com um fundo branco fixado ao módulo, as eficiências calculadas para o fundo branco nas inclinações de 30° e 45° são bastante semelhantes às eficiências obtidas com os dados do simulador solar.

6.3 Parâmetros característicos

A Tabela 6.2 apresenta as configurações de ensaio e os parâmetros calculados.

Tabela 6.2 – Parâmetros característicos

Configuração	G [W/m ²]	P _{MP} [W]	V _{MP} [V]	I _{MP} [mA]	V _{oc} [V]	I _{sc} [mA]	FF	η _{Total} [%]	η _{Células} [%]
Branco 30°	988	0,59	32,73	17,96	53,89	32,28	0,34	0,35	0,77
Metal 30°	945	0,70	30,63	22,83	53,97	40,61	0,32	0,43	0,95
Preto 30°	914	0,38	33,68	11,19	52,90	19,01	0,37	0,24	0,53
Branco 45°	930	0,56	33,03	16,94	52,98	30,73	0,34	0,35	0,78
Metal 45°	902	0,65	29,55	21,83	52,45	40,18	0,31	0,42	0,92
Preto 45°	876	0,34	31,58	10,66	51,87	17,84	0,36	0,23	0,50
Branco 90°	340	0,18	23,73	7,59	42,14	14,29	0,30	0,31	0,68
Metal 90°	318	0,15	23,68	6,52	42,05	11,84	0,31	0,28	0,63
Preto 90°	340	0,08	21,40	3,71	38,58	6,59	0,31	0,14	0,30
Simulador	1000	0,60	39,65	15,20	57,08	23,00	0,46	0,35	0,77

6.4 Teste do *kit* – carregador de smartphone

A utilização do conversor para carregar a bateria de um smartphone foi testada em um dia de céu limpo e foi utilizado o fundo metálico nos dois módulos, buscando a maximizar a produção de energia devido à maior potência obtida para tal configuração. Conforme informações do fabricante, é recomendado que o conversor receba uma potência de, no mínimo, 2,5 W para o carregamento direto de dispositivos – abaixo dessa potência não é possível estabilizar a saída, sendo o carregamento intermitente.

Como pode ser visto nos resultados da Seção 6.3, a máxima potência obtida nos testes para um módulo foi de 0,70 W (inclinação 30° e fundo metálico). Mesmo com a ligação, em paralelo, dos dois módulos ao conversor, não haveria o valor mínimo de potência para um processo de carga contínuo.

Com o aquecimento devido à exposição direta ao sol durante as medidas realizadas, o plástico que envolve os módulos apresentou visível dilatação, resultando em uma deformação plástica dos mesmos. Sugere-se que para um melhor aproveitamento da tecnologia sejam avaliadas diferentes opções de cobertura, como plásticos mais resistentes à temperatura, para as aplicações que dependam de sua flexibilidade, ou vidro para outros tipos de aplicação. A deformação pode ser visualizada na Figura 6.11.



Figura 6.11 – Dilatação do módulo.

6.5 Análise das Incertezas

Para o cálculo das incertezas associadas às medidas do sistema utilizado, foi empregada a mesma metodologia utilizada por Gasparin, 2009, no desenvolvimento de seu sistema, visto que foram utilizados os mesmos equipamentos. A descrição completa dos cálculos pode ser encontrada no capítulo 6 do referido trabalho.

Os cálculos de incerteza apresentados referem-se à configuração de ensaio com inclinação de 30° e fundo branco, por se tratar do teste que apresentou um valor de irradiância mais próximo às condições padrão (1000 W/m²), tendo atingido o valor de 988 W/m².

- A incerteza na medida da irradiância solar é a mesma calculada na seção 6.2 do referido trabalho, sendo igual a 22W/m².
- Incerteza na determinação da tensão de circuito aberto:

$$V_{OC} = (53,887 \pm 0,0077) V$$

- Incerteza na medida de corrente de curto circuito:

$$I_{SC} = (0,0323 \pm 0,00073) A$$

- Incerteza na determinação da potência máxima:

$$P_{MP} = (0,588 \pm 0,14) W$$

7. CONCLUSÕES

7.1 Discussão

Visando conhecer as características elétricas de células fotovoltaicas orgânicas e testar as características divulgadas pelos fabricantes, como a menor dependência ao ângulo de incidência solar, foram traçadas as curvas características e obtidos os parâmetros de um módulo fotovoltaico orgânico comercial. Os ensaios foram realizados para três inclinações distintas e três cores de fundo fixadas ao suporte, utilizando um sistema traçador de curvas para a obtenção dos dados, além do simulador solar do LABSOL – UFRGS para um caso específico. Por último, foi testada a possibilidade de carregamento de um celular através de um *kit* comprado do mesmo fabricante.

Com as notáveis diferenças nos valores das correntes de curto circuito entre as diferentes cores de fundo, conclui-se que as células orgânicas respondem à radiação recebida por ambos os lados, como era esperado quando se optou pela troca das cores de fundo do suporte. Nota-se que o fundo metálico (mais refletivo) apresenta uma corrente de curto circuito superior à do fundo branco (intermediário) para as inclinações de 30° e 45° mesmo com uma irradiação incidente até 4,55% menor. As maiores correntes de curto circuito foram obtidas com a inclinação de 30° para todas as cores de fundo, devido à maior irradiância incidente no módulo em razão da menor inclinação.

Os cálculos das eficiências total e de célula mostraram um aumento de 54,6% em razão da exclusão das áreas inaproveitadas do módulo para a geração de energia. Entretanto, mesmo com o significativo aumento considerando apenas a área das células, os testes obtiveram em sua melhor configuração um valor inferior a 1% de eficiência, sendo este um valor ainda muito aquém do esperado para a tecnologia (~3%), conforme as informações divulgadas pelos fabricantes.

O teste feito no simulador solar apresentou altas tensões de circuito aberto e de máxima potência, apresentando o melhor fator de forma entre os ensaios. Visto que ele foi realizado fixado a um fundo branco, nota-se que sua eficiência é bastante semelhante às eficiências dos ensaios feitos externamente com o fundo branco para as inclinações de 30° e 45°.

A obtenção das curvas características e seus parâmetros são fundamentais para a percepção sobre o comportamento dos módulos fotovoltaicos. A avaliação das células fotovoltaicas orgânicas - sendo estas uma tecnologia relativamente nova, pouco conhecida e ainda não comercializada no Brasil - conhecendo melhor suas características e suas possíveis formas de aplicação, tem o propósito de apresentar e informar sobre a tecnologia, podendo impulsionar novos estudos e, futuramente, melhorias de eficiência por parte dos fabricantes.

7.2 Trabalhos futuros

Considerando o atual suporte construído, sugere-se a avaliação dos parâmetros com diferentes espaçamentos entre o módulo e o suporte. Sugere-se que a menor dependência do OPV ao ângulo de incidência solar seja novamente testada com suporte translúcido, como

acrílico ou vidro, permitindo a total exposição dos módulos à radiação incidente, situação a qual o suporte de madeira é um limitante.

Os dados aqui apresentados foram obtidos em sua totalidade em um único dia de céu limpo, logo, podem ser realizadas coletas de dados em diferentes dias e horários dentro da janela solar a fim de comparar o comportamento do módulo para diferentes valores de irradiância. Implementando algum método de controle de temperatura, pode-se também avaliar a variação dos parâmetros característicos das células orgânicas em função da temperatura.

8. REFERÊNCIAS

Cardozo, O., Carvalho, H. A., Oliveira, R. M., Vilela, O. C., Fraidenraich, N., Vilaça, R., Bagnis, D., Lima, A.; **"Caracterização de Módulos Fotovoltaicos Orgânicos (P3HT:PCBM) com Radiação Solar"**. Acta de la XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 4, pp. 04.81-04.90, 2016.

Coutinho D. J.; **"Estudos sobre fotogeração, efeitos de interfaces e de transportes de portadores em células solares orgânicas"**. Tese de Doutorado. Instituto de Física – USP São Carlos. São Carlos, 2015.

Emmott, C. J., (colocar todos os autores); **"Organic photovoltaic greenhouses: a unique application for semi-transparent PV?"** Energy & Environmental Science. 1317-1328. 2015

EPE – Empresa de Pesquisa Energética; **"Balanço Energético Nacional 2015"**. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf>.

Gasparin, F. P.; **"Desenvolvimento de um Traçador de Curvas Características de Módulos Fotovoltaicos"**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Porto Alegre, 2009.

Krenzinger, A. (org.); **"Radiação Solar e Conversão Térmica da Energia Solar"**. Apostila utilizada na disciplina MEC003 - Energia Solar. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Porto Alegre, 2010.

Lunt, R. R. e V. Bulovic; **"Transparent, near-infrared organic photovoltaic solar cells for window and energy-scavenging applications"**. Applied Physics Letters v. 98. p.11. 2011.

Matsumoto, A.; **"Desenvolvimento de células fotovoltaicas orgânicas e flexíveis"**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. Campinas, 2013.

Pinho, J.T. e Galdino, M. A. (org.); **"Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos"**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf >

Sunew; **Células Solares de 3ª Geração**. Disponível em: < <http://sunew.com.br/> >. Acesso em: 01/11/2016.

Yamamoto, N.A.D.; **"Células Solares Orgânicas Baseadas nas Estruturas Heterojunção em Bicamada e Heterojunção de Volume"**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Física. Curitiba, 2014.