

Utilização de Células Solares Poliméricas na Geração de Energia Elétrica

Marlos H. C. Macedo*, Felipe V. Resende**, Manoel H. N. Marinho*

* Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas, Universidade de Pernambuco, Recife, PE 50.720-001
Brasil (Tel: 81 3184-7570; e-mail: mhcm@poli.br, marinho75@poli.br)

**Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, PE 50.720-001
Brasil (Tel: 81 3184-8400; e-mail: f.dovale@hotmail.com)

Abstract: In this article, data and information on emerging technology applied to the production of polymeric organic cells were collected aiming of producing electric energy. An arithmetic study was carried out to investigate the possibility of including this new photovoltaic solar generation technology in a low power energy supply system. From the equations of power and energy, it was possible to quantify the amount of electric energy produced by a set of polymeric photovoltaic modules. It has been found that the polymer cells still have a very large deficiency, with a yield of about 7.5 times less compared to crystalline silicon cells, but it is a technology that can be studied and developed in order to increase its efficiency, cost and durability.

Resumo: Neste artigo, foram coletados dados e informações da tecnologia emergente aplicada à produção de células solares poliméricas para fins de produção de energia elétrica. Foi efetuado um estudo aritmético para averiguar a possibilidade de incluir esta inovação tecnológica de geração solar fotovoltaica em um sistema de abastecimento de energia de baixa potência. A partir das equações de relação entre potência e energia foi possível quantificar o montante de energia elétrica produzido por um conjunto de módulos fotovoltaicos poliméricos. Verificou-se que as células solares poliméricas ainda têm uma significativa deficiência, com um rendimento de aproximadamente 7,5 vezes menor em relação às células solar de silício cristalino, porém é uma tecnologia que pode ser estudada e desenvolvida a fim de aumentar sua eficiência, custo e durabilidade.

Keywords: Polymeric cells; photovoltaic panels; organic semiconductor; energy; efficiency.

Palavras-chaves: Células poliméricas; painéis fotovoltaicos; semicondutor orgânicos; energia; eficiência.

1. INTRODUÇÃO

O esgotamento de alguns recursos energéticos torna necessário a expansão das formas de geração de energia, dos materiais e tecnologias empregados. As células solares poliméricas, compostas por materiais orgânicos podem ser utilizadas, tanto como uma alternativa na produção de energia descentralizada, quanto em sistemas isolados para acionar uma carga de baixo consumo como em sistemas autônomos de irrigação, bombeamento, abastecimento, aquecimento d'água, etc.

As células solares poliméricas utilizam semicondutores conjugados poliméricos, compostos por filmes de materiais finos, geralmente muito lisos e uniformes. Isso possibilita um grande controle em larga escala das características estruturais e morfológicas do filme. Os domínios cristalinos do polímero, utilizados são tipicamente muito menores do que a escala de comprimento de vários dispositivos óptico-eletrônicos, resultando em características de transporte isotrópico. Isso resulta em baixa variabilidade de desempenho de dispositivo para dispositivo, o que é particularmente importante para a integração de TFT (transistores de filme fino) em circuitos (Facchetti 2011).

De acordo com Silva et al. (2018), o interesse comercial na produção dessas células solares poliméricas é alto, porém as eficiências alcançadas ainda são baixas para que possam ser

competitivas, no entanto, o uso em edificações pode ser caminho para industrialização.

Nos estudos de Duan e Uddin (2020), afirma-se que a célula solar polimérica ou célula solar orgânica (OPV) é uma promissora tecnologia fotovoltaica de filme fino, de baixo custo, leves, flexíveis, semitransparentes e de fácil fabricação.

De acordo com Cui et al. (2020), a eficiência de conversão de energia (PCE) das OPVs ultrapassou 16% para junção única e segundo Meng et al. (2018), 17% para células solares de desempenho melhorado através de técnicas de fabricação *tandem*, a qual pode ser aplicada a células solares de película fina de baixo custo usando Silício Amorfo(a-Si), em oposição ao Silício Cristalino(c-Si) convencional, com o desenvolvimento de tecnologia de síntese de materiais orgânicos com baixo intervalo de banda (*bandgap*) e de processamento para dispositivos. Ajustando-se o *gap* (região de energia) do material e o *bandgap* de uma célula solar de junção única, uma PCE de 10 a 12% pode ser alcançada (Tomar e Johari 2018).

Esta tecnologia visa acrescentar ou até mesmo substituir o uso de células de c-Si por um material mais econômico, leve e biodegradável. Segundo Kimura et al. (2019), os materiais devem ser de baixo custo, com dimensões estáveis e fáceis de manter-se. Alguns estudos recentes também relataram que a

camada de encapsulamento poderia atuar como bloqueador para os raios ultravioleta (UV) sobre as OPVs, e deste modo reduzir sua degradação (Kimura et al. 2019; Patel et al. 2019).

Compreende-se que existem indicadores para que essa tecnologia emergente seja bem aceita devido à possível produção em larga escala de materiais semicondutores orgânicos e, com isso, os custos tornarem-se mais e mais acessíveis, considerando que, segundo Almosni et al. (2018), as células solares da *terceira geração* (tandem, perovskita, sensibilizadas por corantes, orgânicas, ‘novos conceitos’, ...) representam um amplo espectro de conceitos, que vão desde sistemas de baixo custo e baixa eficiência (células solares orgânicas sensibilizadas por corantes) até altas custo de sistemas de alta eficiência (multijunção III - V), com vários propósitos, desde a integração da construção civil às aplicações espaciais. Ainda de acordo com Almosni et al. (2018), as células solares de terceira geração são às vezes chamadas de ‘conceitos emergentes’ devido à sua baixa penetração no mercado, embora algumas delas tenham sido investigadas por mais de 25 anos.

Um desafio importante será a eficiência relativa na produção de energia elétrica, uma vez que ainda se verifica cenários desfavoráveis em relação a outras formas de geração de energia fotovoltaica. Apesar dos desafios, é buscado avaliar as possíveis discrepâncias entre as aplicações com distintos materiais, e aplicar pesquisas e experimentos neste tipo de célula.

A motivação deste trabalho, tem por objetivo verificar tecnicamente o comportamento de um material semicondutor orgânico em comparação ao c-Si, ambos aplicados à módulos fotovoltaicos, e gerar dentro de um caso prático, dados que discutam a viabilidade efetiva sob o ponto de vista analítico, comparando condições, quantidades e eficiência, bem como o impacto financeiro simplificado.

2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Células solares são dispositivos que transformam a energia da radiação solar em eletricidade. Estes dispositivos mudam sua condutividade dependendo das condições de iluminação e composição molecular dessas células. De acordo com Duan & Uddin (2020), nas OPVs, a camada ativa está sempre impressada entre o cátodo metálico de baixa função de trabalho (WF), como alumínio (Al), cálcio (Ca) e bário (Ba) e os ânodos de óxidos metálicos condutores transparentes de alta WF, como óxido de estanho e índio (ITO) e óxido de estanho dopado com flúor (FTO).

2.1 Diferença de potencial gerado em uma célula solar polimérica

Segundo Reiss et al. (2011), a célula solar orgânica mais simples consiste em uma camada de polímero conjugado apropriado (oligômero) intercalado entre dois eletrodos de diferentes funções de trabalho. Um destes eletrodos deve ser transparente, pois a radiação deve atingir a camada semicondutora.

De acordo com Yamamoto (2014), os materiais mais utilizados para compor o eletrodo transparente são filmes de óxido de

estanho (TO) e variações como o ITO ou FTO. O segundo eletrodo pode ser composto de alumínio ou cálcio, e será responsável pela coleta de elétrons. Quando a luz solar incide sobre a célula solar, através do vidro, a camada ativa (polímero) absorve a luz e gera os éxcitons (pares elétron-buraco). Esses pares elétron-buraco devem se dissociar e serem coletados pelos respectivos eletrodos. Ainda de acordo com Yamamoto (2014), um dos materiais aceitadores de elétrons mais comumente utilizado neste tipo de dispositivo é o fulereno C_{60} . Estes éxcitons funcionam transportando elétrons de uma banda com maior energia para uma de menor energia, gerando assim um nível de tensão que depende da irradiação e da capacidade de geração de energia dessa célula, conforme visto na Fig. 1.

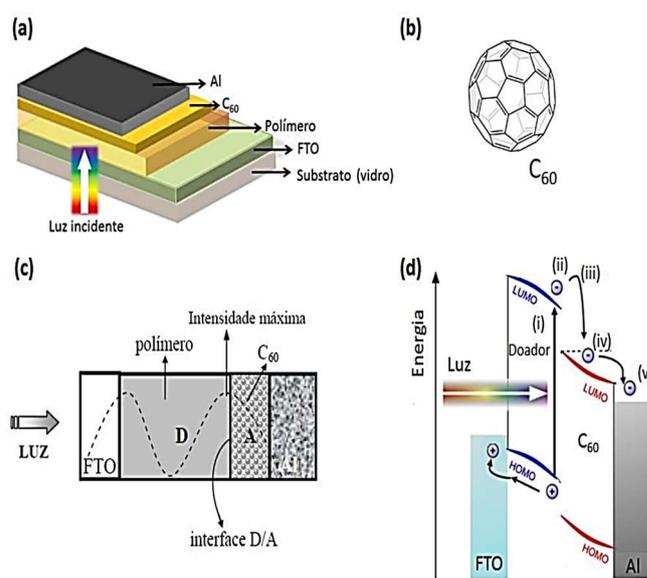


Fig. 1 - (a) Estrutura sanduíche de um dispositivo bicamada do tipo polímero/ C_{60} , (b) estrutura molecular do fulereno C_{60} , (c) esquema da distribuição de intensidade luminosa dentro do dispositivo e (d) diagrama de energia representando a transferência de elétrons para o C_{60} e buracos para o polímero, após a dissociação do éxciton. Fonte: Yamamoto (2014)

De acordo com Kim et al. (2014), a tensão de circuito aberto (V_{oc}) é considerada um dos parâmetros mais importantes, e é determinada – principalmente – pela diferença do nível de energia entre o mais alto orbital molecular ocupado (HOMO) do polímero doador e o menor orbital molecular desocupado (LUMO) da molécula receptora. Sendo chamado, também, de *offset* de energia ou potencial embutido ou, ainda, *bandgap* efetivo.

Conforme mencionado por Yamamoto (2014), a diferença entre o HOMO e o LUMO fornece a energia de banda de mobilidade proibida do material (E_g) que determina a faixa de energia do espectro eletromagnético na qual o polímero é capaz de absorver fótons, ilustrado na Fig. 2.

Kim et al. (2014), em seu estudo, conclui que quanto maior este *gap* entre doador e receptor, maior é a tensão de circuito aberto da célula, e que o mais importante é aumentar esse parâmetro (V_{oc}) para que aconteça um maior aproveitamento na conversão de energia elétrica e agregar valor econômico a essa tecnologia.

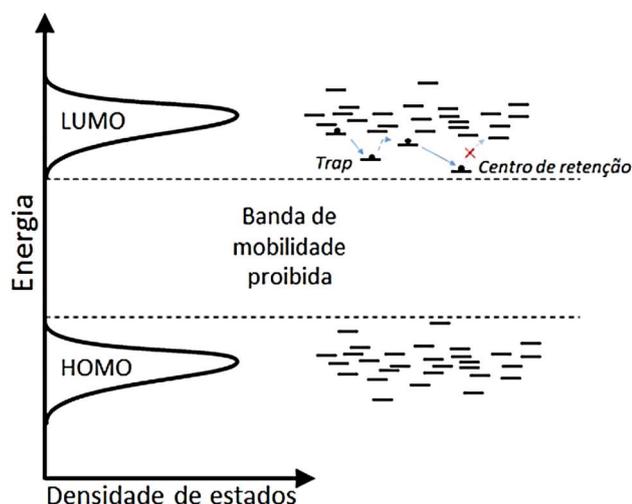


Fig. 2 - Níveis HOMO e LUMO num semiconductor orgânico e respectiva banda de mobilidade proibida. Fonte: Blythe e Bloor (2005)

2.2 Estrutura e diferença de potencial de uma célula de silício cristalino

De acordo com os estudos de Szostak et al. (2017), Fernandes et al. (2016) e Pinheiro et al. (2017), as células de c-Si, que dominam o mercado com 90% das vendas, têm uma taxa de conversão situada entre 15 e 20%, dependendo do grau de pureza do silício usado na construção dos módulos. Na sua fabricação utiliza-se o silício ultrapuro, muito abundante na natureza, juntamente com processos tecnológicos avançados de purificação e dopagem.

Apesar de dominarem o mercado, as placas fotovoltaicas compostas de materiais inorgânicos têm um peso muito superior quando comparadas com as células solares poliméricas que são fabricadas via solução, o que facilita sua aplicação em diversas superfícies, sem causar sobrepeso. Na pesquisa de Sbampato (2017), cita que os módulos OPV pesam apenas 0,5 kg, enquanto o mono-Si pesa cerca de 19 kg, o custo do sistema de montagem da OPV é considerado proporcional ao seu peso.

De acordo com Pinho e Galdino (2014), no exposto da Fig. 3, resume-se a estrutura básica da célula fotovoltaica industrial de c-Si tipo P (carregado positivamente), construída de:

1. Lâmina de c-Si, tipo P dopada com boro;
2. Região n+ (com cargas negativas livres) dopada com fósforo (o índice + significa que a concentração de dopante é superior a 10^{19} átomos/cm³);
3. Região p+ dopada com alumínio, para reduzir a recombinação na face posterior, denominada de campo retrodifusor ou BSF (*back surface field*);
4. Malha metálica frontal fabricada com prata;
5. Barras coletoras ou malha metálica traseira de alumínio-prata;
6. Filme antirreflexivo (AR);
7. Filme para passivação.

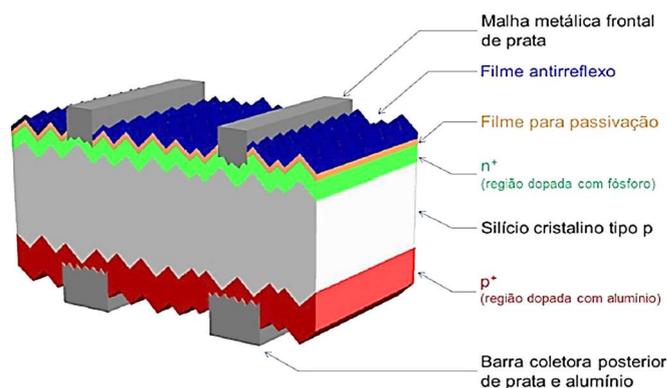


Fig. 3 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino. Fonte: Pinho e Galdino (2014)

De acordo com Brito (2018), partindo de um silício com um grau de pureza superior à 99%, submete-se a célula ao processo de *dopagem*, a qual refere-se à adição, ao cristal intrínseco – o Si, de pequena quantidade de impureza, com propriedades adequadas, de modo a afetar o comportamento elétrico do semiconductor da maneira desejada, e assim, através de átomos doadores e receptores forma uma junção P-N.

Os elétrons livres desta junção passam para o lado P, encontrando os níveis receptores, isso faz com que haja diferença de potencial e um campo elétrico permanente na junção.

Só é possível obter o transporte de cargas elétricas devido à dopagem e à redução ou remoção de elétrons (oxidação) desse material anteriormente isolante.

3. APROVEITAMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA DAS CÉLULAS SOLARES POLIMÉRICAS

Segundo Prado (2008), é possível aumentar a condutividade elétrica do material polimérico da ordem de 10^{-5} S/cm para 10^2 S/cm pela exposição deste à vapores de iodo; este processo foi chamado de dopagem. Desta forma, se um material polimérico é dopado, ele é capaz de usar sua sensibilidade óptica para gerar uma foto-corrente, já que através da absorção de fótons de luz acontece a excitação e transporte de elétrons através desse material. Segundo Oliveira e Ferreira (2009), em semicondutores a absorção de um fóton de luz pode ocorrer pela promoção ou excitação de um elétron da banda de valência para a banda de condução, se o fóton possuir energia igual ou maior que o *band gap* do material. Ainda de acordo com Oliveira e Ferreira (2009), quando o elétron promovido é coletado por um condutor gera uma corrente elétrica se o circuito é fechado, se não, gera uma diferença de potencial. Este efeito é denominado conversão fotovoltaica, ou seja, quando a luz interage com materiais, parte dessa radiação pode ser transmitida através do meio, parte absorvida e parte ser refletida na interface entre os meios. A conversão fotovoltaica é o fenômeno responsável pela utilização da luz solar na geração de eletricidade, ou seja, o aproveitamento da radiação solar como fonte de energia.

Como também foi explicado por Vandewal et al. (2009), as cargas livres são coletadas por eletrodos. Este processo, ilustrado na Fig. 4, fornece a foto corrente, ou seja, a corrente elétrica produzida pelo efeito fotoelétrico.

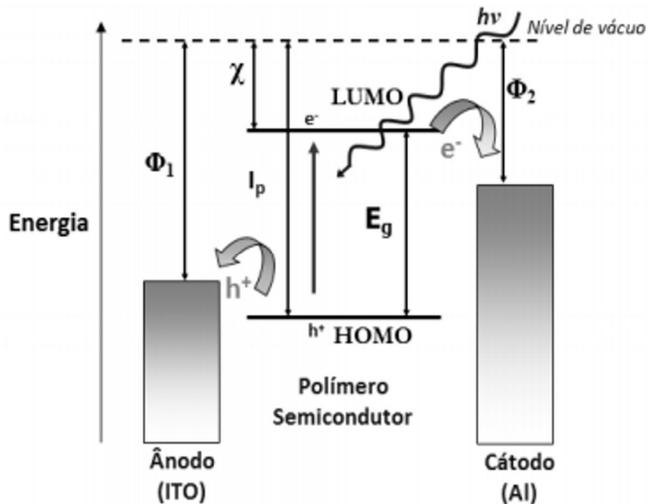


Fig. 4 – Diagrama de níveis de energia para um dispositivo fotovoltaico orgânico. Sob incidência de luz, um elétron (e^-) é promovido ao nível LUMO deixando um buraco (h^+) no nível HOMO, criando o éxciton. Elétrons são coletados pelo cátodo e buracos, pelo ânodo. Na figura, Φ_1 e Φ_2 são as funções trabalho do ânodo e do cátodo, χ é a eletro afinidade, I_p é o potencial de ionização e E_g é a energia de banda proibida. Fonte: Yamamoto (2014)

As células solares orgânicas de heterojunção (do inglês, *Bulk Heterojunction OPV*), que possuem estrutura de filmes finos simples com eletrodo transparente, filme transportador de lacunas, filme ativo, que é composto por um polímero semicondutor em conjunto com um fulereno modificado e um eletrodo metálico, apresentam eficiência em laboratório superior a 10%, porém protótipos comerciais contam com valores na ordem de 1,5 a 2,5% (Scharber e Sariciftci 2013).

A dissociação do éxciton ocorre em regiões de alto campo elétrico, normalmente situadas próximas às interfaces polímero/metalo, ou em outros centros de dissociação formados por impurezas com uma eletro-afinidade maior que a do polímero (Duarte 2013).

Esse efeito, segundo Canestraro (2010), fornece valores de tensão de circuito aberto (V_{oc}), isto é, a diferença de potencial gerada pelo dispositivo quando iluminado, uma das grandezas essenciais para a aplicação destes materiais em células solares. Uma célula fotovoltaica é caracterizada por uma medida de corrente (I) por tensão (V). Da curva $I \times V$ sob iluminação, são extraídos V_{oc} e da corrente de curto-circuito (I_{sc}), e fator de preenchimento (calculado). Destes parâmetros, calcula-se o PCE.

Em seu estudo Yamamoto (2014), cita que a quantidade de energia elétrica que pode ser extraída de uma célula fotovoltaica é proporcional à razão entre a potência máxima fornecida pelo dispositivo e a potência nominal do mesmo. Esta razão é chamada de fator de preenchimento (FF) e é dada pela expressão dada em (1):

$$FF = \frac{J_{max} \times V_{max}}{J_{sc} \times V_{oc}} \quad (1)$$

Em que:

- FF: Fator de preenchimento;

- J e V são valores para densidade de corrente e tensão aplicada, respectivamente, que maximizam o produto ($J \times V$);
- J_{sc} : densidade de corrente de curto circuito;
- V_{oc} : tensão de circuito aberto.

A tensão de circuito aberto (V_{oc}) será máxima quando $J = 0$, sendo, portanto, a maior tensão que uma célula fotovoltaica pode produzir, como mostra a Fig. 5. Da mesma forma, J_{sc} é o maior valor de densidade de corrente que pode ser obtido em um dispositivo fotovoltaico e ocorre quando a tensão é igual a zero.

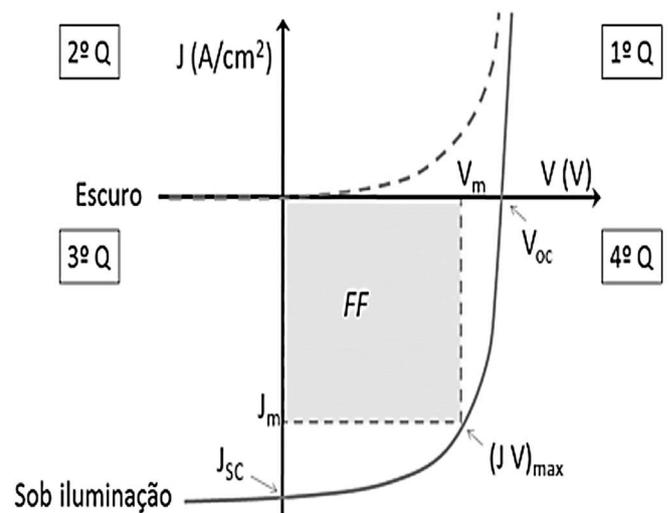


Fig. 5 - Curva característica típica J-V para um dispositivo fotovoltaico ideal no escuro e sob iluminação, indicando os parâmetros V_{oc} , J_{sc} e FF (Q = quadrante). Fonte: Yamamoto (2014)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Desenvolveu-se um protótipo de uma produção solar fotovoltaica polimérica para alimentar uma carga isolada, neste caso, um sistema de bombeamento d'água, com bomba submersa.

A metodologia baseou-se na utilizada por Cardozo et al. (2016). Este estudo foi realizado por pesquisadores do Centro de Energia Renováveis da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), em convênio com o Centro Suíço de Eletrônica e Microtecnologia (CSEM Brasil). Realizou-se um experimento com OPV presentes no módulo utilizado nos ensaios, tendo sua camada ativa formada por uma heterojunção de volume (bulk heterojunção), composta por um polímero (P3HT) e um fulereno (PCBM).

Os resultados foram obtidos através de ensaios *outdoor*, no período de 26/04/2016 a 21/06/2016 em Recife, Nordeste brasileiro, com coordenadas aproximadas de 08° S (Sul) e 034° W (Oeste), latitude e longitude, respectivamente. Todos os testes foram feitos entre 09:00 e 16:00 horas e em dias de céu relativamente claro. Nos experimentos de Cardozo et al. (2016), os dados foram coletados através de um *datalogger Campbell CR 10X*. Para gerar as curvas características os módulos foram acoplados à uma estrutura de suporte e expostos ao sol em uma área livre de sombreamento.

Ainda no experimento de Cardozo et al. (2016), foi utilizado um módulo com área ativa de 0,0072m², mostrado na Fig. 6, formado por 6 células solares orgânicas conectadas em série.

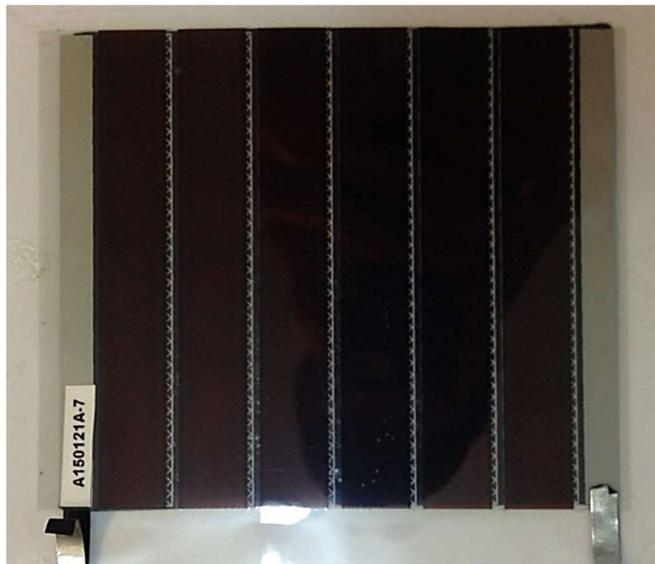


Fig. 6 - OPV. Fonte: Cardozo et al. (2016)

4.1 Comparação das curvas $I \times V$ de OPV com as de silício cristalino

Duas curvas, corrente (I) versus tensão (V) ou curva $I \times V$, também conhecidas como curva de potência, são avaliadas, considerando as tecnologias de células fotovoltaicas escolhidas. O painel fotovoltaico polimérico, com 6 células orgânicas, possui sua curva de máxima potência, representada pela Fig. 7, e o painel fotovoltaico de c-Si, com 36 células solares, representada pela Fig. 8, e destas curvas obtêm-se os Pontos de Máxima Potência (MPP) para cada módulo, em função da temperatura nas células solares, especificamente.

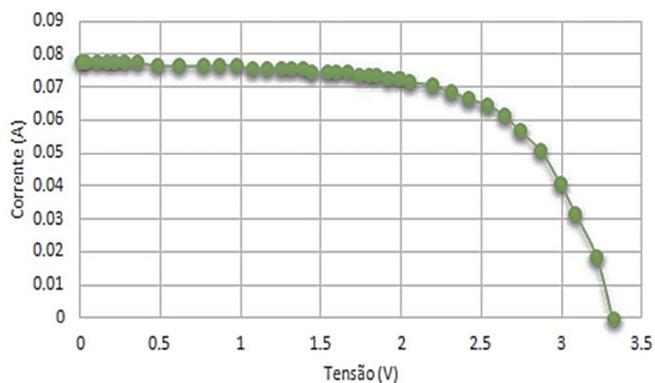


Fig. 7 - Curva característica de um módulo de OPV com 6 células solares obtido em condições outdoor numa irradiância de 993 W/m² e temperatura de célula de 45,5°C. Fonte: Cardozo et al. (2016)

Verifica-se que, os OPVs ainda precisam ser aperfeiçoados em termos de eficiência, dado que fatores como o *bad gap* destes materiais é ainda maior que o do Silício, fazendo com que estes materiais absorvam menos luz e conseqüentemente, gerem menos cargas e apresentem menor eficiência. Além disto, para designar uma planta solar com a finalidade de alimentar uma

carga residencial específica de baixa potência, deve-se definir qual será a capacidade de produção de energia do módulo projetado.

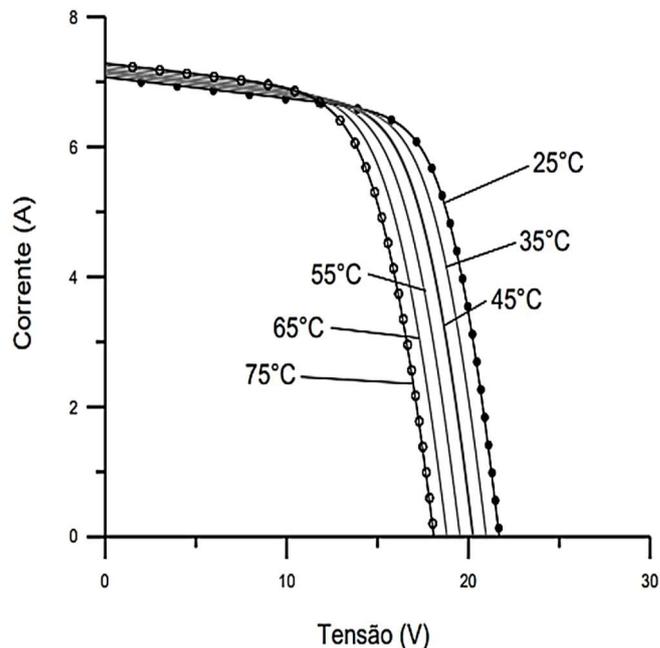


Fig. 8 - Curva para um módulo fotovoltaico de 36 células solares de silício cristalino sob irradiância de 1000 W/m². Fonte: Pinho e Galdino (2014)

Painéis fotovoltaicos recebem muita energia do sol em dias de céu limpo e, nesse caso, costumam esquentar muito. Ao ficarem bem quentes, eles tendem a ter seus valores de tensão diminuídos e, conseqüentemente, sua potência. Já a corrente elétrica não varia com a temperatura. Portanto, o que faz a potência variar quando uma célula fotovoltaica aquece é a tensão, exclusivamente

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para seleção de bombas e moto bombas, do fabricante Schneider, ilustrada na Fig. 9, tem-se, por exemplo, uma bomba d'água submersa de ½ CV (367,74 W), com altura manométrica de 19 m e vazão de 4,4 m³/h.

Pode-se considerar que a potência elétrica é igual a potência mecânica, ignorando o total de perdas e fator de potência deste sistema, para se conseguir encher uma caixa d'água de 1000 litros diariamente será preciso um tempo de 0,23 horas, demandando um gasto de energia de 83,58 Wh ou 0,08358 kWh, valor obtido utilizando (2).

$$E = P \cdot t \quad (2)$$

Em que:

- E : energia elétrica [W.h];
- P : Potência [W];
- t : tempo [h].

A partir da curva de MPP de um módulo fotovoltaico com 6 OPVs, representada na Fig. 7, ao extrair o conjunto de pontos da região em que se obtém o MPP, obtêm-se aproximadamente 0,1625 Wp a partir do produto $I \times V$ ($\approx 0,065A \times 2,5V$) para

um módulo de OPV. Considerando a potência nominal da bomba d'água submersa escolhida para as comparações, é calculado um total de 2.264 módulos com 6 OPVs, ocupando 16,30 m².



Fig. 9 - Bomba d'água submersa modelo SUB 15. Fonte: Tabela para seleção de bombas e moto bombas, Schneider (2018).

Da mesma forma, extraindo o ponto de potência máxima (MPP) da curva para um módulo fotovoltaico de 36 células de c-Si, com dimensão 0,6499 m², conforme calculado a partir das dimensões ilustradas na Fig. 10, a seguir, obtém-se 110 W no MPP, e assim, são necessários apenas 4 módulos com 36 células, ocupando 2,60 m².

Ao analisar a razão das áreas necessárias para alimentação de uma carga de ½ CV, constata-se que o uso de materiais poliméricos na conversão fotovoltaica requer aproximadamente 7,5 vezes mais área que os módulos fotovoltaicos de c-Si, conforme (3), e que é comparado na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação entre os materiais empregados, aplicados por m².

	Células poliméricas	Células de silício
Potência Máxima (W/m ²)	22,57	169,26
Total de módulos (Un./m ²)	138,88	1,54
Área necessária (m ²)	16,30	2,60

Fonte: O Autor

$$Rendimento = \frac{P_{m\acute{a}xSil\acute{c}io}}{P_{m\acute{a}xPolim\acute{e}ricas}} = 7,5 \quad (3)$$

Efetuada-se os cálculos da área necessária para instalação desse sistema em uma residência para atender ao funcionamento desse sistema de bombeamento, seriam necessários módulos fotovoltaicos poliméricos com área total

de 16,30 m², com considerável facilidade de se dispor em qualquer construção residencial.

De acordo com Aneel (2020), o custo intermediário do kWh de energia fornecido pela Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), em setembro de 2020, era R\$ 0,574 por kWh para o consumo ativo, acrescidos de 25% de ICMS, 1,06% de PIS e 4,99% de COFINS, e ainda R\$ 12,71 de iluminação pública. O valor médio aproximado é R\$ 0,92/kWh. O sistema de bombeamento modelado consome 2,5074 kWh.mês (0,08358 kWh x 30 dias), caso utilizada para bombear 1000 litros de água diariamente, a economia sobre o consumo associado é de R\$ 2,31 por mês.

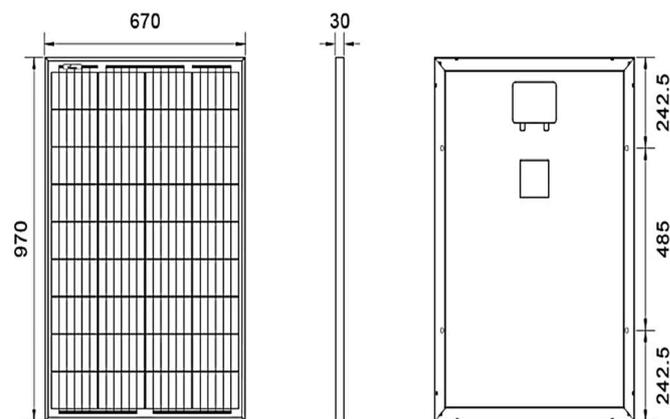


Fig. 10 – Dimensões do Módulo Fotovoltaico, Silício Policristalino, 110W, 36 células. Fonte: O Autor.

Considerando o razão de ocupação de área (Un./m²) entre módulos fotovoltaicos OPVs de 3^a geração e módulos de c-Si, e de acordo com Klepa et al. (2016), onde cita que célula fotovoltaica multijunção, célula fotovoltaica para concentração (CPV – *Concentrated Photovoltaics*) e células sensibilizadas por corante (DSSC – *Dye-Sensitized Solar Cell*) demonstram um potencial para produção de módulos com altas eficiências, embora com um custo ainda não competitivo com as tecnologias que dominam o mercado, conclui-se não existir – ainda – vantagem para implantação de um sistema de geração fotovoltaica por OPVs, seja para alimentação de carga isolada, como conectados à rede.

Observando a possível melhoria na eficiência do material e sua produção ampliada, considera-se como possível e viável economicamente utilizar uma unidade de geração de energia fotovoltaica a partir das OPVs em cargas isoladas e sistemas conectados à rede. É interessante, o uso de OPVs em sistemas isolados a título de experimento e validação, para iluminação rural e bombeamento de água para irrigação, bem como pequenas cargas monofásicas de baixo consumo, em uma localidade remota que possa tornar inviável este tipo de geração de energia elétrica.

5. CONCLUSÕES

A necessidade de expandir as fontes de geração de energia para métodos mais simples e mais econômicos é o que impulsiona os estudos sobre OPVs. Apesar das vantagens que estas OPVs oferecem em relação às tradicionais, em termo de facilidade e custo de produção, a sua utilização é limitada pelo seu índice

de ocupação por m², vide tabela 1, e os baixos valores de PCE quando comparadas com os dispositivos baseados em materiais inorgânicos.

Mostrou-se o uso de uma tecnologia complexa aplicada a um experimento simples. Indicou-se, o quanto ainda é insuficiente o montante de energia gerada a partir de uma área de aproximadamente 16 m², coberta por módulos fotovoltaicos compostos de OPVs, comparando-se com as células de c-Si. Porém, ainda é válido desenvolver pesquisas sobre essas células visando aumentar o potencial de conversão de energia e sua eficiência.

Considera-se que, as diversas aplicações de produtos compostos por células fotovoltaicas, independente da finalidade de geração distribuída ou mesmo a alimentação de cargas monofásicas instaladas, podem-se aproveitar amplamente uma solução que traga a geração de energia fotovoltaica para áreas ou estruturas onde os tradicionais módulos fotovoltaicos não possuem interface de acomodação ou instalação. Pequenas aplicações como carregadores de aparelhos celular, lanternas à LED e ou aparelhos alimentados em baixa tensão, por intermédio de conversor DC-DC, criam uma boa expectativa de pesquisas acadêmicas em torno da versatilidade que os materiais orgânicos oferecem, associada às expectativas de popularização no uso do recurso solar.

AGRADECIMENTOS

À Escola Politécnica de Pernambuco, da Universidade de Pernambuco, por proporcionar o ambiente favorável ao despertar para a pesquisa e o desenvolvimento acadêmico.

REFERÊNCIAS

- Almosni, S., Delamarre, A., Jehl, Z., Suchet, D., Cojocar, L., Giteau, M., . . . Guillemoles, J.-F. (2018). Material challenges for solar cells in the twenty-first century: directions in emerging technologies. *Science and Technology of Advanced Materials*, pp. 336-369. doi:10.1080/14686996.2018.1433439
- Aneel. (2020). *Ranking nacional de tarifas residenciais (Grupo B1)*. Acesso em 13 de 09 de 2020
- Blythe, T., & Bloor, D. (2005). *Electrical Properties of Polymer*. Cambridge University Press.
- Brito, S. (2018). *CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica*. Acesso em 16 de 05 de 2018, disponível em http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321
- Canestraro, C. D. (2010). *Dispositivos Fotovoltaicos Orgânicos: Estudo de camadas ativas e eletrodos*. 193f. Universidade Federal do Paraná.
- Cardozo, O., Carvalho, H. A., Oliveira, R. M., Vilela, O. C., Fraindenraich, N., Vilaça, R., . . . Lima, A. (2016). Caracterização de Módulos Fotovoltaicos Orgânicos (p3ht:pcbm) com Radiação Solar. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares.
- Cui, Y., Yao, H., Hong, L., Zhang, T., Tang, Y., Lin, B., . . . Hou, J. (2020). Organic photovoltaic cell with 17% efficiency and superior processability. *National Science Review*(7), 1239–1246. doi:10.1093/nsr/nwz200
- Duan, L. P., & Uddin, A. (2020). Progress in Stability of Organic Solar Cells. *Adv. Sci.*, p. 7. Fonte: <https://doi.org/10.1002/advs.201903259>
- Duarte, D. A. (2013). *Otimização de células solares orgânicas do tipo P3HT:PCBM*. Departamento de Física: Universidade de Aveiro.
- Facchetti, A. (23 de 12 de 2010). π -Conjugated Polymers for Organic Electronics and Photovoltaic Cell Applications. *Chemistry of Materials*, 23(3), pp. 733–758. doi:<https://doi.org/10.1021/cm102419z>
- Fernandes, S. L., Véron, A. C., Neto, N. F., Nüesch, F. A., Silva, J. H., Zaghete, M. A., & Graeff, C. F. (07 de 06 de 2016). Nb 2 O 5 hole blocking layer for hysteresis-free perovskite solar cells. *Materials Letters*, 181, pp. 103-107. doi:10.1016/j.matlet.2016.06.018
- J.-H., K., Hong, J.-A., Kwon, D.-G., Seo, J., & Park, Y. (2014). Energy level alignment in polymer organic solar cells at donor-acceptor planar junction formed by electrospray vacuum deposition. *Applied Physics Letters*, p. 104.
- Kimura, H., Fukuda, K., Jinno, H., Park, S., Saito, M., Osaka, I., . . . Someya, T. (2019). High Operation Stability of Ultraflexible Organic Solar Cells with Ultraviolet-Filtering Substrates. *Advanced Materials*. doi:10.1002/adma.201808033
- Klepa, R. B., Prazeres, K. C., Silva, T. A., & Santana, J. C. (s.d.). Comparação entre os módulos de Células Fotovoltaicas Classificados pelas Normas Brasileiras. João Pessoa, Paraíba, Brasil: XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Acesso em 13 de 09 de 2020, disponível em http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_WPG_236_374_30087.pdf
- Meng, L., Zhang, Y., Wan, X., Li, C., Zhang, X., Wang, Y., . . . Chen, Y. (2018). Organic and solution-processed tandem solar cells with 17.3% efficiency. *SCIENCE*, 361(6407), 1094-1098. doi:10.1126/science.aat2612
- Oliveira, A. F., & Ferreira, G. M. (2009). *Estudo e Simulação de Desempenho Óptico de Células Solares*. Universidade Federal do ABC.
- Patel, J. B., Tiwana, P., Seidler, N., Morse, G. E., Lozman, O. R., Johnston, M. B., & Herz, L. M. (2019). Effect of Ultraviolet Radiation on Organic Photovoltaic Materials and Devices. *ACS Appl Mater Interfaces*, 11(24), 21543–21551. doi:10.1021/acsami.9b04828
- Pinheiro, G. K., Serpa, R. B., Souza, L. V., Sartorelli, M. L., Reis, F. T., & Rambo, C. R. (20 de 08 de 2017). Increasing incident photon to current efficiency of perovskite solar cells through TiO₂ aerogel-based nanostructured layers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 257, pp. 89-94.
- Pinho, J. T., & Galdino, M. A. (2014). *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos* (Revisada e Atualizada ed.). Rio de Janeiro: CEPTEL - CRESESB.
- Prado, D. A. (2008). *Fabricação e Caracterização de Uma Célula Solar à partir do Polímero POLI(N-Vinilcarbazol) PVK Dopado com Perclorato de*

- Lítio. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo. Acesso em 13 de 09 de 2020, disponível em https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3140/td-e-25092008-115103/publico/Dissertacao_Mestrado_USP_Daniel_Augusto_Prado_rev_1.pdf
- Reiss, P., Couderc, E., De Girolamo, J., & Pron, A. (2011). Conjugated polymers/semiconductor nanocrystals hybrid materials—preparation, electrical transport properties and applications. *Nanoscale*, 3, pp. 446–489.
- Sbampato, B. A. (2017). *Comparative Analysis Between Mono-Si and OPV Photovoltaic Devices: Accelerated Aging Experiments Applied to LCA and LCOE*. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte. Acesso em 13 de 09 de 2020, disponível em https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-AX3LNL/1/disserta__o_bruno_sbampato_corrigeida.pdf
- Scharber, M. C., & Sariciftic, N. S. (2013). Efficiency of bulk-heterojunction organic solar cells. *Progress in Polymer Science*, 38(12), 1929-1940. doi:<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.001>
- Schneider. (24 de 05 de 2018). Tabela para seleção de bombas e motobombas. Fonte: http://www.schneider.ind.br/media/205282/tabela-de-selecao_022018-web.pdf
- Silva, I. B., Pinheiro, R., Americano, I., Thomas, H. Y., & de Oliveira, K. C. (2018). Materiais Aplicados à geração de energia solar em edificações. Gramado: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar.
- Szostak, R., Castro, J. A., Marques, A. S., & Nogueira, A. F. (24 de 05 de 2017). Understanding perovskite formation through the intramolecular exchange method in ambient conditions. *Journal of Photonics for Energy*, 7(2). doi:10.1117/1.JPE.7.022002
- Tomar, A., & Johari, R. (2018). Polymer Tandem solar cell: An overview. 90-95. doi:10.1109/PEEIC.2018.8665591
- Vandewal, K., Tvingstedt, K., Gadisa, A., Inganäs, O., & Manca, J. V. (2009). On the origin of the open-circuit voltage of polymer-fullerene solar cells. *Nat Mater.*, pp. 904-909. doi:10.1038/nmat2548
- Yamamoto, N. A. (2014). Células Solares Orgânicas Baseadas nas Estruturas Heterojunção em Bicamada e Heterojunção de Volume. *Tese de Doutorado*, p. 133.