

Análise da produção e mecanismos de funcionamento de células solares poliméricas

Production analysis and operating mechanisms of polymeric solar cells

Análisis de la producción y mecanismos de trabajo de células solares poliméricas

Recebido: 11/03/2022 | Revisado: 18/04/2022 | Aceito: 15/04/2022 | Publicado: 17/04/2022

Francisco José Lima de Sousa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8591-3014>

Centro Universitário INTA, Brasil

E-mail: 7franciscojose.987@gmail.com

Luiza de Queiroz Correia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5900-0433>

CSEM Brasil, Brasil

E-mail: luiza.correa@csembrasil.com.br

Juliana Luiza da Silva Martins

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5369-6855>

CSEM Brasil, Brasil

E-mail: juliana.martins@csembrasil.com.br

Francisco Anderson de Sousa Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1278-9582>

Universidade de Fortaleza, Brasil

E-mail: anderson.lima@unifor.br

Diego Bagnis

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6933-6352>

CSEM Brasil, Brasil

E-mail: diego.bagnis@csembrasil.com.br

Igor Frota de Vasconcelos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6172-805X>

Universidade Federal do Ceará, Brasil

E-mail: ifvasco@ufc.br

Maurício de Sousa Pereira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5485-1674>

Centro Universitário INTA, Brasil

Faculdade Luciano Feijão, Brasil

E-mail: mauricio.pereira@uninta.edu.br

Resumo

O desenvolvimento de novas tecnologias energéticas é crucial para a estabilidade do clima e segurança do planeta. A crescente demanda energética tem impulsionado diversas pesquisas visando aumentar a oferta de energia elétrica, tanto em nível nacional quanto global. O esgotamento de alguns recursos energéticos torna necessário a expansão das formas de geração de energia, dos materiais e tecnologias empregados. Diante deste cenário, as células solares fotovoltaicas poliméricas oferecem uma rota potencial para implantação de energia solar em grande escala, uma vez que elas possibilitam a redução de custos, utilizando materiais abundantes na natureza e tecnologias de produção de baixo custo. As células solares poliméricas, compostas por materiais orgânicos podem ser utilizadas, tanto como uma alternativa na produção de energia. Neste trabalho de pesquisa, realizou-se um estudo sobre o processo de produção e os mecanismos de funcionamento de células solares poliméricas. Os dispositivos estudados foram produzidos por um método *blade coating*, com camada ativa composta por filmes híbridos polímero:fulereno a base de *poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)* (P3HT):[6,6]-*phenyl-C61-butyric acid methyl ester* (PCBM). Os parâmetros fotovoltaicos avaliados apresentaram pequenos valores de dispersões, sugerindo que o método empregado se mostrou eficiente na fabricação dos dispositivos. A eficiência de conversão de energia do dispositivo fotovoltaico com melhor desempenho foi estimada em torno de 3,12 %.

Palavras-chave: Energias renováveis; Células solares poliméricas; P3HT:PCBM; Sustentabilidade.

Abstract

The development of new energy technologies is crucial for climate stability and planet security. The growing energy demand has driven several researches aiming increase the supply of electricity, nationally and globally. The depletion of some energy resources makes it necessary to expand the forms of energy generation, materials and technologies used. Given this scenario, polymeric photovoltaic solar cells offer a potential route for implantation of large-scale solar energy once they enable cost reduction, using materials abundant in nature and low-cost production technologies. Polymeric solar cells, composed of organic materials, can be used both as an alternative in energy production. In this research work, a study was carried out on the production process and working mechanisms of

polymeric solar cells. The studied devices were produced by a blade coating method, with active layer composed of hybrid films polymer:fullerene based on poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) (P3HT):[6,6]-phenyl-C61-butyrac acid methyl ester (PCBM). The evaluated photovoltaic parameters presented small dispersion values, suggesting that the employed method proved to be efficient in the fabrication of the devices. The energy conversion efficiency of the photovoltaic device with the best performance was estimated to be around 3.12%.

Keywords: Renewable energies; Polymeric solar cells; P3HT; PCBM; Sustainability.

Resumen

El desarrollo de nuevas tecnologías energéticas es crucial para la estabilidad del clima y la seguridad del planeta. La creciente demanda de energía ha impulsado varias investigaciones encaminadas a incrementar la oferta de energía eléctrica, tanto a nivel nacional como mundial. El agotamiento de algunos recursos energéticos hace necesaria la ampliación de las formas de generación de energía, materiales y tecnologías utilizadas. Dado este escenario, las células solares fotovoltaicas poliméricas ofrecen una ruta potencial para el despliegue de energía solar a gran escala porque permiten la reducción de costos, utilizando materiales abundantes en la naturaleza y tecnologías de producción de bajo costo. Las células solares poliméricas, compuestas de materiales orgánicos, pueden utilizarse tanto como una alternativa en la producción de energía. En este trabajo de investigación se realizó un estudio sobre el proceso de producción y los mecanismos de trabajo de las celdas solares poliméricas. Los dispositivos estudiados fueron producidos por un método de revestimiento de láminas, con una capa activa compuesta de polímero híbrido: películas de fullereno a base de *poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)* (P3HT):[6,6]-*phenyl-C61-butyrac acid methyl ester* (PCBM). Los parámetros fotovoltaicos evaluados mostraron valores pequeños de dispersión, lo que sugiere que el método empleado demostró ser eficiente en la fabricación de dispositivos. La eficiencia de conversión de energía del dispositivo fotovoltaico de mejor rendimiento se estimó en alrededor del 3,12 %.

Palabras clave: Energías renovables; Células solares poliméricas; P3HT; PCBM; Sustentabilidad.

1. Introdução

O desenvolvimento sustentável tem sido um dos temas mais debatidos atualmente. Geralmente, as discussões têm como foco principal o uso de recursos naturais e sua preservação para as gerações futuras. A produção e consumo de energia, sobretudo, aquelas geradas por fontes renováveis também têm sido alvo de intensos debates. Fontes de energia renováveis, como solar, eólica, marés e calor geotérmico, têm um enorme potencial para substituir os combustíveis fósseis convencionais no futuro. A luz solar tem sido identificada como a fonte sustentável mais promissora de energia limpa e, portanto, as células solares têm sido pesquisadas ativamente nas últimas décadas. Diante desse cenário, as energias renováveis, entre elas, a energia solar fotovoltaica, se apresentam como protagonistas na geração de energia limpa e sustentável (Vargas *et al.*, 2021; Medeiros *et al.*, 2021).

Atualmente, as células solares poliméricas (CSPs) ou células solares orgânicas (CSOs) alcançaram avanços significativos na eficiência de conversão de energia (ECE) e têm apresentado potencial para aplicações tecnológicas (Lourenço Junior *et al.*, 2020). Nos últimos anos, as CSPs atraíram a atenção dos setores acadêmico e industrial devido a seus recursos privilegiados de flexibilidade, simplicidade de fabricação, baixos custos de fabricação, curto tempo de retorno da energia e baixo impacto ambiental (Sousa, 2021; Liu *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2021; Pereira *et al.*, 2019).

Nos últimos anos, verificou-se uma evolução nas eficiências obtidas a partir de células solares orgânicas. Pesquisas relatam eficiências superiores a 17% em testes de laboratório (Cui *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020; Meng *et al.*, 2018). Esse fato tem impulsionado o interesse comercial na produção de células solares poliméricas em escala industrial. CSPs ou CSOs é uma promissora tecnologia fotovoltaica de filme fino, de baixo custo, leves, flexíveis, semitransparentes e de fácil fabricação, como por exemplo aplicação de técnicas de impressão (Soares *et al.*, 2020; Duan & Uddin, 2020).

Nas células solares de heterojunção em *bulk* baseadas em polímeros, o Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) (P3HT) tem sido largamente usado como polímero doador de elétrons e o fullereno [6,6]-phenyl-C61-butyrac acid methyl ester (PCBM) como aceitador de elétrons. Nesse tipo de dispositivo fotovoltaico a mistura P3HT:PCBM compõe a camada ativa do dispositivo. O P3HT absorve parte da radiação solar na região do visível. O resultado desse processo, são éxcitons dissociados pela transferência eletrônica ultrarápida para o PCBM. Assim, as cargas são geradas nas interfaces doador/aceitador

(polímero/fulereno). O transporte de buracos ocorre ao longo da fase P3HT, enquanto o transporte de elétrons ocorre ao longo da fase PCBM da rede interpenetrante, levando a coleção de cargas nos os eletrodos (Pereira *et al.*, 2017; Pereira, 2017; Huang *et al.*, 2016; Su *et al.*, 2012).

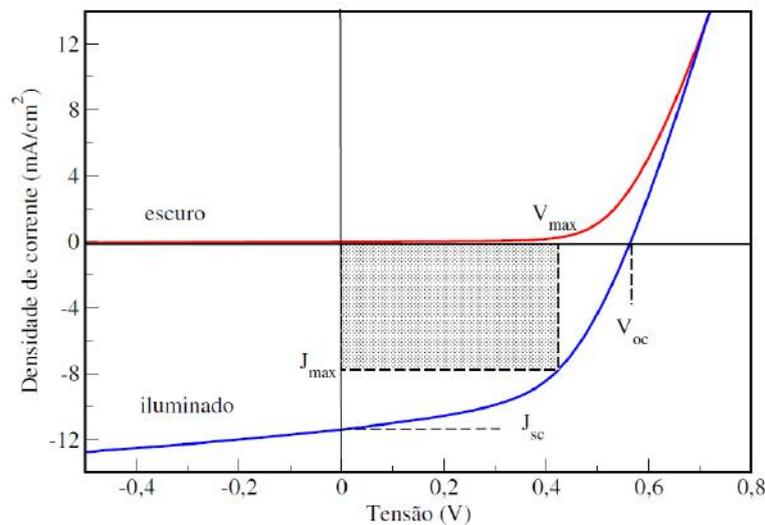
Neste trabalho de pesquisa, realizou-se um estudo sobre o processo de produção e os mecanismos de funcionamento de células solares poliméricas baseadas em P3HT:PCBM. Considerando que existem diversos processos usados na fabricação desses tipos de dispositivos, bem como um vasto material que pode aplicados em sua produção, optou-se pela análise de um tipo de dispositivo para a realização do estudo.

1.1 Parâmetros de Uma Célula Solar Fotovoltaica

Curva $J \times V$

O desempenho de uma célula solar fotovoltaica é caracterizado pela medida de densidade de corrente enquanto a tensão sobre o dispositivo é polarizada com uma carga variável durante a irradiação do dispositivo pela luz. (Yan & Saunders, 2014). A Figura 1 mostra uma curva característica para um dispositivo no escuro e sob iluminação. A curva no escuro (vermelha) representa a resposta para um diodo retificador onde há corrente elétrica apenas para polarização direta (o eletrodo de maior função trabalho é polarizado positivamente e o eletrodo de menor função trabalho, negativamente). A curva iluminada (azul) representa a resposta para uma célula solar sob iluminação. A tensão de circuito aberto (V_{oc}) e a densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}) estão representadas na curva sob iluminação.

Figura 1. Curva característica $J \times V$ para um dispositivo fotovoltaico.



Fonte: Pereira (2017).

Aplica-se o princípio da superposição para comparar os dados obtidos no escuro e sob iluminação. Após a correção para as perdas por resistências, superpondo a foto corrente constante e os dados da curva $J \times V$ no escuro, produz-se a curva $J \times V$ iluminada (Nelson, 2003; Servaites *et al.*, 2011).

Densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc})

Trata-se da densidade de corrente que flui através do circuito externo quando os eletrodos da célula solar estão em curto-circuito ($V = 0$). A densidade de corrente de curto-circuito da célula solar depende da densidade do fluxo de fótons incidentes sobre a célula solar que é determinada pelo espectro da luz incidente. A corrente máxima que uma célula solar que

pode fornecer depende fortemente das propriedades ópticas da célula solar, tais como: absorção da camada absorvedora e reflexão.

Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})

Tensão em que nenhuma corrente flui através do circuito externo ($J = 0$). É a tensão máxima que a célula solar pode fornecer. V_{oc} corresponde à tensão de polarização direta em que a corrente no escuro compensa a fotocorrente, dessa forma ela depende da densidade de fotocorrente gerada. Considerando uma célula solar fotovoltaica ideal, V_{oc} , é dado por:

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_0} + 1 \right) \quad (1)$$

V_{oc} depende da corrente de saturação da célula solar e da fotocorrente gerada. A densidade da corrente de saturação J_0 depende da recombinação na célula solar. Portanto, V_{oc} é uma medida da quantidade de recombinações no dispositivo (Nelson, 2003).

Fator de Preenchimento ou Fill Factor (FF)

A razão entre a potência máxima gerada pela célula solar ($P_m = J_m \times V_m$) e o produto $V_{oc} \times J_{sc}$ é definida como o fator de preenchimento ou *fill factor*:

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} J_{sc}} \quad (2)$$

Este parâmetro está associado com a recombinação e as fugas de corrente na célula, uma vez que depende do valor das resistências em série e *shunt*.

Potência da eficiência de conversão (η)

Medidas de eficiência precisas são cruciais para a avaliação de novos materiais ou tecnologias de processamento. A eficiência de conversão é calculada como a razão entre a potência máxima gerada e a potência incidente.

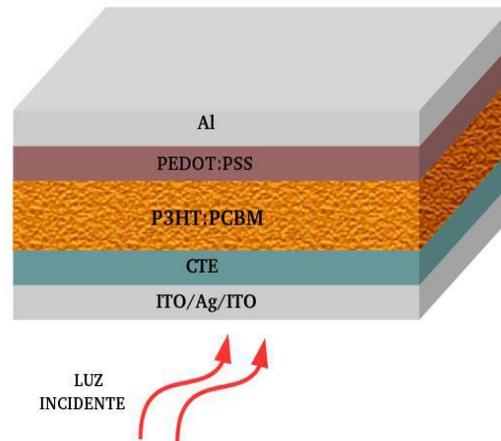
$$\eta = \frac{V_{oc} J_{sc} FF}{P_{inc}} \quad (3)$$

Para medidas de conversão de eficiência em células solares, adota-se como padrão o valor da potência de irradiação incidente $P_{inc} = 1000 \text{W/m}^2$ para um espectro AM 1,5G.

2. Metodologia

Os dispositivos usados nesse trabalho foram produzidos na empresa CSEM Brasil, situado em Belo Horizonte, MG. Os dispositivos fotovoltaicos poliméricos foram produzidos por um método de impressão chamado *blade coating*. Os dispositivos fotovoltaicos foram produzidos em uma arquitetura invertida com uma área ativa de $0,55 \text{cm}^2$. A Figura 2 ilustra a representação esquemática com as partes constituintes da célula solar fotovoltaica.

Figura 2. Representação esquemática do dispositivo fotovoltaico produzido.



Fonte: Autores.

As etapas da montagem dos dispositivos são descritas abaixo:

1. Uma camada transportadora de elétrons (CTE) com uma espessura de 8 nm foi depositado sobre a camada de ITO/Ag/ITO (eletrodo de trabalho) com resistência de 10 Ω /sq;
2. Uma camada composta pela mistura de P3HT:PCBM (camada ativa) de espessura 300 nm foi depositada sobre a camada transportadora de elétrons. As misturas de camada ativa das CSPs foram realizadas em uma proporção molar 1:0,8 de P3HT:PCBM dispersos em solventes não halogenados à base de o-xileno.
3. A camada transportadora de buracos composta pelo poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) com espessura de 200 nm foi depositada sobre a camada ativa;
4. Para fechar o dispositivo, um contra-eletrodo de Al de espessura 200 nm foi depositado por evaporação térmica a uma taxa de 1 Å/s.

Antes dos testes todas as amostras foram encapsuladas com uma folha de barreira com taxas de transmissão de vapor de água (WVTR) de 10^{-3} g/m²/dia com um corte integrado de ultravioleta (UV) em 385 nm, laminado com adesivo curável por UV.

No presente estudo, os dispositivos fotovoltaicos analisados foram produzidos em pequenos módulos contendo 8 células. As medidas de simulação solar foram extraídas de forma individualizada para cada célula e atribuído um valor médio para cada parâmetro fotovoltaico do dispositivo. Para a realização da pesquisa foi analisado um conjunto de 40 células solares impressas em 5 minimódulos. Os dispositivos foram nomeados com D1, D2, D3, D4 e D5, respectivamente.

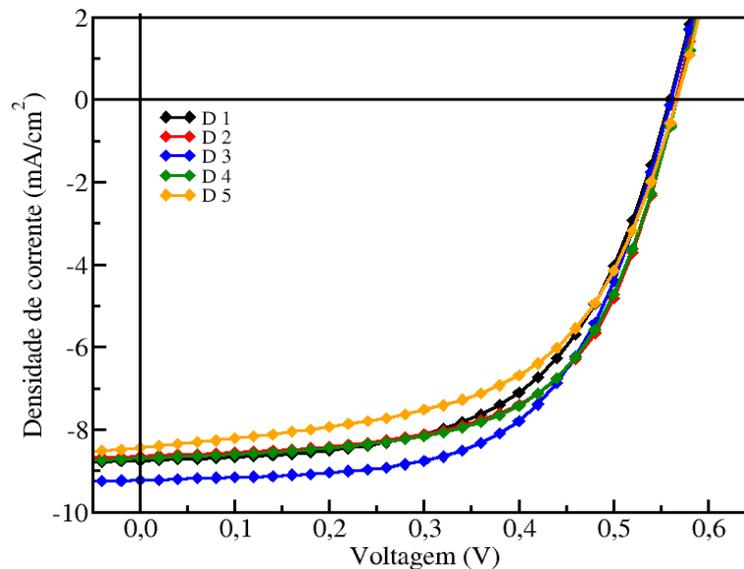
Os testes de simulação solar dos dispositivos fotovoltaicos foram realizados em um simulador, modelo Wacon WXS-156S-10, operando com uma intensidade luminosa de 100 mW/cm². Um fotodiodo Si / BK7 calibrado a partir de medições fotovoltaicas foi usado para calibração antes de cada medição.

3. Resultados e Discussão

Os parâmetros fotovoltaicos, densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), fator de preenchimento (FF) e eficiência de conversão de energia (PCE), de células solares podem ser obtidos a partir de análises da curva $J \times V$. O desempenho de uma célula solar fotovoltaica é caracterizado pela medida de densidade de corrente enquanto a tensão sobre o dispositivo é polarizada com uma carga variável durante a irradiação do dispositivo pela luz. A fonte de fotocorrente é o resultado dos fótons absorvidos convertidos em portadores de cargas livres pelo dispositivo solar fotovoltaico.

Os parâmetros fotovoltaicos dos dispositivos foram calculados a partir da análise da curva J x V obtidos por simulação solar. A Figura 3 mostra as curvas J x V dos cinco dispositivos avaliados neste trabalho. Os parâmetros fotovoltaicos dos respectivos dispositivos estão dispostos na Tabela 1. A eficiência de conversão depende de vários parâmetros como densidade de corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto e fator de preenchimento.

Figura 3. Curva J x V dos dispositivos fotovoltaicos testados sob radiação luminosa de 100 mW/cm².



Fonte: Autores.

Tabela 1. Parâmetros fotovoltaicos dos dispositivos. J_{sc}, V_{oc}, FF, PCE são: densidade de corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, fator de preenchimento e eficiência de conversão de energia, respectivamente.

Dispositivos	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (Volt)	FF (%)	PCE (%)
D 1	8,75	0,561	57,92	2,84
D 2	8,64	0,567	61,08	3,00
D 3	9,22	0,561	60,17	3,12
D 4	8,65	0,568	60,54	2,99
D 5	8,43	0,568	56,06	2,69
Valor Médio	8,74 ± 0,139	0,565 ± 0,000014	59,15 ± 2,0	2,92 ± 0,027

Fonte: Autores.

Analisando os resultados da Tabela 1, verifica-se que os valores dos parâmetros fotovoltaicos J_{sc}, V_{oc}, FF e PCE apresentam pequenos valores de dispersões, sugerindo que o método empregado para a produção das células solares se mostrou eficiente, produzindo dispositivos homogêneos.

O dispositivo D3 foi aquele que exibiu os melhores parâmetros fotovoltaicos com eficiência de conversão de energia em torno de 3,12 %. Pode-se observar que a maior eficiência alcançada pelo dispositivo D3, deve ser atribuído ao valor de J_{sc} mais elevado do que nos outros dispositivos. Os resultados dos parâmetros fotovoltaicos obtidos estão em concordância com os relatados por outros grupos de pesquisa (Pereira *et al.*, 2017; Pereira *et al.*, 2019).

4. Conclusão

Nas últimas décadas a crescente demanda e o interesse por energia limpa e renovável vêm chamando a atenção de pesquisadores, governos e empresas para a pesquisa e desenvolvimento de dispositivos fotovoltaicos, dentre eles os dispositivos fotovoltaicos orgânicos têm recebido bastante destaque.

Neste trabalho de pesquisa, realizou-se um estudo sobre o processo de produção e os mecanismos de funcionamento de células solares poliméricas flexíveis. Considerando que existem diversos processos usados na fabricação desses tipos de dispositivos, bem como um vasto material que podem aplicados em sua produção, optou-se pela análise de um tipo de dispositivo para a realização do estudo.

Os dispositivos usados nesse trabalho foram produzidos na empresa CSEM Brasil, situado em Belo Horizonte, MG. Os dispositivos fotovoltaicos poliméricos foram produzidos por um método de impressão chamado *blade coating*.

Os parâmetros fotovoltaicos avaliados apresentaram pequenos valores de dispersões, sugerindo que o método empregado se mostrou eficiente na fabricação dos dispositivos. A eficiência de conversão de energia do dispositivo fotovoltaico com melhor desempenho foi estimada em torno de 3,12 %.

Considerando os avanços obtidos por essa nova tecnologia, bem como o seu potencial para novas aplicações tecnológicas, é notório que ainda existem diversas potencialidades a serem exploradas, tais como: expandir o estudo para novos dispositivos, com novas arquiteturas e novos materiais, bem como difundir esse conhecimento através de publicações em revistas especializadas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Centro Universitário INTA – UNINTA pelo apoio acadêmico e a empresa CSEM Brasil pelo suporte experimental na produção e testes dos dispositivos.

Referências

- Cui, Y., Yao, H., Hong, L., Zhang, T., Tang, Y., Lin, B., Xian, K., Gao, B., An, C., Bi, P., Ma, W. & Hou, J. (2020). Organic photovoltaic cell with 17% efficiency and superior processability. *National Science Review*, 7, 1239–1246.
- Duan, L. P. & Uddin, A. (2020). Progress in Stability of Organic Solar Cells. *Advanced Science*, 7, 1903259.
- Liu, Q., Jiang, Y., Jin, K., Qin, J., Xu, J., Li, W., Xiong, J., Liu, J., Xiao, Z., Sun, K., Yang, S., Zhang, X., Ding, L. (2020). 18% Efficiency Organic Solar Cells. *Science Bulletin*, 65, 272.
- Liu, C., Xiao, C., Xie, C. & Li, W. (2021). Flexible organic solar cells: Materials, large-area fabrication techniques and potential applications. *Nano Energy*, 89, 106399.
- Lourenço Junior, O. D., Ramoni, M. C., Menezes, L. C. W., Bagnis, D. & Roman, L. S. (2020). Células Solares Orgânicas, a Energia que Vem dos Polímeros. *Revista Virtual de Química*, 12, 583-597
- Medeiros, R. R. B., Lima, A. V. N. A., Diniz, G. F., Melo, V. M., Sousa, L. G. M. & Silva, K. C. G. (2021). Performance study of a hybrid photovoltaic/thermal system. *Research, Society and Development*, 10, e1210716156.
- Meng, L., Zhang, Y., Wan, X., Li, C., Zhang, X., Wang, Y., Ke, X., Xiao, Z., Ding, L., Xia, R., Yip, H-L., Cao, W. & Chen, W. (2018). Organic and solution-processed tandem solar cells with 17.3% efficiency. *Science*, 361, 1094-1098.
- Nelson, J. (2003). *The Physics of Solar Cells*. Imperial College Press.
- Pereira, M. S., Lima, F. A. S., Almeida, R. Q., Martins, J. L. S., Bagnis, D., Barros, E. B., Sombra, A. S. S., Vasconcelos, I. F. (2019). Flexible, large-area organic solar cells with improved performance through incorporation of CoFe₂O₄ nanoparticles in the active layer. *Materials Research*, 22, e20190417.
- Pereira, M. S. (2017). *Application of oxide nanoparticles obtained by proteic sol-gel and mechanical alloying in third generation solar cells*. Tese de Doutorado, Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza – CE.
- Pereira, M. S., Lima, F. A. S.; Ribeiro, T.S., Silva, M. S., Almeida, R. Q., Barros, E. B. & Vasconcelos, I. F. (2017). Application of Fe-doped SnO₂ nanoparticles in organic solar cells with enhanced stability. *Optical Materials*, 64, 548-556.
- Servaites, J. D., Ratner, M. A. & Marks, T. J. (2011). Organic solar cells: A new look at traditional models. *Energy Environmental Science*, 4, 4410.

Soares, G. A., David, T. W., Anizelli, H., Miranda, B., Rodrigues, J., Lopes, P., Martins, J., Cunha, T., Vilaça, R., Kettle, J. & Bagnis, D. (2020). Outdoor performance of organic photovoltaics at two different locations: A comparison of degradation and the effect of condensation. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 12, 063502.

Sousa, F. J. L. (2021). *Estudo sobre a produção e mecanismos de funcionamento de células solares poliméricas*. Monografia, Engenharia Civil, Centro Universitário INTA – UNINTA, Sobral – CE.

Vargas, M. C., Siqueira, J. A. C., Tokura, L. K., Santos, R. F. & Feiber, F. N. (2021). Solar energy available and energy generated in photovoltaic systems in different inclinations and orientations of roofs of buildings. *Research, Society and Development*, 10(16), e279101623494,

Yan, J. & Saunders, B. R. (2014). Third-generation solar cells: a review and comparison of polymer:fullerene, hybrid polymer and perovskite solar cells. *RSC Advances*, 4, 43286.

Yang, F., Huang, Y., Li, Y. & Li, Y. (2021). Large-area flexible organic solar cells. *Flexible Electronics*, 5, 30.