



Avaliação do potencial de corantes orgânicos para produção de célula solar nanocristalina

Renan Angrizani de Oliveira

Professor Doutor, UNISO, Brasil.
renan.oliveira@prof.uniso.br

Juliana Heloisa Pinê Américo-Pinheiro

Professora Doutora, UNESP, UB, Brasil.
juliana.heloisa@unesp.br
juliana.pinheiro@ub.edu.br

Arthur Pereira dos Santos

Doutorando em Ciências Ambientais, UNESP, Brasil.
arthur.p.santos@unesp.br

Darllan Collins da Cunha e Silva

Professor Doutor, UNESP, Brasil.
darllan.collins@unesp.br

Diego Aparecido Carvalho Albuquerque

Professor Doutor, UNISO, Brasil.
diego.albuquerque@prof.uniso.br

RESUMO

Com o aumento da demanda energética mundial e a necessidade de redução das emissões dos gases de efeito estufa, é inegável a necessidade de se gerar energia de fontes limpas e renováveis. Neste sentido, se destaca a energia solar, uma fonte de energia promissora pelo fato de ser inesgotável e causar impactos ambientais reduzidos, comparados às outras fontes de energia. O presente estudo teve como objetivo confeccionar e avaliar a eficiência da Célula Solar Nanocristalina Sensibilizada por Corante (CSNS), por meio da avaliação prévia da transmitância de diferentes corantes a base de chá por meio de espectroscopia óptica. Para obtenção dos corantes foram utilizados diferentes chás, sendo mate; maçã com canela; maçã com baunilha; capim cidreira; erva doce; frutas vermelhas; e hortelã em diferentes concentrações, e posteriormente, submetida à leitura óptica em comprimentos de ondas de transmitância (400 nm a 900 nm). Foi produzida uma CSNS para avaliação da sua eficiência, que foi realizada pela relação Tensão x Corrente e Potência x Resistência. Os resultados obtidos na análise de transmitância dos corantes evidenciaram que quanto maior a concentração do corante, menor a transmitância. Dentre os chás avaliados, o de frutas vermelhas na maior concentração obteve o melhor resultado. A caracterização elétrica realizada na célula produzida com o corante a base de chá de frutas vermelhas apresentou valores de potência máxima de 8 μ W para resistência de carga de 700 Ω . A técnica empregada para a análise prévia de transmitância dos corantes apresentou resultados satisfatórios ao que tange a redução de custos e rápida aplicabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Energia solar. Fotovoltaicos orgânicos. Energia renovável.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional vem ocasionando o aumento da demanda energética global, tornando necessária a busca por novas fontes de energia. No entanto, as fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis, impactam diretamente no aumento das emissões dos gases de efeito estufa (GEE), intensificando o aumento da temperatura média mundial. Portanto, é inegável a necessidade de se investir em formas alternativas de produção energéticas limpas e renováveis (ALONSO et al., 2012; LAERA, 2013; FEITOSA et al., 2018; AHMED et al., 2023).

Visando a redução das emissões de GEE e o atendimento da crescente demanda energética mundial, a energia solar é apresentada como uma fonte promissora, tendo em vista que sua fonte é inesgotável e os impactos ambientais na geração de energia são reduzidos comparados às fontes de energia não renováveis. Além disso, a energia solar se apresenta como uma fonte de energia sustentável e de grande potencial de geração energética, tendo em vista que a quantidade de radiação solar que incide diariamente sobre o planeta Terra em uma hora, é equivalente a demanda energética mundial anual, mas ainda é pouco aproveitada na geração de energia elétrica (VARELLA; CAVALIERO; SILVA, 2008; SOLANGI et al., 2011; GONG; LIANG; SUMATHY, 2012; LIMA; SOUZA; LOPES, 2022).

A energia solar pode ser classificada em quatro categorias, tais como energia fotovoltaica, termossolar, fotovoltaicas de concentração e chaminé solar, sendo mais comum os sistemas fotovoltaicos, que convertem a energia radiante do Sol diretamente em energia elétrica. Entretanto, um dos aspectos negativos na utilização de células fotovoltaicas consiste em seu elevado custo e a baixa eficiência de conversão energética (REIS, 2011; SHARMA, 2022).

Uma solução promissora para o elevado custo e complexo processo de fabricação

das células fotovoltaicas convencionais, consiste na Célula Solar Nanocristalina Sensibilizada por Corante (CSNS) ou do inglês *Dye Sensitized Solar Cells* (DSSC), proposta por O’Regan e Grätzel (1991), que consiste em um dispositivo fotovoltaico que utiliza corantes orgânicos em sua produção, tornando-o um método de custo inferior se comparado às células solares convencionais, que utilizam o silício como matéria-prima na sua produção (AGNALDO et al., 2006; ANDUALEM, DEMISS, 2018).

O sistema de células fotovoltaicas criado a partir de corantes orgânicos por O’Regan e Grätzel (1991), baseia-se na observação do fenômeno da fotossíntese, processo no qual as plantas geram energia química através da absorção da luz solar. Com isso, desenvolveu-se o modelo de célula que converte energia solar em elétrica a partir de corantes orgânicos.

Os corantes utilizados na CSNS possuem a capacidade de absorção de fótons, que ao serem absorvidos excitam e transferem elétrons para a banda de condução e, em seguida, o fluxo de elétrons gerado percorre até a camada onde são coletados na forma de corrente elétrica. Portanto, os corantes são fundamentais na produção de energia e devem ser capazes de absorver luz em ampla faixa espectral (GONG; LIANG; SUMATHY, 2012; ANDUALEM, DEMISS, 2018).

O método de produção de uma CSNS tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores, que apresentaram progressos em seu desenvolvimento e aplicação. Isto pode ser atribuído à busca pelo melhor entendimento e aperfeiçoamento deste novo modelo de célula fotovoltaica, buscando melhorar sua eficiência energética e consequentemente competitividade com as células convencionais de silício (PETER, 2011; GONG; LIANG; SUMATHY, 2012; SONAI et al., 2015; SUN et al., 2023).

Diante da importância em se desenvolver novas tecnologias para suprir a demanda energética e reduzir o atual custo das células fotovoltaicas, o presente estudo experimental, buscou investigar a eficiência da CSNS, por meio da avaliação prévia da transmitância dos corantes analisados por espectroscopia óptica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Conforme modelo proposto por Azevedo e Cunha (1991), realizou-se a produção da CSNS, e posteriormente foi analisada a eficiência da célula produzida por meio da relação Tensão x Corrente e Potência x Resistência. A escolha do método de O’Regan e Grätzel (1991) foi motivada devido ao seu baixo custo e simplificado processo de fabricação, comparado a tecnologia das células fotovoltaicas convencionais.

2.1 Produção de corantes

Para obtenção dos corantes foram utilizados diferentes tipos de chás em sachê, sendo dos tipos: mate; maçã com canela; maçã com baunilha; capim cidreira; erva doce; frutas vermelhas; e hortelã em diferentes concentrações. Para a produção de todos os chás, a água foi aquecida previamente a 90°C, sendo aferida com termômetro.

Para concentração (1), foram adicionados 100 ml de água para cada sachê de chá por

6 min. Na produção dos corantes nas concentrações (2) e (3), foram empregados os mesmos critérios de preparo da concentração (1), variando o volume de água, onde na concentração (2) utilizou-se 200 ml de água para um sachê, e para a concentração (3) foram utilizadas 400 ml de água para um sachê.

2.2 Avaliação dos corantes

Buscando identificar o melhor corante produzido para a confecção da CSNS, foram analisados todos os corantes orgânicos a base de diferentes chás com diferentes concentrações, sendo submetidos à análise de transmitância por espectroscopia óptica no intervalo de comprimentos de onda de 400nm a 900nm.

Para a estimativa do potencial de geração de energia dos corantes produzidos, foram realizadas caracterizações no espectrofotômetro (Ocean Optics – Modelo Red Tide USB650), com cubeta de vidro.

A partir dos dados obtidos de transmitância dos corantes foi possível estimar a região do espectro de ondas eletromagnéticas em que há absorção de energia pelos corantes. De este modo, os espectros obtidos possibilitaram a comparação dos corantes em função de sua concentração e transmitância.

2.3 Produção da Célula Solar Nanocristalina Sensibilizada por Corante (CSNS)

Identificado o corante e a concentração com o maior potencial de absorção de fótons, em função da transmitância analisada para cada corante em diferentes concentrações, foi então produzida uma CSNS, utilizando a metodologia proposta por Azevedo e Cunha (1991), que consiste na preparação de dois eletrodos, sendo um negativo e o outro positivo.

2.3.1 Produção de eletrodo negativo

A produção do eletrodo negativo, foi realizada em uma lâmina de vidro recoberto com óxido de índio dopado com estanho, do inglês *Indium tin oxide* (ITO), com resistividade 70-100 Ω sq⁻¹, 25 mm² por 1,1 mm de espessura (Sigma-Aldrich), higienizada com água de osmose reversa e posteriormente, seca com um soprador térmico à 300 °C (Steinel – Modelo HL1500).

O semicondutor foi preparado partir da dissolução de 3 g de dióxido de titânio - TiO₂ (Merck) em 6 mL de ácido nítrico 65% P.A. (Química Moderna), formando uma solução pastosa, distribuída sobre a superfície condutiva do vidro recoberto com ITO com auxílio de um bastão de vidro, obtendo-se um filme uniforme com espessura de 2 mm.

Posteriormente, a lâmina com o filme de TiO₂ foi levada para secagem em uma chapa aquecedora, previamente aquecida à 300°C por 5 min para a remoção da umidade da lâmina, e posteriormente, para que houvesse o recozimento do filme do TiO₂, levada para secagem em mufla (Quimis – Modelo Q318M) à 550°C por 10 min.

Após o resfriamento, a lâmina foi submersa no corante orgânico a base de chá em temperatura de 20 °C por 5 min, de forma que a pasta de TiO₂ adquirisse coloração.

2.3.2 Produção de eletrodo positivo

Para a produção do eletrodo positivo foi utilizada uma lâmina de vidro recoberta com ITO, utilizando o mesmo método de limpeza e secagem empregado no eletrodo negativo.

A utilização do catalizador foi realizada aplicando-se uma camada de grafite no lado condutor da lâmina com um lápis 2B.

2.3.3 Montagem da Célula Solar Nanocristalina Sensibilizada por Corante (CSNS)

Após a preparação dos eletrodos, estes foram unidos utilizando dois binder clips, mantendo as partes condutivas voltadas para a parte interna da junção.

Para ativação da célula, foi colocado 0,25 ml de eletrólito na lateral da célula, preparado a partir da metodologia de Freitas (2006), onde foram utilizados 0,05 mol de iodo ressublimado - I₂, triturado com auxílio de uma espátula e adicionado 0,5 mols de iodeto de potássio – KI, diluído em 30 mL de etilenoglicol - C₂H₄(OH)₂.

2.4 Caracterização elétrica da Célula Solar Nanocristalina Sensibilizada por Corante (CSNS)

Para determinação da eficiência da CSNS produzida, foram realizadas medidas de tensão (V) e corrente (I) a fim de obter uma curva I-V em diferentes valores de resistência (R), por conseguinte, foi obtida a potência em função da resistência aplicada.

Para obtenção das medidas, foi adotada uma lâmpada de 100 W do tipo incandescente em um tripé universal, posicionada à 4 cm da célula. Foram conectados cabos nas extremidades de cada eletrodo da célula, os quais estavam ligados a um circuito com um multímetro (Minipa – Modelo ET-2042D) para a medição da tensão, uma década resistiva (Minipa – Modelo MDR-610) para variar as resistências e a medição da corrente foi realizada com um multímetro digital (Agilent – Modelo 34401A).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo Freitas (2006) e Gong, Liang e Sumathy (2012), a CSNS apresenta melhor aproveitamento de uma faixa ampla de luminosidade, pelo fato de os corantes orgânicos serem capazes de absorver radiação na região do visível e do infravermelho próximo; além de apresentarem menor sensibilidade ao ângulo de incidência da radiação, e possuindo uma operação em faixa de temperatura de até 70°C.

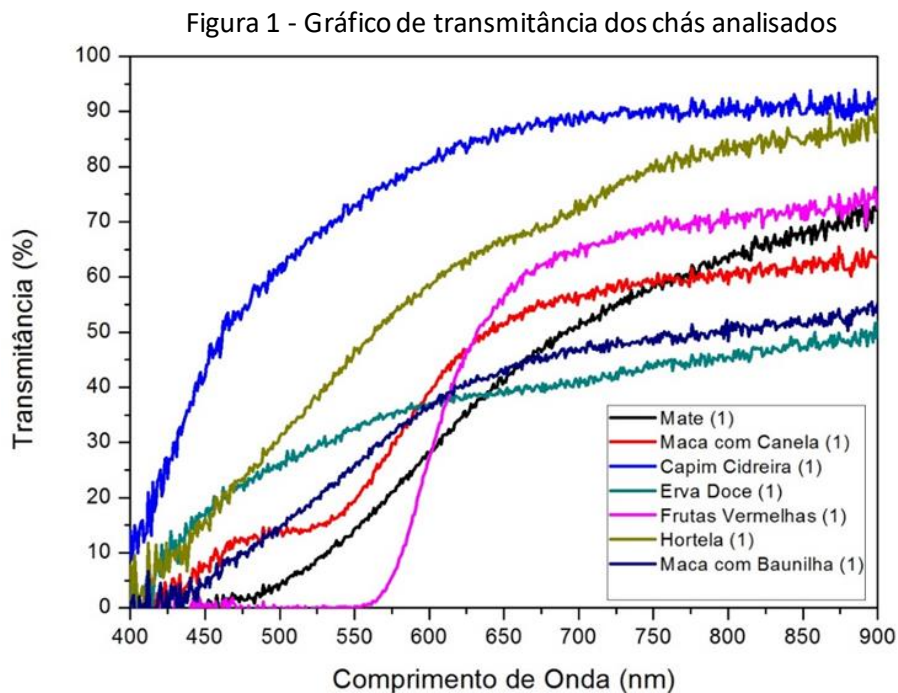
3.1 Corantes avaliados no estudo

A análise da transmitância dos corantes em diferentes concentrações, realizada na faixa de 400 nm a 900 nm, possibilitou a verificação do desempenho dos corantes para geração de energia elétrica nas CSNS.

Como o dióxido de titânio (TiO₂), semiconductor comumente utilizados nas CSNS, absorve luz em comprimento de ondas abaixo de 400 nm, é necessário a utilização de corantes

capazes de absorver uma ampla faixa do espectro solar, como o visível e infravermelho próximo (MURAKOSHI et al., 1998; GONG; LIANG; SUMATHY, 2012).

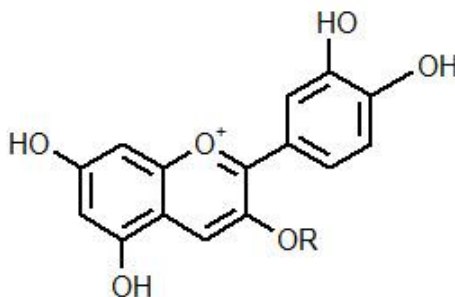
Nos resultados obtidos de transmitância dos chás foi possível constatar que, para as maiores concentrações (1), houve significativa redução na transmitância e, conseqüentemente, maior absorção; logo, para as concentrações (2) e (3) verificou-se uma maior transmitância em todos os corantes analisados. Portanto, para a avaliação dos corantes, foram selecionados apenas os corantes com maior concentração, conforme demonstrado na Figura 1.



Diante da análise dos resultados (Figura 1), todos os corantes na maior concentração (1) apresentaram os melhores resultados de absorção. No entanto, o corante obtido a partir do chá de frutas vermelhas (1), seguido pelo corante de chá mate (1) e chá de maçã com canela (1), apresentaram o maior potencial de geração de energia devido à redução na transmitância em uma região maior do espectro.

Portanto, o melhor resultado de absorção de luz foi apresentado pelo corante produzido com o chá de frutas vermelhas, comportamento sugestivo da presença da antocianina (Figura 2), que consiste em um grupo de pigmentos solúveis em água amplamente estudados, muito utilizado na indústria de alimentos como corantes naturais (LOPES et al., 2007). Este pigmento natural, é responsável pelas colorações vermelha, azul e roxa em flores e frutos, onde a variação de coloração também é influenciada pelo pH do meio (MAEDA-YAMAMOTO et al., 2012; ROY; RHIM, 2020).

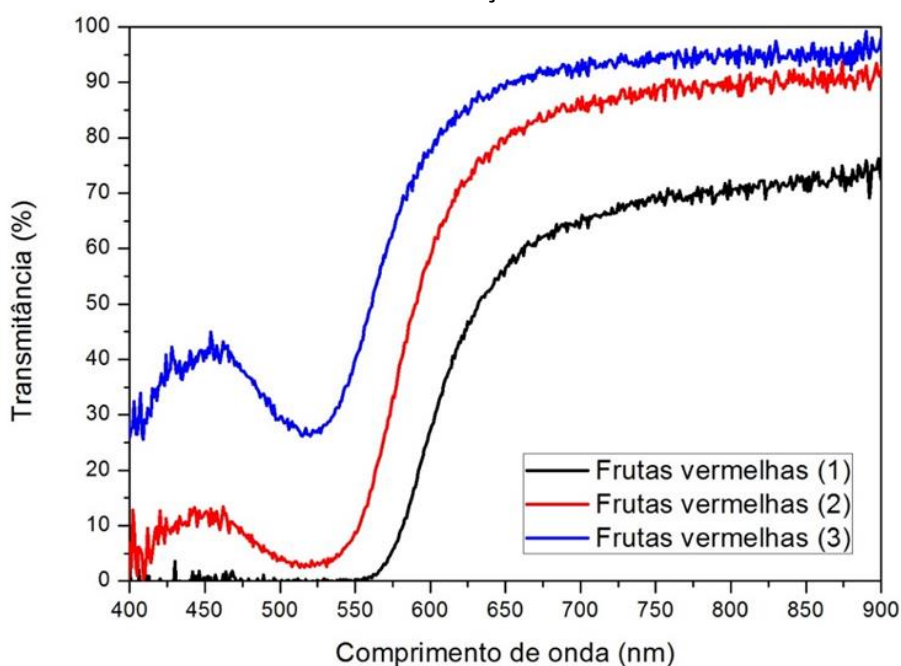
Figura 2 - Estrutura química da antocianina presente no chá de frutas vermelhas



Fonte: Dos autores, 2024.

Deste modo, verificou-se que este pigmento é responsável pela coloração do chá de frutas vermelhas (Figura 3), que apresentou queda de transmitância em comprimento de onda próximo de 530 nm, referentes às transições eletrônicas π - π^* decorrentes das antocianinas (CALOGERO et al., 2009; PATROCÍNIO; IHA, 2010; MAEDA-YAMAMOTO et al., 2012; SONAI et al., 2015).

Figura 3 - Gráfico da transmitância para o corante de chá de frutas vermelhas em diferentes concentrações



Fonte: Dos autores, 2024.

As concentrações (2) e (3) do corante obtido a partir do chá de frutas vermelhas apresentaram resultados inferiores, visto que as transmitâncias obtidas nessas concentrações estiveram acima do encontrado para a concentração (1). Portanto, verifica-se que a concentração influencia diretamente na transmitância e, conseqüentemente, na absorbância do corante.

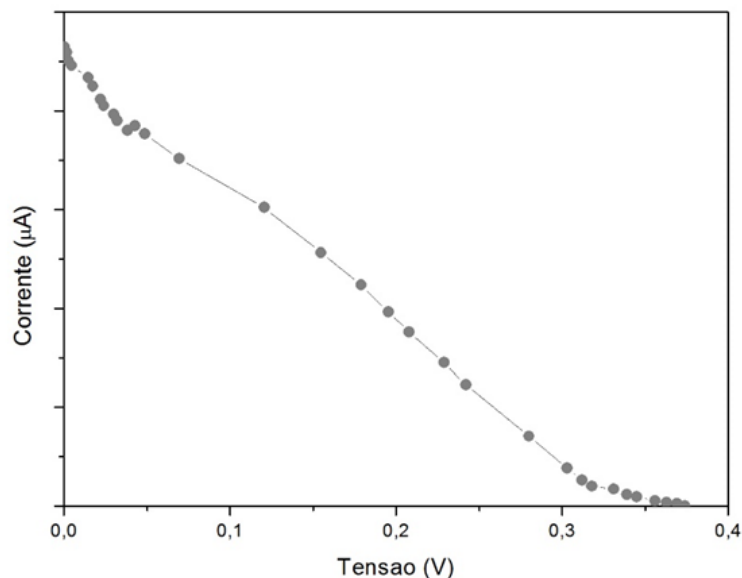
3.2 Avaliação elétrica da Célula Solar Nanocristalina Sensibilizada por Corante (CSNS)

A caracterização da célula fotovoltaica produzida com o corante de chá de frutas vermelhas (1) foi realizada por meio da medição da tensão (V) e corrente (I). Deste modo, foi obtida a curva I-V em diferentes valores de resistência (R), conforme observado na Figura 4.

A curva I-V (Figura 4) apresentou semelhança ao estudo realizado por Azevedo e Cunha (1991). Foi possível realizar a determinação da potência gerada em função da resistência aplicada (Figura 5), um dado importante no que se refere à aplicação das células fotovoltaicas, segundo os autores.

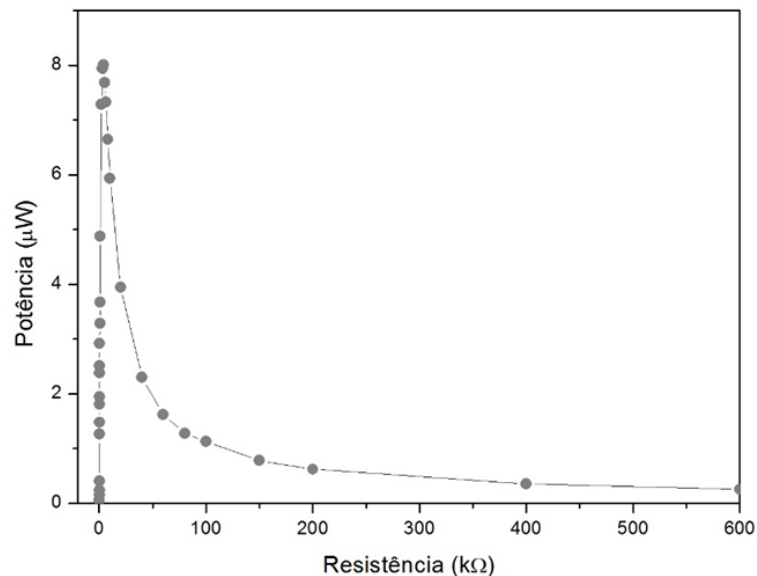
Por meio da análise dos resultados apresentados na Figura 5, foi possível determinar para a célula confeccionada de 25 mm² a potência máxima (P_{max}) em função da resistência de carga (R_{carga}), onde a P_{max} encontrada foi equivalente a 8 μW para a R_{carga} de 700 Ω, resultando em uma P_{max} de 3,2 μW cm⁻².

Figura 4 - Curva I-V da CSNS confeccionada.



Fonte: Dos autores, 2024.

Figura 5 - Curva de potência em função da carga da CSNS confeccionada.



Fonte: Dos autores, 2024.

As caracterizações elétricas obtidas, demonstraram resultados inferiores aos demais estudos que utilizaram extratos naturais com a presença da antocianina, visto que a eficiência obtida para o chá no estudo apresentou valores de potência máxima abaixo dos encontrados por Patrocínio e Iha (2010), que apresentaram valores de P_{max} para a amora, framboesa e mirtilo de respectivamente $1600 \mu W \text{ cm}^{-2}$; $1500 \mu W \text{ cm}^{-2}$ e $810 \mu W \text{ cm}^{-2}$. No entanto, segundo Kim et al. (2013) para a jabuticaba foi encontrado o valor de $4248 \mu W \text{ cm}^{-2}$. O que pode ser atribuído ao material utilizado, tendo em vista que os estudos utilizaram frutas *in natura* para obtenção dos corantes, o que possibilita uma maior eficiência.

Entretanto, observou-se que faltam metodologias para uma comparação efetiva dos resultados dos estudos já realizados, fato que pode ser atribuído às variações nos procedimentos laboratoriais e até mesmo à origem do composto, tendo em vista que, por se tratar de corantes orgânicos, estão suscetíveis às influências do meio, tais como às condições climáticas da região, composição do solo, variação genética da planta, entre outros fatores.

O Brasil possui uma matriz energética baseada em fontes hidroelétricas e termoelétricas; porém, devido seu grande potencial de produção energética por meio de células fotovoltaicas, alguns estudos são realizados no território nacional, tais como a pesquisa feita por Feitosa et al. (2018), que avaliaram a influência do clima na produção energética fotovoltaica no Estado do Maranhão. Os autores analisaram a correlação entre a incidência solar e a precipitação na região amazônica e no cerrado, e verificaram que as zonas de cerrado possuem um maior potencial de produção energética fotovoltaica se comparada à Amazônia, tendo em vista as condições de menores índices de precipitação.

Portanto, de modo a diminuir o custo de confecção e produção das células e painéis fotovoltaicos, torna-se imprescindível a realização de estudos que contemplem diferentes materiais, tais como o presente estudo, aumentando, assim, a competitividade dessa matriz energética. Deste modo, será possível expandir o acesso da população a tecnologia, e contribuir para a diminuição da emissão de gases de efeito estufa provenientes das usinas termoelétricas, ainda utilizadas em uma larga escala no mundo.

4 CONCLUSÃO

Foi possível verificar que há uma variação na transmitância em função dos compostos dos diferentes corantes analisados e suas concentrações. Conclui-se que a análise prévia de transmitância ou absorvância dos corantes, visando baixa transmitância e, conseqüentemente, maior absorvância para aplicação em CSNS, consiste em uma técnica eficaz, visto que o Brasil é um país detentor de uma vasta biodiversidade, e com isso possui um grande potencial de exploração de novos compostos com eficiência desconhecida. A técnica empregada demonstra de maneira rápida e com custo reduzido, a estimativa de eficiência das CSNS.

A célula fotovoltaica produzida a partir do chá de frutas vermelhas apresentou a potência máxima de $8 \mu\text{W}$ para a recarga de 700Ω , valor abaixo do encontrado na literatura, o fato pode ser atribuído a falta de uniformidades metodológicas, assim como os diferentes materiais utilizados como corantes.

REFERÊNCIAS

- AGNALDO, J. S.; BASTOS, J. B. V.; CRESSONI, J. C.; VISWANATHAN, G. M. Células solares de TiO_2 sensibilizado por corante. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 28, n. 1, p. 77-84, 2006.
- AHMED, A. A.; NAZZAL, M. A.; DARRAS, B. M.; DEIAB, I. M. Global warming potential, water footprint, and energy demand of shared autonomous electric vehicles incorporating circular economy practices. *Sustainable Production and Consumption*, v. 36, p. 449-462, 2023.
- ALONSO, E.; SHERMAN, A. M.; WALLINGTON, T. J.; EVERSON, M. P.; FIELD, F. R.; ROTH, R.; KIRCHAIN, R. E. Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies. *Environmental Science & Technology*, v. 46, n. 6, p. 3406-3414, 2012.
- ANDUALEM, A.; SOLOMON, D. Review on Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs). *Journal of Heterocyclics*, v. 1, n. 1, p. 6, 2018.
- AZEVEDO, M.; CUNHA, A. Fazer uma célula fotovoltaica. *Rev. Physical on Stage*, v. 2, n. 4, p. 1-3, 1991.
- CALOGERO, G.; DI MARCO, G.; CARAMORI, S.; CAZZANTI, S.; ARGAZZI, R.; BIGNOZZI, C. A. Natural dye sensitzers for photoelectrochemical cells. *Energy & Environmental Science*, v. 2, n. 11, p. 1162-1172, 2009.
- FEITOSA, F. E. C. S.; BELO, R. C. R.; SANTOS, J. R. N.; DE ARAÚJO, M. L. S.; DOS SANTOS, J. S.; SILVA, F. B. Influência das Mudanças de Tempo e Variabilidade Climática sobre a Produção de Energia Fotovoltaica no Estado do Maranhão. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 10, n. 6, p. 1959-1973, 2017.

- FREITAS, F. E. **Célula solar de SnO₂/TiO₂ preparada por spray-pirólise ativada com corante orgânico**. 150 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista (Unesp), Ilha Solteira, 2006.
- GONG, J.; LIANG, J.; SUMATHY, K. Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Fundamental concepts and novel materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 8, p. 5848-5860, 2012.
- KIM, H. J.; KIM, D. J.; KARTHICK, S. N.; HEMALATHA, K. V.; RAJ, C. J.; OK, S.; CHOE, Y. Curcumin dye extracted from Curcuma longa L. used as sensitizers for efficient dye-sensitized solar cells. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 8, n. 6, p. 8320-8328, 2013.
- LAERA, L. H. N. Mudanças Climáticas e as Responsabilidades, Atribuições e Ações do Poder Público na Cidade do Rio de Janeiro. **Revista de Direito da Cidade**, v. 5, n. 2, p. 137-152, 2013.
- LIMA, G. A. M.; SOUZA, V. O.; LOPES, R. S. Emerging technologies for photovoltaic solar cell production: a review. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 17, p. e139111736068, 2022.
- LOPES, T.; XAVIER, M.; QUADRI, M. G.; QUADRI, M. Antocianinas: uma breve revisão das características estruturais e da estabilidade. **Current Agricultural Science and Technology**, v. 13, n. 3, p. 291-297, 2007.
- MAEDA-YAMAMOTO, M. et al. Chemical analysis and acetylcholinesterase inhibitory effect of anthocyanin-rich red leaf tea (cv. Sunrouge). **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 92, n. 11, p. 2379-2386, 2012.
- MURAKOSHI, K.; KOGURE, R.; WADA, Y.; YANAGIDA, S. Fabrication of solid-state dye-sensitized TiO₂ solar cells combined with polypyrrole. **Solar Energy Materials and solar cells**, v. 55, n. 1-2, p. 113-125, 1998.
- O'REGAN, B.; GRÄTZEL, M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. **Nature**, v. 353, n. 6346, p. 737-740, 1991.
- PATROCÍNIO, A. O. T.; MURAKAMI IHA, N. Y. Em busca da sustentabilidade: células solares sensibilizadas por extratos naturais. **Química Nova**, v. 33, n. 3, p. 574-578, 2010.
- PETER, L. M. The gratzel cell: where next? **The Journal of Physical Chemistry Letters**, v. 2, n. 15, p. 1861-1867, 2011.
- REIS, L. B. Geração de Energia Elétrica. 2 ed. Barueri, SP: Manole, 2011.
- ROY, S.; RHIM, J.-W. Anthocyanin food colorant and its application in pH-responsive color change indicator films. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 61, n. 14, p. 2297-2325, 2021.
- SHARMA, R.; SHARMA, A.; AGARWAL, S.; DHAKA, M. S. Stability and efficiency issues, solutions and advancements in perovskite solar cells: A review. **Solar Energy**, v. 224, n. 15, p. 516-535, 2022.
- SOLANGI, K. H.; ISLAM, M. R.; SAIDUR, R.; RAHIM, N. A.; FAYAZ, H. A review on global solar energy policy. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 15, n. 4, p. 2149-2163, 2011.
- SONAI, G. G.; MELO JUNIOR, M. A.; NUNES, J. H.; MEGIATTO JR, J. D.; NOGUEIRA, A. F. Solar cells sensitized with natural dyes: an introductory experiment about solar energy for undergraduate students. **Química Nova**, v. 38, n. 10, p. 1357-1365, 2015.
- SUN, L.; CHEN, Y.; SUN, M.; ZHENG, Y. Organic solar cells: physical principle and recent advances. **Chemistry - An Asian Journal**, v. 18, n. 5, p. e202300006, 2023.
- VARELLA, F. K. O. M.; CAVALIERO, C. K. N.; SILVA, E. P. D. Energia solar fotovoltaica no Brasil: Incentivos regulatórios. **Revista Brasileira de Energia**, v. 14, n. 1, p. 9-22, 2008.