

Desenvolvimento de células fotovoltaicas de terceira geração empregando nanotecnologia

Zaira Navarro Catel¹, Marcelo Kioshi Hirata², Jilian Nei de Freitas²

zcatel@cti.gov.br, mkhirata@cti.gov.br, jnfreitas@cti.gov.br

**¹Faculdade de Engenharia Química
Pontifícia Universidade Católica de Campinas – Campinas – SP**

**²Divisão de Nano, Microssistemas e Materiais – DINAM
CTI/MCTI Renato Archer – Campinas/SP**

Abstract. This work covers the light-matter interaction in Ruthenium dye and natural dyes, in addition to studying the characterization parameters of solar cells according to the variation of film thickness and dyes.¹ The solar cells were successfully manufactured and the main objective of starting a small engine was achieved. Natural dyes work successfully and are a lower cost alternative, however, they are not efficient enough to start the engine, as a greater number of cells are needed for the same effect.

Resumo. Este trabalho abrange a interação luz-matéria no corante de Rutênio e nos corantes naturais, além de estudar os parâmetros de caracterização de células solares de acordo com a variação do corante e da espessura do filme. As células solares foram confeccionadas com sucesso e o objetivo principal de acionar um pequeno motor foi alcançado. Os corantes naturais funcionam com sucesso e são uma alternativa de menor custo, porém, não são eficientes o suficiente para acionar o motor, pois são necessários um maior número de células para o mesmo efeito.

Introdução

A Energia Fotovoltaica é cada vez mais crescente no Brasil, segundo o Balanço Energético Nacional de 2023 [Portal Solar] ^[1], no país a maior parte da energia provém das fontes renováveis, com 88 % da oferta total. Desta porcentagem, 17,5 % são representados pela energia fotovoltaica. Hoje há um crescente interesse dos brasileiros em investir nas placas fotovoltaicas para uso doméstico e em pequenos negócios.

As placas que constituem as usinas, também chamadas de módulos, são feitas a partir de ligações de várias células fotovoltaicas. Essas células são dispositivos que convertem a energia da luz do sol em energia elétrica por meio do efeito fotoelétrico, e são classificadas por seus diferentes materiais. No comércio, os principais tipos de células fotovoltaicas são produzidos em silício, novas gerações de células incluem tecnologia de filmes finos e células solares sensibilizadas por corante (DSSC).

As DSSCs (do inglês, *Dye-Sensitized Solar Cells*), são uma tentativa de simular a fotossíntese das plantas, contendo um corante que absorve a luz solar que gera e transporta elétrons para um semicondutor. Esses elétrons são transferidos por um circuito gerando corrente elétrica. O corante oxidado se regenera a partir de um eletrólito, e este é regenerado pelo contra eletrodo, que fecha o circuito. Essas células também são conhecidas por células de Grätzel e podem alcançar até 10 % de eficiência em sua montagem original criada na década de 90 [Hirata 2015] ^[2] [Sonai, Júnior, Nunes, Júnior e Nogueira 2015] ^[3].

A DSSC em sua configuração clássica é constituída, respectivamente, por um vidro que contém um Óxido Condutor Transparente (*Transparent Conducting Oxides* - TCO), podendo ser um Óxido de Estanho e Índio (*Indium Tin Oxide* - ITO) ou um Óxido de Estanho dopado com Flúor (*Fluorine-doped Tin Oxide* - FTO), em seguida há um filme fino de um semicondutor (Dióxido de Titânio - TiO_2) que fará a adsorção do corante (normalmente a base de Rutênio), após este componente, tem-se como eletrólito um par redox de íons de Iodeto / Triiodeto (I/I_3^-), por fim, a célula é fechada com um contra eletrodo de Platina (Pt) (vidro condutor com uma fina camada de Platina) [Sonai, Júnior, Nunes, Júnior e Nogueira 2015] ^[3].

Contudo, utilizando um repertório de baixo custo e com o objetivo de tornar a energia solar cada vez mais acessível, este trabalho de iniciação científica procura estudar a utilização de corantes naturais em Células Solares Sensibilizadas por Corante.

Materiais e Métodos

Foram feitas montagens de DSSCs para estudos e caracterizações de diversas etapas, além da substituição do corante padrão por corantes naturais, que proporciona um custo ainda mais baixo que a montagem clássica.

Substrato

O FTO é um material utilizado em muitos sistemas eletrônicos e dispositivos. Utilizou-se então o substrato de vidro com FTO (*TCO10-10, SOLARONIX*) para as células solares. Este foi cortado nas dimensões 2,0 x 2,5 cm, para células com área ativa de 1,0 cm², e 1,5 x 2,0 cm, para células com área ativa de 0,25 cm².

Para a limpeza do vidro com FTO aplicou-se como reagentes: detergente neutro (EXTRAN – MA02, 3%), acetona (99,7% - PA), álcool isopropílico (99,9% - PA) e

água deionizada. Foram feitos banho em ultrassom por 30 min e enxague com água deionizada entre cada reagente. Com os substratos limpos, realizou-se uma secagem com nitrogênio.

Pasta de TiO₂

A pasta de dióxido de titânio foi preparada a partir dos seguintes reagentes: TiO₂ (EVONIK – Aeroxide TiO₂ P25) previamente macerado, polietilenoglicol (Merk - PEG - 2000) também previamente macerado, água deionizada, acetilacetona (Merk – 99,0 %) e TritonX-100 (Sigma-Aldrich). Deste modo a pasta foi executada conforme descrito no artigo de 1992 [Nazeeruddin, Kay, Rodicio, Humpbry-Baker, Miiller, Liska, Vlachopoulos e Grätzel 1993] ^[4], com o uso de um quarto dos reagentes.

O TiO₂ utilizado foi o de forma alotrópica anatase, pois este tem como característica um band gap de 3,2 eV, ou seja, é o mais adequado para a coleta de cargas, o PEG é utilizado como reagente orgânico para criar a porosidade e rugosidade do filme após o tratamento térmico, a acetilacetona evita o reagrupamento das partículas de TiO₂ e o TritonX-100 auxilia a deposição de um filme homogêneo, pois ele ajuda a pasta a se espalhar no substrato [Nazeeruddin, Kay, Rodicio, Humpbry-Baker, Miiller, Liska, Vlachopoulos e Grätzel 1993] ^[4].

Então colocou-se em um almofariz 3 g de TiO₂, 1,2 g de PEG-2000, 100 µL de acetilacetona e 4 mL de água deionizada, e prosseguiu-se para a maceração por aproximadamente 25 min. Em seguida aplicou-se 50 µL de TritonX-100 e 1 mL de água deionizada para mais 5 min de maceração.

Deposição do filme de TiO₂

Para a deposição do filme do semicondutor foi selecionada a técnica *Doctor Blading*, na qual promove um filme uniforme e possibilita a escolha de sua espessura, além de ser simples de executá-la. Foi utilizada a fita mágica (EUROCEL) como espaçador, colocou-se uma pequena quantidade da pasta de TiO₂ na ponta do substrato e com uma pipeta de vidro realizou-se a deposição.

Tratamento Térmico

O tratamento térmico do filme foi realizado com o objetivo de eliminar todas as substâncias orgânicas e solventes presentes na pasta depositada, o que proporciona um filme poroso e promove uma maior área superficial para a ancoragem do corante.

Em uma Mufla a vácuo (Fornos INTI – FTR-1100), o substrato passou por um tratamento térmico de acordo com o artigo de Grätzel [Grätzel e O'Regan 1991] ^[5]. Neste tratamento programou-se o forno por 30 min à 350 °C como primeiro patamar e 30 min à 450 °C como segundo patamar.

Delimitação da área ativa

Após o tratamento térmico é possível delimitar a área ativa do dispositivo através da raspagem do filme de TiO₂ com o auxílio de uma lâmina de vidro, para áreas de 1 cm² e 0,25 cm², de modo a padronizar as células.

Corantes

Os corantes mais utilizados nas DSSCs são os corantes comerciais de rutênio, o N719 ((cis-ditiocianatobis (2,2' bipiridina-4,4'-ácidodicarboxílico) rutênio (II)) di-tetrabutil-amônio)), o N-3 ((isotiocianato)-bis (4,4'-ácido dicarboxílico 2,2'-bipiridina)2-rutênio (II)), e o N749 (Tris(N,N,N-tributil-1-butanaminium)[[2,2''6',2''-terpiridina]-4,4',4''-tricarboxilato(3-)-N1,N1',N1'']tris(tiocianato-N)hidrogenorrutenato) mais conhecido comercialmente como *Black Dye*.

Foram utilizados os corantes naturais e o corante comercial *Black Dye* (ALDRICH) para os dispositivos. O *Black Dye* é comercializado em pó, com a necessidade de ser preparada uma solução para ser utilizado nos dispositivos. Assim, foi feita previamente uma solução (0,25 mmol·L⁻¹) de corante em Etanol (99,7 %), no qual foi coberto de papel alumínio para evitar a degradação do corante.

Nesta etapa, como os corantes são fotossensíveis, ou seja, degradam se expostos a luz, foi realizado o procedimento em uma sala escura. Os dispositivos então foram aquecidos em uma chapa a 60 °C e colocados em uma placa de Petri e imersos na solução do corante por um período mínimo de 18 horas. Após o tempo determinado, foram retiradas as células da solução e, com uma pipeta, foi realizada uma lavagem com etanol para retirar o excesso do corante que poderia estar presente no substrato.

Corantes naturais

Foram utilizadas frutas para a extração dos corantes naturais, nas quais as substâncias responsáveis pela coloração dessas frutas pertencem à classe dos flavonoides, que em geral, são divididos em classes dependendo de sua estrutura química [Março, Poppi e Scarminio 2008] ^[6].

A duas classes de flavonoides consideradas mais interessantes para a aplicação em células solares são as betacianinas e as antocianinas por serem fotossensíveis e serem escuras, ou seja, há uma absorção maior do espectro visível [Calogero, Yum, Sinopoli, Marco, Grätzel e Nazeeruddin 2012] ^[7] [Giusti e Ronald 2001] ^[8]. Foi realizada uma pesquisa de frutas que tem predominância nas duas classes de corantes naturais, e dentre elas, foram escolhidas o Mirtilo, Amora e Pitaya.

Mirtilo

Para o extrato do pigmento da fruta com predominância das antocianinas, foi primeiramente separada a casca da polpa e foi feita uma maceração da casca com etanol (99,5%) (Figura 1 – A), após a maceração realizou-se uma filtração simples (Figura 1 – B) e a solução foi armazenada em frasco âmbar na geladeira.

Também foi realizado um teste no qual colocou-se um mirtilo dentro de um Becker com etanol e aquecimento, assim foi visto que o calor facilita a extração do corante (Figura 1 – C). Portanto, antes do extrato ser filtrado, foi colocado um agitador magnético e deixou-se o corante aquecer na chapa a 60 °C por aproximadamente 10 min.

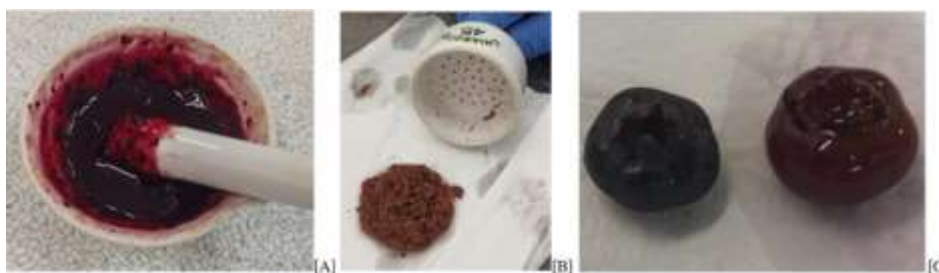


Figura 1 – (A) Maceração do mirtillo com etanol; (B) Resíduo sólido da filtração do mirtillo; (C) Teste de aquecimento do mirtillo em etanol para comprovar que o corante é extraído com mais facilidade com calor.

Amora

Para o extrato da amora, que também há predominância das antocianinas, foi feita uma maceração da fruta com etanol (99,5%), após a maceração realizou-se uma filtração simples e a solução foi armazenada igual ao mirtillo (Figura 2 – A e B). Os mesmos testes de aquecimento realizados com o extrato de mirtillo foram repetidos para a amora.

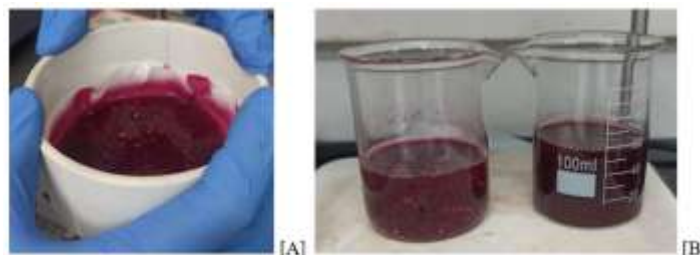


Figura 2 – (A) Filtração do extrato de amora; (B) Comparação do extrato antes da filtração e pós filtração respectivamente.

Pitaya

O último dos corantes naturais foi extraído da Pitaya (Figura 3 – A) com predominância das betacianinas, e para seu extrato foi primeiramente separada a casca da polpa e foi feita uma maceração da polpa com etanol (99,5%) (Figura 3 – B), após a maceração realizou-se uma filtração em um pano para retirar boa parte dos resíduos sólidos e diminuir a viscosidade do extrato. Agitou-se o extrato para realizar uma filtração simples (Figura 3 – C) e a solução foi armazenada em frasco âmbar na geladeira.

O teste de aquecimento durante a extração foi repetido para Pitaya. Porém, não houve uma alteração considerável após o procedimento. Desta maneira optou-se por não realizar este procedimento para a extração do corante de Pitaya.

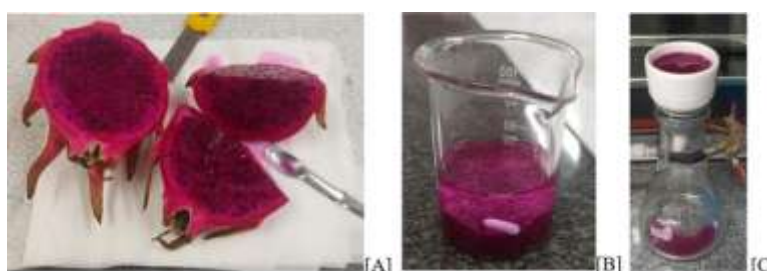


Figura 3 – (A) Pitaya usada para o experimento; (B) Processo de agitação com o etanol; (C) Processo de filtração da Pitaya.

Montagem das Células Solares

Para a montagem das células solares foi utilizada a estrutura da célula clássica, assim em um ambiente escuro, após as células serem retiradas dos corantes, usou-se de um filme de Policloreto de vinila (PVC) como espaçador ao redor da célula, foram colocadas 2 gotas do eletrólito com par redox de Iodo e um contra eletrodo de platina para fechar a célula.

Em seguida, um teste foi realizado com as células montadas, nas quais foram colocadas em um circuito em paralelo para que acionasse um pequeno motor com uma hélice, assim, com essa observação, foi possível verificar o funcionamento das células no sol e quantas células foram necessárias para mover o motor.

Resultados e Discussão

Os resultados foram obtidos a partir das caracterizações realizadas, como a análise da superfície do filme de TiO_2 por perfilometria e microscopia óptica, a caracterização dos extratos naturais por meio de espectrofotometria na região do UV-Vis e Cromatografia, e a caracterização das células fotovoltaicas por meio de um simulador solar.

Análises do filme de TiO_2

O perfilômetro (*BRUKER - Dektak-XT*) foi utilizado para medir a espessura dos filmes de TiO_2 e sua rugosidade após o tratamento térmico. De acordo com o artigo de 1991 [Grätzel e O'Regan 1991] ^[5], os filmes de TiO_2 devem conter uma espessura ideal de 8 a 12 μm , que sejam homogêneos e não tenham rupturas.

A rugosidade do filme também é um requisito importante pois deve ser ajustada a ponto de não deixar com que o filme de TiO_2 corado tenha contato com o contra eletrodo, assim evitando um curto-circuito na célula (Figura 4).

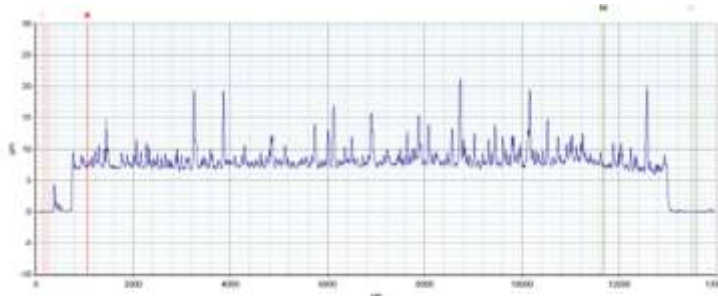


Figura 4 - Medida de espessura e rugosidade do filme de TiO_2 .

A pasta obteve maior rugosidade em comparação ao esperado pelos estudos, em que pode ser tratada como algo não desejado, pois uma rugosidade maior aumenta as chances de gerar um curto-circuito.

Com esses dados, foi possível tirar uma média da espessura e rugosidade conforme o número de fitas utilizado na deposição do filme (Figura 5). Logo, para células com filmes de 1 fita, foi encontrada uma média de 10,77 μm de espessura e 1,34 μm de rugosidade, já para células com 2 fitas, foi encontrada uma média de 22,16 μm de espessura e 1,83 μm de rugosidade, e para 3 fitas, foi encontrada uma média de 26,43 μm de espessura e 1,42 μm de rugosidade.

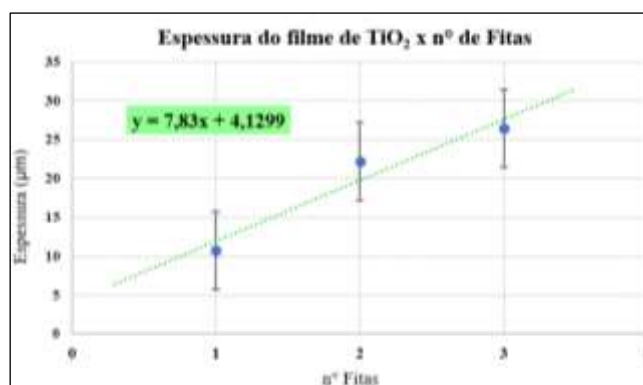


Figura 5 – Gráfico de análise da espessura do filme de TiO_2 conforme o número de fitas utilizadas na deposição.

Dessa forma, obteve-se como parâmetro a medida de 1 fita, que seria mais ideal não só pela sua espessura de acordo com o artigo de Grätzel [Nazeeruddin, Kay, Rodicio, Humpbry-Baker, Miiller, Liska, Vlachopoulos e Grätzel 1993] ^[4], mas também por análises no microscópio óptico (*EVIDENT - Olympus BX51*), no qual se observou que os filmes com 2 ou mais fitas são quebradiços e não uniformes (Figura 6), o que é mais difícil de se perceber nos filmes com 1 fita por terem um índice menor desses acontecimentos (Figura 7).

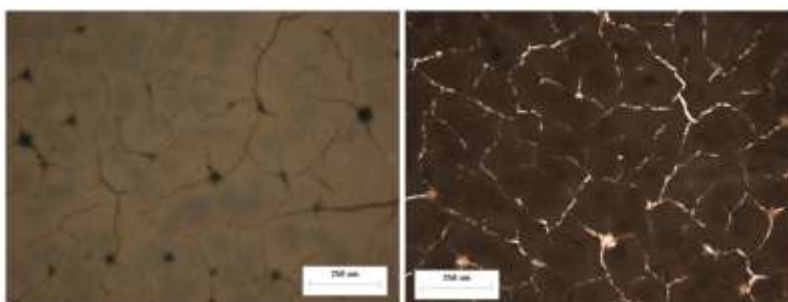


Figura 6 – Imagens de microscopia de um filme de TiO_2 depositado com 2 fitas.

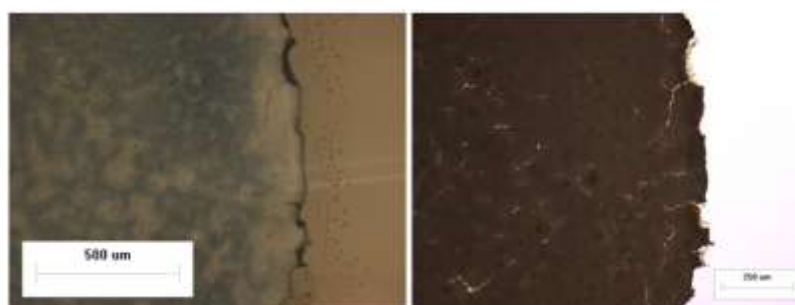


Figura 7 - Imagens de microscopia de um filme de TiO_2 depositado com 1 fita.

Além disso, como a pasta de TiO_2 foi feita a mão, observou-se que houve alterações de viscosidade da pasta de acordo com a temperatura, pressão, tempo, e quantidade de água em sua composição. Logo, foi possível perceber que a viscosidade da pasta altera a espessura, quanto mais viscosa a pasta, mais espesso será o filme, conforme corrobora com os resultados do perfilômetro (Figura 8).

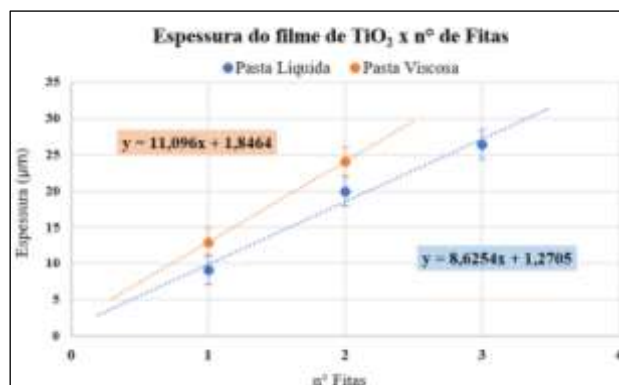


Figura 8 - Gráfico de análise da espessura do filme de TiO_2 conforme o número de fitas utilizadas na deposição para uma pasta mais líquida e uma pasta mais viscosa.

Cromatografia e Espectrofotometria na região do UV-Vis

Após a retirada dos extratos de corantes, foram realizados testes de afinidade com o TiO_2 (Figura 9 -A), uma placa com filme de TiO_2 já tratado termicamente foi submersa parcialmente em cada extrato de corante natural, para verificar se ocorre a adsorção.

Fitas de pH foram utilizadas, não para o tratamento de ajuste de pH, mas para o acompanhamento do mesmo, pois foi verificado que os extratos apresentam sensibilidade às variações de pH [Mejica, Unpaprom, Balakrishnan, Dussadee, Buochareon e Ramaraj 2022] ^[9]. Neste teste de afinidade foram observadas diferentes colorações nos filmes de TiO_2 , para um mesmo extrato, o que evidência a presença de mais de um tipo de corante por extrato.

Com o objetivo de separar os diversos corantes dos extratos, foram elaborados dois procedimentos; Uma análise de cromatografia em papel (Figura 9 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**-B) [Oladzadabbasabadi, Nafchi, Ghasemlou, Ariffin, Singh e Al-Hassan 2022] ^[10], para fins de determinação se o etanol seria o solvente adequado para a extração dos pigmentos das frutas; E uma coluna cromatográfica simples. Utilizou-se uma bureta, sílica gel, e vários frascos âmbar para coleta das amostras. Então, foi utilizado um pouco do extrato para separação e o etanol como solvente da coluna. Vale ressaltar que o experimento foi feito no escuro e a coluna foi coberta de papel alumínio a fim de evitar a degradação do corante por ser fotossensível (Figura 10).

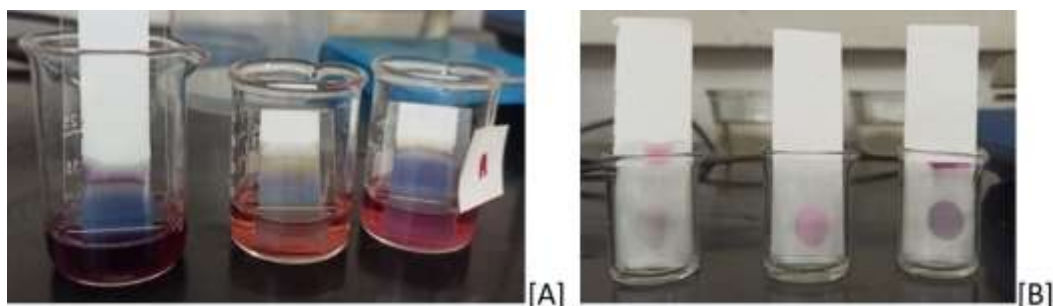


Figura 9 – (A) Teste de afinidade dos extratos de mirtilo e um de amora respectivamente. Com separação no próprio filme do semiconductor; (B) Cromatografia em papel do extrato de Amora, Pitaya, e Mirtilo respectivamente.



Figura 10 – (A) Preparação da coluna cromatográfica; (B) Separação dos corantes do extrato de mirtilo; (C) Primeira fração do extrato de mirtilo retirada da coluna cromatográfica.

Após a coluna cromatográfica, as amostras coletadas e os extratos das frutas foram caracterizados com o uso do espectrômetro de UV-Vis (Espectrômetro UV vis Lambda 900) em modo de absorbância, no qual, o extrato de Mirtilo teve-se como maior absorção um comprimento de onda de 538 nm (Figura 11), variando entre a faixa de 440 nm a 570 nm, o que corrobora com os resultados estudados. Já a Amora, teve-se como maior absorção um comprimento de onda de 528 nm (Figura 12), variando entre a faixa de 430 nm a 550 nm, o que também corrobora com os resultados estudados.



Figura 11 – Gráfico da absorbância versus o comprimento de onda do extrato de Mirtilo e as frações retiradas da coluna cromatográfica.



Figura 12 - Gráfico da absorbância versus o comprimento de onda do extrato de Amora e as frações retiradas da coluna cromatográfica.

As colunas cromatográficas separaram os corantes, como pode ser verificado nos gráficos já que há uma diferença nos resultados de absorbância em comparação do extrato com as frações, porém ficou para trás, dentro da coluna, uma última fração que se supõem ser a com comprimento de onda que aparece nos extratos e não aparece em outras frações no gráfico, na qual seria de interesse por ter a absorção do espectro visível.

Caracterização das DSSCs

Para a caracterização das células solares foi utilizado um simulador solar (*OSSILA*), foi realizada uma coleta dos dados para análise das curvas de corrente por voltagem, ou de $J \times V$, no qual J representa a densidade da corrente (corrente dividida pela área ativa da célula). Com essa curva, foi possível determinar o potencial de circuito aberto (V_{oc}), e a corrente de curto-circuito (I_{sc}), assim, com esses valores, foi possível calcular, pelo seu produto, a potência máxima teórica (P_{th}).

Também foi possível determinar a potência máxima atingida pela célula (P_{max}), a qual se dá pelo produto do potencial quando a potência é máxima (V_{mpp}) com a corrente quando a potência é máxima (I_{mpp}). A partir desses parâmetros calculados, foi possível determinar fator de preenchimento, do inglês, *Fill Factor* (FF – razão da potência máxima pela potência teórica) que representa o quanto a curva obtida está próxima da curva ideal.

Com esses parâmetros, foi possível calcular a eficiência da célula, dada pela razão da potência máxima pelo produto da irradiância de um sol (100 mW/cm^2) com área ativa da célula, tudo multiplicado por 100, (Equação 1) (Figura 13).

$$\eta = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{\text{Irradiance} \cdot A} \cdot 100\% \therefore \eta = \frac{P_{max}}{\text{Irradiance} \cdot A} \cdot 100\%$$

Equação 1 – Cálculo da eficiência da célula solar.

Foram feitas a análise dos parâmetros das células com diferentes espessuras (Tabela 1), e comparadas as eficiências para células feitas com 1 fita e com 2 fitas, a qual se chegou no resultado de que 1 fita seria mais eficiente para as DSSCs (Figura 13).

Tabela 1 – Médias dos parâmetros de DSSCs com Black Dye e área ativa de 1 cm^2 .

	Jsc	Isc	Voc	Impp	Vmpp	Pmax	FF	n
	[mA/cm ²]	[mA]	[V]	[mA]	[V]	[mW]		[%]
Média 1 fita	6,24	6,24	0,65	4,46	0,43	1,93	0,47	1,93
σ 1 fita	0,64	0,64	0,00	0,59	0,06	0,47	0,08	0,47
Média 2 fitas	5,70	5,70	0,63	3,87	0,39	1,52	0,42	1,52
σ 2 fitas	0,23	0,23	0,00	0,57	0,07	0,49	0,13	0,49

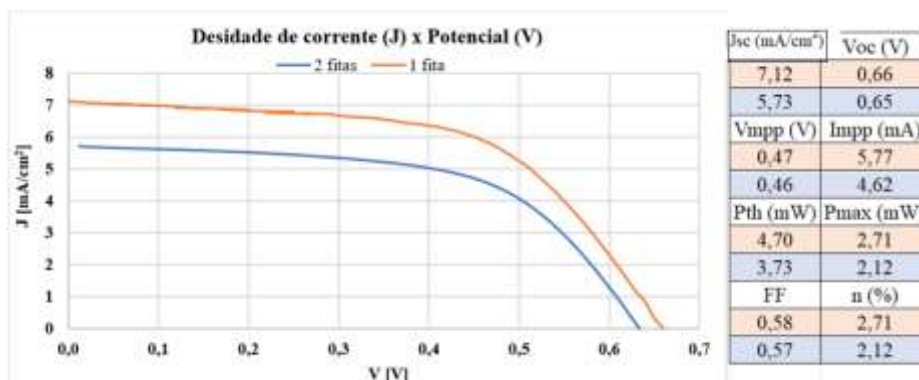


Figura 13 – Comparação e caracterização de células com 1 fita e 2 fitas, ambas com Black Dye e área de 1 cm^2 .

Além da espessura, também foram caracterizadas células com diferentes corantes (Tabela 2). Obteve-se então curvas para o Mirtilo, Amora e Rutênio, em que se fixou a espessura em 1 fita e área ativa de $0,25 \text{ cm}^2$ (Figura 14 e Figura 15).

Tabela 2 – Média dos parâmetros de DSSCs com diferentes corantes, deposição com 1 fita e área ativa de 0,25 cm².

	Jsc	Voc	Impp	Vmpp	Pmax	FF	n
	[mA/cm ²]	[V]	[mA]	[V]	[mW]		[%]
Média Mirtilo	0,59	0,48	0,05	0,32	0,02	0,24	0,05
σ Mirtilo	0,40	0,02	0,01	0,02	0,00	0,14	0,02
Média Amora	0,35	0,53	0,10	0,39	0,04	0,53	0,10
σ Amora	0,02	0,02	0,01	0,03	0,00	0,04	0,01
Média Rutênio	2,26	0,62	0,61	0,41	0,24	0,62	0,75
σ Rutênio	1,10	0,01	0,24	0,04	0,08	0,33	0,19

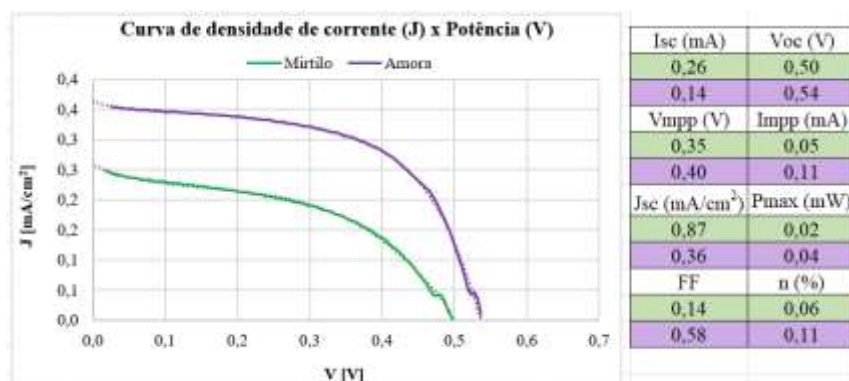


Figura 14 – Medida de uma DSSC com extrato de Amora e Mirtilo, área ativa de 0,25 cm² e deposição com 1 fita.

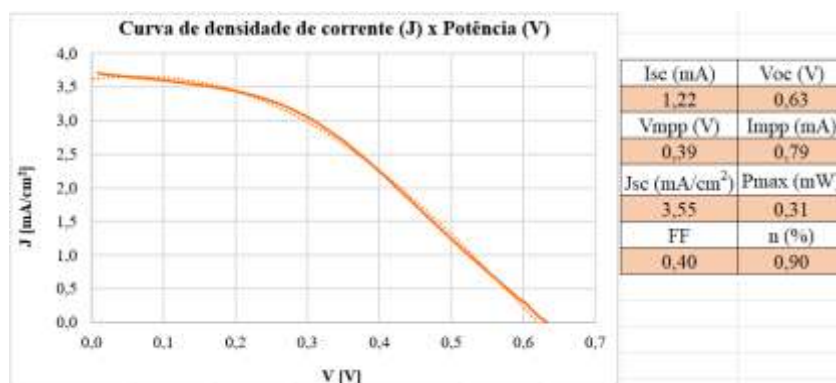


Figura 15 - Medida de uma DSSC com extrato de Rutênio, área ativa de 0,25 cm² e deposição com 1 fita.

O extrato de amora foi o que obteve melhor resultado depois do Rutênio. Já a Pitaya não foi possível ser medida, pois no extrato da polpa havia muita água e elementos que não tinham afinidade com o TiO₂, o que gerou dificuldade de o pigmento ser absorvido pelo filme semicondutor. Assim corrobora com os artigos consultados, pois neles o corante de Pitaya é extraído de sua casca e não da polpa.

Conclusão

Os corantes naturais foram empregados nas células solares devido à sua fácil preparação e baixo custo, em que se tornaram uma alternativa eficaz aos corantes de Rutênio, cuja síntese e purificação são complexas, proporcionando altos custos. Porém houve um maior cuidado pois estes degradam facilmente e apresentam um grande efeito em sua mudança de pH, algo que pode ser assunto em estudos futuros.

As células solares foram confeccionadas com sucesso e o objetivo principal de acionar o pequeno motor foi alcançado, porém somente com o corante de Rutênio, pois os corantes naturais, embora terem funcionado com sucesso e serem uma alternativa de menor custo, não são eficientes o suficiente para acionar o motor, portanto necessitam de um maior número de células para o mesmo efeito.

Referência Bibliográficas

- [1] PORTAL SOLAR. Matriz energética brasileira e matriz elétrica brasileira. Portal Solar. [Matriz elétrica e matriz energética: o que é suas diferenças | Portal Solar](#)
- [2] HIRATA, M. K. Desenvolvimento e caracterização de módulo solar de células de TiO_2 /corante com eletrólito gel. 2015.
- [3] SONAI, G. G.; JÚNIOR, M. A. M.; NUNES, J. H. B.; JÚNIOR, J. D. M.; NOGUEIRA, A. F. Células Solares Sensibilizadas por Corantes Naturais: um experimento introdutório sobre energia renovável para alunos de graduação. Quim. Nova, Vol. 38, No. 10, 1357-1365. 2015. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20150148>
- [4] NAZEERUDDIN, M. K.; KAY, A.; HUMPBRY-BAKER, R.; MILLER, E.; LISKA, P.; VLACHOPOULOS, N.; GRÄTZEL, M. Conversion of Light to Electricity by cis-XzBis(2,2'-bipyridyl 4,4'-dicarboxylate)ruthenium(II) Charge-Transfer Sensitizers (X = Cl-, Br-, I-, CN-, and SCN-) on Nanocrystalline TiO_2 Electrodes, J. Am. Chem. Soc. 115, 6382-6390. 1993.
- [5] GRÄTZEL, M.; O'REGAN, B. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films. Nature; Oct 24, 1991; 353, 6346; Research Library pg. 737. 1991.
- [6] MARÇO, P. H.; POPPI, R. J.; SCARMINIO, I. S. Procedimentos Analíticos Para Identificação De Antocianinas Presentes Em Extratos Naturais. Quim. Nova, Vol. 31, No. 5, 1218-1223. 2008.
- [7] CALOGERO, G.; YUM, J.; SINOPOLI, A.; MARCO, G. D.; GRÄTZEL, M.; NAZEERUDDIN, M. K. Anthocyanins and betalains as light-harvesting pigments for dye-sensitized solar cells. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.02.018>
- [8] GIUSTI, M. M.; WROLSTAD, E. R. Current Protocols in Food Analytical Chemistry. F1.2.1-F1.2.13 Copyright © by John Wiley & Sons, Inc. 2001.
- [9] MEJICA, G. F. C.; UNPAPROM, Y.; BALAKRISHNAN, D.; DUSSADEE, N.; BUOCHAREON, S.; RAMARAJ, R. Anthocyanin pigment-based dye-sensitized solar cells with improved pH-dependent photovoltaic Properties. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.101971>

-
- ^[10] OLADZADABBASABADI, N.; NAFCHI, A. M.; GHASEMLOU, M.; ARIFFIN, F.; SINGH, Z.; Al-Hassan, A. Natural anthocyanins: Sources, extraction, characterization, and suitability for smart packaging. 2022. <http://www.elsevier.com/locate/fpsl>