



## DESENVOLVIMENTO DE CÉLULA SOLAR SENSIBILIZADA COM CORANTE NATURAL DE PINHÃO-ROXO (*Jatropha gossypifolia* L.) COM APLICAÇÃO DE ELETRÓLITO GEL POLIMÉRICO À BASE DE XANTANA

Alice Silva Lima de Almeida<sup>1\*</sup>  
Fernanda Yuri Muta<sup>1\*</sup>  
João Guilherme Sousa Matos<sup>1\*</sup>  
Milene Feitosa de Araujo Martins<sup>1\*</sup>  
Sabrina Santana Klabacher<sup>1\*</sup>  
Prof.<sup>a</sup> Dra. Patrícia A. Santos

### RESUMO

Células solares sensibilizadas por corante são parte precípua no estudo de fotovoltaicos devido a sua produção de reduzido custo, baixo impacto ambiental e alta eficiência em relação às células inorgânicas utilizadas à base de silício. Logo, o presente projeto visa desenvolver células solares sensibilizadas pelo corante natural de pinhão-roxo (*Jatropha gossypifolia* L.) com aplicação de eletrólito gel polimérico à base de xantana, visando atenuar as problemáticas apresentadas pelas fontes energéticas tradicionalmente utilizadas. Assim, aplicou-se um corante natural de fácil obtenção e um eletrólito gel polimérico, permitindo uma maior vida útil. As células foram desenvolvidas a partir de 2 substratos de vidro contendo um filme fino condutor de SnO<sub>2</sub>:F, uma camada semicondutora de TiO<sub>2</sub>, um eletrólito gel à base de xantana e um contra eletrodo de grafite. Para aumentar a eficiência energética, foi avaliada a sensibilização pela sinergia entre o corante de pinhão-roxo e o corante azul de metileno. Para efeito comparativo de dados, foram produzidos 3 lotes distintos de células. Deste modo, foram avaliados 2 principais parâmetros, ddp e resistividade dos vidros condutores, a fim de analisar a eficiência energética, verificando-se um aumento na condutividade das células pela sinergia entre corantes e comparando às medidas dos parâmetros obtidas com a literatura, comprovou-se os vidros condutores do terceiro lote como os mais promissores para a confecção das CSSCs. Posteriormente foi determinada a presença de antocianinas pela análise espectrofotométrica do corante de pinhão-roxo em meio ácido, confirmando o potencial de aplicação deste na camada semicondutora.

**Palavras-chave:** Energia renovável. Células solares. Pinhão-roxo.

### ABSTRACT

Dye-sensitized solar cells are a fundamental part of the photovoltaic study due to their low cost of manufacturing and low environmental impact compared to inorganic cells based on silicon. Therefore, this project aims to develop solar cells sensitized by the natural dye of purple pine nuts (*Jatropha gossypifolia* L.) with an application of polymeric gel electrolyte based on xanthan, aiming to alleviate the problems caused by traditionally used energy sources. Thus, an easily obtainable natural dye and a polymeric gel electrolyte were applied, allowing for longer shelf life. The cells were developed from 2 glass substrates

<sup>1</sup> Curso Técnico em Química – ETEC Irmã Agostina  
Av. Feliciano Correa s/n – Jardim Satélite – CEP 04815-240 – São Paulo – Brasil  
\* celulasolar.pinhaoroxo@gmail.com

Recebido em: XX/XX/2021

Apresentado à banca em: XX/XX/2021

containing a thin film conducting  $\text{SnO}_2\text{:F}$ , a semiconducting layer of  $\text{TiO}_2$ , a xanthan-based gel electrolyte, and a graphite counter electrode. To increase energy efficiency, sensitization was evaluated by the synergy between the purple pine and methylene blue dye. For data comparison purposes, 3 different batches of cells were obtained. Thus, two main parameters were taken, p.d. and resistivity of conductive glasses, to analyze energy efficiency, verifying an increase in cell conductivity due to the interaction between dyes and comparing the measurements of the parameters obtained with the literature. The conductive glass of the third batch as the most promising for the manufacture of DSSCs. Subsequently, the presence of anthocyanins was determined by spectrophotometric analysis in the purple pine-nut dye in an acidic medium, confirming the potential for application of this dye in the semiconductor layer.

**Keywords:** Renewable energy. Solar cells. Purple pine nuts.

## 1 INTRODUÇÃO

Diante da atual crise energética que assola o Brasil, é evidente a necessidade de diversificar a matriz energética, encontrando alternativas que reduzam os custos e aumentem o acesso a esse recurso. Nesse sentido, a energia solar tem sido tema de muitas manchetes nas mídias e meios de divulgação, por ser uma possibilidade que gera energia mais barata em comparação às usinas hidrelétricas, as quais representam 59,5% da produção energética atual do país, conforme apontado pela ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica).

Ademais, a economia financeira, estimada em 50% a 95% na tarifa de eletricidade pelo Portal Solar, não é a única vantagem prevista pela utilização dessa energia, posto que ela é limpa e renovável, configurando um baixo impacto ambiental em consonância com a demanda por sustentabilidade, principalmente quando comparada às demais modalidades de geração de energia poluentes.

Em virtude de tais benefícios e da alta taxa de insolação diária no Brasil entre 4500 e 6000  $\text{Wh/m}^2$  (DUAIK, 2018), as células solares sensibilizadas por corantes (CSSCs) ou células de Grätzel, dispositivos que transformam essa energia em elétrica, tornaram-se uma proposta relevante e viável para colaborar com a resolução das presentes problemáticas econômicas e ambientais.

### 1.1 Célula solar de Grätzel

As células solares foram citadas pela primeira vez por Skotheim (1977), entretanto foi com a pesquisa de O'regan e Grätzel (1991) que esse dispositivo adquiriu maior visibilidade. A célula solar nanocristalina sensibilizada por corante (CSNS) possui uma camada nanoporosa de  $\text{TiO}_2$  e um corante a base de um complexo de rutênio, o qual tem os elétrons excitados pela luz, para então serem injetados na banda de condução do  $\text{TiO}_2$  – sendo esse processo eletroquímico regenerativo, com parte da energia produzida perdida através da recombinação de cargas (CARVALHO, 2016).

Segundo a teoria do limite de Shockley-Queisser, a eficiência máxima a ser atingida pelas

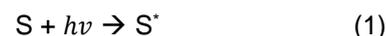
CSSCs seria de 20%, não sendo capazes de competir nesse quesito dentro do mercado fotovoltaico, destacando que o recorde mundial dentre as células é de 47,1%, por uma célula solar de seis junções III-V (GEISZ *et al.*, 2020). Contudo, outras vantagens podem ser apontadas, como alta estabilidade térmica, baixo custo de produção e deposição, grande flexibilidade e a ampla gama de arquiteturas possíveis, legitimando seu valor de pesquisa (CARVALHO, 2016).

Além disso, a substituição dos corantes sintéticos por corantes naturais ou a sinergia entre esses, possibilita minimizar os custos do processo ainda mais, sendo aplicável o extrato da espécie *Jatropha gossypifolia* (pinhão-roxo), anteriormente caracterizado por Oliveira *et al.* (2015) e apontado como um corante sensibilizador eficiente, juntamente com o azul de metileno, analisado por Reis (2017).

### 1.2 Mecanismo de funcionamento das células solares

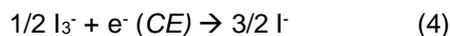
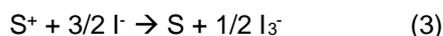
O funcionamento das células solares é baseado no efeito fotovoltaico, o qual ocorre em materiais de natureza semicondutora (AGNALDO *et al.*, 2006).

O processo em questão é iniciado quando a luz solar incide sobre o corante, excitando seus elétrons de valência a partir da transferência de energia  $h\nu$  pelos fótons (Equação 1). Os elétrons são, então, injetados na banda de condução do  $\text{TiO}_2$ , causando a oxidação do corante, como explicitado na Equação 2.



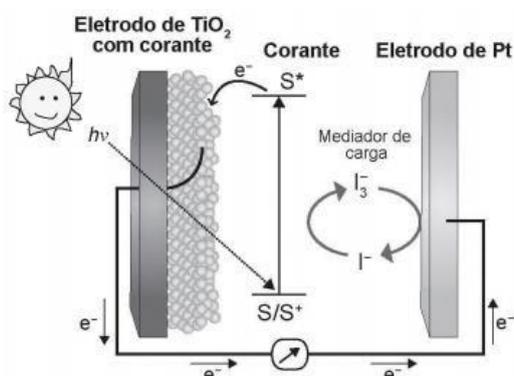
Em seguida, o corante oxidado é rapidamente regenerado pelos íons iodeto, a partir de uma reação de redução promovida pelas espécies químicas presentes no eletrólito – formado pelo par redox  $\text{I}^-/\text{I}_3^-$ . Com isso, ao regenerar o corante, o  $\text{I}^-$  é oxidado a  $\text{I}_3^-$  (Equação 3) (MAYRINCK *et al.*, 2017). Paralelamente, os elétrons que passam pelo circuito externo da célula,

ao liberarem energia, chegam ao contra eletrodo (CE) e são transferidos para o eletrólito, causando a redução da espécie  $I_3^-$  a  $I^-$ , conforme exposto pela Equação 4. Dessa forma, o processo se torna cíclico e possibilita um funcionamento contínuo das CSSCs (CARVALHO, 2016).



Todas as etapas supracitadas estão representadas na Figura 1.

Figura 1: Esquema do funcionamento de uma CSSC.



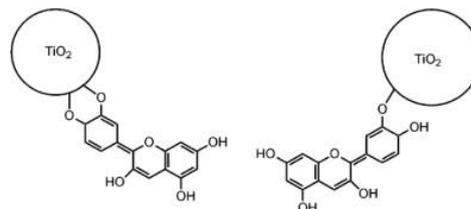
(FONTE: LONGO; PAOLI, 2003)

### 1.3 Pinhão-roxo

A espécie *Jatropha gossypifolia* é popularmente conhecida como pinhão-roxo devido a coloração de suas folhas. É destaque para utilização em ritos religiosos e em ornamentos, como cercas-vivas (SILVA, 1998). Está distribuída nas cinco regiões brasileiras devido a sua alta capacidade de adaptação, resistência a pragas e longos períodos de seca (VERONA, 2010).

O corante natural extraído do pinhão-roxo é rico em antocianinas, as quais apresentam um modo eficaz e barato para a conversão de energia solar em energia elétrica. A combinação da camada do semiconductor e do corante permite uma maior faixa de absorção passando pelo UV, infravermelho e, principalmente, visível. Isto se deve à interação da ligação das antocianinas à superfície do semiconductor, favorecendo a injeção de elétrons (FEITOSA, 2011).

Figura 2: Representação esquemática da ligação das antocianinas por efeito quelante e por condensação alcoólica, respectivamente, na superfície do semiconductor de  $TiO_2$ .



(FONTE: CARVALHO, 2016)

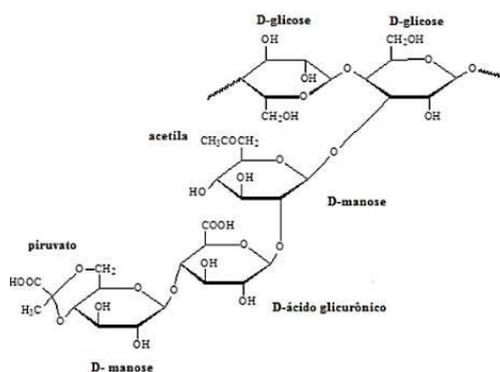
Desse modo, a aplicação do pigmento como corante sensibilizador proveniente do corante de pinhão-roxo é uma alternativa de substituição dos corantes sintéticos por apresentar menor valor agregado, além de ser uma opção livre de materiais tóxicos ao meio ambiente.

### 1.4 Xantana

A xantana é um biopolímero natural, produzido por bactérias fitopatogênicas do gênero *Xanthomonas* (DIAZ; VENDRUSCOLO, 2004). É um polissacarídeo comercializado industrialmente em larga escala, sendo principalmente utilizado na indústria alimentícia como emulsificante e espessante (SILVA; SCHMIDT, 2015).

A estrutura da xantana é composta por unidades repetidas de pentassacarídeos, formada por duas unidades de glicose, três unidades de manose e duas unidades de ácido glicurônico.

Figura 3: Estrutura química da xantana.



(FONTE: TAVARES, 2019)

Dentre as principais características da solução de xantana se destacam alta viscosidade em baixas concentrações, ausência de toxicidade e suas propriedades reológicas, que garantem seu uso como eletrólito – parte da célula responsável por regenerar o sistema e juntar os demais componentes – que, por ser em gel, evitaria

problemas de vazamento e perda de eficiência de conversão de energia (NERY *et al.*, 2018; TAVARES, 2019).

## 2 METODOLOGIA

Nesse item encontram-se descritos todos os materiais e procedimentos utilizados para a realização das análises.

### 2.1. Materiais

Os reagentes utilizados durante os procedimentos, seguidos de seus fornecedores, estão descritos a seguir: Ácido Clorídrico P.A. (Synth); Ácido Nítrico (Synth); Álcool isopropílico (ECIBRA); Azul de metileno (Autolabor); Cloreto de estanho(II) di-hidratado (Synth); Dióxido de titânio (Etecia – Embalagem própria); Etanol P.A. (Synth); Etilenoglicol (Synth); Fluoreto de amônio (CAAL); Goma xantana; Iodo (Merck); Iodeto de potássio (Synth); Ureia (Vetec).

Para a realização das etapas foram utilizados os seguintes equipamentos: Balança analítica modelo AG200, marca Gehaka®; Espectrofotômetro UV/Visível modelo NI-1600 UV, marca Nova Instruments®; Agitador magnético, marca IKA® Color Squid; pHmetro digital, modelo PG1800, marca Gehaka®; Forno mufla, marca Quimis®; Alicata Amperímetro 8559 (multímetro), marca Brasfort.

Para a realização dos procedimentos foram utilizados os seguintes materiais: Caixa de madeira (35 cm x 25 cm x 28 cm); Fita adesiva Scotch Magic Tape® (3M); Lâmpada de 7 W 65000K AC85-265V 50/60 Hz (ENT); Lápis 6B (Faber-Castell).

## 2.2. Métodos

### 2.2.1 Obtenção do corante de pinhão-roxo

#### 2.2.1.1 Cultivo do pinhão-roxo

As mudas foram transferidas da embalagem original para vasos plásticos utilizando terra vegetal, indicada para o plantio de mudas e plantas em geral, conforme descrito na embalagem do fornecedor.

O tratamento fitossanitário foi realizado utilizando inseticida em pó, baseado em lambda-cialotrina, com a finalidade de controle de pragas. O produto foi pulverizado em áreas propícias a pragas.

As plantas foram cultivadas em São Paulo (SP), onde, de acordo com a classificação climática de Köppen e Geiger, aplicada por Rolim *et al.* (2007), o clima é classificado como subtropical com

verão quente. As espécimes foram regadas, semanalmente, com uma quantidade aproximada de 500 mL de água em cada.

#### 2.2.1.2 Extração do corante do pinhão-roxo

O método utilizado foi determinado seguindo a metodologia descrita por Teixeira, Stringheta e Oliveira (2008) e adaptada a este trabalho.

As amostras foram previamente coletadas e feitas a separação manual das partes do caule, galhos e folhas da muda do pinhão-roxo. Em seguida, em uma balança analítica, pesou-se cerca de 18 g das folhas em um bquer de 250 mL. Triturou-se a amostra com auxílio do pistilo e almofariz e adicionou-se 70 mL do solvente extrator, etanol P.A, e 30 mL de água destilada. Os reagentes foram adicionados de 5 em 5 mL com maceração constante.

A solução permaneceu durante 15 dias a temperatura de 5 °C em recipiente coberto ao abrigo da luz. Após esse período, o extrato foi submetido a filtração simples e depositado em um bquer de 250 mL. Posterior a essa última etapa, o meio foi acidificado com HCl 0,1% a fim de ajustar o pH para 2. Desse modo, há uma estabilidade maior das antocianinas presentes no corante.

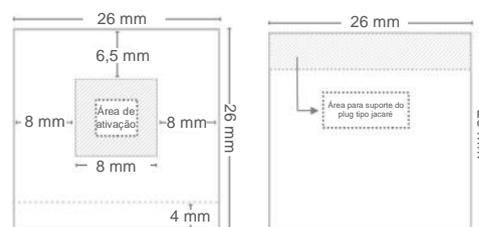
#### 2.2.1.3 Determinação do comprimento de onda de máxima absorção

Para a obtenção do espectro de absorção molecular do pinhão-roxo foi utilizada a diluição do corante em etanol a 95% HCl 1,5 M (85:15). Desse modo, 2 mL do corante foram diluídos com 6,8 mL de etanol e 1,2 mL de HCl 1,5 M. Em seguida, as leituras foram realizadas em cubetas de poliestireno com 1 cm de caminho óptico.

### 2.2.2 Construção da célula solar

Desenvolveu-se, ao todo, nove células solares, as quais foram divididas em três lotes que continham, respectivamente, 2, 4 e 3 dispositivos. Esses foram feitos a partir de substratos de vidro com dimensões 26 mm x 26 mm, 1 mm de espessura e com área de ativação de 1 cm<sup>2</sup> (Figura 4).

Figura 4: Esquemática dos eletrodo e do contra eletrodo, respectivamente, das CSSCs produzidas.



(FONTE: Do próprio autor, 2021)

Ademais, destaca-se que, durante todas as etapas, utilizou-se pinças metálicas para o manuseio dos vidros, uma vez que o contato manual poderia transferir gorduras e outras impurezas para a superfície.

### 2.2.2.1 Limpeza dos substratos de vidro

A limpeza dos substratos de vidro, realizada antes do processo de preparo do vidro condutor, teve como base a metodologia descrita por Pirovani (2017) e adaptada a este trabalho.

Em um béquer de 100 mL, os substratos de vidro foram mergulhados individualmente, com o auxílio de uma pinça metálica, em uma solução de detergente neutro. Em seguida, os vidros foram lavados com água destilada com o auxílio de uma pisseta e imersos em 200 mL de água destilada fervente, onde foram deixados por 30 minutos. Posto isso, retirou-se os substratos do sistema e, após resfriados, foram lavados com álcool isopropílico. Após a secagem ao ar, foram envoltos por filme PVC e armazenados ao abrigo da luz.

### 2.2.2.2 Preparo do vidro condutor de óxido de estanho dopado com Flúor (FTO)

Para preparar o vidro condutor de FTO, tomou-se como base as metodologias descritas por Lima (2013) e Queiroz (2015), adaptadas a este trabalho.

Primeiramente, preparou-se a solução precursora. Para tanto, pesou-se, em um béquer de 50 mL, 10 g de  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Adicionou-se 25 mL de HCl P.A. ao sal, formando uma solução de  $1,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , e a mistura foi submetida à agitação magnética por 25 minutos a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Paralelamente, preparou-se a solução do material dopante  $\text{NH}_4\text{F}$  ( $1,78 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ). Para tanto, pesou-se  $1,65 \text{ g}$  do sal, dissolvendo-o, em seguida, em  $25 \text{ mL}$  de água destilada até que se obtivesse um líquido transparente. Por fim, verteu-se a solução de  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (à temperatura ambiente) à solução de  $\text{NH}_4\text{F}$ .

A solução precursora preparada foi, então, depositada nos substratos de vidro pelo método de spray-pirólise. Assim, aqueceu-se a mufla até  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  e adicionou-se um substrato de cerâmica que continha os vidros. O sistema foi deixado no interior do equipamento por 15 minutos a fim de estabelecer o equilíbrio térmico, sendo, após esse tempo, aquecido a  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ . Paralelamente, aqueceu-se a solução precursora em banho-maria a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Após a mufla atingir  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  (temperatura adequada de sinterização), o substrato de cerâmica contendo os vidros foi levado à capela de exaustão, onde foi aplicada a solução precursora por meio de um borrifador com bico de plástico de  $50 \text{ mL}$  a uma

distância de  $25 \text{ cm}$ . A deposição foi feita 4 vezes, com um intervalo de tempo de 3 segundos por aplicação. Após cada ciclo, os substratos de vidro eram conduzidos novamente à mufla a  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  por 2 minutos, a fim de restabelecer o equilíbrio térmico.

Com a repetição desse processo seis vezes, a mufla foi desligada e os substratos foram deixados em repouso em seu interior por 24 horas.

### 2.2.2.3 Caracterização do vidro condutor

Para a caracterização dos vidros condutores obtidos após o processo de sinterização, determinou-se um método para a obtenção da resistividade elétrica. Para tanto, utilizou-se como base a metodologia proposta por Esmeraldo (2013).

A caracterização foi realizada a partir de uma análise de medição da resistência elétrica do material, realizada com um multímetro digital em vários pontos da superfície do vidro condutor, a qual viabilizou a determinação da resistividade.

O valor da resistividade elétrica  $\rho$  foi obtido a partir da utilização da Segunda Lei de Ohm (Equação 5), onde  $R$  representa a resistência elétrica medida pelo multímetro,  $L$  o comprimento do vidro condutor,  $a$  a espessura e  $b$  a sua largura.

$$\rho = \frac{a \cdot b \cdot R}{L} \quad (5)$$

### 2.2.2.4 Preparo do fotoânodo de $\text{TiO}_2$

Para preparar o fotoânodo de  $\text{TiO}_2$ , tomou-se como base as metodologias descritas por Jasim, Al-Dallal e Hassan (2012) e por Laura (2017).

Após submeter os vidros condutores à limpeza individual em uma solução de água destilada e detergente, seguido da limpeza em água destilada, delimitou-se, com o auxílio da fita adesiva Scotch Magic Tape (3M®) de espessura  $50 \mu\text{m}$ , uma área de ativação de  $1 \text{ cm}^2$  para a deposição da pasta de  $\text{TiO}_2$ .

Posteriormente, preparou-se uma pasta de  $\text{TiO}_2$ . Para tanto, pesou-se  $3 \text{ g}$  de  $\text{TiO}_2$  em um béquer de  $50 \text{ mL}$  e transferiu-se a massa para um almofariz. Em seguida, adicionou-se  $4,5 \text{ mL}$  de  $\text{HNO}_3$   $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (pH 3-4) e foi realizada a maceração por cerca de 30 minutos. Para promover a obtenção de uma pasta livre de grânulos, adicionou-se, durante a maceração e aos poucos,  $4 \text{ mL}$  de água destilada. Depois, 1 gota de detergente neutro foi diluída em  $1 \text{ mL}$  de água destilada e adicionada ao almofariz, com o intuito de assegurar a uniformidade e a adesão do filme

após a deposição no substrato de vidro, haja vista o papel do detergente como tensoativo.

Após o preparo da pasta de  $\text{TiO}_2$ , realizou-se a deposição por meio do método *Doctor Blade*. Assim, uma quantidade suficiente da pasta foi transferida, com o auxílio de uma pipeta Pasteur, à área demarcada no vidro condutor e distribuída com um bastão de vidro até que se formasse uma camada fina e homogênea. Os vidros foram deixados em repouso por cerca de 5 minutos até que a camada de dióxido de titânio depositada secasse. Depois, retiraram-se, cuidadosamente, as fitas dos substratos, os quais, logo após, foram levados à mufla a  $450\text{ }^\circ\text{C}$  por 30 minutos em um substrato de cerâmica.

Decorrido o tempo indicado, os filmes finos sinterizados foram deixados no interior do equipamento por 24 horas, a fim de evitar possíveis choques térmicos.

### 2.2.2.5 Preparo do contra eletrodo de grafite

O método a ser utilizado para esta etapa está baseado na metodologia descrita por O'Regan e Grätzel (1991).

Depositou-se, com um lápis 6B, uma fina camada de grafite (carbono) sobre os substratos de vidro condutor que foram utilizados como contra eletrodos. Em seguida, utilizou-se uma fita adesiva para retirar o grafite em excesso da superfície dos substratos. Logo após, o sistema foi levado ao aquecimento na mufla a  $450\text{ }^\circ\text{C}$  por 30 minutos.

### 2.2.2.6 Preparo do eletrólito gel polimérico à base de xantana

O método utilizado para a preparação do eletrólito gel polimérico à base de xantana foi determinado seguindo as metodologias descritas por Abdulkarim *et al.* (2017), Lima (2013) e Tavares (2019), adaptada a este trabalho.

O preparo do eletrólito gel polimérico foi dividido em 3 etapas: na primeira, dissolveu-se 0,075 g de xantana em 5 mL de etilenoglicol, sob agitação magnética e aquecimento a  $60\text{ }^\circ\text{C}$  por aproximadamente 30 minutos, até a dissolução completa. Cessou-se o aquecimento e iniciou-se a segunda etapa, com a preparação da solução de  $\text{KI}$   $1\text{ mol.L}^{-1}$  e  $\text{I}_2$   $0,1\text{ mol.L}^{-1}$ . Primeiramente, adicionou-se 4,4149 g de  $\text{KI}$  e 0,6345 g de  $\text{I}_2$  em 25 mL de etilenoglicol, homogeneizando com agitador magnético (4 rpm, 20 minutos). Após o preparo das duas primeiras etapas, misturou-se as soluções, deixando-as sob agitação magnética por 4 horas. Depois, a solução foi armazenada em um frasco âmbar ao abrigo da luz durante 7 dias.

Posteriormente, iniciou-se o preparo da terceira parte, a fim de se ajustar a viscosidade do eletrólito, com a preparação da solução de 0,1532 g de xantana em 5 mL de etilenoglicol, seguido da homogeneização com agitador magnético e aquecimento (4 rpm, 30 minutos,  $60\text{ }^\circ\text{C}$ ). Por fim, cerca de 3,5 mL da solução preparada anteriormente foi adicionada, gota a gota, à solução de xantana, seguido de agitação até completa solubilização.

### 2.2.2.7 Sensibilização dos fotoânodos

A metodologia utilizada para a sensibilização do filme de  $\text{TiO}_2$  foi baseada e adaptada de acordo com as metodologias de Coutinho (2014) e Carvalho (2016).

- **Sensibilização com corante natural do pinhão-roxo (*Jatropha gossypifolia*)**

O fotoânodo foi colocado em um béquer. Posteriormente, adicionou-se a solução de corante de pinhão-roxo em quantidade suficiente para cobrir o filme de  $\text{TiO}_2$ . Assim, este foi retirado do sistema após aproximadamente 3 horas, seguido da lavagem com álcool etílico.

- **Sinergia entre os corantes de pinhão-roxo e azul de metileno**

Para a realização da sinergia entre os corantes, preparou-se, inicialmente, a solução do corante azul de metileno 0,64% (m/v). Assim, foi pesado 0,16 g de azul de metileno, que foi transferido para um béquer onde se adicionou 25,0 mL de água. A mistura foi levada ao agitador magnético até a formação de uma solução.

Para a sensibilização do filme de  $\text{TiO}_2$ , foi colocado, em um mesmo béquer, 25,0 mL da solução de corante de azul de metileno e 25,0 mL da solução corante de pinhão-roxo. A solubilização foi feita por meio de agitação, com auxílio de um bastão de vidro.

Por fim, o fotoânodo foi colocado em um béquer, onde se colocou a solução-mistura entre os corantes de pinhão-roxo e azul de metileno, em quantidade suficiente para cobrir o filme de  $\text{TiO}_2$ . Este foi retirado após 3 horas, lavando-o com água destilada a fim de remover possíveis partículas não adsorvidas.

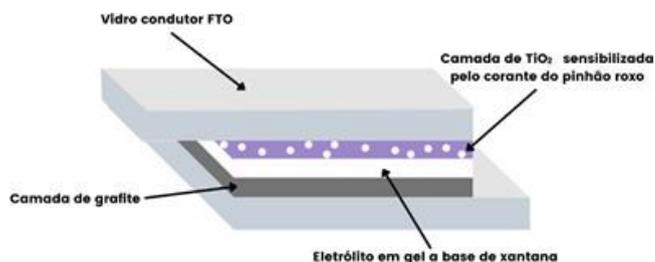
### 2.2.3 Montagem da célula solar

A selagem das CSSCs foi realizada pela junção da camada de  $\text{TiO}_2$  (ânodo) com a camada de grafite (cátodo), sendo o eletrólito em gel à base de xantana aplicado no meio delas, garantindo o processo de oxirredução da célula. Para efeito de

comparação foram montadas 5 células do modelo 1 (Figura 5) e 4 células do modelo 2 (Figura 6):

1. Célula sensibilizada pelo corante natural do pinhão-roxo

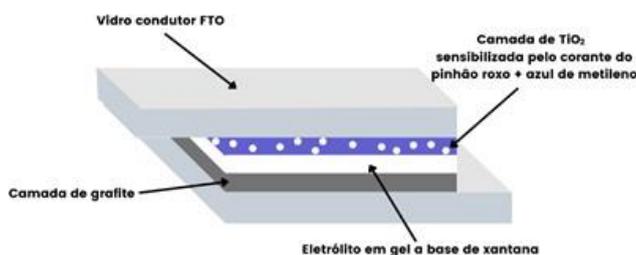
Figura 5: Montagem do modelo 1 da célula.



(FONTE: Do próprio autor, 2021)

2. Célula sensibilizada pela sinergia entre o corante do pinhão-roxo e azul de metileno.

Figura 6: Montagem do modelo 2 da célula.



(FONTE: Do próprio autor, 2021)

É necessário destacar que, conforme os esquemas, uma das extremidades de cada camada não deve estar em contato com a outra, estabelecendo os polos negativo e positivo do dispositivo.

Após a aplicação do eletrólito em gel com uma espátula de plástico, a célula foi selada utilizando prendedores de metal para papel (25 mm) fixos nas laterais, de modo a manter os componentes na configuração estipulada para evitar vazamento do eletrólito.

#### 2.2.4 Caracterização da célula solar

O dispositivo foi acoplado em uma caixa de madeira (35 cm x 25 cm x 28 cm) com dois orifícios: na parte de cima para passagem dos fios conectados ao bocal, no qual a lâmpada de 7W 65000K AC85-265V 50/60 Hz (ENT) foi rosqueada a aproximadamente 20,5 cm da célula, e na parte de baixo, permitindo que os fios do multímetro realizem o contato elétrico nas extremidades do vidro condutor.

Assim, foram realizados testes de caracterização, de acordo com as metodologias de Carvalho (2014) e Tavares (2019), para extrair e comparar a diferença de potencial (ddp) relacionada ao funcionamento dos dois modelos.

- Diferença de potencial (ddp)

Uma alta diferença de potencial ou tensão elétrica no dispositivo fotovoltaico indica um desempenho satisfatório, correspondente também a uma baixa variabilidade, a qual deve ser calculada pela média e desvio padrão dos ensaios realizados com o multímetro.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Cultivo do pinhão-roxo

Em um período de 30 dias foram constatados crescimentos de 2,0 cm e 1,5 cm nas mudas A e B (Figura 7), totalizando 14,0 e 16,0 cm, respectivamente. Não houve crescimento significativo no diâmetro do caule em nenhum dos espécimes.

Figura 7: Mudanças de pinhão-roxo cultivadas.



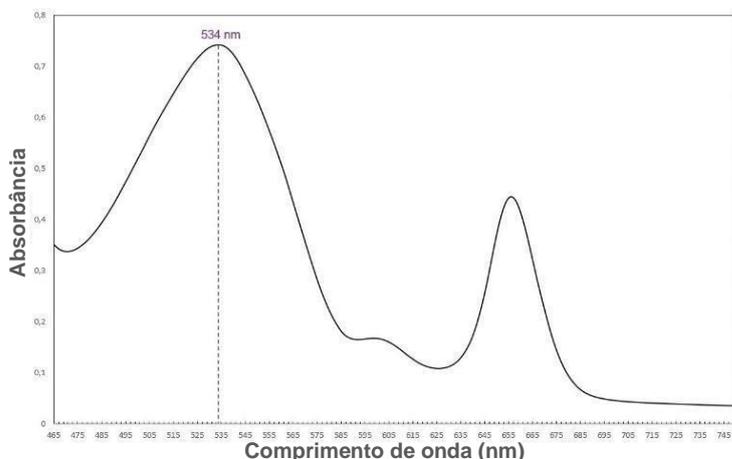
(FONTE: Do próprio autor, 2021)

#### 3.2 Determinação do comprimento de onda de máxima absorção do corante de pinhão-roxo

O UV-Visível permite avaliar se o corante de pinhão-roxo possui as características necessárias para a aplicação em células solares, como, por exemplo, ser classificado como sensibilizador na região visível do espectro eletromagnético a partir da presença de antocianinas.

De acordo com o Gráfico 1, pode-se analisar a máxima absorbância em 700 e 450 nm e formação do pico em 534 nm. Além disso, o espectro de corante de pinhão-roxo apresentou dois picos na região visível, o que o qualifica a ter uma maior eficiência de captação de luz solar.

**Gráfico 1: Espectro de absorção do corante de pinhão-roxo.**



(FONTE: Do próprio autor, 2021)

### 3.3 Caracterização dos vidros condutores

A partir dos dados obtidos por meio dos ensaios com o multímetro digital, foi possível realizar a comparação da resistência e da resistividade dos vidros condutores de FTO, analisando os lotes individualmente e executando um estudo conjunto entre eles. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 1, base para a discussão.

**Tabela 1: Valores de resistência e resistividade médias obtidos de cada lote, expressos por média  $\pm$  desvio padrão.**

	Lote 1	Lote 2	Lote 3
<b>Resistência (<math>\Omega</math>)</b>	$5,25 \cdot 10^3 \pm 1,07 \cdot 10^3$	$10,63 \cdot 10^6 \pm 8,1 \cdot 10^4$	$157,14 \pm 31,24$
<b>Resistividade (<math>\text{mm}^2 \cdot \Omega \cdot \text{m}^{-1}</math>)</b>	$5246,33 \cdot 10^3 \pm 1067,93 \cdot 10^3$	$10625,55 \cdot 10^6 \pm 81,07 \cdot 10^6$	$157138,89 \pm 31244,63$

(FONTE: Do próprio autor, 2021)

A fim de se comparar as medidas de dispersão obtidas em cada lote, foram calculados os coeficientes de variação (CV), conforme mostrado na Equação 6, onde  $\sigma$  representa o desvio padrão e  $\bar{x}$ , a média. Os valores obtidos estão descritos na Tabela 2.

$$cv = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100 \quad (6)$$

**Tabela 2: Coeficientes de variação relacionados aos valores de resistência e resistividade médias de cada lote.**

Coeficiente de variação (%)			
	Lote 1	Lote 2	Lote 3
<b>Resistência</b>	20,38	0,7620	19,880
<b>Resistividade</b>	20,35	0,7630	19,883

(FONTE: Do próprio autor, 2021)

Nesse parâmetro, o segundo grupo apresentou menor variabilidade, ou seja, menores valores de dispersão em comparação com o primeiro e terceiro lote, visto que ambos admitem resultados similares. Tais dados indicam que o lote 2 demonstra medidas mais reprodutíveis.

Contudo, conforme pontuado por Santos (2017), vidros condutores comerciais apresentam resistência elétrica entre 4 e 8  $\Omega$ , o que, em relação às medidas do parâmetro obtidas, caracteriza os vidros condutores do terceiro lote como os mais promissores para a confecção das CSSCs. Ainda assim, a grande discrepância entre as médias de cada lote, indicadas na Tabela 1, propiciou a discussão sobre os resultados divergentes.

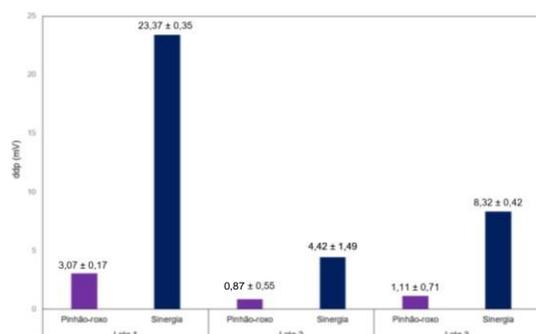
Assim, em vista do uso da mesma solução precursora para a deposição nos substratos de vidro, descarta-se as possibilidades relacionadas às diferenças advirem da preparação dessa solução, acentuando a probabilidade de a divergência nos dados ter ocorrido pela ineficiência da aplicação do spray manual, a qual pode não ter contemplado o vidro condutor de forma homogênea.

### 3.4 Ensaio das células solares sensibilizadas pelos corantes de pinhão-roxo e sinergia

Com os testes realizados nas células fotovoltaicas, foram obtidos dados de diferença de potencial elétrico (ddp) para as amostras de todos os 3 lotes.

A média de valores obtidos do 1º lote foi de  $3,075 \pm 0,1707$  mV para amostra com o corante de pinhão-roxo e  $23,37 \pm 0,35$  mV para a amostra com a sinergia entre corantes. Em relação ao 2º lote, os valores foram de  $0,867 \pm 0,55$  mV para as amostras com pinhão-roxo e  $4,425 \pm 1,49$  mV para a sinergia. Por fim, no 3º lote, obteve-se  $1,1125 \pm 0,71$  mV para as amostras com pinhão-roxo e  $8,325 \pm 0,4193$  para a sinergia. Os dados estão expressos como média  $\pm$  desvio-padrão e podem ser observados conforme exposto no Gráfico 2.

**Gráfico 2: Comparação das ddps dos lotes de CSSCs produzidos.**



(FONTE: Do próprio autor, 2021)

Os valores de tensão obtidos viabilizaram a comparação com outros modelos de CSSCs presentes na literatura. Dessa forma, comparou-se a eficiência das células solares produzidas em relação aos valores obtidos por Sonai *et al.* (2015) – no qual avaliou-se dispositivos sensibilizados por corantes de jabuticaba e mirtilo – e por Gonçalves (2017) – no qual avaliou-se dispositivos sensibilizados por corante de morango. Os resultados obtidos estão expressos na Tabela 3.

**Tabela 3: Eficiência das células solares produzidas em relação às CSSCs de jabuticaba, mirtilo e morango.**

CSSC	Tensão (mV)	Eficiência relativa (%)	
		Pinhão-roxo	Sinergia
Jabuticaba	510	0,34	2,36
Mirtilo	390	0,44	3,09
Morango	300	0,57	4,01

(FONTE: Do próprio autor, 2021)

Em relação à variação nos valores e o baixo rendimento relativo apresentados, esta pode ser explicada pelo uso da solução precursora, uma vez que foi usada a mesma solução em intervalos diferentes de tempo. Assim, os testes feitos em células do mesmo lote, em datas diferentes, apresentaram considerável variação.

Além disso, outras possíveis explicações para os baixos valores de ddp e rendimento obtidos são, também, o curto período de tempo realizado na etapa de sensibilização – podendo ter acarretado uma reação incompleta entre o corante e a superfície de  $\text{TiO}_2$  –, a homogeneidade da camada semicondutora e perdas por recombinação de cargas, fator limitante para a eficiência de CSSCs (AGNALDO *et al.*, 2006).

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises dos resultados obtidos, foi constatado que a construção de células fotovoltaicas sensibilizadas por corantes naturais, como o pinhão-roxo, é uma técnica viável.

No entanto, alguns fatores devem ser considerados para a avaliação do dispositivo. Nesse sentido, a homogeneidade do filme de  $\text{TiO}_2$  limitou a adsorção do corante de pinhão-roxo, o que possivelmente ocasionou uma menor interação ao semiconductor. Outra possível justificativa para o decréscimo de energia é o tempo de sensibilização das camadas de  $\text{TiO}_2$  com as antocianinas, o qual foi curto. Logo, esses aspectos reduziram o potencial de absorção de luz pelas células e consequentemente a energia gerada por estas.

Além disso, cabe destacar que o corante de pinhão-roxo demonstrou alta absorção na região do visível, o que o capacita a ser utilizado como corante sensibilizador em células fotovoltaicas. Desse modo, é necessário o aprimoramento dos outros componentes do dispositivo para a garantia de uma eficiência satisfatória. Assim, é necessário aumentar a quantidade de amostras de cada lote, bem como realizar mais testes a fim de garantir uma maior confiabilidade dos dados.

Outrossim, a utilização da sinergia entre os corantes de pinhão-roxo e azul de metileno obteve resultados satisfatórios, dado que houve um aumento da condutividade de corrente, maximização das características dos corantes precursores e melhora na eficiência energética.

Portanto, a partir das discussões apresentadas, compreende-se o papel econômico e ambiental das células sensibilizadas por corantes naturais, tendo em vista a crescente demanda energética mundial. Avalia-se, ainda, o potencial da ampla utilização desse dispositivo em virtude do custo acessível comparado às células convencionais. Assim, infere-se a capacidade desse projeto para o desenvolvimento sustentável.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos às professoras da disciplina de PDTCC, Dra. Aline Alves Ramos e Thais Taciano dos Santos, por todo o suporte, embasamento teórico e apoio incondicionais e imprescindíveis para a realização do trabalho.

Aos professores Dr. Fábio Rizzo de Aguiar e Alexandre Barros, pelo auxílio dado às adaptações da metodologia.

À orientação da professora Dra. Patrícia Araújo dos Santos e pelo auxílio em eventuais questões.

Ao corpo docente da Escola Técnica Estadual Irmã Agostina, pelo suporte prático e teórico ao longo do curso e pelas aulas cedidas para o desenvolvimento do trabalho.

Aos nossos familiares e amigos, pela ajuda direta ou indireta e pelo apoio aos componentes do grupo.

À Escola Técnica Estadual Irmã Agostina, por toda a infraestrutura concedida.

## REFERÊNCIAS

- ABDULKARIM, S.; ELBOHY, H.; ADHIKARI, N.; HASAN, M.N.; YUE, W.; QIAO, Q.. **Urea-Treated Electrolytes for Higher Efficiency Dye-Sensitized Solar Cells**. The Journal Of Physical Chemistry C, [S.L.], v. 121, n. 39, p. 21225-21230, 26 set. 2017. American Chemical Society (ACS).
- ABSOLAR. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. 2021. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 6 de jun. 2021.
- AGNALDO, J.S.; BASTOS, J.B.V.; CRESSONI, J.C.; VISWANATHAN, G.M.. **Células solares de TiO<sub>2</sub> sensibilizado por corante**. Revista Brasileira de Ensino de Física, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 77-84, 2006.
- CARVALHO, A.L.C.. **Metodologia para análise, caracterização e simulação de células fotovoltaicas**. 2014. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- CARVALHO, G.B.L.. **Corante natural de açaí em dispositivos fotovoltaicos**. 2016. 47 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- COUTINHO, N.F. **Células Solares Sensibilizadas por Corante**. 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.
- DIAZ, P.S.; VENDRUSCOLO, C.T.; VENDRUSCOLO, J.L.S. **Reologia de Xantana: uma revisão sobre a influência de eletrólitos na viscosidade de soluções aquosas de gomas xantana**. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 25, n.1, p.15-28, 2004.
- DUAIK, I.R. **Estudo sobre a viabilidade financeira da implementação de um sistema fotovoltaico em um hospital público**. 2018. 130 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- ESMERALDO, F.S. **Desenvolvimento de uma célula solar fotoeletroquímica utilizando a mesoporfirina como sensibilizador orgânico**. 2013. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- FEITOSA, A.V.. **Estudo de Novos Corantes Naturais Fotoexcitáveis Como Sensibilizadores em Células Solares**. 2011. Dissertação (Mestrado Acadêmico ou Profissional em 2011) - Universidade Estadual do Ceará, 2011.
- GEISZ, J.F.; FRANCE, R.M.; SCHULTE, K.L.; STEINER, M.A.; NORMAN, A.G.; GUTHREY, H.L.; YOUNG, M.R.; SONG, T.; MORIARTY, T.. **Six-junction III-V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration**. Nature Energy, v. 5, n. 4, p. 326-335, abr. 2020. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0598-5>. Acesso em: 1 de jun. 2021.
- GONÇALVES, G.I.. **Produção de células solares orgânicas como fonte de energia renovável**. 2017. 33 f. TCC (Graduação) – Curso de Química, Instituto Federal de Goiás, Inhumas, 2017.
- JASIM, K.E.; AL-DALLAL, S.; HASSAN, A.M.. **Henna (*Lawsonia inermis* L.) Dye-Sensitized Nanocrystalline Titania Solar Cell**. Journal Of Nanotechnology, [S.L.], v. 2012, p. 1-6, 2012.
- LAURA, G.A.. **Pasta de TiO<sub>2</sub> para uso em Células Solares Fotovoltaicas**. 2017. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.
- LIMA, J.C.. **Fabricação de filmes finos de SnO<sub>2</sub>:F por spray pirólise**. 2013. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.
- LONGO, C.; PAOLI, M.A.. **Dye-sensitized solar cells: a successful combination of materials**. Journal Of The Brazilian Chemical Society, [S.L.], v. 14, n. 6, dez. 2003.
- MAYRINCK, C.; ROCHA, L.A.; VITORETI, A.B.F.; VAZ, R.; TARTUCI, L.G.; FERRARI, J.L.; SCHIAVON, M.A.. **Célula Solar de Grätzel: Uma Proposta de Experimentação Interdisciplinar**. Revista Virtual de Química, [S.L.],

p. 717-728, 2017. Sociedade Brasileira de Química (SBQ).

NERY, T.B.R.; BRANDÃO, L.V.; ESPERIDIÃO, M.C.A.; DRUZIAN, J.I.. **Biossíntese de goma xantana a partir da fermentação de soro de leite: rendimento e viscosidade.** Química Nova, [S.L.], v. 31, n. 8, p. 1937-1941, 2008.

OLIVEIRA, M.A.C; BEZERRA, D.P.; MEDEIROS, A.J.D.. **CARACTERIZAÇÃO DE CORANTES NATURAIS PARA USO EM CÉLULAS SOLARES ORGÂNICAS.** Congresso Brasileiro de Química, [S. I.], 2015. 55 CBQ Goiás 2015. Disponível em: <http://www.abq.org.br/cbq/2015/trabalhos/5/8225-21586.html>. Acesso em: 07 maio. 2021.

O'REGAN, B.; GRÄTZEL, M.. **A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films.** 1991. 352 v. Chemistry, Institute Of Physical Chemistry, Swiss Federal Institute Of Technology, Lausanne, 1991.

PIROVANI, L.L.. **Preparação e caracterização de filmes finos de óxido de estanho dopados com flúor para aplicação como óxido condutor transparente.** 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2014.

PORTAL SOLAR. **Energia Solar gera economia de 50% e 95% na conta de luz.** 2017. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/energia-solar-gera-economia-de-50-e-95-na-conta-de-luz.html>. Acesso em: 21 de set. 2021.

QUEIROZ, J.C.A.. **Produção e análise do desempenho óptico e elétrico de filmes finos de SnO<sub>2</sub>:F (FTO) para aplicações fotovoltaicas.** 2015. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

REIS, G.A.. **Desenvolvimento e padronização de uma célula fotovoltaica de baixo custo sensibilizada por azul de metileno.** 2017. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário de Itajubá, Itajubá, 2017.

ROLIM, G.S.; CAMARGO, M.B.P.; LANIA, D.G.; MORAES, J.F.L.. **Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo.** Bragantia, [S.L.], v. 66, n. 4, p. 711-720, 2007.

SANTOS, J.C.M.. **Estudo da deposição de Estanho em vidro para aplicação como eletrodo em célula fotovoltaica de terceira geração.** 2017. 61 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

SILVA, G.S.; SCHMIDT, C.A.. **Prospecção Tecnológica da Produção de Goma Xantana ao Longo dos Anos.** Cadernos de Prospecção, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 92-101, 30 mar. 2015. Universidade Federal da Bahia.

SILVA, I.S. **Euphorbiaceae da Caatinga:** distribuição de espécies e potencial oleaginoso. 1998. 132p. Tese (Doutorado - Área de concentração em Botânica) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo. Acesso em: 19 maio 2021.

SKOTHEIM, T.A. **Dye-sensitized solar cells.** Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States), 1980.

SONAI, G.G.; MELO JUNIOR, M.A.; NUNES, J.H.B.; MEGIATTO JUNIOR, J.D.; NOGUEIRA, A.F.. **SOLAR CELLS SENSITIZED WITH NATURAL DYES:** an introductory experiment about solar energy for undergraduate students. Química Nova, [S.L.], 2015. GN1 Genesis Network.

TAVARES, F.C.. **Desenvolvimento de eletrólito gel polimérico à base de xantana para aplicação e célula solar sensibilizada por corante de estado quase sólido.** 2019. 94 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

TEIXEIRA, L.N.; STRINGHETA, P.C.; OLIVEIRA, F.A. de. **Comparação de métodos para quantificação de antocianinas.** Revista Ceres, Viçosa, v. 55, n. 4, p. 297-304, ago. 2008.

VERONA, R.L.C.. **Ácaros associados à *Jatropha spp.* (Euphorbiaceae) no Brasil.** 2010. 69 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, 2010.