



Corante antociânico de baixo custo da flor de faveira (*Parkia platycephala*) para DSSC livre de Pt

Low-cost anthocyanin dye from broad bean flower (*Parkia platycephala*) for Pt-free DSSC

E. C. da Silva^{1,2}; J. R. Viana³; R. M. M. Oliveira^{1,2*}

¹Coordenação de Ciência e Tecnologia/Laboratório de Química, Universidade Federal do Maranhão/Centro de Ciências de Balsas, 65800-000, Balsas-Maranhão, Brasil

²Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal do Maranhão/Campus Dom Delgado, 65080-805, São Luís-Maranhão, Brasil

³Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Maranhão/Campus Bom Jesus, 65915-240, Imperatriz-Maranhão, Brasil

*regina.oliveira@ufma.br

(Recebido em 23 de novembro de 2024; aceito em 04 de julho de 2025)

O crescente interesse por fontes de energia limpa e renovável impulsiona a pesquisa em tecnologias como as células solares sensibilizadas por corante (DSSCs, *Dye Sensitized Solar Cells*). Apesar do seu potencial, as DSSCs ainda enfrentam limitações relacionadas à eficiência e ao custo. Este trabalho investigou o potencial do extrato de antocianina da flor de faveira (*Parkia platycephala*) como sensibilizador em DSSCs. Antocianinas foram extraídas de diferentes partes da flor, sendo o extrato de grânulos (EAG) o mais rico em antocianinas (369,5 mg/100g). O EAG foi caracterizado por diversas técnicas, incluindo espectrometria de absorção atômica, que revelou a presença de metais como rubídio, cálcio e potássio. Um novo material, zinco-extrato antociânico (Zn-EAG), foi sintetizado a partir da reação do EAG com um sal de zinco. A análise espectroscópica e colorimétrica do Zn-EAG confirmou a quelação das antocianinas ao Zn(II). DSSCs foram fabricadas utilizando EAG e Zn-EAG como sensibilizadores, e sua performance fotovoltaica foi avaliada sob irradiação solar natural. Os resultados mostraram que a DSSC com Zn-EAG apresentou melhor desempenho, inclusive sob luz difusa, enquanto a DSSC com EAG apresentou queda de tensão em condições de sombra. A quelação das antocianinas ao Zn(II) no Zn-EAG favorece a transferência eletrônica, resultando em melhor performance da DSSC. Este estudo demonstra o potencial da *P. platycephala* como fonte de materiais para aplicação em DSSCs, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias de energia limpa e sustentável.

Palavras-chave: *Parkia platycephala*, antocianina, célula solar.

The growing interest in clean and renewable energy sources is driving research into technologies such as dye-sensitized solar cells (DSSCs). Despite their potential, DSSCs still face limitations related to efficiency and cost. This work investigated the potential of anthocyanin extract from broad bean flower (*Parkia platycephala*) as a sensitizer in DSSCs. Anthocyanins were extracted from different parts of the flower, with the granule extract (EAG) being the richest in anthocyanins (369.5 mg/100 g). The EAG was characterized by several techniques, including atomic absorption spectrometry, which revealed the presence of metals such as rubidium, calcium and potassium. A new material, zinc-anthocyanin extract (Zn-EAG), was synthesized from the reaction of EAG with a zinc salt. Spectroscopic and colorimetric analysis of Zn-EAG confirmed the chelation of anthocyanins to Zn(II). DSSCs were fabricated using EAG and Zn-EAG as sensitizers, and their photovoltaic performance was evaluated under natural solar irradiation. The results showed that DSSC with Zn-EAG presented better performance, even under diffuse light, while DSSC with EAG presented voltage drop under shade conditions. The chelation of anthocyanins to Zn(II) in Zn-EAG favors electron transfer, resulting in better DSSC performance. This study demonstrates the potential of *P. platycephala* as a source of materials for application in DSSCs, contributing to the development of clean and sustainable energy technologies.

Keywords: *Parkia platycephala*, anthocyanin, solar cell.

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica, fundamental para a realização de atividades básicas na vida moderna [1], consolidou-se como um pilar essencial para o funcionamento da sociedade contemporânea [2]. A partir dessa constatação, torna-se evidente a importância da produção e distribuição de

energia elétrica para a população, assegurando o acesso a um recurso vital para o bem-estar social e o desenvolvimento socioeconômico [3]. A economia atual depende fortemente das flutuações nos preços dos combustíveis fósseis, cuja combustão representa cerca de 32,8 bilhões de toneladas de dióxido de carbono emitidos por ano globalmente [4]. A natureza finita dos recursos fósseis e seu uso intensivo geram preocupações ambientais, motivando a busca por alternativas energéticas limpas e renováveis.

Como forma de aproveitamento da energia solar, as células fotovoltaicas baseadas em silício, com eficiência de cerca de 30 %, são disponíveis no mercado, mas os custos de fabricação aumentam o preço das placas solares [5]. Como alternativa, as DSSCs, que já alcançam 14,3% de eficiência, se beneficiam de poderem ser produzidas em uma variedade de cores e terem melhor desempenho em condições de baixa luminosidade [6]. No entanto, as DSSCs clássicas possuem complexos de rutênio como sensibilizador [7, 8], como o corante N719 considerado referência [8]. Porém, a toxicidade, a escassez do rutênio na natureza, a durabilidade reduzida, o alto custo de síntese e etapas de purificação demoradas, preocupam e dificultam a comercialização [9]. As propriedades eletrônicas do corante na região visível tem papel importante no desempenho de uma DSSC [8, 10].

As antocianinas são corantes encontrados nas folhas, raízes e flores de diversos vegetais, absorvem luz na região visível do espectro em comprimentos de onda entre 450 e 580 nm [11] e a biossíntese está associada à proteção contra danos fotoinibitórios [12]. Estas características indicam a possibilidade de uso de antocianinas como sensibilizador em DSSC. Dentre as plantas que apresentam flores com pigmentação avermelhada existe a faveira (*Parkia platycephala*), árvore nativa do Brasil, distribuída no nordeste em áreas de transição entre Cerrado e Mata Atlântica para a Caatinga. A sua variabilidade genética favorece a sua conservação e manejo florestal [13].

Dada a inexistência de estudos prévios sobre a utilização de extratos da flor de *P. platycephala* como sensibilizadores em DSSCs, esta pesquisa propõe uma abordagem inovadora para o desenvolvimento de células solares mais sustentáveis. O estudo se concentra na preparação e caracterização de DSSCs utilizando antocianinas extraídas dessa flor, além de investigar a interação dessas antocianinas com zinco e o impacto nas propriedades fotovoltaicas das células. A pesquisa se alinha com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especificamente o ODS 7 (Energia Acessível e Limpa), ao buscar alternativas sustentáveis para a produção de energia. A utilização de extratos naturais como sensibilizadores em DSSCs representa um avanço em direção a tecnologias energéticas mais limpas, com menor impacto ambiental e alinhadas com os princípios da economia circular.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Universidade Federal do Maranhão (UFMA) / Centro de Ciências de Balsas (CCBL), no laboratório de química. A pesquisa é do tipo experimental, seguindo um planejamento rigoroso [14].

2.1 Coleta das amostras

Flores de *P. platycephala* (Benth) foram colhidas em 07 de junho de 2022 na UFMA, em Balsas, Maranhão/Brasil, mesorregião do cerrado maranhense. A Figura 1 mostra etapas de coleta e segregação das flores.



Figura 1: Imagens referentes às etapas de coleta e segregação da flor de *Parkia platycephala*.

Depois de colhidas as flores foram levadas para o laboratório de Química, separadas em folículos e grânulos e cada uma das partes foi lavada com solução de hipoclorito diluída, seca em estufa à 37 °C por 24 horas e armazenada. Ressalta-se que este trabalho conta com o Cadastro nº A691963 no Sistema Nacional de Gestão do Patrimônio Genético e do Conhecimento Tradicional Associado (SisGen) para estudo desta espécie.

2.2 Extração de antocianina

A extração foi realizada conforme o método de Lees e Francis (1972) [15]. Em seguida, as amostras foram filtradas em funil de vidro sinterizado nº 1, e os resíduos lavados com a solução extratora até a completa remoção dos pigmentos. Os filtrados foram coletados em balões volumétricos de 25 mL, os quais foram aferidos com a solução extratora. Parte do extrato foi transferido para frascos âmbar e armazenado a -4 °C até o momento das análises e outra parte foi seca em dessecador em ambiente escuro.

2.3 Determinação do teor de antocianinas

A determinação de antocianinas foi realizada em triplicata a partir de leituras de absorbância do filtrado a 535 nm em um espectrofotômetro modelo UV-5100S. No cálculo considerou-se o fator de diluição e o coeficiente de extinção do 3-galactosídeo de cianeto (98,2) de acordo com a metodologia de Lees e Francis (1972) [15], com modificações de Fuleki e Francis (1968) [16], conforme a Equação 1:

$$\text{Antocianinas totais (mg cianidina g}^{-1}\text{)} = (A \times F) / 98,2 \quad (1)$$

Onde: A é a absorbância e F é o fator de diluição.

2.4 Preparação do produto Zn-EGA

Em um balão contendo 2,5 mL de EAG adicionou-se 5 mL da solução metanólica de acetato de zinco. O sistema permaneceu sob agitação por 10 min à temperatura ambiente (TA). O precipitado azul foi filtrado à vácuo em funil sintetizado e lavado metanol gelado, seco e armazenado no escuro.

2.5 Caracterização das amostras

Na determinação de metais em EAG utilizou-se um Espectrofotômetro de Fluorescência Atômica (da Brooks Rand, modelo III) da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão, calibrado com soluções padrão. As amostras foram digeridas em ácido nítrico e

diluídas com água deionizada e as análises feitas em triplicata. As curvas TG/DTG-DTA foram realizadas simultaneamente em um analisador térmico da Shimadzu Instruments, modelo DTA-60, utilizando 5,00 mg da amostra em cadinho de platina, e como referência um cadinho vazio de mesma composição. A análise foi realizada em atmosfera de gás nitrogênio com vazão de 100 mL/min, razão de aquecimento de 10 °C/min e temperatura de 27 a 800 °C. Os espectros FTIR das amostras sólidas diluídas em brometo de potássio na proporção 1/100 (amostra/KBr) foram obtidos sob vácuo, utilizando o espectrofotômetro FT-IR Vertex 70V da Bruker, na faixa de 4000 e 200 cm^{-1} , no laboratório de Materiais da UFMA/Campus Bom Jesus. As análises colorimétricas foram realizadas em diferentes pHs (1,0; 4,5; 6,5; 9,0; 11,5), em que 10 μL das amostras foram adicionadas em 2,5 mL de tampões fosfato.

2.6 Montagem das células solares

Primeiramente, as lâminas de vidro transparente de 5 cm \times 4 cm funcionalizadas com ITO foram lavadas com água destilada e álcool 99,5% e secas em estufa. Para o preparo dos fotoanodos, pasta de TiO_2 nanocristalino foi depositada no lado condutor das lâminas, em uma área de 12 cm^2 , com o uso da técnica *doctor blading* [17], e colocadas em forno mufla a 280 °C por 10 min. Para a adsorção dos corantes, os filmes de TiO_2 sinterizados foram imersos, à TA, na solução extratora contendo 0,0325 mg/mL das amostras, cujos sistemas permaneceram fechados e no escuro por 10 min e, em seguida, lavados com etanol e secos em dessecador. Os contraeletrodos foram preparados com pasta de carbono depositada em lâminas de ITO em uma área de 12 cm^2 . O eletrólito contendo o par redox I_3^-/I^- foi preparado em água destilada contendo iodeto de potássio (KI) e iodo (I_2) nas concentrações de 100 e 50 g/L, respectivamente. Na montagem das DSSCs, os eletrodos foram colocados face-a-face, fixos com pregadores e 500 μL do eletrólito foram injetados com micropipeta. As medidas elétricas foram realizadas com a exposição da DSSC em ambiente solar natural, os dados de fotovoltagem obtidos com multímetros (TEC POWER, TP4000ZC).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Determinação do teor de antocianinas totais

Os teores de antocianinas foram de 162,3 e 369,5 mg/100g de matéria seca de EAF e EAG, respectivamente, apresentando maior teor nos grânulos da flor. O pH de aproximadamente 1,0 da solução extratora garante maior estabilidade dos pigmentos extraídos [15]. Quanto à faixa de absorção no visível, para os extratos foi de 480 a 620 nm (Figura 2a), com comprimento de onda máximo em 546 nm.

Na Figura 2b observa-se a variação de perda de massa de EAG à medida que foi submetido a um aumento progressivo de temperatura. Na análise termogravimétrica (TG) foram registrados três eventos térmicos: o primeiro na faixa de 27 a 126 °C com perda de peso de 1,05%, correspondente à perda de água superficial e de possíveis substâncias voláteis que possam estar presentes. Após a desidratação de EAG, o segundo ocorre na faixa de 126 a 218 °C, referente à volatilização de moléculas mais fortemente ligadas, com perda de peso de 4,2%; e o terceiro, entre 218 e 490 °C, refere-se à decomposição dos componentes orgânicos livres presentes na amostra com perda de peso de 13,9%. Conforme a análise térmica diferencial (DTA), a temperatura máxima de mudança de fase ocorre em aproximadamente 350 °C. A curva de calorimetria exploratória diferencial (DSC) mostra três eventos endotérmicos entre 27 e 365 °C, com pico máximo em 266 °C, que podem estar associados a processos de liberação de água seguida de volatilização de material orgânico pouco volátil e posterior decomposição de material orgânico remanescente.

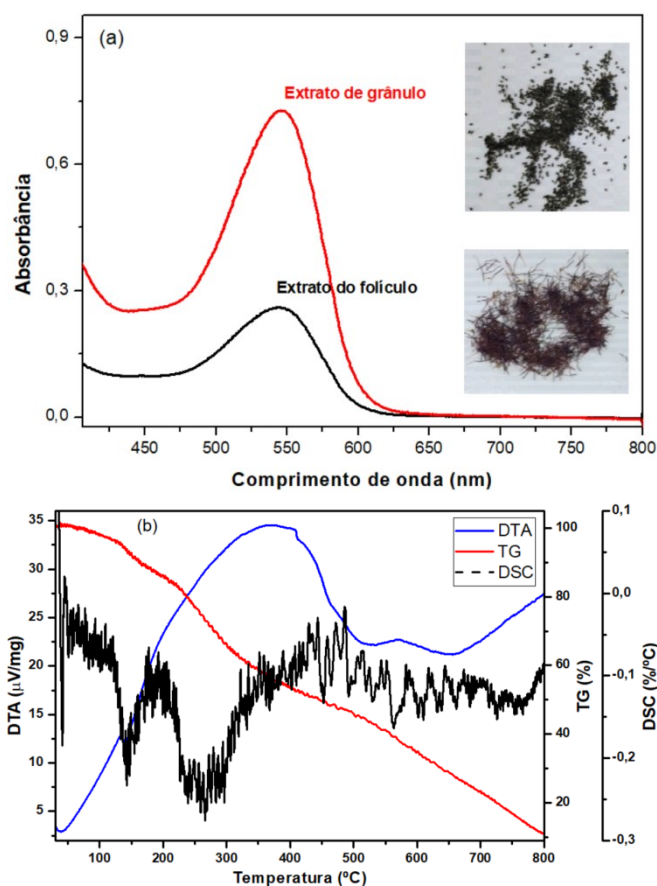


Figura 2: (a) Espectros no UV-Vis dos extratos em solução de etanol 95%/HCl 0,1 mol L⁻¹ (85/15, v/v), pH 1, à 25 ± 0,1 °C; (b) Curvas térmicas de EAG.

3.2 Teor de metais nos extratos

A flor de *P. platycephala* possui alta concentração de rubídio (Rb) em relação aos demais detectados, cálcio (Ca), potássio (K), mercúrio (Hg), sódio (Na), zinco (Zn), cobalto (Co), alumínio (Al), cobre (Cu) e manganês (Mn). Na Tabela 1 são apresentadas as concentrações de alguns metais encontrados nos extratos EAF e EAG de flores.

Tabela 1: Concentrações de metais nos extratos de flores de *Parkia platycephala*.

| Amostras | Elementos encontrados (concentração em mg/L) | | | | | | | | | | |
|----------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Rb | Ca | K | Mg | Hg | Na | Zn | Co | Al | Cu | Mn |
| EAF | 150 | 18,2 | 12,0 | 4,48 | 0,91 | 0,51 | 0,20 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |
| EAG | 130 | 20,0 | 13,0 | 4,81 | 0,93 | 0,54 | 0,25 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,03 |

Os micronutrientes Zn, Cu, Mn, Co e Na e os macronutrientes Ca, K e Mg são importantes para o metabolismo das plantas [18]. Com relação ao Rb, Padilha et al. (2021) [19] também relata a presença deste elemento na casca do cupuaçu. Segundo Cavalcanti et al. (2011) [20], a presença de metais nas antocianinas é associada à formação de complexos e ao fenômeno de copigmentação. Quanto ao mercúrio encontrado nos extratos, este metal não é considerado um elemento natural no desenvolvimento das plantas e pode, mesmo em concentrações reduzidas, ter efeitos deletérios no metabolismo vegetal [21]. Isto evidencia a necessidade de pesquisas sobre a origem e a dinâmica do mercúrio nesses ambientes e o impacto fisiológico na vegetação.

3.3 Espectros eletrônicos no UV-Vis

Na Figura 3a estão os espectros eletrônicos de Zn-EAG e EAG obtidos em solução extratora e, em ambos, são observadas bandas máximas em 546 nm, característica de antocianinas [15].

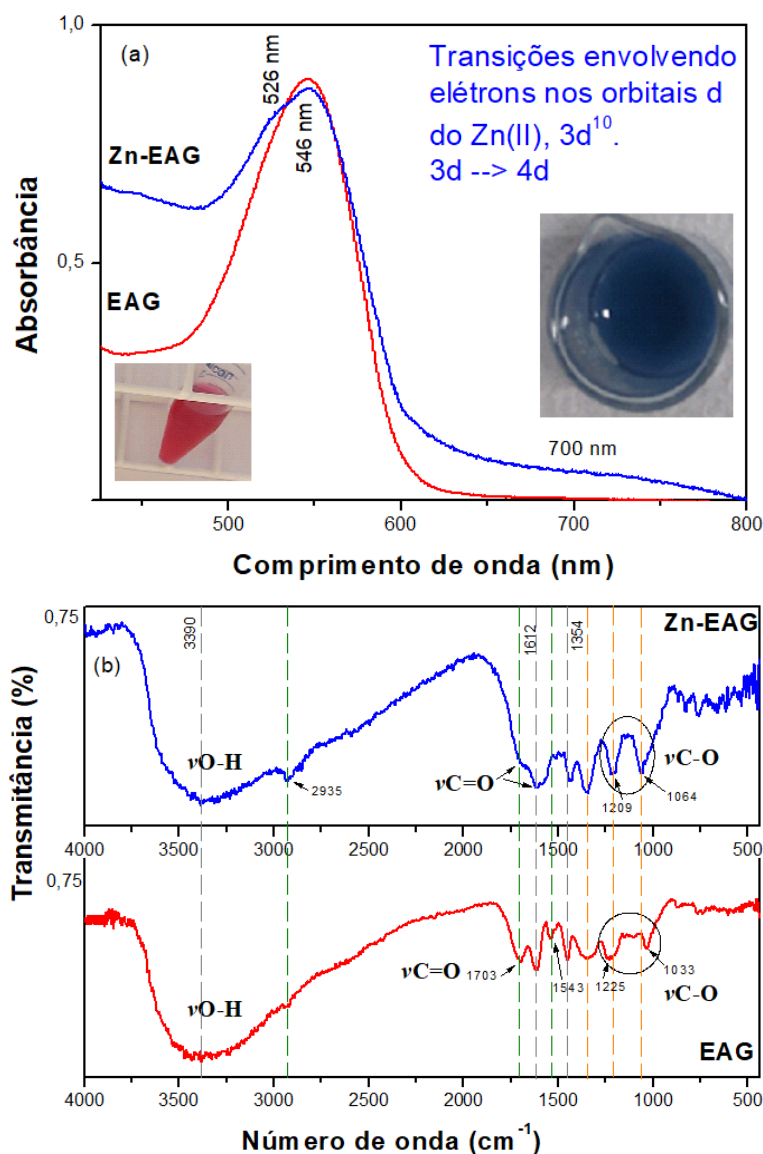


Figura 3: Espectros de EAG e Zn-EAG no: UV-Vis em solução de etanol 95%/HCl 0,1 mol L⁻¹ (85/15, v/v), pH 1, à 25 ± 0,1 °C (a); infravermelho de Zn-EAG, em pastilhas de KBr. (b).

No de Zn-EAG também há bandas em 526 e 700 nm, a qual é característica de transições envolvendo os elétrons dos orbitais d do íon metálico ao interagir com ligante, sendo de baixa intensidade. Sugere-se que a transição d-d envolve a promoção de elétrons dos orbitais 3d para níveis de energia mais altos (4d) do Zn(II), de configuração 3d¹⁰.

3.4 Espectros vibracionais no infravermelho

A fim de identificar os grupos funcionais presentes no produto Zn-EG, foi realizada a análise de infravermelho. Na Figura 3b são apresentados os espectros de EAG e de Zn-EAG. Nos

espectros são observadas algumas alterações, em que algumas bandas tiveram suas intensidades reduzidas ou foram deslocadas, algo esperado em razão das modificações no ambiente químico e estrutural das espécies devido a interação de moléculas do extrato com o centro metálico de zinco. No espectro de EAG as principais bandas observadas são: em 3391 cm^{-1} , larga e característica dos grupos hidroxila presentes nas moléculas; em 2932 cm^{-1} , referente ao estiramento assimétrico e simétrico dos grupos CH_2 ; em 1703 cm^{-1} , atribuído ao estiramento da ligação $\text{C}=\text{O}$ do anel aromático do benzopirano de antocianinas; em 1612 cm^{-1} , do estiramento das ligações $\text{C}-\text{C}$ dos anéis aromáticos; em 1543 cm^{-1} , corresponde à deformação axial da ligação $\text{C}=\text{C}$ dos anéis aromáticos; em 1354 cm^{-1} são atribuídas à deformação angular das ligações $\text{C}-\text{O}$ dos fenóis; em 1030 cm^{-1} é atribuído ao estiramento das ligações $\text{C}-\text{O}$ [22]. Apesar da similaridade do espectro de EAG com o de Zn-EAG , é possível observar que neste houve alteração nas intensidades de algumas bandas: diminuição em 1703 cm^{-1} ; aumento na faixa de 1354 a 1064 cm^{-1} ; supressão em 1543 cm^{-1} ; aumento/aparecimento na faixa de 800 a 520 cm^{-1} , característico da ligação de metal com oxigênio. Além disso, observa-se o deslocamento de 1030 cm^{-1} para 1065 cm^{-1} , para regiões de maior frequência, referente ao estiramento da $\nu(\text{C}-\text{O})$ fenólico, indicando o fortalecimento da ligação devido a ressonância induzida pela coordenação de moléculas ao Zn(II) [23].

3.5 Análise colorimétrica

As antocianinas absorvem luz em vários comprimentos de onda, dependendo do pH, e por isso exibem diferentes cores [24]. Segundo Sigurdson et al. (2017) [25], as tonalidades azuis das antocianinas ocorrem em ambientes químicos com pHs mais básicos. Também está relacionada à interação com íons metálicos bi e trivalentes, favorecendo a mudança de uma tonalidade avermelhada ou rósea para um azul intenso. Foi possível observar a mudança da tonalidade avermelhada de EAG (Figura 4a), para azul no meio reacional de formação de Zn-EAG (Figura 4b), indicando a quelação do Zn(II) à moléculas antociânicas presentes no extrato.

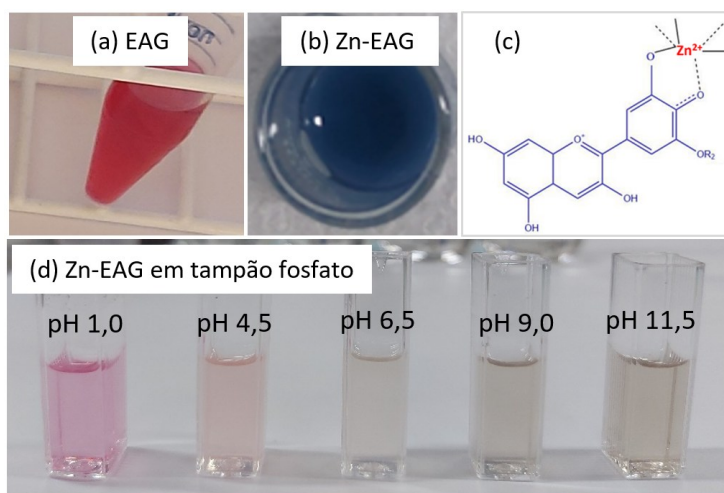


Figura 4: (a) EAG na solução extratora; (b) Zn-EAG no meio reacional; (c) Zn-EAG em tampão fosfato (pH 1 a 11,5); (d) estrutura genérica proposta para os quelatos antociânicos com Zn(II) , onde $\text{R}_2 = \text{H}$, OH , ou OCH_3 para cianidina, delphinidina e petunidina, respectivamente.

A quelação ocorre quando um ligante (molécula ou íon) forma múltiplas ligações coordenadas com um íon metálico por meio de pares de elétrons livres. Essas ligações formam um complexo de coordenação mais estável, muito comum em química de metais de transição [26]. Já a transferência eletrônica refere-se ao movimento de elétrons entre duas espécies

químicas, especialmente em reações de oxidação-redução, como as que ocorrem na cadeia respiratória mitocondrial ou em células solares.

Grupos funcionais presentes em corantes quelados influenciam diretamente suas propriedades fotoativas [27], pois afetam a intensidade e o comprimento de onda da luz absorvida, a eficiência da transferência de elétrons para o metal central e a estabilidade do complexo, determinando seu desempenho em processos como fotocatalise, fluorescência e geração de energia.

Segundo Yoshida et al. (2009) [28], a formação de complexos metálicos de antocianinas requer pelo menos dois grupos hidroxila presentes no anel benzeno das antocianinas, como no caso da cianidina, delphinidina e petunidina. Buchweitz et al. (2013) [29] relatam que os íons metálicos induzem à desprotonação do anel benzeno antociânico, favorecendo a transformação do cátion flavílio para a espécie base quinoidal azul. Assim, propõe-se a estrutura genérica dos possíveis quelatos formados no meio reacional do extrato antociânico do grânulo com Zn(II) mostrada na Figura 4c. Quanto à tonalidade apresentada por Zn-EAG em tampão fosfato no pH 1,0 (Figura 4d), é característica das antocianinas com carga positiva no anel interno, o que possibilita a absorção de luz na faixa de 460 a 550 nm [26]. Nos tampões com pHs 4,5 e 6,5 Zn-EAG apresenta tonalidades mais claras da cor róseo, Figura 9(c), um indicativo da gradual perda de carga positiva do anel interno. Esse é um fenômeno comum das antocianinas naturais em pH 5, em que não absorvem luz na faixa visível do espectro. Em pH 9,0 Zn-EAG apresenta coloração azul-escuro (típico de base quinoidal aniônica) e indo para pH 11,5 a tonalidade esverdeada se torna mais evidente, característico de chalconas. A estrutura ressonante é uma característica peculiar das antocianinas que possibilita as alterações de cor, tornando o produto Zn-EAG um indicador de pH.

3.6 Fotovoltagens das células solares

A tensão fotovoltaica é uma medida da diferença de potencial elétrico gerada quando a luz incide sobre a célula ou painel solar, sendo uma das principais características elétricas dos dispositivos fotovoltaicos. A Figura 5a mostra alguns materiais usados na elaboração das DSSCs. A Figura 5b apresenta os dados de tensão (mV) obtidos pelas DSSCs com fotoanodos puro (TiO_2) e sensibilizados com corantes (TiO_2/EAG e $\text{TiO}_2/\text{Zn-EAG}$), estes últimos expostos à irradiação solar natural simultaneamente. Ao analisar os dados verificou-se que a célula funcionalizada com Zn-EAG apresentou maior tensão elétrica a partir do tempo de exposição de 150 s, além de funcionar continuamente mesmo com luz difusa. Esta é uma característica relatada para várias células DSSC [30]. Além disso, a DSSC com EAG apresentou queda de tensão nos momentos de menor intensidade de irradiação (sombra). Estudos com extrato de mirtilo realizados por Martins et al. (2013) [31] mostram tensões significativamente menores ao longo do tempo, com valores que chegam a cerca de 9,0 mV aos 400 s.

Portanto, sugere-se que a possível quelação de antocianinas naturais presentes no extrato com o Zn(II) possibilita sua maior estabilidade e eficiência na conversão de energia solar em elétrica. Segundo Brennaman et al. (2016) [32], uma das características de um sensibilizador ideal é apresentar bandas de absorção na região de baixa energia (região do vermelho e infravermelho no espectro). Comparando os espectros eletrônicos de EAG (Figura 2a) e Zn-EAG (Figura 3a), este tem a vantagem de apresentar uma banda larga, mesmo que de baixa intensidade, em aproximadamente 700 nm, o que favorece a captação de fótons no processo fotovoltaico. Com base em caracterizações elétricas de DSSCs sensibilizadas com extrato de antocianinas de uvas (com absorção na faixa de 542 nm), Szostak et al. (2014) [33] verificaram que estas têm viabilidade para tal aplicação, devido à maior absorção de radiação e maior adsorção sobre o óxido semiconductor TiO_2 em comparação com o corante padrão comercial N719.

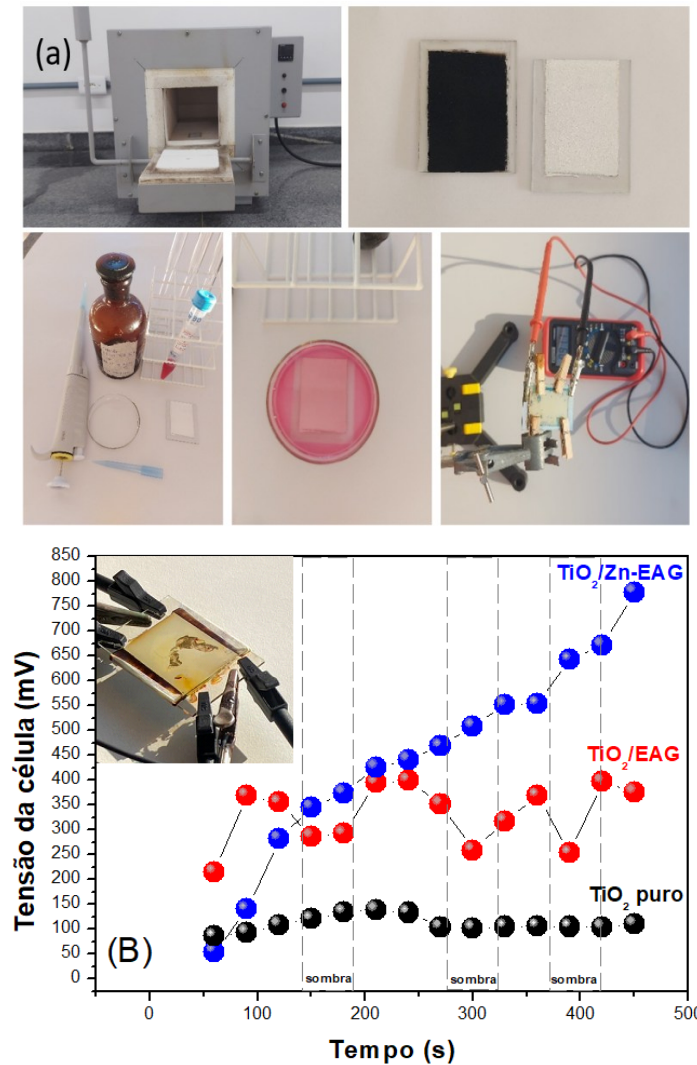


Figura 5: Materiais utilizados na elaboração das DSSCs (a); (b) gráficos de tensão vs. tempo.

Segundo os autores, N719 possui na região do visível apenas uma banda de absorção fraca e larga em 526 nm atribuída à transferência de carga metal ligante (MLCT) $4d-\pi^*$. Portanto, a melhor performance fotovoltaica apresentada por Zn-EAG pode estar relacionada à sua maior absorção na região visível do espectro eletromagnético em diferentes comprimentos de onda ($\lambda_{\text{máx}} = 526, 546$ e 700 nm) em comparação ao extrato de antocianinas de flor de *P. platycephala* não processado.

4. CONCLUSÃO

O método de extração utilizado para obtenção do extrato da flor de *P. platycephala* permitiu obter um material enriquecido em antocianinas, conforme observado nos espectros eletrônicos e vibracionais nas regiões do UV-Vis e infravermelho, respectivamente. Os folículos e os grânulos de flor de *P. platycephala* são ricos em pigmentos antocianínicos, contendo valores de 162,3 e 369,5 mg/100g de matéria seca, respectivamente. Os dados espectroscópicos sugerem a quelação de moléculas de antocianinas naturais com Zn(II) formando o produto Zn-EAG, assim como a observação colorimétrica indica o seu funcionamento como indicador de pH. As medidas de fotovoltagem permitiram observar que o produto Zn-EAG funciona continuamente mesmo com luz difusa, ao contrário de EAG, que apresenta queda de tensão nos momentos de

sombra. Um comparativo entre os dados de absorção na região visível do espectro do extrato de antocianinas naturais ($\lambda_{\text{máx}} = 546 \text{ nm}$), do corante padrão comercial N719 ($\lambda_{\text{máx}} = 526 \text{ nm}$) e de Zn-EAG ($\lambda_{\text{máx}} = 526, 546 \text{ e } 700 \text{ nm}$), com ampla faixa de absorção, permite sugerir a viabilidade de uso do produto obtido neste estudo como sensibilizador em dispositivo solar. Portanto, a performance em fotovoltagem apresentada por Zn-EAG é um indicativo de agregação de valor adicional dos subprodutos da *P. platycephala* para aplicação em DSSC.

5. AGRADECIMENTOS

À FAPEMA pelo apoio financeiro; ao PIBIC/UFMA pela bolsa concedida; ao prof. Dr. Jorge Diniz de Oliveira, pelas análises de Absorção Atômica; aos técnicos do Lab. de Química da UFMA/CCBL e à prof. Dra. Queli Cristina Fidelis, pelo apoio.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Franzolin CJ, Klingor BA, Brollo MEA. Pobreza energética do cidadão e sua vulnerabilidade diante de uma necessária transição energética. RDP. 2024;21(111):91-114. doi: 10.11117/rdp.v21i111.7936
2. Goldemberg J. Energia e desenvolvimento. Estud Av. 1998;12(33):7-15. doi: 10.1590/S0103-40141998000200002
3. Borges FQ, Vasconcelos MR. O papel do setor elétrico na redução da vulnerabilidade social. Res Soc Dev. 2022;11(6):e35911629327. doi: 10.33448/rsd-v11i6.29327
4. Alsarhan LM, Alayyar AS, Alqahtani NB, Khadry NH. Circular Carbon Economy (CCE): A way to invest CO₂ and protect the environment, a review. Sustainability. 2021;13(21):11625. doi: 10.3390/su132111625
5. Sun Z, Chen X, He Y, Li J, Wang J, Yan H, et al. Toward efficiency limits of crystalline silicon solar cells: Recent progress in high-efficiency silicon heterojunction solar cells. Adv Energy Mater. 2022;12(23):2200015. doi: 10.1002/aenm.202270094
6. Kokkonen M, Talebi P, Zhou J, Asgari S, Soomro AS, Elsehrawy F, et al. Advanced research trends in dye-sensitized solar cells. J Mater Chem A. 2021;9(17):10527. doi: 10.1039/d1ta00690h
7. Gratzel M. Dye-sensitized solar cells. J Photochem Photobiol C: Photochem Rev. 2003;4:145-53. doi: 10.1016/S1389-5567(03)00026-1
8. Hagfeldt A, Boschloo G, Sun L, Kloo L, Pettersson H. Dye-sensitized solar cells. Chem Rev. 2010;110(11):6595-663. doi: 10.1021/cr900356p
9. Błaszczuk A, Joachimiak-Lechman K, Sady S, Tański T, Szindler M, Drygała A. Environmental performance of dye-sensitized solar cells based on natural dyes. Energia solar. 2021;215:346-55. doi: 10.1016/j.solener.2020.12.040
10. de Jesus NC, de Abreu DLG, Viana JR, Oliveira RMM. Síntese, caracterização e aplicação como sensibilizador solar de um novo composto de coordenação de Cu(II) com ligantes 2,2'-bipiridina e antrarfina. Cuadernos de Educación y Desarrollo. 2025;17(3):01-20. doi: 10.55905/cuadv17n3-084
11. Kim AN, Lee KY, Jeong EJ, Cha SW, Kim BG, Kerr WL, et al. Effect of vacuum-grinding on the stability of anthocyanins, ascorbic acid, and oxidative enzyme activity of strawberry. LWT. 2021;136:110304. doi: 10.1016/j.lwt.2020.110304
12. Zhang KM, Yu HJ, Shi K, Zhou YH, Yu JQ, Xia XJ. Photoprotective roles of anthocyanins in *Begonia semperflorens*. Plant Sci. 2010;179(3):202-8. doi: 10.1016/j.plantsci.2010.05.006
13. Silva DYBO, Farias SGG, Araujo PCD, Sousa MB, Silva RB, Oliveira CVA. Variabilidade genética de populações de *Parkia platycephala*: subsídio para definir áreas de coleta de sementes. Rev Caatinga. 2022;35(4):905-14. doi: 10.1590/1983-21252022v35n418rc
14. Triviños ANS. Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação. São Paulo (SP): Atlas; 1987.
15. Lees DH, Francis FJ. Standardization of pigment analyses in cranberries. HortScience. 1972;7(1):83-4. doi: 10.21273/HORTSCI.7.1.83
16. Fuleki T, Francis FJ. Quantitative methods for anthocyanins. II. Determination of total anthocyanin and degradation index for cranberry juice. J Food Sci. 1968;33:78-83. doi: 10.1111/j.1365-2621.1968.tb00888.x

17. Deng Y, Peng E, Shao Y, Xiao Z, Dong Q, Huang J. Scalable fabrication of efficient organolead trihalide perovskite solar cells with doctor-bladed active layers. *Energy Environ Sci.* 2015;8(5):1544-50. doi: 10.1039/C4EE03907F
18. Menegaes JF, Stefanello R, Nunes UR. Sementes: foco em pesquisa sobre qualidade fisiológica e sanitária. vol. 2. Nova Xavantina (MT): Pantanal; 2024. Capítulo 2, Nutrição mineral de plantas e qualidade fisiológica de sementes: uma análise científica; p. 25-41. doi: 10.46420/9786585756280cap2
19. Padilha NA, Brigido TS, Cardozo CF, Fernandes LF, Oliveira AS, Mattos JCP. Identificação elementar de (cobre, zinco, ferro, rubídio) nos resíduos das cascas do cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) pelo método de fluorescência de raio X. *Sci Naturalis.* 2021;3(5):2315-21. doi: 10.29327/269504.3.5-24
20. Cavalcanti RN, Santos DT, Meireles MAA. Non-thermal stabilization mechanisms of anthocyanins in model and food systems-An overview. *Food Res Int.* 2011;44(2):499-509. doi: 10.1016/j.foodres.2010.12.007
21. Lasat MM. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms. *J Environ Qual.* 2002;31:109-20. doi: 10.2134/jeq2002.1090
22. Jeyaram S, Geethakrishnan T. Vibrational spectroscopic, linear and nonlinear optical characteristics of anthocyanin extracted from blueberry. *Results Opt.* 2020;1(100010):1-6. doi: 10.1016/j.rio.2020.100010
23. Oliveira RMM, Ferreira LC, Cardoso FMN. Zinc-natural product complex: development and application as a photosensitizer for solar cells. *Braz J Dev.* 2020;6(11):87828-42. doi: 10.34117/bjdv6n11-270
24. Qin C, Li Y, Niu W, Ding Y, Zhang R, Shang X, et al. Analysis and characterisation of anthocyanins in mulberry fruit. *Czech J Food Sci.* 2010;28(2):117-26. doi: 10.17221/228/2008-CJFS
25. Sigurdson GT, Robbins RJ, Collins TM, Giusti MM. Spectral and colorimetric characteristics of metal chelates of acylated cyanidin derivatives. *Food Chem.* 2017;221:1088-95. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.11.052
26. Wilkins RG. The study of kinetics and mechanism of reactions of transition metal complexes. Boston (US): Allyn and Bacon; 1974.
27. Kalyanasundaram K. Photochemistry of polypyridine and porphyrin complexes. San Diego (US): Academic Press; 1992.
28. Yoshida K, Mori M, Kondo T. Blue flower color development by anthocyanins: from chemical structure to cell physiology. *Nat Prod Rep.* 2009;26(7):84-915. doi: 10.1039/b800165k
29. Buchweitz M, Brauch J, Carle R, Kammerer DR. Application of ferric anthocyanin chelates as natural blue food colorants in polysaccharide and gelatin based gels. *Food Res Int.* 2013;51(1):274-82. doi: 10.1016/j.foodres.2012.11.030
30. Abdellatif SO, Josten S, Khalil SASG, Erni D, Marlow F. Transparency and diffused light efficiency of dye-sensitized solar cells: Tuning and a New Figure of Merit. *IEEE J Photovoltaics.* 2020;10(2):522-30. doi: 10.1109/JPHOTOV.2020.2965399
31. Martins AD., Silva NA, Braga CCS, Franco CC, Sales DA, Rezende GC, et al. Otimização de células fotovoltaicas orgânicas. *E-xacta.* 2013;(6):79-92.
32. Brennaman MK, Dillon RJ, Alibabaei L, Gish MK, Dares CJ, Ashford DL, et al. Finding the way to solar fuels with dye-sensitized photoelectrosynthesis cells. *J Am Chem Soc.* 2016;138(40):13085-102. doi: 10.1021/jacs.6b06466
33. Szostak R, Souza ECF, Antunes SEM, Borges CPF, Antunes AC, Andrade AVC. Células solares (dssc) sensibilizadas com antocianinas extraídas da casca de uvas "*Vitis labrusca*". *CBENS.* 2014;1:1-10. doi: 10.59627/cbens.2014.2126