



SENSIBILIZAÇÃO DO DIÓXIDO DE TITÂNIO COM NANOPARTÍCULAS DE CARBONO NITROGENADAS PARA ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DO EFEITO FOTOVOLTAICO

Gabriel B. Edinger¹; Tiago S. Luckmann¹; Sandro Marmitt¹; Marcelo L. Dellinghausen¹

1. *Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha*

22000413@liberato.com.br

Palavras-Chave: célula solar, nanomateriais, semicondutores

Introdução

Com os problemas ambientais causados pelo uso de combustíveis fósseis, que hoje em dia representam mais de 80% da fonte de energia mundial (PADDISON, L, 2024), fontes de energias alternativas se tornam cada vez mais relevantes e necessárias para uma boa manutenção do meio ambiente. Uma das tecnologias desenvolvidas para solucionar esse problema, nos últimos tempos, é a utilização de energia solar, onde fótons são convertidos a elétrons por meio do efeito fotovoltaico em células solares. Método altamente eficiente de geração de energia, sem a geração de gases poluentes tornando-se muito mais limpa em relação aos métodos mais tradicionais, sendo seu maior problema o alto custo de produção. Mesmo sendo mais ecologicamente viável, a energia solar acaba enfrentando um grande problema ambiental no final do seu processo, com o descarte do material, sendo em grande parte constituído de silício na grande maioria das placas solares utilizadas hoje em dia. O problema do fim da vida útil vem em grande parte do seu descarte inadequado por conta do alto custo de reciclagem, como cerca de 90% das placas comercializadas hoje em dia são de silício cristalino, necessitam de chumbo na solda e prata na trilha condutora, portanto o descarte do material na natureza acaba causando um grande problema ambiental pela contaminação do solo com os metais pesados constituintes das placas (CHOWDHURY, M. S. et al, 2020).

As placas solares que utilizam silício como principal material são chamadas de placas solares de primeira e segunda geração, sendo diferenciadas, em suma, pela diferença de espessura de silício na célula. Para tentar resolver o problema com o descarte e o custo de produção das placas, surgiu a terceira geração de placas solares que foca em utilizar tecnologias emergentes como a nanotecnologia para reduzir o custo por watt, utilizar-se de matérias primas de maior abundância e com menor impacto ambiental ao final. Dentre os os semicondutores mais utilizados nas placas de terceira geração está o TiO_2 , um óxido não tóxico fotoestável, além de ser um material de baixo custo e fácil obtenção. Porém, por possuir um band-gap largo, o que é algo considerado bom para um semicondutor, ele acaba não permitindo absorver luz além da faixa do ultravioleta (VITORETI, et al, 2017). Um outro nanomaterial com uma grande capacidade óptica são os pontos de carbonos (CDs), nanopartículas formadas majoritariamente por carbono que vêm sendo estudadas e aplicadas em diversas tecnologias dado sua biocompatibilidade, propriedades de absorção e emissão de luz. Apresentando grande potencial em aplicações como em luzes do tipo LED, em dispositivos fotovoltaicos ou também no campo da medicina. E devido às suas propriedades



de absorção de luz, vem sendo pesquisado e demonstra potencial em utilizar os pontos de quânticos de carbono para sensibilizar TiO_2 para potencializar absorção de luz para além da faixa do ultravioleta (MACHADO, et al, 2015).

Células de terceira geração sensibilizadas por materiais como os pontos quânticos de carbono, são conhecidas também como Células Solares Sensibilizadas por Corantes e apresentam uma boa funcionalidade, porém apresentam dois grandes problemas em seu uso. O primeiro é o uso de corantes extremamente caros e tóxicos, principalmente, à base de rutênio, e o segundo é a sua baixa eficiência de conversão energética, se limitando entre 7% a 10% em seus modelos comerciais. Com isso, o objetivo principal do trabalho é o de utilizar um corante mais acessível e biocompatível na célula, os pontos quânticos de carbono, para analisar se esse material consegue aumentar as propriedades de absorção de luz e assim, consequentemente, aumentar a sua conversão elétrica no final.

Material e Métodos

A síntese dos CDs foi realizada adicionando e misturando ácido cítrico, uréia e água deionizada em um béquer, levando à um forno microondas convencional. A evidência de formação dos CDs foi dada pela coloração marrom escura da solução junto de pequenos sólidos agrupados na mesma. Estes sólidos foram redispersos através de banho-ultrassônico aquecido. Após isso a dispersão foi filtrada a vácuo utilizando filtros de 28 μm , 0,6 μm e também com um filtro de seringa de 0,22 μm . Foi realizado um teste de excitação por incidência de luz negra genérica, verificando a propriedade de fluorescência destas nanopartículas, confirmando a sua síntese.

Após a síntese, os CDs foram caracterizados para analisar sua morfologia e propriedades através de Espectroscopia de Absorção na Região do Ultravioleta-Visível (UV-Vis) e Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier.

Para a confecção do filme, foi utilizado TiO_2 em pó (P.A.), submetido à peptização com solução de HNO_3 . Esse processo assegura a dispersão adequada das nanopartículas, gerando um filme com a morfologia e porosidade ideais para a ancoragem dos fotossensibilizadores. Após isso também foi adicionado álcool polivinílico para servir como agente porogênico e ligante orgânico, garantindo uma maior porosidade do filme e prevenindo possíveis rachaduras durante a posterior calcinação.

A pasta preparada foi depositada em uma placa de vidro FTO (Fluorine-doped Tin Oxide), utilizando um aplicador de tinta, com fenda de 50 μm e foi repousado por alguns minutos para o autonivelamento e aquecido em capela para liberação de gases nitrosos. O material foi então calcinado em forno mufla, assim garantindo a sinterização do filme na placa e a remoção de demais resíduos orgânicos.

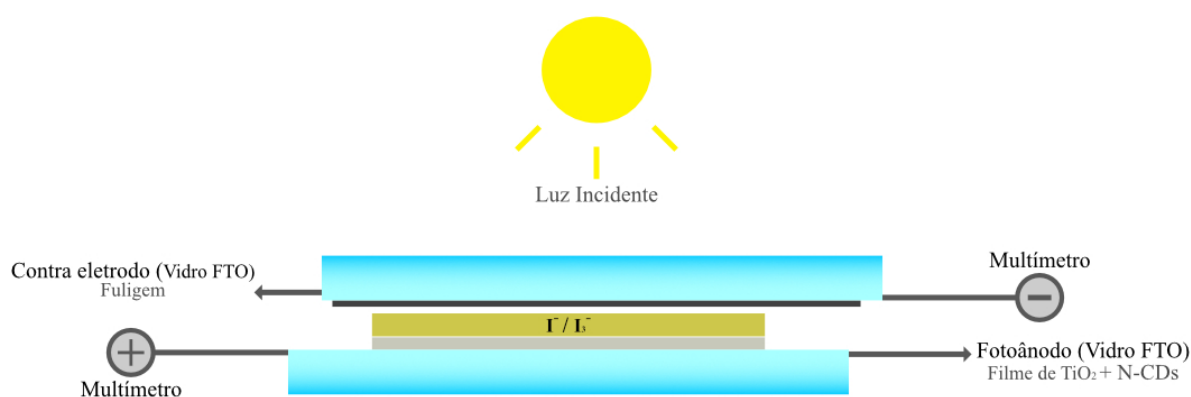
Após a calcinação e resfriamento natural, o substrato com o TiO_2 foi imerso na solução de CDs durante 24 horas e enxaguada com água deionizada ao final.

Para analisar os resultados da sensibilização do filme de TiO_2 com os CDs, serão utilizados dois substratos, um com o TiO_2 sensibilizado e o outro somente com o óxido. Então em ambos os substratos será realizado uma análise microscópica através de um microscópio

eletrônico de varredura, análise de absorção do espectro UV-vis e análise do efeito fotovoltaico.

A montagem da célula solar e o teste do efeito fotovoltaico seguirá conforme a figura 1, montado com a seguinte ordem: substrato com o filme de TiO_2 ; eletrólito de par redox triiodeto, preparado através de uma solução de iodo e iodeto e solvente de etanol absoluto; e contra eletrodo de vidro FTO com fuligem aplicada, para melhor injeção dos elétrons.

Figura 1 - Montagem da célula solar utilizada para testes



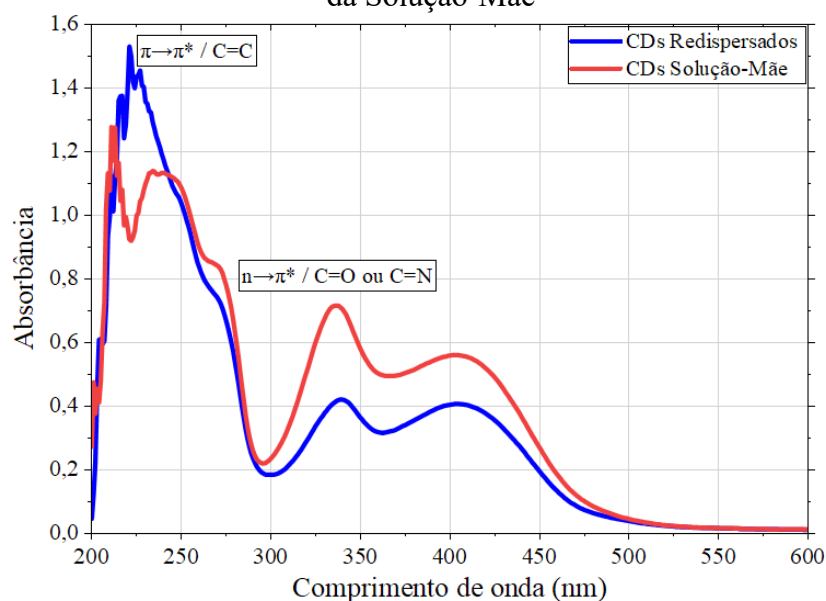
Fonte: os autores (2026).

O teste será realizado utilizando uma lâmpada dicróica a qual será calibrada para atingir uma irradiância de 100 mW/cm^2 que será aplicada a luz sobre a célula montada e serão medidos, com um multímetro, os parâmetros necessários para traçar uma curva I-V.

Resultados e Discussão

Para a caracterização de espectroscopia de absorção UV-Vis, a solução de CDs preparada anteriormente foi submetida a secagem do solvente (etanol) em uma chapa de aquecimento, gerando então sólidos de CDs. Esse material então foi redisperso em etanol 96% e levado à análise de absorção do espectro UV-vis, junto de uma amostra da solução de CDs original, a qual teve que ser diluída em 20 vezes, para confirmar se não houve degradação das moléculas. Segundo os gráficos na Figura 2, os CDs apresentaram uma absorbância significativa em comprimentos de onda próximos a 400 nm, comprovando assim sua capacidade de absorver certa luz no espectro visível da luz. A varredura do espectro também registrou pico na região de 240 nm, a qual representa transições eletrônicas do tipo $\pi \rightarrow \pi^*$, característica de ligação dupla entre carbonos. O pico na região de 340 nm representa as transições $n \rightarrow \pi^*$, que pode estar associado à grupos funcionais na superfície dos CDs, como ligações $\text{C}=\text{O}$ ou $\text{C}=\text{N}$. Enquanto o pico na região de 400 nm, pode estar associado a defeitos de superfície ou transições eletrônicas de alguns grupos funcionais, mas sem ser possível especificar exatamente qual. (PAVIA, D. L. et al, 2010; GOEDEL, L. C. 2019).

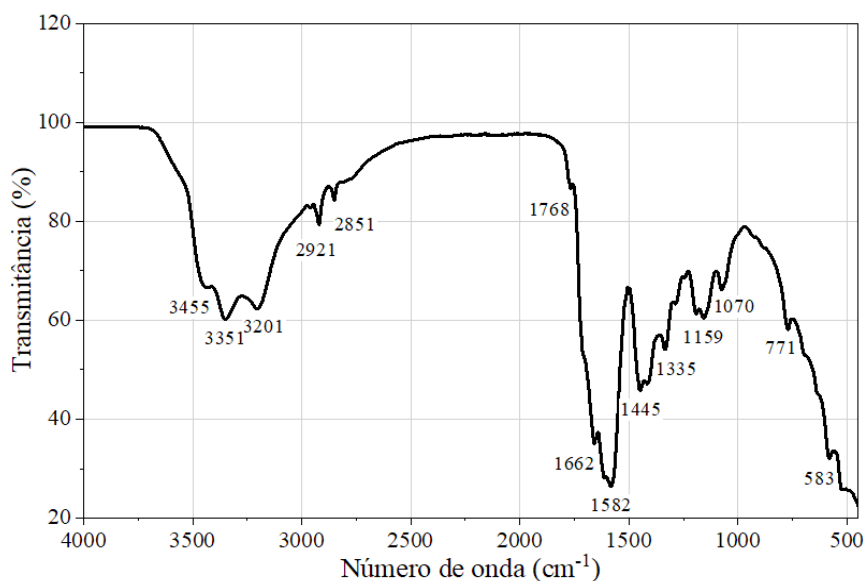
Figura 2 - Espectro de absorção UV-Vis da solução de CDs Redispersados e solução de CDs da Solução-Mãe



Fonte: os autores (2026).

Para a espectroscopia FTIR, foram realizadas duas tentativas, uma utilizando a solução e a outra os sólidos de CDs preparados. O procedimento utilizando a solução não foi muito efetivo pois os CDs estavam dispersos no etanol absoluto, então a banda de O-H (em torno de $3400\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$) impossibilitava a identificação de alguns grupos esperados devido a matéria prima, como as aminas ($3500\text{--}3100\text{ cm}^{-1}$). Enquanto com os sólidos de CDs quase livres de etanol geraram um espectro mais limpo para leitura, conforme a Figura 3.

Figura 3 - Espectro FTIR dos CDs



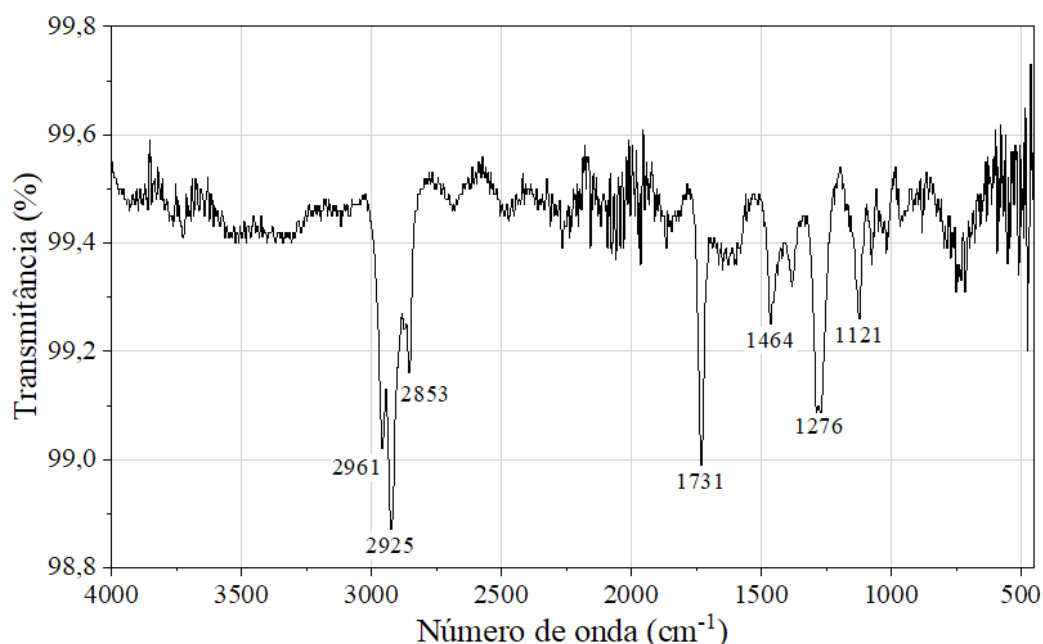
Fonte: os autores (2026).



Através do espectro gerado é possível identificar algumas bandas que nos comprovam a existência de grupos nitrogenados, como as bandas em 3455, 3351 e 3201 cm^{-1} indicando provavelmente o estiramento de aminas, a grande largura da banda pode indicar também a presença de alcoóis. A banda em 2921 cm^{-1} e 2851 cm^{-1} está associada a vibrações de estiramento das ligações C-H. A banda semi-escondida em 1662 cm^{-1} , pode estar associada a vibrações de alcenos ou também pode ser de carbonila, e caso seja essa última pode ser que haja grupos amidas. A banda em 1584 cm^{-1} indica vibrações de dobramento de ligações N-H ou também ligações com o grupo NO_2 . A banda em 1445 cm^{-1} pode indicar a vibração de estiramento em ligações C-N e também dobramento de grupos metila ou $-\text{CH}_2-$. E em 1159 cm^{-1} podem ser vibrações de estiramento em ligações C-N (PAVIA, D. L. et al, 2010; SHIBATA, H. et al. 2022). Desta forma percebe-se que a síntese ocorreu em conformidade com a literatura estudada, resultando em pontos de carbono com a presença de nitrogênio e grande absorção de luz, os quais espera-se que tenha grande atividade óptica na aplicação de sensibilização do filme de TiO_2 para uso em célula solares (SUN, M. et al. 2015; PINTO, T. S. 2023).

Após a confecção da pasta de TiO_2 e aplicação do filme nos substratos, estes foram levados a calcinação a 500 $^{\circ}\text{C}$ por 1 hora para garantir a fixação do filme no vidro. A fixação foi feita com sucesso em ambos, através de comprovação em espectroscopia FTIR, que, conforme a Figura 4, antes do tratamento térmico era possível identificar, fracas bandas provenientes do PVA, apesar dos ruídos devido às ligações iônicas. Após o processo de calcinação, essas bandas se demonstraram ausentes, conforme a Figura 5, restando assim somente o filme de TiO_2 no substrato.

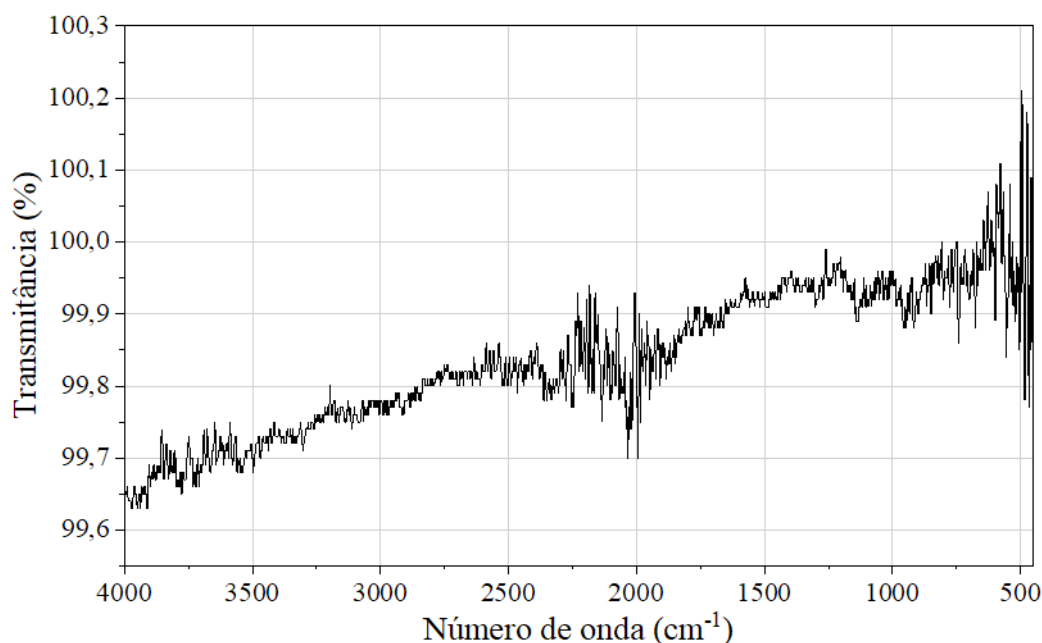
Figura 4 - Substrato com filme de TiO_2 pré-calcinação



Fonte: os autores (2026).



Figura 5 - Substrato com filme de TiO_2 pré-calcinação



Fonte: os autores (2026).

Após o tratamento térmico, um dos substratos foi submetido a sensibilização apresentando falhas em sua superfície após as 24 horas imersas na solução das nanopartículas. Foi levantada uma hipótese em que a superfície teria rachado por conta de um mal espalhamento do filme, pois as áreas falhadas foram regiões onde o filme estava mais espesso que o resto da superfície, fragilizando a região. Os N-CDs terem influência é uma teoria que será comprovada ou não após a calcinação de um novo filme, dessa vez com uma superfície mais uniforme. Será comprovado a ocorrência da sensibilização do filme após os resultados do MEV de ambos os substratos, que está em andamento e espera-se no momento.

Portanto, espera-se que ao comprovar a sensibilização do filme de TiO_2 com a solução de N-CDs, estes atuem como absorvedor dos fótons provenientes da luz solar e então injetem os elétrons fotogerados na banda de condução do dióxido de titânio, que atuará como coletor e condutor de carga, transportando os elétrons para o circuito externo e gerando energia elétrica de forma mais eficiente.

Conclusões

Foi possível realizar a síntese dos N-CDs e caracterizar os compostos nitrogenados em sua superfície com sucesso, cumprindo com o esperado quanto a sua capacidade absorptiva, se estendendo da região do ultravioleta até o início do visível. Foi possível também realizar o filme de TiO_2 , com êxito, eliminando o PVA na etapa de tratamento térmico a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ sem a degradação do óxido, sendo necessário realizar pequenos ajustes para melhorar a superfície, a fim de evitar possíveis rachaduras no filme. Como próximos passos, a formação do filme de TiO_2 será refeita para melhorar o espalhamento, assim como ele será caracterizado por MEV



para comprovação da adsorção das nanopartículas. O sistema será analisado com absorção UV-Vis e passará por testes do efeito fotovoltaico para verificar o desempenho do filme sensibilizado.

Referências

- CHOWDHURY, Md. Shahariar et al. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*, [s. l.], v. 27, art. 100431, jan. 2020. DOI: 10.1016/j.esr.2019.100431.
- GOEDEL, L. C. Síntese de nanopartículas de carbono luminescentes e sua aplicação em membranas. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- MACHADO, Claudia et al. Pontos Quânticos de Carbono: Síntese Química, Propriedades e Aplicações. *Revista Virtual de Química*, [S. l.], v. 7, n. 4, p. 1118-1142, 2015.
- PADDISON, Laura. Uso de combustíveis fósseis atinge recordes em meio ao calor, fogo e tempestade. *CNN Brasil*, 20 jun. 2024.
- PAVIA, D. L. et al. *Introdução à Espectroscopia*. 4. ed. tradução da 4ª ed. norte-americana. São Paulo: Cengage Learning, 2010. 716 p.
- PINTO, T. S. Preparação e caracterização de pontos de carbono a partir de diferentes métodos e precursores de baixa massa molar e suas aplicações como sensores para íons metálicos. 117 p. Tese (Doutorado em Ciências - Química) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.
- SHIBATA, H. et al. Microwave-assisted synthesis and formation mechanism of fluorescent carbon dots from starch. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, [s. l.], v. 3, p. 1–11, jun. 2022.
- SUN, Mingye et al. Towards efficient photoinduced charge separation in carbon nanodots and TiO₂ composites in the visible region. *Physical Chemistry Chemical Physics*, [s. l.], v. 17, n. 12, p. 7966-7971, 2015.
- VITORETI, Ana Beatriz et al. Aplicação de Dióxido de Titânio em Células Solares. *Revista Virtual de Química*, [S. l.], v. 9, n. 3, 2017.