



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS - ICE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA - PPGQ

**DESENVOLVIMENTO DE CÉLULAS SOLARES FLEXÍVEIS BASEADAS EM
PONTOS QUÂNTICOS DE CARBONO**

THIAGO MONTEIRO DE SOUZA
(Mestrado)

MANAUS
FEVEREIRO/2026

THIAGO MONTEIRO DE SOUZA

**DESENVOLVIMENTO DE CÉLULAS SOLARES FLEXÍVEIS BASEADAS EM
PONTOS QUÂNTICOS DE CARBONO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Química, com ênfase na linha de pesquisa: Química de Materiais e Interfaces.

Dr. Walter Ricardo Brito

(Orientador)

MANAUS

FEVEREIRO/2026

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S729d Souza, Thiago Monteiro
Desenvolvimento de Células Solares Flexíveis Baseadas em Pontos
Quânticos de Carbono / Thiago Monteiro Souza. - 2026.
56 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): Walter Ricardo Brito.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa
de Pós-Graduação em Química, Manaus, 2026.

1. CQDs. 2. TiO. 3. Células Solares. 4. Matriz Energética. I. Brito,
Walter Ricardo. II. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-
Graduação em Química. III. Título

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo amor e apoio incondicional em cada etapa da minha vida, e ao meu tio Magno Monteiro, cuja memória segue me inspirando a nunca desistir dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser a base de todas as coisas na minha vida. Pela força nos momentos de fraqueza, pela luz que guiou cada passo nesta jornada.

À minha família, que sempre acreditou em mim e me apoiou incondicionalmente. Aos meus pais e irmã pelo amor infinito, pelas renúncias silenciosas e pelo incentivo constante em cada etapa da minha vida.

Ao meu orientador **Walter Ricardo Brito**, pela orientação e amizade, pelas críticas construtivas e pela confiança depositada em mim. Seu exemplo de dedicação foi essencial para o amadurecimento deste trabalho e para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

Aos amigos, que tornaram esta caminhada mais leve e especial, em especial à **Thayz Nascimento**, pelo carinho, pelas palavras de incentivo e pelos momentos de alegria que encheram meu coração de forças para seguir em frente.

Aos amigos da residência universitária, em especial à **Thaliane Alves**, pelo apoio constante, pelo carinho nos dias difíceis e pelo incentivo. Agradeço pelas conversas que salvaram semanas, pelas risadas que reacenderam meu ânimo.

Aos meus amigos **Henrique Alves**, **Moisés Amâncio** e **Yonny Barcelay** que foram pessoas singulares durante toda essa fase, ajudando com estudos e orientação.

Aos professores do **PPGQ** e do **DQ**, em especial **Karen Segala**, **Karime Bentes** e **Paulo Couceiro**, pelo apoio, amizade e ensinamentos que foram decisivos para meu crescimento profissional e pessoal.

Agradeço ao pesquisador **Rodrigo Szostak** e ao grupo de pesquisa da linha de luz Carnáuba pelo apoio e pela colaboração disponibilizados para a produção das células solares, bem como pela receptividade durante a missão de estudos no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron.

Aos colegas e amigos de trabalho, pelo companheirismo, apoio e aprendizado compartilhado ao longo dessa trajetória. Em especial, agradeço a **Alice**, **Ariamna**, **Bianka**, **Bruna**, **Carlos**, **Claudionor**, **Dennis**, **Emanuel**, **Jackiney**, **Juliana**, **Mark**, **Rebeca**, **Semira** e **Taísa**, cuja presença tornou o caminho mais enriquecedor e inspirador.

Meus agradecimentos a **FAPEAM** pela bolsa cedida e financiamento deste projeto.

A **TODOS** que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta etapa tão importante de minha vida, deixo aqui minha profunda gratidão e carinho.

“Eu não luto achando que vou vencer, eu luto porque tenho que vencer, é por isso que continuo a lutar.”

(Ichigo Kurosaki, Bleach)

RESUMO

O avanço das tecnologias de geração de energia, tem impulsionado vários estudos para diversificação da matriz energética, uma vez que a maior parte da geração de energia vem de materiais de natureza não renovável. As células solares são dispositivos promissores capazes de converter energia eletromagnética em energia elétrica de forma limpa e renovável. Os pontos quânticos de carbono (CQDs) surgiram como uma classe de nanomateriais muito versáteis que podem ser aplicados em várias áreas devido à sua baixa toxicidade, alta fotoluminescência e biocompatibilidade. Estes CQDs podem ser aplicados em biossensores, bioimagem, catálise, diodos emissores de luz, fotodetectores e células solares. Na energia fotovoltaica eles são utilizados como material fotoativo em células solares de 3ª geração, devido sua capacidade de absorver luz no espectro visível e ultravioleta. Neste trabalho foram obtidos CQDs por síntese solvotermal e posteriormente caracterizados por Espectroscopia Ultravioleta-Visível (UV-Vis), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Espectroscopia RAMAN e Microscopia Eletrônica de Transmissão (TEM). Além disso, foi obtido TiO_2 pelo método de síntese Sol-Gel e caracterizado por DRX. As imagens de TEM confirmaram a presença e a média de tamanho (10,04 nm) dos CQDs obtidos. Através de FTIR e Raman foram identificados os principais grupos funcionais e tipo de carbono presente nos CQDs. No espectro de absorbância coletado, foram observadas duas regiões de absorção: 250-375 nm (transições $\pi - \pi^*$) e 376 -705 nm ($n - \pi^*$). Os resultados de DRX mostraram que o TiO_2 obtido é polimórfico, contendo as fases anatase e brookita, com frações de 56,28 e 43,72% respectivamente e de acordo com a equação de Debye-Sherrer, o tamanho dos cristalitos do material foi de aproximadamente $13,5 \pm 2,7$ nm para a fase anatase, $22,5 \pm 5,7$ nm para a fase brookita e $20,1 \pm 6,4$ nm para ambas as fases. Os dispositivos fotovoltaicos foram montados e caracterizados, apresentando eficiências próximas de 0,60%.

Palavras-Chave: CQDs; Células Solares; Matriz Energética.

ABSTRACT

Advances in energy generation technologies have driven several studies aimed at diversifying the energy matrix, since most energy generation comes from non-renewable materials. Solar cells are promising devices capable of converting electromagnetic energy into electrical energy in a clean and renewable way. Carbon quantum dots (CQDs) have emerged as a class of highly versatile nanomaterials that can be applied in various areas due to their low toxicity, high photoluminescence, and biocompatibility. These CQDs can be applied in biosensors, bioimaging, catalysis, light-emitting diodes, photodetectors, and solar cells. In photovoltaic energy, they are used as photoactive material in third-generation solar cells due to their ability to absorb light in the visible and ultraviolet spectrum. In this work, CQDs were obtained by solvothermal synthesis and subsequently characterized by Ultraviolet-Visible Spectroscopy (UV-Vis), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), RAMAN Spectroscopy, and Transmission Electron Microscopy (TEM). In addition, TiO₂ was obtained by the Sol-Gel synthesis method and characterized by XRD. TEM images confirmed the presence and average size (10.04 nm) of the obtained CQDs. FTIR and Raman spectroscopy identified the main functional groups and type of carbon present in the CQDs. In the absorbance spectrum collected, two absorption regions were observed: 250-375 nm ($\pi - \pi^*$ transitions) and 376-705 nm ($n - \pi^*$). The XRD results showed that the TiO₂ obtained is polymorphic, containing the anatase and brookite phases, with fractions of 56.28 and 43.72%, respectively. According to the Debye-Sherrer equation, the size of the material's crystallites was approximately 13.5 ± 2.7 nm for the anatase phase, 22.5 ± 5.7 nm for the brookite phase, and 20.1 ± 6.4 nm for both phases. The photovoltaic devices were assembled and characterized, presenting efficiencies close to 0.60%.

Keywords: CQDs; TiO₂; Solar Cell; Energy Matrix.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fornecimento total da energia mundial.....	12
Figura 2: Crescimento da geração mundial de eletricidade por dispositivos fotovoltaicos.	13
Figura 3: Arquiteturas padrão e invertida de células solares de 3 ^a geração.	19
Figura 4: Estrutura de células solares de pontos quânticos.....	21
Figura 5: Curva J-V no escuro e sob iluminação.	21
Figura 6: Imagens TEM de nanopartículas uniformes de TiO ₂ anatase sintetizadas pelo método sol-gel	22
Figura 7: Estrutura dos QDs.....	23
Figura 8: Composição estrutural dos CQDs.....	24
Figura 9: Métodos de síntese de pontos quânticos.....	25
Figura 10: a) Açaizeiro (Euterpe precatoria) e b) Fruto do Açaí	27
Figura 11: Estrutura molecular principal das antocianinas	27
Figura 12: Diagrama esquemático da síntese de CQDs a partir da polpa e do pigmento do fruto de Euterpe precatoria. a) Síntese solvotérmica dos CQDs; b) Processo de centrifugação e filtração da dispersão coloidal obtida.	31
Figura 13: Diagrama da síntese de TiO ₂ . a) Preparo da Solução e síntese via sol-gel; b) Lavagem, centrifugação e tratamento térmico.	33
Figura 14: Gravação ácida de uma faixa de ITO pelo processo litográfico, utilizando pó de zinco e ácido clorídrico.....	34
Figura 15: Imagem da solução de CQDs após 180 dias de armazenamento a) sob luz UV (365 nm) e b) sob luz ambiente.	37
Figura 16: Espectro da análise de UV-Vis dos CQDs.	38
Figura 17: a) Espectros de FTIR e b) Raman dos CQDs.	39
Figura 18: a) Imagem de TEM dos CQDs e b) histograma do tamanho de partículas.	40
Figura 19: Espectro de EDS dos CQDs	40
Figura 20: a) Padrão de DRX e b) refinamento estrutural de Rietveld para o TiO ₂	41
Figura 21: Protótipo final da célula solar	43

Figura 22: a) Diagrama da eficiência dos dispositivos em diferentes velocidades de deposição da camada fotoativa, b) Curva J-V e diagrama de montagem do dispositivo fotovoltaico com maior eficiência. 44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Gerações das tecnologias fotovoltaicas	15
Tabela 2: Evolução da eficiência de células solares de 3ª geração entre 2015-2025	17
Tabela 3: Radicais dos tipos de Antocianinas	28
Tabela 4: Identificação das amostras e velocidade de rotação durante a deposição da camada fotoativa.	36
Tabela 5: Valores (%) do peso elementos encontrados nos CQDs	41
Tabela 6: Parâmetros de rede (a, b, c e V) e parâmetros estatísticos (χ^2 e S), obtidos a partir do refinamento estrutural do TiO ₂	42
Tabela 7: Parâmetros atômicos das soluções sólidas de TiO ₂	42

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CdTe – Telureto de Cádmio

CIGS – Cobre, Índio, Gálio e Selênio

CMABio – Centro Multiusuário para Análise de Fenômenos Biomédicos

CQDs – Pontos Quânticos de Carbono (do inglês: *Carbon Quantum Dots*)

DRX – Difração de Raios X

EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X

ETL – Camada Transportadora de Elétrons (do inglês: *Electron Transport Layer*)

eV – Elétron-Volt

FF – Fator de Preenchimento (do inglês: *Fill Factor*)

FTIR – Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (do inglês: *Fourier-transform Infrared Spectroscopy*)

HTL – Camada Transportadora de Buracos (do inglês: *Hole Transport Layer*)

h ν – Fóton de energia

ICSD – Banco de Dados de Estrutura Cristalina Inorgânica (do inglês: *Inorganic Crystal Structure Database*)

ITO – Óxido de Índio dopado com Estanho (do inglês: *Indium tin Oxide*)

J-V – Densidade de Corrente em Função da Tensão

LABCEM – Laboratório Cromatografia e Espectrometria de Massas

LABEL – Laboratório de Bioeletrônica e Eletroanalítica

LABEV – Laboratório de Espectroscopias Vibracionais

LAEQ – Laboratório de Abertura de Amostra e Ensaio Químicos

LPFQ – Laboratório de Pesquisa de Físico-Química

LSCN – Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

PET – Poli(Tereftalato de Etileno)

PVDF – Fluoreto de Polivinilideno

QDs – Pontos Quânticos (do inglês: *Quantum Dots*)

S – Good of fitness

T – Temperatura

t – Tempo

TEM – Microscopia Eletrônica de Transmissão (do inglês: *Transmission Electron Microscopy*)

TiO₂ – Óxido de titânio

UV-Vis – Espectroscopia no Ultravioleta-Visível

χ^2 – Qui-quadrado

J_{sc} – Densidade de Corrente de Curto-Circuito (do inglês: *Short Circuit Current Density*)

R_p – Factor R de perfil

R_w – Fator R peso esperado

V_{oc} – Potencial de Circuito Aberto (do inglês: *Open Circuit Potential*)

η – Eficiência de Conversão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVOS.....	11
2.1. Geral.....	11
2.2. Específicos	11
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	12
3.1. Energias renováveis	12
3.2. Energia solar fotovoltaica	13
3.2.1. Células solares	14
3.2.2. Células solares de primeira geração	15
3.2.3. Células solares de segunda geração	15
3.2.4. Células solares de terceira geração	16
3.2.5. Evolução da eficiência das células solares de terceira geração	16
3.2.6. Células solares de quarta geração	17
3.2.7. Limite Shockley-Queisser (Limite de eficiência radiativa).....	18
3.3. Arquitetura e estrutura de células solares de terceira geração	18
3.3.1. Substrato condutor flexível.....	19
3.3.2. Camada transportadora de elétrons (ETL).....	19
3.3.3. Camada fotoativa.....	19
3.3.4. Camada transportadora de buracos (HTL)	20
3.3.5. Contato elétrico	20
3.4. Princípio de funcionamento de células solares.....	20
3.5. Técnicas de caracterização de células solares	21
3.6. Dióxido de Titânio (TiO₂).....	22
3.7. Pontos quânticos (QDs)	23
3.7.1. Pontos quânticos de carbono (CQDs).....	24
3.7.2. Síntese solvotermal de CQDs	26
3.8. Açaí (<i>Euterpe precatoria</i>).....	26
3.8.1. Antocianinas	27
4. MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1. Materiais	29
4.3. Equipamentos.....	29
4.4. Seleção do material carbonáceo e solvente para obtenção dos CQDs	30
4.5. Obtenção dos frutos (<i>Euterpe precatoria</i>)	30

4.6. Síntese de pontos quânticos de carbono (CQDs)	30
4.7. Métodos de caracterização dos pontos quânticos de carbono	31
4.7.1. Espectroscopia no ultravioleta-visível (UV-Vis)	31
4.7.2. Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	31
4.7.3. Espectroscopia de espalhamento vibracional RAMAN	32
4.7.4. Microscopia eletrônica de transmissão (TEM) e Espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS)	32
4.8. Síntese de nanopartículas de dióxido de titânio (TiO₂)	32
4.9. Métodos de caracterização do TiO₂	33
4.9.1. Difração de raios X (DRX) e refinamento estrutural de Rietveld	33
4.10. Montagem das células solares	34
4.10.1. Corte do substrato de óxido de índio dopado com estanho (ITO)	34
4.10.3. Gravação da área de condução do substrato	34
4.10.4. Limpeza do substrato de óxido de índio dopado com estanho (ITO)	35
4.10.5. Eletrodeposição da camada semicondutora de TiO ₂	35
4.10.6. Deposição da camada fotoativa de CQDs	35
4.10.7. Preparo e deposição da camada transportadora de buracos	36
4.10.8. Deposição catódica do ouro	36
4.11. Caracterização fotoelétrica dos dispositivos fotovoltaicos	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1. Pontos quânticos de carbono (CQDs)	37
5.1.1. Fluorescência e estabilidade coloidal	37
5.1.2. Espectroscopia de UV-Vis	37
5.1.3. Caracterização espectroscópica por FTIR e RAMAN	38
5.1.4. Microscopia eletrônica de transmissão (TEM)	39
5.1.5. Espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS)	40
5.2. Dióxido de titânio (TiO₂)	41
5.2.1. Difração de raios X (DRX)	41
5.3. Fabricação e caracterização fotoelétrica dos dispositivos fotovoltaicos	43
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
7. PERSPECTIVAS FUTURAS	46
REFERÊNCIAS	47
APÊNDICE	56

1. INTRODUÇÃO

Segundo Ribeiro (2022), a preocupação com a redução de poluentes e os impactos ambientais gerados pelas fontes de energia não renováveis tem se tornado cada vez mais relevante no último século, especialmente devido ao uso intensivo de recursos como carvão mineral, gás natural e petróleo. A busca por alternativas às fontes energéticas convencionais tem se intensificado, e a energia solar fotovoltaica tem recebido grande destaque por ser uma opção moderna, de baixo impacto ambiental e de custos reduzidos de produção e manutenção.

A energia solar fotovoltaica tem uma importância singular, uma vez que ela consegue suprir a carência de energia elétrica em regiões com difícil acessibilidade, como por exemplo as cidades interioranas do Amazonas, que por sua vez não tem acesso à energia elétrica de qualidade ou nenhuma, com essa visão, a energia solar não é só importante como energia renovável, mas também como objeto de caráter social, dando oportunidades para famílias em regiões com baixa acessibilidade tenham acesso à energia de qualidade e baixo custo (GASPARIN *et al.*, 2022).

A energia fotovoltaica está diretamente alinhada ao sétimo Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7), estabelecido pela Organização das Nações Unidas, o qual tem como propósito assegurar o acesso universal a fontes de energia confiáveis, sustentáveis, modernas e economicamente acessíveis. Nesse contexto, a geração de energia a partir de sistemas fotovoltaicos destaca-se por utilizar uma fonte renovável e abundante, contribuindo significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a mitigação dos impactos ambientais associados às matrizes energéticas baseadas em combustíveis fósseis (SILVA, 2025).

Atualmente as tecnologias fotovoltaicas estão divididas em três gerações. A primeira geração explora a tecnologia do silício, são células de maior estabilidade e com eficiência de conversão de aproximadamente 20% (DAMBHARE *et al.*, 2021). A segunda geração é composta por células de filmes finos, que devido à maior instabilidade, apresentam eficiência de aproximadamente 15% (ROSA; TOLEDO, 2021). Nesse contexto de geração e eficiência, as células de terceira geração, nas quais são aplicados pontos quânticos de carbono (CQDs) (XU *et al.*, 2015).

Os CQDs são materiais promissores para a produção de células solares, destacando-se por suas características únicas e grande potencial de aplicação em células solares de última

geração. Isso se deve à sua capacidade de absorver luz nas regiões do espectro visível e ultravioleta. Além de ser um material de baixa toxicidade e fácil obtenção, podendo ser obtidos a partir de materiais orgânicos, como frutos, pigmentos e dejetos orgânicos (CAROLAN *et al.*, 2017).

O presente estudo busca obter CQDs para aplicá-los como camada fotoativa em células solares híbridas. Esta pesquisa visa compreender os comportamentos ópticos deste material para sua aplicação em células solares, apresentando uma alternativa de baixo custo para a difusão da energia fotovoltaica.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Desenvolver células solares flexíveis baseadas em pontos quânticos de carbono a partir de corantes vegetais.

2.2. Específicos

- Sintetizar os CQDs a partir da biomassa vegetal por método solvotermal e otimizar os parâmetros de síntese dos pontos quânticos;
- Sintetizar as nanopartículas de TiO_2 pelo método sol-gel;
- Caracterizar os CQDs por espectroscopia RAMAN, espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), espectroscopia de absorção UV-Vis; microscopia eletrônica de transmissão (TEM) e espectroscopia de energia dispersiva de raios x (EDS);
- Caracterizar o TiO_2 por meio de difração de raios X (DRX);
- Fabricar células solares fotossensibilizadas flexíveis aplicando os CQDs como material fotoativo e o TiO_2 como camada transportadora de elétrons;
- Analisar o comportamento dos parâmetros fotoelétricos das células solares por meio de curvas de corrente em função do potencial (J-V).

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Energias renováveis

As fontes de energia elétrica podem ser divididas em duas categorias: renováveis e não renováveis. As energias renováveis utilizam recursos que se renovam naturalmente ou com auxílio humano, como a energia solar (fotovoltaica e térmica), eólica (*onshore* e *offshore*), hidrelétrica e biomassa. (ELIE *et al.*, 2021). As energias não renováveis, por sua vez, dependem de recursos que se esgotam e se regeneram muito lentamente, como o carvão mineral, o gás natural e o petróleo. Vale ressaltar que o uso excessivo desses combustíveis provoca impactos ambientais severos, incluindo a emissão de gases de efeito estufa, a degradação do solo e a poluição das águas, comprometendo diretamente a vida no planeta (ARAÚJO *et al.*, 2022).

A Agência Internacional de Energia (AIE) notificou em 2023 que 86% da energia mundial é proveniente de tecnologias energéticas não renováveis, enquanto apenas 14% são de energias renováveis como representado no gráfico da Figura 1.

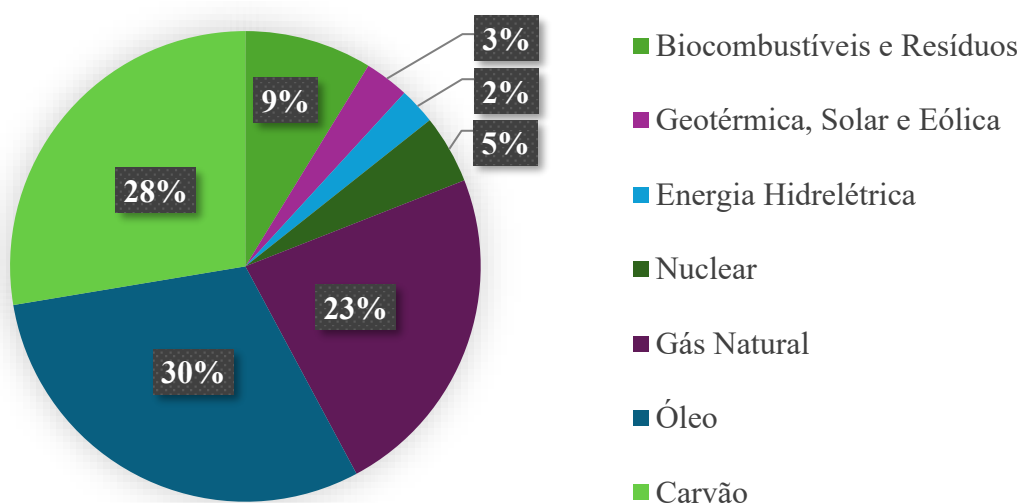


Figura 1: Fornecimento total da energia mundial.

Fonte: Adaptado de Shilpa e colaboradores (2023)

Com o aumento da produção de energia mundial e alto índice de uso de energias não renováveis, os níveis de poluição na natureza tem aumentado exponencialmente, mediante a isso, nas últimas décadas a ampliação pela demanda de fontes de energias renováveis tem tido um foco singular, visando evitar os problemas causados pela produção de energia de fontes não renováveis (FARGHALI *et al.*, 2023).

Dentre as fontes de energia renováveis, a energia solar fotovoltaica tem se destacado significativamente, impulsionada por incentivos voltados à redução dos impactos socioeconômicos e ambientais. Além disso, sua crescente adoção como fonte alternativa de energia, evidencia sua versatilidade, sendo progressivamente implementada em diversas aplicações, incluindo a geração e o fornecimento de eletricidade para residências com acesso limitado à rede elétrica (KUMAR *et al.*, 2023).

3.2. Energia solar fotovoltaica

Devido à alta incidência de radiação solar na superfície terrestre, o potencial para a geração de energia fotovoltaica é significativamente elevado, a partir disso, diversas aplicações fotovoltaicas têm sido desenvolvidas, destacando-se a geração de energia solar. Este avanço demonstra o potencial da energia solar como solução eficiente e sustentável para suprir a crescente demanda energética mundial (MIRANDA; OLIVEIRA, 2024).

Vale destacar que entre 2012 e 2022, observa-se um crescimento de aproximadamente 1200% na geração de energia a partir de equipamentos fotovoltaicos, como ilustrado na Figura 2. Esse crescimento ocorreu devido à redução dos custos desta tecnologia, ao avanço das pesquisas sobre energia solar e à crescente busca por fontes renováveis de energia (NETO *et al.*, 2024).

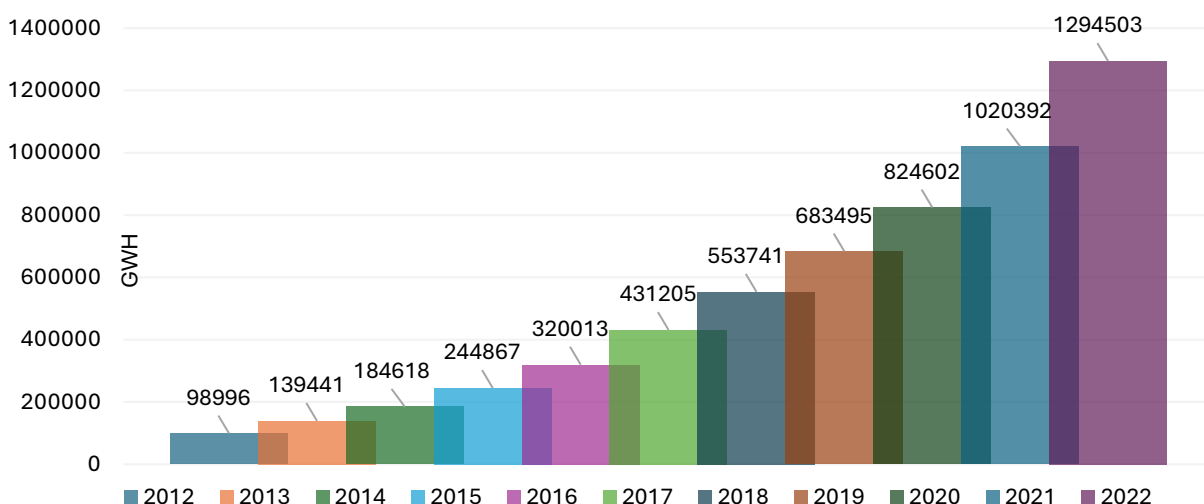


Figura 2: Crescimento da geração mundial de eletricidade por dispositivos fotovoltaicos.

Fonte: Adaptado de International Energy Agency (2024)

Os avanços nas pesquisas sobre energia fotovoltaica, aliados ao constante progresso tecnológico, têm resultado em uma redução exponencial dos custos de produção dessa energia.

Nesse contexto, os sistemas fotovoltaicos, como as células solares, emergem como uma alternativa cada vez mais viável para a geração de energia, tanto sob a perspectiva econômica, devido à redução dos investimentos necessários, quanto sob a perspectiva ambiental, por se tratar de uma fonte sustentável e de baixo impacto ambiental (HAO *et al.*, 2022).

Outro ponto que foi determinante para o crescimento do uso de energia fotovoltaica foi a assinatura do acordo de Paris em dezembro de 2015, durante a 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP21), que teve como principal objetivo expandir o uso de fontes limpas e sustentáveis, como forma de combater o aquecimento global e fomentar o desenvolvimento tecnológico (FREITAS; SILVA, 2020).

3.2.1. Células solares

As células solares são dispositivos fotovoltaicos projetados para converter a luz solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico (KUMAR; NAIDU, 2021). Este efeito é um fenômeno espontâneo que gera um campo elétrico na junção de dois materiais em resposta à radiação eletromagnética (fótons) (JIANG *et al.*, 2021). Durante este processo, a incidência da luz sobre as heterojunções fotossensíveis promove a formação de pares elétron-buraco. Os portadores de carga são separados e deslocam-se em direções opostas, que gera um fluxo de corrente elétrica (YAO *et al.*, 2019).

Estes dispositivos estão classificados em quatro gerações, conforme ilustrado na Tabela 1. As células de primeira geração baseiam-se em *wafers* de silício, tecnologia amplamente utilizada devido à sua eficiência e à sua maturidade no mercado. As células de segunda geração utilizam filmes finos (do inglês: *thin-film*), que reduz o custo de produção e aumenta a flexibilidade em determinadas aplicações. Já as células solares de terceira geração são desenvolvidas a partir de materiais organometálicos, perovskitas e pontos quânticos (QDs), representando uma inovação promissora para aumentar a eficiência e as possibilidades de captação de energia solar (TEIXEIRA *et al.*, 2021).

As células de quarta geração, distinguem-se por integrar uma relação custo-benefício favorável e a versatilidade de filmes finos poliméricos com a robustez de nanoestruturas orgânicas, abrangendo nanopartículas metálicas, óxidos metálicos, nanotubos de carbono, grafeno e seus derivados (SHARMA; MISHRA, 2025). O termo "células inorgânicas híbridas" é frequentemente usado para se referir a células PV de quarta geração.

Tabela 1: Gerações das tecnologias fotovoltaicas

Tecnologias Fotovoltaicas	1ª Geração	Silício Monocristalino Silício Policristalino
	2ª Geração	Silício Amorfo Filmes Finos Telureto de Cádmio Seleneto de Cobre, Índio e Gálio
	3ª Geração	Corante Orgânicas Pontos Quânticos Perovskitas
	4ª Geração	Híbridas

Fonte: Adaptado de Damhare e colaboradores (2021)

3.2.2. Células solares de primeira geração

As células de primeira geração são fabricadas a partir de silício e se dividem-se em dois tipos: monocristalino e policristalino. As células de silício monocristalino apresentam maior eficiência de aproximadamente 15 e 24%, além de um band gap de $\sim 1,1$ eV, pois são compostas por um único cristal, resultando em uma estrutura mais uniforme e otimizada para o transporte de elétrons (TORRES *et al.*, 2019). As células de silício policristalino são constituídas por múltiplos fragmentos de silício, o que resulta em uma estrutura cristalina menos uniforme. Essa descontinuidade cria uma uniformidade que dificulta o transporte dos elétrons, aumentando as perdas por recombinação. Como consequência, essa tecnologia apresenta eficiências tipicamente inferiores, entre 10 e 18%. Isso explica por que o silício monocristalino apresenta maior eficiência (TEIXEIRA *et al.*, 2021).

3.2.3. Células solares de segunda geração

As células de segunda geração utilizam filmes finos inorgânicos depositados sobre um substrato condutor. Elas apresentam menor demanda energética na produção e custos menores em comparação às células de primeira geração. No entanto, devido à dificuldade em fabricar filmes isento de imperfeições, a eficiência na conversão de energia é inferior (VITORETI *et al.*, 2016). Estas células podem ser fabricadas a partir de silício amorfo - a-Si, telureto de cádmio - CdTe, seleneto de cobre, índio e gálio - CIGS (BÜHLER *et al.*, 2019).

As células solares de silício amorfo (a-Si) apresentam eficiências de 5 a 12%, banda proibida em torno de 1,7 eV e vida útil aproximada de 15 anos, destacando-se pelo baixo custo, ampla disponibilidade, não toxicidade e alto coeficiente de absorção, embora sejam limitadas pela menor eficiência e pela curta vida dos transportadores de carga; as células CdTe/CdS

exibem eficiências entre 15 e 16%, banda próxima de 1,45 eV e expectativa de vida de cerca de 20 anos, com alta absorção e menor uso de material, mas sofrem restrições relacionadas à toxicidade do cádmio, à limitação do telúrio e à sensibilidade à temperatura; já as células CIGS alcançam eficiência em torno de 20%, banda proibida de aproximadamente 1,7 eV e vida útil estimada em 12 anos, exigindo menos material na produção, porém apresentando alto custo, instabilidade, sensibilidade térmica e baixa confiabilidade (SHARMA; GOYAL, 2020).

3.2.4. Células solares de terceira geração

As células solares de terceira geração são desenvolvidas a partir de filmes semicondutores nanocristalinos, como as células de Grätzel, descritas em 1991. Estas células são compostas por materiais orgânicos, corantes, QDs ou perovskitas e podem incluir estruturas mais avançadas, como as células de multi-junção. Essas células geram múltiplos éxcitons, o que proporciona uma eficiência de aproximadamente 27% (O'REGAN; GRATZEL, 1991; RAPHAEL *et al.*, 2017). Uma das principais vantagens das células de terceira geração é a capacidade de superar o limite de Shockley-Queisser. Esse avanço tecnológico representa um marco na busca por sistemas fotovoltaicos mais eficientes e sustentáveis (SOUZA *et al.*, 2024).

As células sensibilizadas por corantes apresentam eficiências entre 5 e 20%, com vantagens como baixo custo, bom desempenho em baixa luz e em ângulos amplos, além de robustez, mas são limitadas por problemas de estabilidade térmica e pelo uso de substâncias tóxicas; as células baseadas em pontos quânticos atingem eficiências de 11 a 17%, com baixo custo de produção, porém sofrem com toxicidade e degradação; as células orgânicas e poliméricas exibem eficiências de 9 a 11%, destacando-se pela leveza, flexibilidade e baixo custo de processamento, apesar da baixa eficiência, as células de perovskita alcançam cerca de 21% de eficiência, combinando baixo custo e alta eficiência, mas ainda apresentam instabilidade; por fim, as células de múltiplas junções superam 36% de eficiência, oferecendo alto desempenho, embora sejam complexas e caras (PASTUSZAK; WEGIEREK, 2022).

3.2.5. Evolução da eficiência das células solares de terceira geração

Quando falamos sobre eficiência das células solares, as tecnologias de terceira geração ocupam as primeiras posições no ranking. Na Tabela 2, observa-se que as células solares de perovskita apresentam a maior eficiência entre as tecnologias de 3ª geração com cerca de 29%. Esta tecnologia mostrou-se a mais promissora entre as demais, demonstrando um aumento de eficiência de 20% para 26,5% ao longo de aproximadamente 10 anos (SHARMA, 2021).

Tabela 2: Evolução da eficiência de células solares de 3ª geração entre 2015-2025

Ano	Orgânicas (%)	Pontos Quânticos (%)	DSSC (%)	Perovskitas (%)
2015	11	9	—	20
2016	—	10,5	12	22
2017	12	12	—	22,5
2018	—	14	12	23
2019	15,5	15,5	—	24
2020	16,5	16,5	12	25
2021	17,5	17,5	12,5	25,2
2023	18,5	18,5	—	25,5
2025	19	19	—	26,5

Fonte: Adaptado de National Renewable Energy Laboratory (2025)

Em segundo lugar, observa-se um empate entre as células de QDs e células orgânicas, que, em 2025, atingiram uma eficiência próxima de 19%. As células QDs mostraram um crescimento mais acentuado, confirmando os avanços significativos nas tecnologias com a aplicação de QDs, assim demonstrando um potencial tecnológico mais promissor em frente as células solares orgânicas que provavelmente atingiram seu limite de eficiência na arquitetura atual (KANT; SINGH, 2022).

Por fim, apresentamos as células sensibilizadas por corante que, desde 2015 até 2021, se mantiveram estáveis, onde observa-se uma variação de 1%. Este comportamento apresentado na Tabela 2, indica que não houve avanços expressivos da tecnologia e sugere uma proximidade ao limite de eficiência do dispositivo (GIANOLA *et al.*, 2023).

3.2.6. Células solares de quarta geração

As células fotovoltaicas de quarta geração, também denominadas células híbridas inorgânicas, caracterizam-se pela superação do limite de Shockley-Queisser, combinação do baixo custo e da flexibilidade das películas finas de polímeros com a estabilidade de nanoestruturas orgânicas, incluindo nanopartículas metálicas, óxidos metálicos, nanotubos de carbono, grafeno e seus derivados, sendo apontados como uma alternativa promissora para o futuro da tecnologia fotovoltaica (WU *et al.*, 2020).

A eficiência de conversão de energia ultrapassou 20,3% em células solares de perovskita à base de grafeno e atingiu 10% em células solares orgânicas, evidenciando o papel multifuncional do grafeno nesses dispositivos, que, além de atuar na extração e no transporte de cargas até os eletrodos, contribui de forma decisiva para a proteção contra a degradação

ambiental, em razão de sua estrutura de rede bidimensional compacta, garantindo assim maior estabilidade ambiental de longo prazo aos dispositivos fotovoltaicos (REHMAN *et al.*, 2023).

3.2.7. Limite Shockley-Queisser (Limite de eficiência radiativa)

Em 1961, Shockley e Queisser estabeleceram uma formulação teórica para estimar a eficiência máxima de uma célula solar de junção única, fundamentada no princípio do balanço detalhado, segundo o qual os fluxos de fótons incidentes e emitidos pelo dispositivo são considerados equivalentes em regime de circuito aberto (SHOCKLEY; QUEISSER, 1961). Assim, os pesquisadores determinaram que uma célula solar com uma camada fotoativa ideal com *band gap* de 1,4 eV, apresenta um limite teórico máximo de eficiência de 33,7%, o que corresponde a uma geração máxima de energia elétrica de 337 W m^{-2} (WANG *et al.*, 2022).

O limite de Shockley-Queisser é obtido pela aplicação do princípio do equilíbrio detalhado aos fluxos de partículas que entram e saem do semicondutor. Para cada fóton com energia superior à banda proibida absorvido pelo material, forma-se um par elétron–buraco. A eficiência máxima é atingida quando não há recombinação não radiativa e todos os portadores gerados são efetivamente coletados como corrente elétrica ou se recombina radiativamente, com a emissão de um único fóton por par elétron–buraco (XU *et al.*, 2015). Então o limite de Shockley-Queisser decorre de perdas intrínsecas e inevitáveis no processo de conversão da luz em eletricidade, que incluem a termalização dos portadores, a transmissão de fótons não absorvidos e os mecanismos de recombinação (SEO *et al.*, 2025).

3.3. Arquitetura e estrutura de células solares de terceira geração

As células solares possuem estruturas em camadas, semelhantes a um sanduíche, compostas principalmente por uma camada fotossensível, responsável pela absorção da luz, além de camadas adjacentes, como a camada de transporte de elétrons, camada de transporte de buracos, o substrato condutor com base flexível constituído de poli(tereftalato de etileno) (PET) ou base de vidro e o contra eletrodo. As células têm dois tipos de arquitetura, padrão e invertida, em que a única diferença reside na inversão da camada transportadora de elétrons (ETL) com a camada transportadora de buracos (HTL), representados na Figura 3 (a - b) (ZHANG *et al.*, 2023).

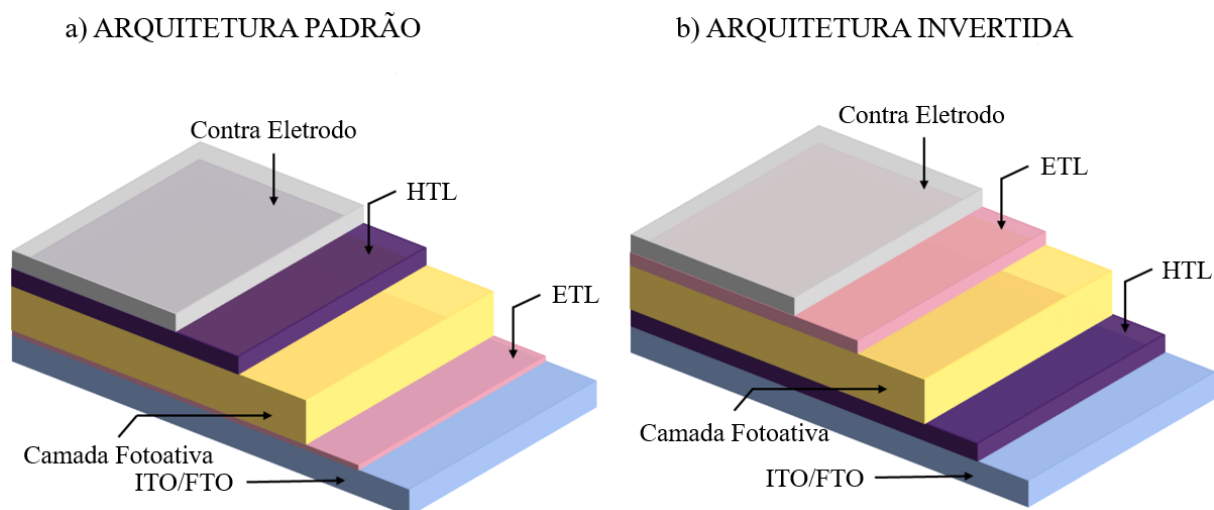


Figura 3: Arquiteturas padrão e invertida de células solares de 3ª geração.

Fonte: Adaptado de Mazivieiro e colaboradores (2024)

3.3.1. Substrato condutor flexível

O substrato condutor serve como alicerce para os demais materiais da célula solar, garantindo estabilidade estrutural e transportando os elétrons ou buracos gerados pela luz solar aos contatos elétricos, permitindo que a corrente elétrica flua no circuito externo (QIAO *et al.*, 2022). O óxido de estanho dopado com flúor (FTO) e óxido de estanho dopado com índio (ITO) revestidos em vidro ou PET são os substratos mais utilizados em células solares (MENG *et al.*, 2014; YOO *et al.*, 2008).

3.3.2. Camada transportadora de elétrons (ETL)

As principais funções da camada transportadora de elétrons em dispositivos fotovoltaicos envolvem a adsorção do material fotoativo, o transporte de elétrons fotoinduzidos das moléculas do material fotoativo para o substrato condutor, e o espalhamento da luz incidente, o que contribui para uma melhor absorção pela camada de fotoativa (HO KIM *et al.*, 2022). Diversos óxidos semicondutores, como ZnO, SnO₂WO₃ e TiO₂, podem ser utilizados como ETL. Dentre eles, o TiO₂ tem se destacado devido às suas propriedades ópticas, térmicas, fotocatalíticas, além de ser um material biocompatível e de baixo custo.

3.3.3. Camada fotoativa

A camada fotoativa é composta por uma ou mais filmes semicondutores que tem a função de absorver a radiação solar e gerar portadores de carga, que são formados quando um elétron em um material semicondutor absorve energia e se desloca da banda de valência para a banda de condução, deixando para trás uma lacuna na estrutura cristalina (SHAHZAD *et al.*,

2022; TARIQ; NOMAN, 2022). Existem diversos materiais que podem ser utilizados como camada fotoativa, incluindo *wafers* de silício, perovskitas, QDs, filmes finos de cobre, índio, gálio e selênio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe) (LUO *et al.*, 2023; MAALOUF *et al.*, 2023; SUKHAREVSKA *et al.*, 2021).

3.3.4. Camada transportadora de buracos (HTL)

A sua principal função é transportar os buracos gerados pela absorção de luz na camada fotoativa até o contato elétrico de ouro. Ela atua na separação e na movimentação das cargas elétricas na célula solar, permitindo a geração de uma corrente elétrica utilizável. Alguns materiais e polímeros podem ser utilizados como HTL, tais como o poli[bis(4-fenil)(2,4,6-trimetilfenil)amina (PTAA), PEDOT:PSS e Spiro-OMeTAD (SHEN *et al.*, 2022).

3.3.5. Contato elétrico

O contato elétrico desempenha um papel fundamental na extração e na coleta de cargas elétricas, garantindo a continuidade do circuito elétrico (NYIEKAA *et al.*, 2024). As principais características dos contatos elétricos de alto desempenho incluem: (i) baixa resistência, reduzindo a perda de tensão em circuito aberto; (ii) alta condutividade e elevada atividade catalítica. Os metais mais utilizados são prata e ouro (DAWO *et al.*, 2023).

3.4. Princípio de funcionamento de células solares

O princípio de funcionamento de uma célula solar baseia-se no efeito fotovoltaico, descoberto em 1839 pelo físico francês Alexander Becquerel. O efeito inicia-se com a incidência de radiação eletromagnética, a partir disso, formam-se pares de elétrons e buracos nas heterojunções fotossensíveis. Em seguida, a diferença de potencial da junção faz com que os pares sejam separados por ação de um campo elétrico aplicado sobre eles (ZOU *et al.*, 2020). Como consequência os elétrons gerados são injetados na banda de condução da ETL, enquanto os buracos gerados são injetados na banda de valência da HTL. As cargas são extraídas até os contatos frontal e traseiro do dispositivo, e conduzidas a um circuito externo, gerando corrente elétrica e, consequentemente, trabalho elétrico, conforme ilustrado na Figura 4 (YAO *et al.*, 2019).

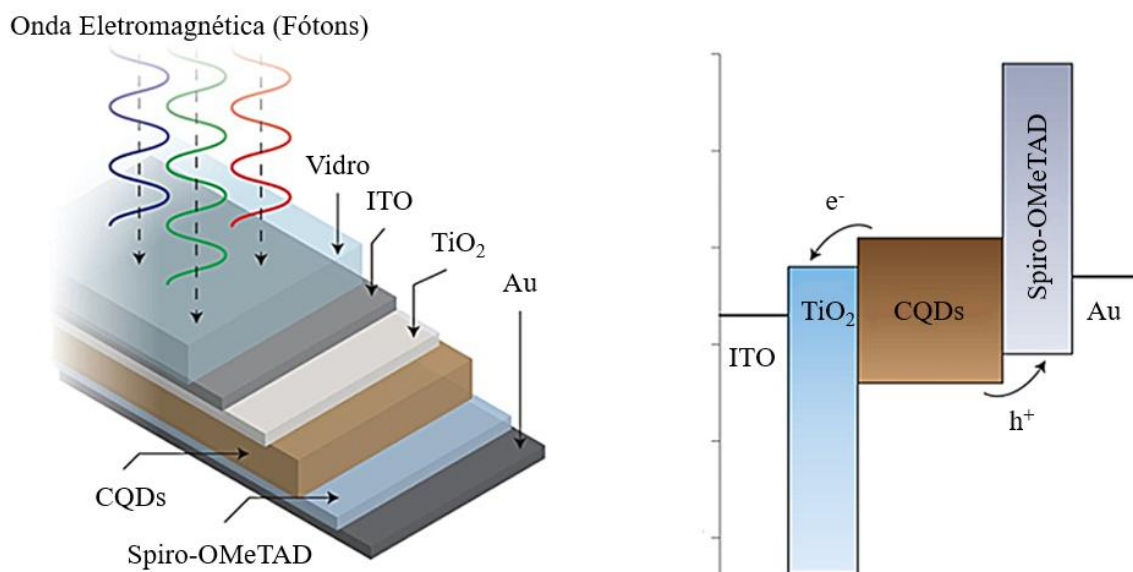


Figura 4: Estrutura de células solares de pontos quânticos.

Fonte: Adaptado de Dhingra e colaboradores (2016)

3.5. Técnicas de caracterização de células solares

Os principais parâmetros que são usados para definir a eficiência de conversão (η) das células solares são a tensão de circuito aberto (V_{oc}), densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}) e fator de preenchimento (FF), esses parâmetros são obtidos a partir das curvas de corrente vs tensão (I - V) representado na Figura 5, que ao medir podemos simular o comportamento da célula solar em aplicação real, podendo ser medido a partir de um potenciostato em conjunto com um simulador solar (KARIM *et al.*, 2018).

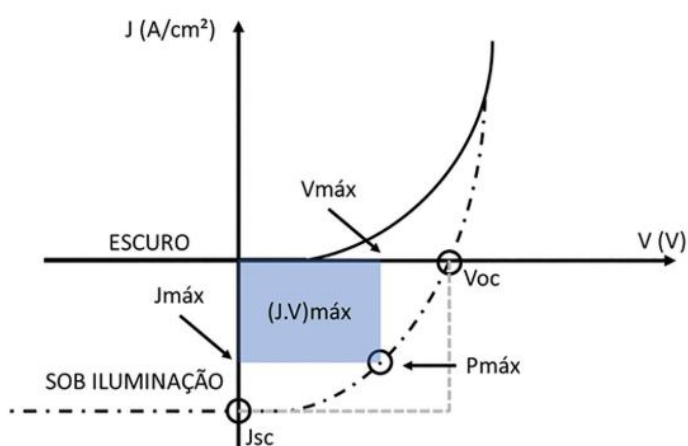


Figura 5: Curva J-V no escuro e sob iluminação.

Fonte: Adaptado de Rosa e Toledo (2021)

O J_{sc} representa a corrente produzida pelo dispositivo exclusivamente devido à absorção de fótons incidentes, sem a aplicação de tensão externa. Já o V_{oc} corresponde à diferença de potencial entre os eletrodos da célula solar (ROSA; TOLEDO, 2021).

O FF (1) é o parâmetro que avalia a qualidade inerte de uma célula solar, em que V_{max} e J_{max} correspondem aos valores de tensão e densidade de corrente máximos do dispositivo, respectivamente (DEVADIGA *et al.*, 2021).

$$FF = \frac{V_{max} \times J_{max}}{V_{oc} \times J_{sc}} \quad (1)$$

O η (2) é um parâmetro que indica sua capacidade de conversão de energia, ela é determinada pela razão entre a potência máxima gerada pela célula e a intensidade da luz incidente (P_{in}) no dispositivo. Em condições padrão, temos 100 mW cm^{-2} de potência de luz incidente. (PAZOKI *et al.*, 2017).

$$\eta = \frac{V_{oc} \times J_{sc} \times FF}{P_{in}} \times 100\% \quad (2)$$

3.6. Dióxido de Titânio (TiO_2)

O dióxido de titânio pode ser encontrado em três fases, anatase, rutilo e brookita (SHAH *et al.*, 2023). A fase anatase destaca-se por sua maior eficiência em diversas aplicações, como fotocatalise, sensores e células solares, quando comparada às fases rutilo e brookita. No entanto, a fase rutilo apresenta vantagens significativas, incluindo maior estabilidade química, índice de refração mais elevado e menor custo de produção, tornando-se uma alternativa viável em determinadas aplicações. Já a fase brookita é a menos explorada, devido às dificuldades associadas à obtenção de sua forma pura (GARCÍA-CONTRERAS *et al.*, 2022).

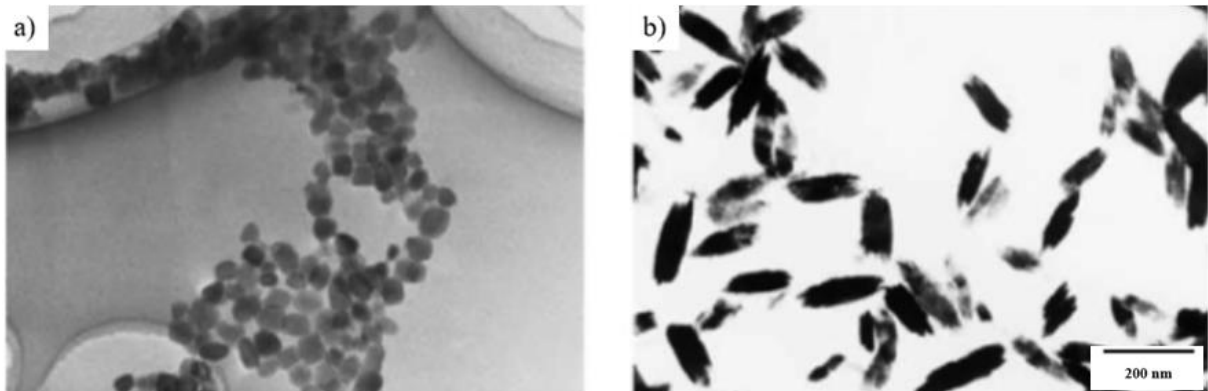


Figura 6: Imagens TEM de nanopartículas uniformes de TiO_2 anatase sintetizadas pelo método sol-gel

Fonte: Reproduzido de Chen e colaboradores (2007)

Esse material pode ser sintetizado por vários métodos, tais como sol-gel, micela, micela inversa, hidrotermal, solvotermal, oxidação direta, deposição química de vapor, sonoquímica, microondas e entre outros. O método sol-gel é um processo versátil amplamente empregado na fabricação de diferentes materiais cerâmicos, no qual uma suspensão coloidal, denominada sol, é formada a partir de reações de hidrólise e polimerização de precursores, geralmente sais metálicos inorgânicos ou compostos organometálicos, como alcóxidos metálicos, sendo que a polimerização completa associada à perda de solvente promove a transição do sistema de um sol líquido para uma fase de gel sólido. A Figura 6 apresenta uma imagem de TEM de nanopartículas de TiO₂ obtidas pelo método sol-gel (CHEN; MAO, 2007).

3.7. Pontos quânticos (QDs)

Os QDs foram descobertos na década de 1980 por Alexei Ekimov. Essas nanopartículas, com dimensões geralmente inferiores a 10 nm, apresentam ligantes de superfície, biomoléculas ligadas à superfície do ponto quântico para controlar sua solubilidade e funcionalidade. Na estrutura dos QDs temos a casca (do inglês: *Shell*) que tem como função proteger a parte interna dos QDs e o Núcleo (do inglês: *Core*) que é a região central composta por um material semicondutor onde ocorre o confinamento quântico dos elétrons e lacunas, conforme ilustrado na Figura 7 (SAHU; KUMAR, 2022; YADAV *et al.*, 2023). Dependendo do material do núcleo, os QDs podem ser classificados em metálicos, como à base de prata e índio, não metálicos, à base de carbono e silício, além de QDs compostos e outras variações (LIU; TANG, 2020).

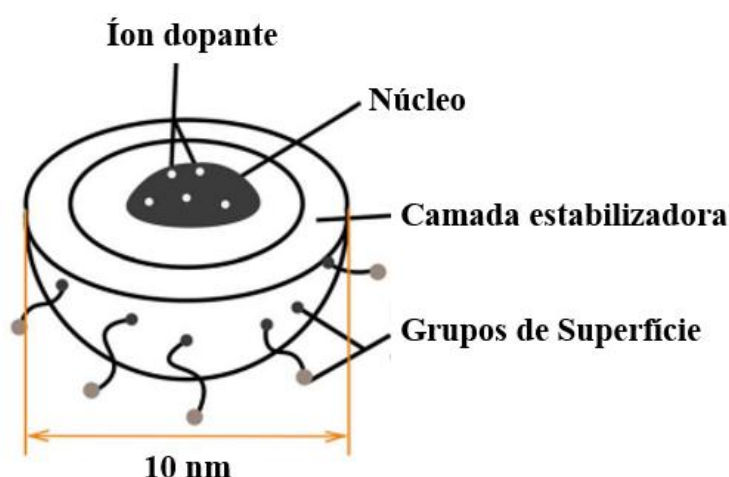


Figura 7: Estrutura dos QDs.

Fonte: Adaptado de Sun e colaboradores (2024)

Esses materiais fotocatalíticos são amplamente reconhecidos e aceitos devido à sua alta estabilidade química, baixa sensibilidade, baixa toxicidade e excelentes propriedades ópticas. Dentre suas propriedades, destacam-se a fotoluminescência, o amplo espectro de excitação, o espectro de emissão estreito, a elevada intensidade de fluorescência, além da notável estabilidade e resistência ao fotobranqueamento. O espectro de emissão e absorção pode abranger a região visível, devido a modificações no tamanho e nos ligantes de superfície dos QDs (WANG *et al.*, 2022).

Os QDs têm sido usados em diversas aplicações ambientais, como fotocatalise, sensores ópticos, diodos emissores de luz e células solares (MANIKANDAN; LEE, 2022). Nas células solares, os QDs são empregados como material fotoativo devido ao seu bandgap de energia ajustável, que abrange a faixa ótima para células solares de junção única e múltiplas (CHUANG *et al.*, 2014).

3.7.1. Pontos quânticos de carbono (CQDs)

Os CQDs foram descobertos acidentalmente por Xu e colaboradores (2004), desde então, tornaram-se uma nova classe de nanopartículas à base de carbono. Esse nanomaterial apresenta uma morfologia quase esférica, com tamanhos entre 1 nm e 10 nm (KAUR *et al.*, 2022). Esta delimitação de tamanho é devida à limitação do tempo de vida do éxciton, tamanhos de domínio em nanoescala de ~ 10 nm que correspondem ao comprimento de difusão do éxciton são necessários para uma difusão eficiente (CUI; LI, 2021).

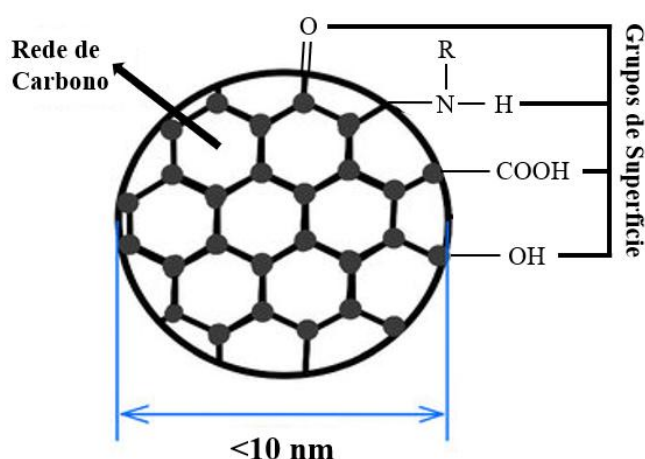


Figura 8: Composição estrutural dos CQDs.

Fonte: Adaptado de Sun e colaboradores (2024)

Sua estrutura é composta por um núcleo de carbono amorfo (mistura de sp^2/sp^3) ou semelhante ao grafite (sp^2), enquanto sua superfície é recoberta por diversos grupos funcionais,

conforme ilustrado na Figura 8 (DUA *et al.*, 2023). A composição e características desses grupos estão diretamente relacionadas à técnica de síntese empregada e aos materiais de partida utilizados (ROCCO *et al.*, 2023).

Devido à facilidade de fabricação por meio de protocolos de síntese verde e à abundância de matérias-primas, os CQDs têm mostrado perspectivas promissoras de aplicação em diversos campos, como a medicina, a química e o meio ambiente (PANG *et al.*, 2022). Além disso, os CQDs apresentam propriedades interessantes, como excelente fotoluminescência, boa fotoestabilidade, alta inércia química e excelente dispersibilidade em meios aquosos e orgânicos. Esses nanomateriais fluorescentes podem ser derivados de vários materiais de carbono, como grafeno, fulereno e outros materiais orgânicos (RASAL *et al.*, 2021).

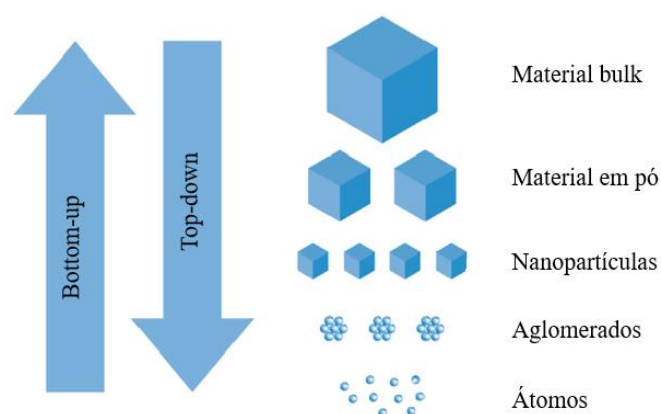


Figura 9: Métodos de síntese de pontos quânticos

Fonte: Adaptado de Aparício e colaboradores (2025)

Os métodos de síntese de CQDs geralmente são classificados como *top-down* e *bottom-up*. Em geral, o método *top-down* normalmente utiliza materiais maciços como precursor e obtém CQDs por meio de corrosão química, irradiação de microondas, tratamento ultrassônico, método eletroquímico e outros métodos. Os CQDs também podem ser sintetizados quimicamente a partir de pequenos precursores orgânicos por meio de uma estratégia de síntese *bottom-up*, que consiste na formação de nanopartículas por agregação controlada de átomos ou moléculas, que se auto-organizam para originar a estrutura final desejada, conforme ilustrado na Figura 9 (XU *et al.*, 2022).

Esse nanomaterial pode ser produzido a partir de uma variedade de fontes naturais de carbono (ácido cítrico, ácido ascórbico e glicose), incluindo fontes de carbono inorgânico (nanotubos de carbono e grafite) e de biomassa (folhas, cascas de árvores e frutos). Dependendo

da fonte de carbono, observa-se um efeito significativo nas propriedades dos CQDs, podendo variar a estrutura química e propriedades ópticas (ZHAO *et al.*, 2023).

3.7.2. Síntese solvotermal de CQDs

A síntese de CQDs pelo método solvotermal utiliza uma autoclave de cilindro de aço de paredes espessas, capazes de suportar altas temperaturas e pressões elevadas, juntamente com um copo de teflon que protege a autoclave da corrosão e mantém o ambiente fechado. Deste modo, as moléculas precursoras são dissolvidas em solvente, colocadas na autoclave a alta temperatura e pressão por um tempo determinado (HUO *et al.*, 2023).

Nesses métodos, precursores orgânicos de baixo peso molecular ou polímeros são tipicamente dissolvidos em meio aquoso ou em solventes orgânicos. Em seguida os precursores passam por tratamento térmico, para induzir a formação de núcleos de carbono, que atuam como sítios para o crescimento controlado dos CQDs. Para induzir mudanças dos grupos funcionais de superfície, diferentes solventes podem ser empregados durante a síntese (ELUGOKE *et al.*, 2024).

Os CQDs obtidos por meio do tratamento solvotérmico apresentam diversas propriedades interessantes, como alta homogeneidade, solubilidade em água, monodispersidade e fotoestabilidade. Na síntese deste nanomaterial várias moléculas precursoras podem ser utilizadas, como proteínas, polímeros, aminoácidos, polióis, glicose, alguns resíduos e produtos de origem vegetal (folhas, frutos, cascas e pigmentos naturais) (YADAV *et al.*, 2023).

3.8. Açaí (*Euterpe precatoria*)

O açaizeiro como demonstrado na Figura 10 (a) é uma espécie amplamente distribuída na América Latina, com maior concentração no bioma amazônico. O Brasil se destaca como o principal produtor mundial de frutos dessa palmeira (SILVA *et al.*, 2020). A espécie *Euterpe precatoria* possui um estipe solitário, cilíndrico e liso, de coloração cinza, podendo atingir até 20 m de altura e 16 cm de diâmetro. Seus frutos, conforme ilustrado na Figura 10 (b) são sésseis, do tipo drupa, esféricos, apresentam coloração preto-púrpura quando maduros e ficam agrupados em cachos (AGUIAR; MENDONÇA, 2003).



Figura 10: a) Açaizeiro (*Euterpe precatoria*) e b) Fruto do Açaí

Fonte: Próprio autor, 2024.

O fruto açaí é amplamente reconhecido por seu alto valor nutricional e pelos benefícios à saúde. Nos últimos anos, o consumo de açaí tem crescido significativamente, impulsionando a expansão da cadeia produtiva da região (OLIVEIRA *et al.*, 2025). O açaí amazônico destaca-se pela presença de substâncias bioativas, como compostos fenólicos, flavonoides e antocianinas (YAMAGUCHI *et al.*, 2015).

3.8.1. Antocianinas

As antocianinas são um dos principais compostos bioativos presentes na polpa do açaí, e são classificadas como polifenóis pertencentes ao grupo dos flavonoides. Trata-se de pigmentos hidrossolúveis responsáveis por colorações que variam entre tons de vermelho, azul e roxo, cuja intensidade está diretamente relacionada à concentração desses compostos na matéria-prima.

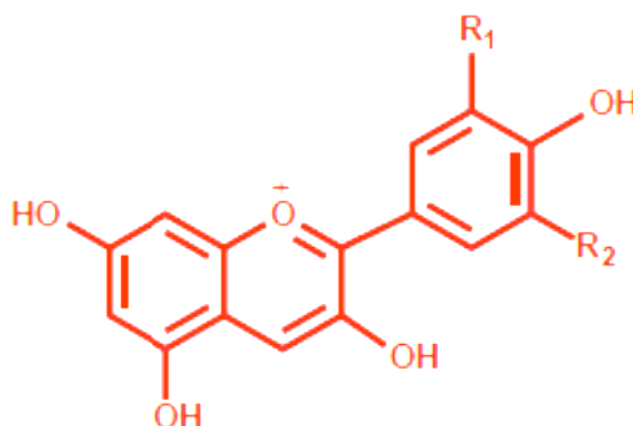


Figura 11: Estrutura molecular principal das antocianinas

Fonte: Adaptado de Silva e colaboradores (2018)

Esses compostos apresentam picos de absorção característicos, com máximo em torno de 540 nm, atribuídos às transições eletrônicas π - π^* de sua estrutura (SONAI *et al.*, 2015). A Figura 11 evidencia a estrutura molecular principal das antocianinas que consiste em um 2-fenilbenzopirílio(flavílio) esqueleto heterocíclico C-15 (antocianidina) contendo -OH ou grupos -OCH₃, além de dois radicais responsáveis pela classificação da antocianina, apresentado na Tabela 3 (ROSSI *et al.*, 2022).

Tabela 3: Radicais dos tipos de Antocianinas

Antocianinas	Radicais	
Pelargonidina	R ₁ = H	R ₂ = H
Malvidina	R ₁ = OCH ₃	R ₂ = OCH ₃
Petunidina	R ₁ = OCH ₃	R ₂ = OH
Peonidina	R ₁ = OCH ₃	R ₂ = H
Delfinidina	R ₁ = OH	R ₂ = OH
Cianidina	R ₁ = OH	R ₂ = H

Fonte: Adaptado de Silva e colaboradores (2018)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho foram: Frutos do Açaí (*Euterpe precatória*); autoclave com copo de teflon; filtros de seringa de fluoreto de polivinilideno (PVDF) 0,45 µm (Chromastore, 306095275); seringa de vidro (ArtiGlass, 1700513); substrato condutor flexível de ITO (Sigma, 639303), fita condutiva de 13 mm (Kapton).

4.2. Reagentes e soluções

Os reagentes e soluções utilizadas foram: 4-tertbutilpiridina (Sigma, 142379); Acetonitrila (Sigma, 34851); Água deionizada (Milli-Q); Bis(trifluorometanossulfonil)imida de lítio (Sigma, 792071); Clorobenzeno (Sigma, 319996); FK-209 (Sigma, 805386); Detergente Industrial Neutro (Sigma, 1.07553); Éter de Petróleo (Sigma, 184519); Isopropóxido de Titânio IV (Sigma, 87560); Spiro-OMeTAD (Sigma, 792071); Tolueno (Sigma, 179418).

4.3. Equipamentos

A caracterização por espectroscopia UV-Vis foi realizada no Laboratório de Abertura de Amostra e Ensaio Químicos – LAEQ da Divisão Central Analítica, utilizando o Espectrofotômetro UV-Vis (Thermo Scientific, Evolution 220). As caracterizações por espectroscopia FTIR e RAMAN foram realizadas no Laboratório de Espectroscopias Vibracionais - LABEV da Divisão Central Analítica, utilizando o Espectrofotômetro FTIR (Thermo Scientific, Nicolet iS10) e o Espectrofotômetro RAMAN (HORIBA Scientific, XploRA Plus), respectivamente.

As imagens de TEM e deposição catódica de ouro foram realizadas no Centro Multiusuário para Análise de Fenômenos Biomédicos - CMABio da Universidade do Estado do Amazonas, utilizando o Microscópio Eletrônico de Transmissão de 120 kV (Jeol, JEM-1400 Flash) e o Sputtering (Smart Coater, DII-29010SCTR), respectivamente. As análises de DRX foram coletadas na Central Analítica do Instituto Federal do Amazonas, utilizando o Difratorômetro (Shimadzu, XRD 7000).

Os materiais foram liofilizados no Laboratório de Cromatografia e Espectrometria de Massas – LABCEM da Divisão Central Analítica, utilizando o Liofilizador (Christ, Alpha 1-2 LD Plus). As soluções foram centrifugadas no Laboratório de Pesquisa de Físico-Química - LPFQ do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal do Amazonas, usando a Ultracentrífuga (Centrilab, TG16MW).

As caracterizações fotoelétricas das células, deposição de filmes finos, eletrodeposição foram realizadas no Laboratório de Bioeletrônica e Eletroanalítica – LABEL da Divisão Central Analítica, usando um *LED Driver Kit Optical Bench* (Metrohm, Autolab AUT.LEDKIT.S) acoplado a um potenciostato (Metrohm, Autolab, modelo PGSTAT128N). Além disso, foram usados outros equipamentos como *spin coater* (VTC-50A, 03040001-140), fonte de alimentação de corrente contínua (Agilent, E3616A), Agitador Magnético com Aquecimento (SOLAB, SL-91), Banho Ultrassônico (DEKEL, TS-218), Balança Analítica (BEL, M214Ai) e Impressora 3D (ELEGOO, Saturn 4 Ultra).

4.4. Seleção do material carbonáceo e solvente para obtenção dos CQDs

Inicialmente, realizou-se uma análise bibliográfica para avaliar os materiais empregados na síntese de CQDs. O principal critério para a seleção foi a capacidade de absorção na região do visível e condição de serem materiais que pudessem ser obtidos na floresta amazônica. A avaliação resultou na seleção de frutos de açaí e de jenipapo como candidatos potenciais a materiais precursores.

A definição do material carbonáceo e do solvente para a síntese final dos CQDs ocorreu através de análises de UV-Vis adaptando as metodologias dos itens 4.6 e 4.7.1. Foram avaliadas as combinações de açaí e jenipapo com os solventes isopropanol, piridina, etanol, acetonitrila e tolueno. O critério de escolha foi a combinação que apresentasse a maior absorbância deslocada para a região do visível, tendo em vista que para o melhor funcionamento de uma célula solar, o material deve absorver luz nessa região do espectro eletromagnético.

4.5. Obtenção dos frutos (*Euterpe precatoria*)

As amostras de açaí foram coletadas no município de Coari no estado do Amazonas, nas coordenadas (-4.1194976, -63.0383884). O açaí foi obtido da palmeira *Euterpe precatoria*. A seleção dos frutos foi realizada manualmente, descartando os verdes ou os que apresentavam defeitos estruturais. Os frutos obtidos foram transferidos para o freezer, onde foram estocados a temperaturas próximas de -18 °C (VASCONCELOS *et al.*, 2006).

4.6. Síntese de pontos quânticos de carbono (CQDs)

Inicialmente o pigmento foi extraído em água utilizando um agitador magnético com aquecimento a 80 °C por 1 h. Em seguida o pigmento foi submetido à liofilização por 72 h para a remoção da umidade residual. As soluções de CQDs foram obtidas por meio do processo solvotermal, conforme a Figura 12 (a), utilizando 2 g do pigmento previamente liofilizado e 20

mL do solvente, neste caso o tolueno. A mistura foi então transferida para uma autoclave de aço inoxidável, contendo um recipiente interno de teflon de 50 mL e submetida a aquecimento em estufa a 180 °C por 12 h, o que promoveu a formação dos CQDs (PANG *et al.*, 2022).

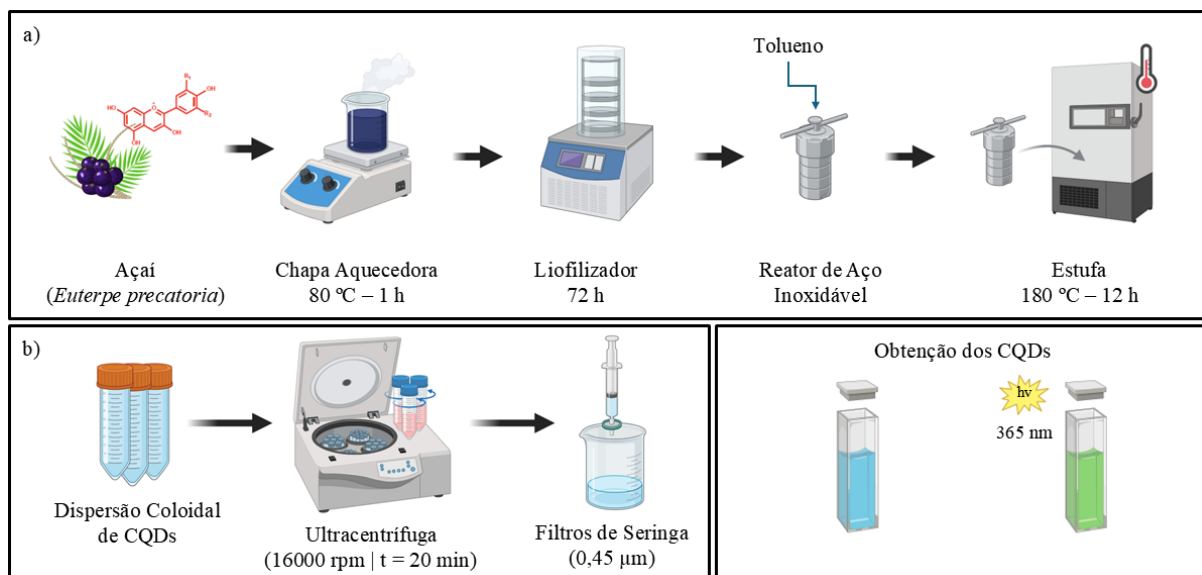


Figura 12: Diagrama esquemático da síntese de CQDs a partir da polpa e do pigmento do fruto de *Euterpe precatoria*. a) Síntese solvotérmica dos CQDs; b) Processo de centrifugação e filtração da dispersão coloidal obtida.

Após a síntese, a solução de CQDs foi submetida a centrifugação a 16.000 rpm por 20 minutos, com o objetivo de separar os resíduos orgânicos da solução coloidal de CQDs. Em seguida, a solução foi filtrada com filtros de seringa com poro de 0,45 µm e uma seringa de vidro de 50 mL, a fim de remover impurezas particuladas e obter uma dispersão homogênea dos CQDs, conforme a Figura 12 (b).

4.7. Métodos de caracterização dos pontos quânticos de carbono

4.7.1. Espectroscopia no ultravioleta-visível (UV-Vis)

Para a aquisição dos dados de UV-Vis, inicialmente foi coletado o branco com tolueno e, em seguida, foi realizada a análise da amostra de CQDs. Na aquisição dos dados foi realizada uma varredura entre 190 e 800 nm, com resolução de 1 nm.

4.7.2. Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

Para a aquisição dos dados no infravermelho, inicialmente, foi coletado o branco com tolueno. Para a amostra, uma pequena quantidade de CQDs foi gotejada sobre pastilha de KBr, colocada na estufa a 50 °C por 10 min, e finalmente os espectros coletados entre 500 e 4000 cm⁻¹, com resolução de 1 cm⁻¹.

4.7.3. Espectroscopia de espalhamento vibracional RAMAN

As análises de espectroscopia Raman foram realizadas em um espectrômetro RAMAN no modo regular. Como fonte, foi usada a linha de 785 nm de um laser de diodo pulsado com intensidade de 3,5%. O feixe de laser foi focalizado com uma objetiva Olympus de alta qualidade, com ampliação de 10x. Os espectros dos CQDs estudados foram coletados na faixa de 1000-2000 cm^{-1} . A razão I_D/I_G foi calculada a partir da expressão na (3), em que valores superiores a 1 indicam maior desordem estrutural e ruptura da hibridização sp^2 , enquanto valores inferiores a 1 refletem menor quantidade de defeitos e melhor organização gráfica.

$$I_D/I_G = \frac{\text{intensidade da banda D}}{\text{intensidade da banda G}} \quad (3)$$

4.7.4. Microscopia eletrônica de transmissão (TEM) e Espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS)

O TEM foi utilizado para analisar a morfologia, a dispersão e a distribuição estatística das dimensões dos CQDs. As amostras foram antecipadamente diluídas e submetidas a sonicação em pulso por 10 minutos para dispersar as nanopartículas. Em seguida, uma gota da solução foi depositada sobre um *grid* de cobre e deixada para secar à temperatura ambiente. As imagens foram adquiridas com resolução de linha de 20-200 nm e potencial de 80 kV, juntamente com o EDS. A análise morfológica e a medição do tamanho das partículas foram realizadas com base em imagens obtidas por TEM. Para a quantificação do tamanho médio e da distribuição de partículas, utilizou-se o software MATLAB (Versão R2024b, maio de 2025).

4.8. Síntese de nanopartículas de dióxido de titânio (TiO_2)

As nanopartículas de TiO_2 foram obtidas pelo método sol-gel a partir de isopropóxido de titânio IV, isopropanol e água deionizada conforme a Figura 13 (a). Inicialmente, preparou-se uma solução na proporção 1:1 (V/V), misturando 5 mL de isopropanol e 5 mL de isopropóxido de titânio IV. A solução foi então adicionada, gota a gota, a 20 mL de água deionizada sob agitação ultrassônica (ULLATTIL; PERIYAT, 2017).

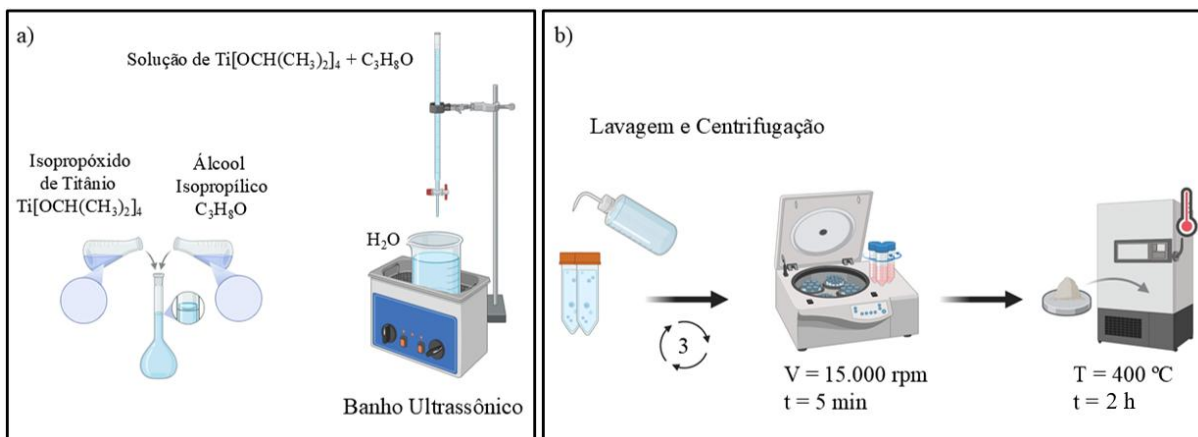


Figura 13: Diagrama da síntese de TiO_2 . a) Preparo da Solução e síntese via sol-gel; b) Lavagem, centrifugação e tratamento térmico.

A solução de nanopartículas de TiO_2 foi centrifugada a 15.000 rpm por 5 min e lavada com água deionizada. O procedimento foi repetido três vezes para purificação completa. Visando à indução de possíveis transformações estruturais e cristalográficas no material, o material obtido foi submetido a um tratamento térmico em mufla a $400 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 2 h conforme a Figura 13(b) (DUBEY *et al.*, 2019).

4.9. Métodos de caracterização do TiO_2

4.9.1. Difração de raios X (DRX) e refinamento estrutural de Rietveld

Inicialmente, o TiO_2 foi macerado em um almofariz de ágata com pistilo para obter um pó homogêneo, e o material resultante foi transferido para o porta amostra de aço inoxidável, garantindo uma distribuição homogênea para as análises. Os padrões de DRX foram adquiridos utilizando um difratômetro equipado com radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,54184 \text{ nm}$), operando com corrente de 14 mA, à temperatura ambiente. A análise foi realizada no intervalo de 10° a 80° (2θ), com um passo de varredura de 2° por minuto.

O software FullProf Suite (Versão 5.20, dezembro de 2023) foi utilizado no refinamento estrutural de Rietveld para calcular os parâmetros de rede e quantificar as fases presentes no material. Durante a análise, a função Pseudo-Voigt foi utilizada para ajustar os picos de difração do TiO_2 , foram refinados os parâmetros de rede (a , b e c) e coordenadas atômicas (x , y e z) e os parâmetros FWHM foram refinados usando a função de Caglioti (BERNARDES *et al.*, 2023; BOSE *et al.*, 2003). Para a amostra, foram calculados os parâmetros de rede e as porcentagens das fases cristalinas presentes no pó de TiO_2 , utilizando os padrões do Base de Dados de Estrutura Cristalina Inorgânica (do inglês: *Inorganic Crystal Structure Database*) ICSD nº 82082 para a fase anatase e ICSD nº 36408 para a fase brookita.

Os tamanhos dos cristalitos foram calculados usando a equação de Scherrer (4) a partir do picos de difração (ABOULOARD *et al.*, 2020). Inicialmente, foram realizados os cálculos para cada um dos picos de difração, em seguida foi determinada a média e o desvio padrão populacional, utilizando o aplicativo OriginPro (Versão 10.2.0.196, 2025).

$$D_{hkl} = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4)$$

4.10. Montagem das células solares

4.10.1. Corte do substrato de óxido de índio dopado com estanho (ITO)

Primeiramente, o substrato de ITO flexível foi cortado em dimensões de 2x3 cm, o corte foi realizado pelo lado não condutivo. Para garantir precisão geométrica e reprodutibilidade do processo, foi utilizada uma máscara confeccionada por impressão 3D, que serviu como guia durante o corte.

4.10.2. Produção das máscaras

As máscaras foram projetadas pelo colaborador Rodrigo Szostak, do Laboratório Nacional de Luz Sincrotron, utilizando o software Autodesk AutoCAD (2026 Edition). Posteriormente, foram realizadas adaptações para impressão em impressora 3D de resina de alta resolução (Eleego Saturn 16K, 4 Ultra).

4.10.3. Gravação da área de condução do substrato

Inicialmente foi preparada uma solução de HCl 4 mol L⁻¹, então foi preparada uma máscara utilizando fita Kapton de 13 mm conforme a Figura 14.

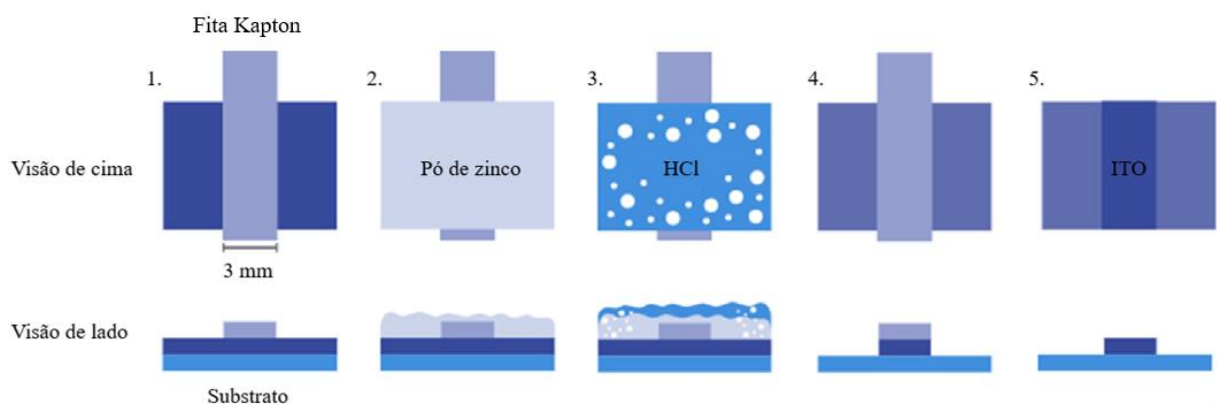


Figura 14: Gravação ácida de uma faixa de ITO pelo processo litográfico, utilizando pó de zinco e ácido clorídrico.

Para o processo de gravação química, foram aplicados 2 g de pó de zinco e posteriormente foram adicionados 3 mL de solução de HCl 4 mol L⁻¹ sobre o substrato de ITO de flexível previamente protegido pela máscara de fita, conforme ilustrado na Figura 14. Mediante a esse processo foi possível remover seletivamente a camada de ITO apenas nas regiões não cobertas pela fita, criando uma trilha isolante nas áreas não protegidas pela fita e garantindo a definição adequada do padrão desejado.

4.10.4. Limpeza do substrato de óxido de índio dopado com estanho (ITO)

Inicialmente, o ITO foi lavado com água deionizada para remover de resíduos de pó de zinco. Em seguida, o lado condutivo do substrato foi cuidadosamente limpo com o auxílio de uma escova de cerdas finas, utilizando uma solução aquosa de sabão industrial a 2%. Posteriormente, o substrato foi colocado em um copo de 200 mL e completamente imerso na solução de sabão industrial a 2%, sendo então submetido a um banho ultrassônico por um período de 15 minutos, sem aquecimento. Após essa etapa, o substrato foi retirado da solução e lavado abundantemente com água deionizada, mantendo sempre o lado com ITO voltado para cima.

Na sequência, o substrato foi imerso novamente em água deionizada e submetido a um novo banho ultrassônico por 15 minutos. Em seguida, a água foi removida e o substrato foi coberto com acetona, e o substrato foi submetido ao banho ultrassônico por mais 15 min, sem aquecimento. Após a remoção da acetona, o substrato foi imerso em isopropanol e submetido a um banho ultrassônico por 15 minutos. Por fim, o substrato foi enxaguado com isopropanol e seco rapidamente com jato de nitrogênio, garantindo a limpeza adequada da superfície para as etapas subsequentes.

4.10.5. Eletrodeposição da camada semicondutora de TiO₂

Para a obtenção do filme de nanopartículas de TiO₂ foi utilizada a técnica de eletrodeposição. Primeiramente, a área de deposição foi delimitada com uma máscara de fita. Em seguida, o substrato foi imerso em uma dispersão de 0,3 g de TiO₂, preparada em 10 mL etanol e submetido a uma tensão de 10 V por 5 s para a formação da fina camada de TiO₂.

4.10.6. Deposição da camada fotoativa de CQDs

Inicialmente, a amostra foi submetida a um jato de nitrogênio (N₂) comprimido para a remoção de eventuais partículas de poeira presentes na superfície. Em seguida, aproximadamente 50 µL da solução de CQDs foram dispensados sobre o substrato.

Posteriormente, o aplicador de N₂ foi posicionado acima do substrato e, na seguida, iniciou-se a rotação do *spin coater* com diferentes velocidades conforme a Tabela 4 por 20 s, visando identificar a velocidade capaz de garantir uma distribuição uniforme e reprodutível da célula solar.

Tabela 4: Identificação das amostras e velocidade de rotação durante a deposição da camada fotoativa.

Identificação da amostra	Velocidade de rotação durante a deposição dos CQDs
CQDs_01	1000
CQDs_02	2000
CQDs_03	3000
CQDs_04	4000
CQDs_05	5000

4.10.7. Preparo e deposição da camada transportadora de buracos

Inicialmente foi preparada a solução transportadora de buracos, misturando 72,3 mg de Spiro-OMeTAD, 1 mL de clorobenzeno, 27 µL de 4-tertbutilpiridina 98%, 17 µL da solução feita a partir de 520 mg de sal de bis(trifluorometanossulfonil)imida de lítio e FK-209 em 1 mL de acetonitrila. Após a deposição da camada fotoativa, a solução transportadora de buracos foi aplicada por *spin coating*. Para isso, 50 µL da solução foram gotejados sobre a camada de CQDs, e o substrato foi submetido a rotação de aproximadamente 4000 rpm por 20 s.

4.10.8. Deposição catódica do ouro

Inicialmente, o substrato foi recoberto com uma máscara confeccionada por impressão 3D. Em seguida, realizou-se a deposição catódica de ouro por um período de 6 minutos utilizando o *sputtering* sob vácuo, visando a formação do contato elétrico superior da célula.

4.11. Caracterização fotoelétrica dos dispositivos fotovoltaicos

As medidas fotoelétricas foram realizadas utilizando um potenciostato acoplado a um simulador solar, sob condições de iluminação padrão de 100 mW cm⁻². O equipamento foi configurado para a análise de dispositivos com área fotoativa de 0,16 cm², sendo o potencial analisado no intervalo de 0 a 1,2 V. Todas as medidas foram realizadas sem controle das condições ambientais.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Pontos quânticos de carbono (CQDs)

5.1.1. Fluorescência e estabilidade coloidal

Os CQDs obtidos apresentaram emissão de fluorescência na cor verde, sob excitação a 365 nm conforme a Figura 15 (a), o que confirma as propriedades fotoluminescentes desse nanomaterial. Esta emissão colorida pode ser atribuída a uma combinação de fatores como, efeitos de confinamento quântico, presença de grupos funcionais e defeitos na superfície dos CQDs. Todavia, este fenômeno pode estar associado à presença de grupos orgânicos que promovem centros de captura para éxcitons, originado à fluorescência, que é relacionada com o estado de superfície da nanopartícula (WANG *et al.*, 2019).

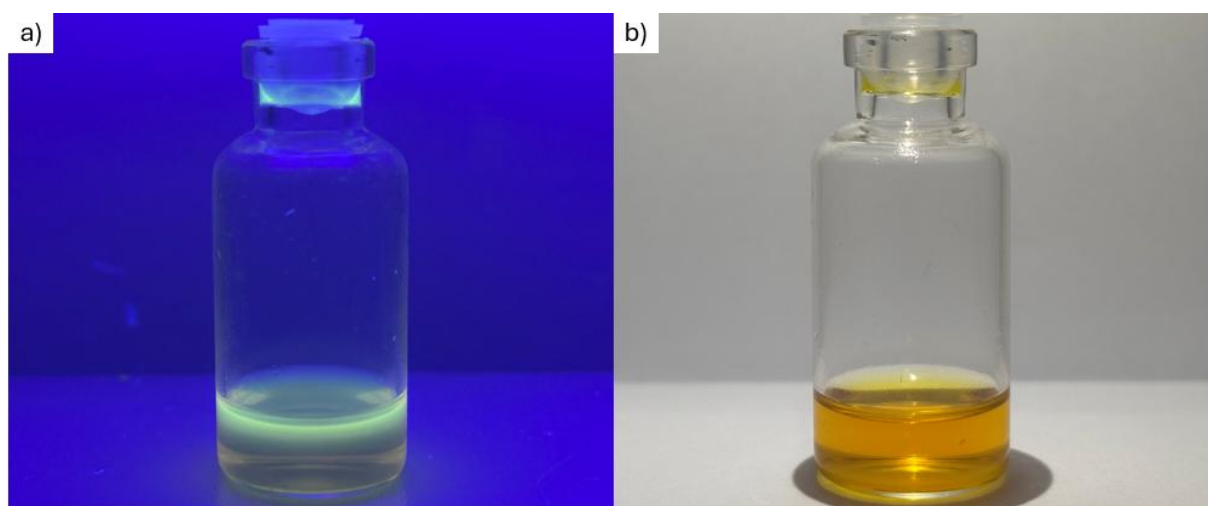


Figura 15: Imagem da solução de CQDs após 180 dias de armazenamento a) sob luz UV (365 nm) e b) sob luz ambiente.

A dispersão aquosa dos CQDs obtidos apresentou elevada estabilidade coloidal, mantendo-se homogênea e sem evidências de precipitação mesmo após 180 dias de armazenamento, conforme mostrado na Figura 15 (b). A estabilidade pode ser atribuída a vários fatores como a presença de grupos funcionais de superfície, o pH e a temperatura de síntese do material (DUA *et al.*, 2023).

5.1.2. Espectroscopia de UV-Vis

A caracterização por UV-Vis foi empregada para investigar detalhadamente as propriedades óticas e as transições eletrônicas dos CQDs, permitindo analisar seus perfis de absorção, a interação com a radiação eletromagnética e avaliar a viabilidade de aplicação dos CQDs em células solares.

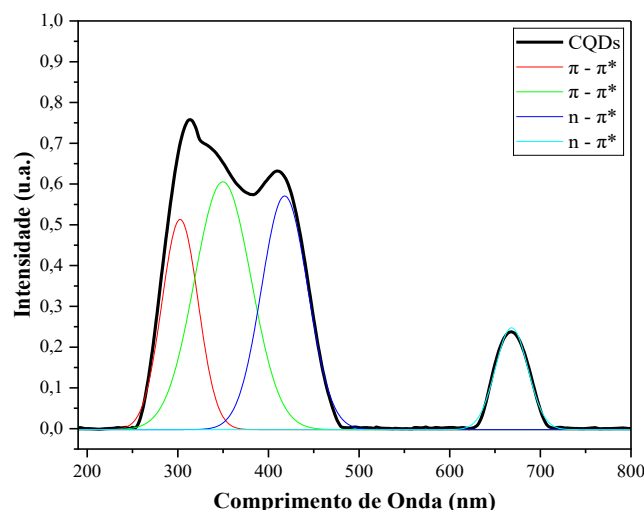


Figura 16: Espectro da análise de UV-Vis dos CQDs.

O espectro exibido na Figura 16, apresentam absorção no comprimento de onda entre 250 e 375 nm que é atribuída as transições $\pi - \pi^*$, associada a hibridização sp^2 das ligações duplas carbono-carbono, no entanto, a absorção no comprimento de onda de 376 e 705 nm que é atribuída a transições $n - \pi^*$, que está associada a hibridização sp^3 padrão das ligações entre átomos de carbono e outros grupos funcionais, como átomos de nitrogênio ou oxigênio (JAVED; O'CARROLL, 2021).

5.1.3. Caracterização espectroscópica por FTIR e RAMAN

A caracterização por FTIR foi utilizada para obter informações sobre os grupos funcionais presentes na superfície e sobre as ligações químicas dos CQDs. O espectro exibido na Figura 17(a) apresenta larga banda de transmitância observada em 3660 cm^{-1} está associada ao estiramento O-H, indicando a presença de grupos hidroxila (KHOJASTEH *et al.*, 2025). A banda em 2923 cm^{-1} e 2850 cm^{-1} , estão associada ao alongamento da banda de ligação C-H. As bandas em 1737 cm^{-1} e 1595 cm^{-1} confirmam a presença das ligações C=O e C=C, respectivamente. Além disso, as vibrações de flexão da ligação C-N podem estar associadas à banda em 1460 cm^{-1} . A banda em 1158 cm^{-1} é atribuída a vibração das ligações de C-O, indicando a presença de grupos carboxila (AMANCIO *et al.*, 2024). Enquanto o banda em 727 cm^{-1} é atribuída devido ao estiramento C=C, a banda é associada às transições $\pi \rightarrow \pi^*$ (sp^2) (FAWAZ *et al.*, 2023).

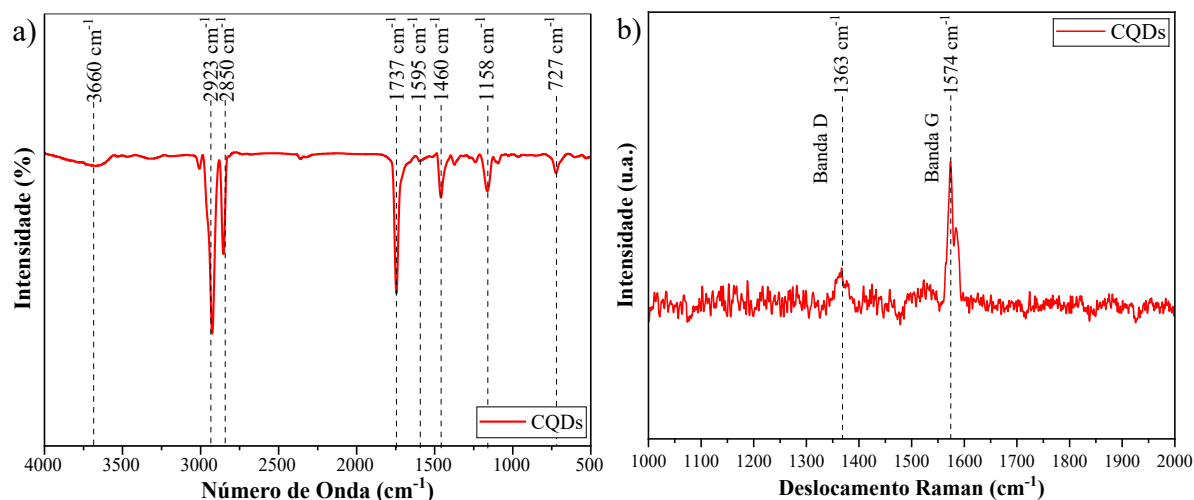


Figura 17: a) Espectros de FTIR e b) Raman dos CQDs.

A caracterização por Raman foi utilizada para fornecer informações sobre a estrutura e tipo de carbono presente no nanomaterial. A Figura 17(b) apresenta a banda D, em 1363 cm^{-1} associada a modos vibracionais que indicam desordem estrutural gráfitica do material, como ligações sp^3 , grupos funcionais de superfície alifáticos, oxigenados ou defeitos na rede (ATEIA *et al.*, 2024). A banda G, em 1574 cm^{-1} é atribuída à presença de domínios gráfiticos nos CQDs, o que corresponde aos modos de estiramento dos átomos de carbono sp^2 em anéis aromáticos (grafeno ou grafite) (SHAHADA *et al.*, 2025). No cálculo da razão I_D/I_G para os CQDs, a razão de 0,79 sugere a presença de um número significativo de defeitos ou de desordem na estrutura desse nanomaterial (TADESSE *et al.*, 2020).

5.1.4. Microscopia eletrônica de transmissão (TEM)

As imagens de TEM foram utilizadas para determinar a média de tamanho, a morfologia e a dispersão dos CQDs. A Figura 18 (a) exibe os resultados obtidos por TEM, os quais evidenciam que as nanopartículas de CQDs apresentam morfologia semiesférica bem uniforme e algumas com contornos irregulares, não foram observados agregados de nanopartículas, apresentando uma alta dispersão (DIAB *et al.*, 2025). A morfologia apresentada contribui para a maior estabilidade coloidal e estrutural das nanopartículas. Algo importante a salientar é que os CQDs obtido apresentaram eletrodensidade muito baixa, não sendo possível observar suas estruturas de rede internas do ponto quântico (SETIANTO *et al.*, 2024).

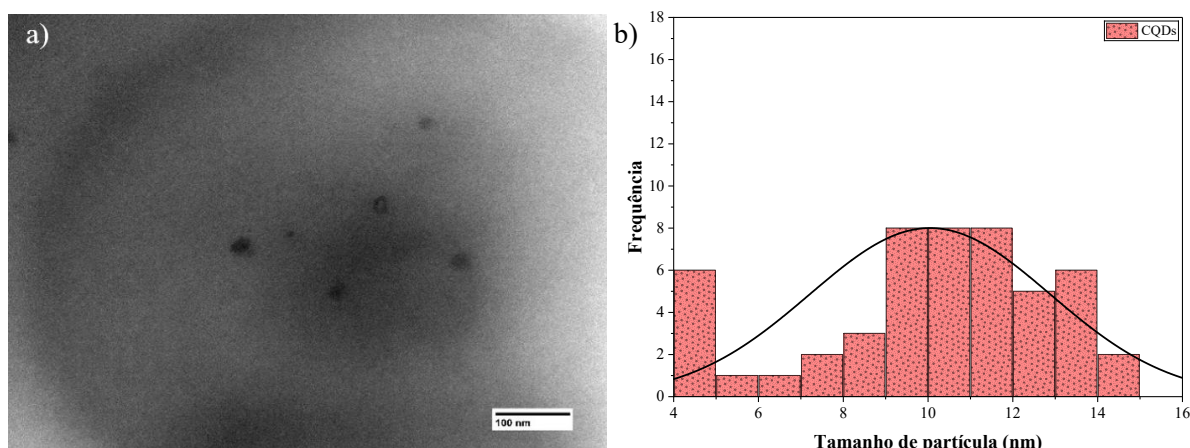


Figura 18: a) Imagem de TEM dos CQDs e b) histograma do tamanho de partículas.

A curva de distribuição do tamanho de partícula, apresentado na Figura 18 (b), corrobora com a afirmação com a média tamanho de partículas de CQDs, mostrando um tamanho médio de partícula de aproximadamente $10,04 \pm 2,83$ nm, essa uniformidade dimensional é essencial para garantir efeitos de confinamento quântico, os quais influenciam as propriedades ópticas e eletrônicas dos nanomateriais (SHESHMANI *et al.*, 2025).

5.1.5. Espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS)

O EDS foi utilizado para avaliar a composição química dos CQDs. Os espectros de EDS apresentados na **Figura 19** evidenciam a detecção dos elementos O, Na, Al, P, S, Cl, K, Ca e Fe, que podem ser atribuídos à composição bromatológica e química do açaí, caracterizada pela elevada presença de minerais (CARVALHO *et al.*, 2023).

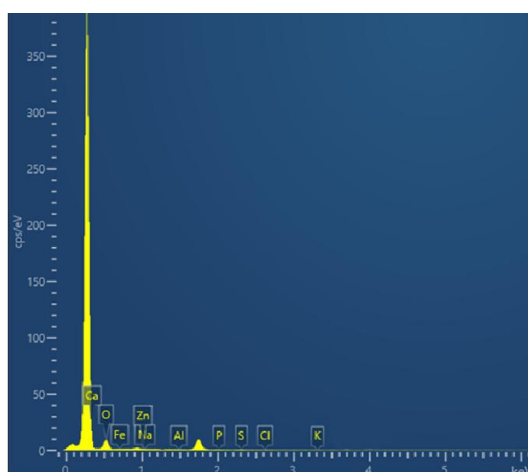


Figura 19: Espectro de EDS dos CQDs

O elevado teor de oxigênio conforme demonstrado na Tabela 5 está associado à presença abundante de grupos funcionais oxigenados na superfície dos CQDs, como

evidenciado pela espectroscopia FTIR, os quais se originam de lipídios, carboidratos, polifenóis e antocianinas presentes no açaí (YUYAMA *et al.*, 2011). Os minerais encontrados na estrutura dos CQDs, são importantes, pois aumentam a condutividade ao criar concentrações de portadores de carga, tornando-os ideais para uso em dispositivos que utilizam semicondutores, como células solares (MOHANDOSS *et al.*, 2026).

Tabela 5: Valores (%) do peso elementos encontrados nos CQDs

Elemento	Peso (%)
O	89,66
Na	0,21
Al	2,18
P	2,30
S	2,32
Cl	0,93
K	0,65
Ca	1,17
Fe	0,58

Nesta análise, não foi possível quantificar o teor de carbono das nanopartículas, uma vez que os *grids* utilizados durante o análise estavam revestidos por uma fina camada de carbono, o que interferiu diretamente na detecção e na quantificação do elemento na estrutura dos CQDs.

5.2. Dióxido de titânio (TiO₂)

5.2.1. Difração de raios X (DRX)

A difração de raios x e refinamento de Rietveld foram empregados para quantificar e identificar as fases cristalinas do TiO₂, além de calcular o tamanho de cristalito.

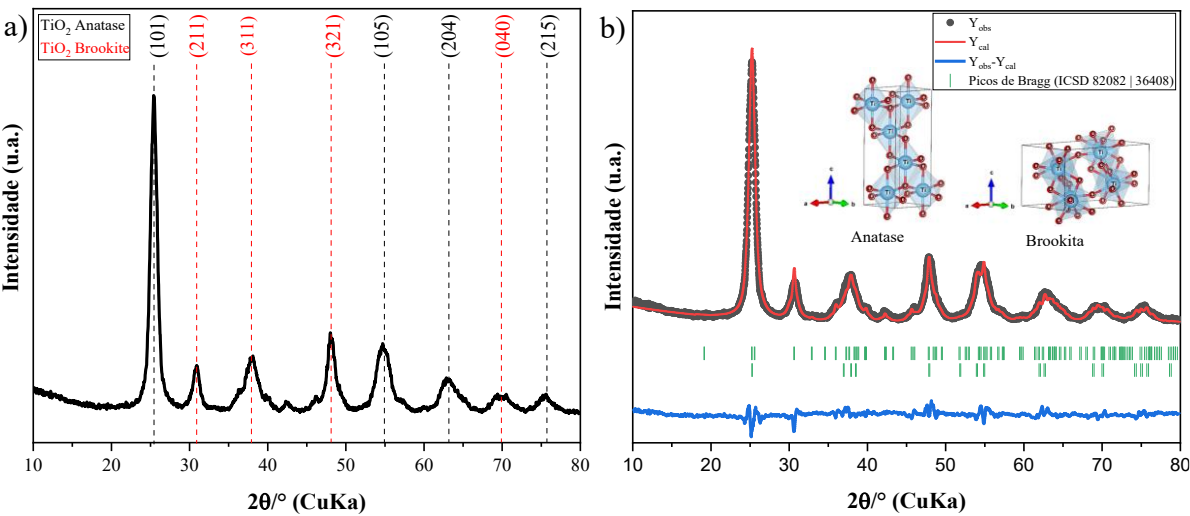


Figura 20: a) Padrão de DRX e b) refinamento estrutural de Rietveld para o TiO₂.

A Figura 20 apresenta o padrão de DRX do TiO₂. Os picos de difração observados em 25,45°, 54,94°, 63,18° e 75,74° correspondem aos planos *hkl* (101), (105), (204), e (215), respectivamente, característicos da fase anatase. Dentre esses, o pico mais significativo foi notado em 25,45°, atribuído ao plano *hkl* (101), de acordo com o cartão ICSD nº 82082 (JIANG *et al.*, 2019). Foram também identificados picos de difração característicos da fase brookita em 30,92°, 37,93°, 48,11° e 69,90° indexados aos planos *hkl* (211), (311), (321) e (040) respectivamente, de acordo com o padrão do cartão ICSD nº 36408 (LIU *et al.*, 2013).

O refinamento de Rietveld confirmou a obtenção do TiO₂ polimórfico, indicando a presença das fases anatase e brookita. A análise quantitativa revelou que a fase majoritária é a anatase, com fração de 56,28%, enquanto a brookita corresponde a 43,72%. Observou-se que as maiores atividades fotocatalíticas ocorrem em composições em que a fração de anatase se aproxima de 55%, sugerindo uma possível sinergia entre as fases cristalinas na otimização do desempenho fotocatalítico (SU *et al.*, 2011). Na Tabela 6 são apresentados os parâmetros de rede do refinamento e dos cartões cristalográficos das fases brookita e anatase do TiO₂.

Tabela 6: Parâmetros de rede (a, b, c e V) e parâmetros estatísticos (χ^2 e S), obtidos a partir do refinamento estrutural do TiO₂.

Amostra	Parâmetros de Rede				χ^2	S
	a/Å	b/Å	c/Å	V/Å ³		
ICSD 82082 (Anatase)	3,780	3,780	9,510	135,882	-	-
ICSD 36408 (Brookita)	9,174	5,449	5,138	256,844	-	-
Anatase	3,799	3,799	9,497	137,079	1,6447	1,2824
Brookita	9,280	5,449	5,190	262,457	1,6447	1,2824

Legenda: V = volume de célula unitária; χ^2 = qui-quadrado; S = *goodness-of-fit*.

Na Tabela 7 são verificadas as posições atômicas, através do refinamento estrutural das amostras. Os fatores R_{wp}, R_p e S, fornecem uma medida quantitativa da qualidade do refinamento estrutural (NOBRE *et al.*, 2019).

Tabela 7: Parâmetros atômicos das soluções sólidas de TiO₂.

Fase	Átomo	Wyckoff	Fator Ocupacional	Posição Atômica		
				x	y	z
Anatase	Ti1	4a	0,12500	0,00000	0,75000	0,12500
	O1	8e	0,25000	0,00000	0,25000	0,07840
Parâmetros: R _{wp} = 18,0, R _p = 13,6, S = 1,64						
Brookita	Ti1	8c	100,000	0,12890	0,09720	0,86280
	O1	8c	100,000	0,00950	0,14910	0,18350
	O1	8c	100,000	0,23140	0,11100	0,53660
Parâmetros: R _{wp} = 17,8, R _p = 13,3, S = 1,61						

De acordo com a equação de Sherrer (4), o tamanho médio dos cristalitos foi estimado em aproximadamente $13,5 \pm 2,7$ nm para a fase anatase e $22,5 \pm 5,7$ nm para a fase brookita, dado que a fase anatase apresenta maior estabilidade termodinâmica para partículas com diâmetro próximo a 11 nm, a fase brookita torna-se estável na faixa de 11 nm a 35 nm (ANTON; BRAGA, 2015). A respeito do uso de nanopartículas de TiO_2 em células solares, o tamanho ideal de partículas para atingir o desempenho mais alto é de 20 nm, proporcionando um equilíbrio entre alta área superficial e transporte eficiente de cargas (SON *et al.*, 2018).

5.3. Fabricação e caracterização fotoelétrica dos dispositivos fotovoltaicos

Na Figura 21, apresenta-se o protótipo final do dispositivo fotovoltaico baseado em CQDs, com dimensões totais de 2x3 cm, área de fotoabsorção de $0,16 \text{ cm}^2$ e contato elétrico de ouro de $0,2 \times 0,1$ cm.

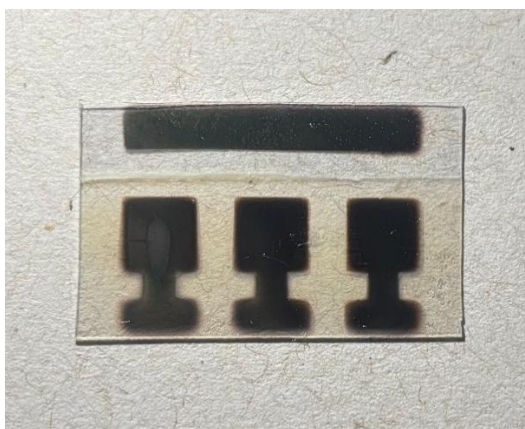


Figura 21: Protótipo final da célula solar

A Figura 22 (a) apresenta a eficiência de cinco dispositivos fotovoltaicos, cada um correspondente ao melhor desempenho obtido para uma determinada velocidade de deposição da camada fotoativa. Na literatura, relatam-se células solares experimentais baseadas em CQDs com eficiências em torno de 0,66%, o que demonstra boa concordância com o desempenho dos dispositivos desenvolvidos neste trabalho (HUANG *et al.*, 2020).

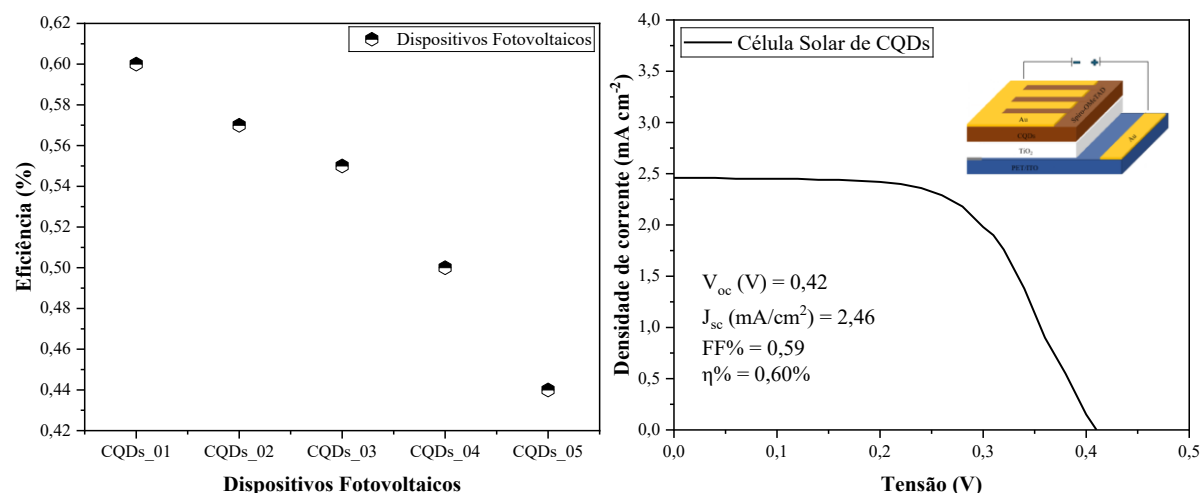


Figura 22: a) Diagrama da eficiência dos dispositivos em diferentes velocidades de deposição da camada fotoativa, b) Curva J-V e diagrama de montagem do dispositivo fotovoltaico com maior eficiência.

Na Figura 22 (a) também é observado o comportamento da eficiência das células em relação à velocidade de deposição da camada fotoativa via *spin coating*, o gráfico demonstra uma correlação inversa entre velocidade de deposição e eficiência fotovoltaica para esses dispositivos. O aumento da rotação reduz a espessura da camada fotoativa, o que impacta negativamente a absorção óptica e o desempenho elétrico. Isso demonstra que velocidades mais baixas, especialmente próximas de 1000 rpm, são mais adequadas para a fabricação de células solares de CQDs.

Na Figura 22(b) é apresentada curva de densidade de corrente em função da tensão do dispositivo que apresentou melhor desempenho. A célula solar de CQDs demonstrou uma densidade de corrente de aproximadamente 2,46 mA cm⁻² e uma tensão de circuito aberto de 0,42 V, o fator de forma foi de 0,59 e a eficiência de conversão foi de aproximadamente 0,60%. Essa baixa eficiência deve-se ao ambiente não controlado em que as células solares foram fabricadas (GUO *et al.*, 2023). A situação se torna ainda mais preocupante devido o Amazonas ser um dos estados mais úmidos do Brasil, onde, em certos períodos do ano, a umidade relativa pode chegar a 90% (MARTINS *et al.*, 2019).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, os CQDs foram obtidos com sucesso pelo método solvotermal. A análise por espectroscopia UV-Vis confirmou que os CQDs apresentam ampla absorção na região do visível do espectro eletromagnético, atribuída às transições $\pi \rightarrow \pi^*$ e $n \rightarrow \pi^*$, o que os torna materiais promissores para aplicações em células solares. Na espectroscopia FTIR, foram identificados grupos funcionais de superfície como O–H, C–H, C=C (associado à transição $n \rightarrow \pi^*$) e C–O, indicando a presença de funcionalidades oxigenadas relevantes para a estabilidade coloidal e a modulação das propriedades ópticas. O espectro Raman revelou a banda D em 1380 cm^{-1} , associada a modos vibracionais indicativos de desordem estrutural em domínios grafiticos, enquanto a banda G, em 1540 cm^{-1} , está relacionado à presença de regiões com ordenamento sp^2 típico de estruturas grafiticas nos CQDs.

Quando observada sob luz UV (364 nm), a solução de CQDs apresentou fluorescência de cor verde. A dispersão aquosa de CQDs apresentou elevada estabilidade coloidal, mantendo-se homogênea e sem evidências de precipitação ao longo 180 dias. O diâmetro médio dos CQDs foi de 10,04 nm, com tamanho variando de 1 a 16 nm. A síntese do TiO_2 também foi realizada com sucesso, através do DRX constatou-se o sucesso do TiO_2 polimórfico com frações de 56,28% para anatase e 43,72% brookita, o tamanho médio dos cristalitos foi estimado em aproximadamente $13,5 \pm 2,7\text{ nm}$ para a fase anatase, $22,5 \pm 5,7\text{ nm}$ para a fase brookita e $20,1 \pm 6,4\text{ nm}$ para ambas as fases.

Os dispositivos fotovoltaicos desenvolvidos apresentaram uma eficiência de conversão de energia entre 0,44 e 0,60%, conforme obtido pela caracterização fotoelétrica. Esses resultados evidenciam o potencial dos CQDs como materiais promissores para aplicações em energia solar, especialmente devido às suas características únicas, como baixo custo, biocompatibilidade e versatilidade sintética.

7. PERSPECTIVAS FUTURAS

Como perspectivas futuras deste trabalho, destaca-se a relevância da realização de experimentos sob atmosfera inerte, visando à melhoria da estabilidade das células solares e consequentemente à obtenção das maiores eficiências possíveis desses dispositivos. Adicionalmente, estudos sistemáticos voltados à otimização da concentração, do tamanho e da funcionalização superficial dos CQDs podem fornecer uma correlação mais robusta entre suas propriedades físico-químicas e a eficiência das células solares. Além disso os CQDs podem ser aplicados na passivação de perovskitas, que surge como uma estratégia altamente promissora para aumento da estabilidade de células solares de perovskitas.

REFERÊNCIAS

- ABOULOUARD, A.; GULTEKIN, B.; CAN, M.; EROL, M.; JOUAITI, A.; ELHADADI, B.; ZAFER, C.; DEMIC, S. Dye sensitized solar cells based on titanium dioxide nanoparticles synthesized by flame spray pyrolysis and hydrothermal sol-gel methods: A comparative study on photovoltaic performances. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 2, p. 1569–1577, 2020. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.11.083.
- AGUIAR, M. O.; MENDONÇA, M. S. de. Morfo-anatomia da semente de *Euterpe precatoria* Mart. (Palmae). *Revista Brasileira de Sementes*, v. 25, n. 1, p. 37–42, 2003. DOI: 10.1590/S0101-31222003000100007.
- AMANCIO, M. do A.; BARCELAY, Y. R.; GANDARILLA, A.; SALES, R. R.; DE SOUZA, T. M.; NOBRE, F. X.; RAPHAEL, E.; BRITO, W. R. Enhanced Grätzel solar cells using carbon nanodots and natural dye. *ACS Physical Chemistry Au*, 2024. DOI: 10.1021/acspchemau.4c00080.
- ANTON, L. D. B.; BRAGA, N. D. A. Nanopartículas de TiO₂: Síntese pelo método sol-gel e técnicas de caracterização. *Scientia Amazonia*, v. 4, p. 36–59, 2015.
- APARÍCIO, R. R.; HANSEL, F. A.; LORENA, T.; ACOSTA, N.; SCHIAVON, M. A.; INES, G.; MUNIZ, B. De; LUIZ, W.; MAGALHÃES, E.; HENRIQUE, P.; CADEMARTORI, G. De. Lignin as a renewable precursor for carbon quantum dots: Synthesis, doping strategies, and applications. *Advanced Energy and Sustainability Research*, v. 2500187, p. 1–21, 2025. DOI: 10.1002/aesr.202500187.
- ARAÚJO, R. S. de; SOUSA, F. L. N. de; VANDERLEY, P. S.; BENTES, S. O. da S.; GOMES, L. M.; FERREIRA, F. C. L. Fontes de energias renováveis: pesquisas, tendências e perspectivas sobre as práticas sustentáveis. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 11, p. e468111133893, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i11.33893.
- ATEIA, E. E.; RABIE, O.; MOHAMED, A. T. Assessment of the correlation between optical properties and CQD preparation approaches. *European Physical Journal Plus*, v. 139, n. 1, 2024. DOI: 10.1140/epjp/s13360-023-04811-7.
- BERNARDES, A. A.; DA SILVA, A. L.; RAMOS, B.; FONSECA, F. C.; GOUVÊA, D. Intrinsic defects generated by iodine during TiO₂ crystallization and its relationship with electrical conductivity and photoactivity. *International Journal of Ceramic Engineering and Science*, v. 5, n. 5, p. 1–11, 2023. DOI: 10.1002/ces2.10186.
- BOSE, P.; PRADHAN, S. K.; SEN, S. Rietveld analysis of polymorphic transformations of ball milled anatase TiO₂. *Materials Chemistry and Physics*, v. 80, n. 1, p. 73–81, 2003. DOI: 10.1016/S0254-0584(02)00463-7.
- BÜHLER, A. J.; GABE, I. J.; SANTOS, F. H. dos. Uma revisão sobre as tecnologias fotovoltaicas atuais. *Energia solar e eólica*. [S. l.], Antonella Carvalho de Oliveira. p. 10–25, 2019.
- CAROLAN, D.; ROCKS, C.; PADMANABAN, D. B.; MAGUIRE, P.; SVRCEK, V.; MARIOTTI, D. Environmentally friendly nitrogen-doped carbon quantum dots for next generation solar cells. *Sustainable Energy and Fuels*, v. 1, n. 7, p. 1611–1619, 2017. DOI: 10.1039/c7se00158d.
- CARVALHO, A. V.; JUNIOR, E. M.; CHISTÉ, R. C.; OLIVEIRA, M. do S. P. de. Caracterização físico-química da polpa de híbridos interespecíficos entre *Euterpe oleracea* e

Euterpe precatoria. Research, Society and Development, v. 12, n. 13, p. 1–7, 2023. DOI: 10.33448/rsd-v12i13.44391.

CHEN, X.; MAO, S. S. Titanium dioxide nanomaterials: synthesis, properties, modifications, and applications. Chemical Reviews, v. 107, p. 2891–2959, 2007. DOI: 10.1021/cr0500535.

CHUANG, C. H. M.; BROWN, P. R.; BULOVIĆ, V.; BAWENDI, M. G. Improved performance and stability in quantum dot solar cells through band alignment engineering. Nature Materials, v. 13, n. 8, p. 796–801, 2014. DOI: 10.1038/nmat3984.

CUI, C.; LI, Y. Morphology optimization of photoactive layers in organic solar cells. Aggregate, v. 2, n. 2, p. 1–13, 2021. DOI: 10.1002/agt2.31.

DAMBHARE, M. V.; BUTEY, B.; MOHARIL, S. V. Solar photovoltaic technology: A review of different types of solar cells and its future trends. Journal of Physics: Conference Series, v. 1913, n. 1, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1913/1/012053.

DAWO, C.; KRISHNAN, P.; CHATURVEDI, H. Carbon nanotubes/PANI composite as an efficient counter electrode material for dye sensitized solar cell. Materials Science & Engineering B, v. 297, n. June, p. 116722, 2023. DOI: 10.1016/j.mseb.2023.116722.

DEVADIGA, D.; SELVAKUMAR, M.; SHETTY, P.; SANTOSH, M. S. Dye-sensitized solar cell for indoor applications : A mini-review. Journal of Electronic Materials, v. 50, n. 6, p. 3187–3206, 2021. DOI: 10.1007/s11664-021-08854-3.

DHINGRA, P.; SINGH, P.; RANA, P. J. S.; GARG, A.; KAR, P. Hole-transporting materials for perovskite-sensitized solar cells. Energy Technology, v. 4, n. 8, p. 891–938, 2016. DOI: 10.1002/ente.201500534.

DIAB, E. A.; GHALI, M.; MOSAAD, M. M. In vitro antimicrobial and anticancer potentials of green synthesized luminescent carbon quantum dots derived from artichoke leaves. Scientific Reports, v. 15, p. 1–21, 2025. DOI: doi.org/10.1038/s41598-025-99841-9 1.

DUA, S.; KUMAR, P.; PANI, B.; KAUR, A.; KHANNA, M.; BHATT, G. Stability of carbon quantum dots: a critical review. RSC Advances, v. 13, n. 20, p. 13845–13861, 2023. DOI: 10.1039/d2ra07180k.

DUBEY, R. S.; KRISHNAMURTHY, K. V.; SINGH, S. Experimental studies of TiO₂ nanoparticles synthesized by sol-gel and solvothermal routes for DSSCs application. Results in Physics, v. 14, n. May, p. 102390, 2019. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102390.

ELIE, L.; GRANIER, C.; RIGOT, S. The different types of renewable energy finance: A Bibliometric analysis. Energy Economics, v. 93, p. 104997, 2021. DOI: 10.1016/j.eneco.2020.104997.

ELUGOKE, S. E.; UWAYA, G. E.; QUADRI, T. W.; EBENSO, E. E. Carbon quantum dots: basics, properties, and Fundamentals. ACS Symposium Series, 2024. DOI: 10.1021/bk-2024-1465.ch001.

FARGHALI, M.; OSMAN, A. I.; CHEN, Z.; ABDELHALEEM, A.; IHARA, I.; MOHAMED, I. M. A.; YAP, P.-S.; ROONEY, D. W. Social, environmental, and economic consequences of integrating renewable energies in the electricity sector: a review. Environmental Chemistry Letters, v. 21, n. 3, p. 1381–1418, 2023. DOI: 10.1007/s10311-023-01587-1.

FAWAZ, W.; HASIAN, J.; ALGHORAIBI, I. Synthesis and physicochemical characterization of carbon quantum dots produced from folic acid. Scientific Reports, v. 13, n. 1, p. 1–7, 2023.

DOI: 10.1038/s41598-023-46084-1.

FREITAS, C. V. M. de; SILVA, M. L. P. da. Mudanças do clima: Análise das conferências que trataram do mercado de carbono e seus principais resultados. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 10, p. 75332–75342, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n10-093.

GARCÍA-CONTRERAS, L. A.; FLORES-FLORES, J. O.; ARENAS-ALATORRE, J. Á.; CHÁVEZ-CARVAYAR, J. Á. Synthesis, characterization and study of the structural change of nanobelts of TiO_2 ($\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) to nanobelts with anatase, brookite and rutile phases. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 923, p. 166236, 2022. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.166236.

GASPARIN, F. B.; DE LIMA, V. O. D.; MICHELETTI, D. H.; BURIN, E. L. K. The influence of public policies for the progress of photovoltaic solar generation and diversification of the brazilian energy matrix. *Revista Virtual de Química*, v. 14, n. 1, p. 77–81, 2022. DOI: 10.21577/1984-6835.20210102.

GIANOLA, G.; SPERANZA, R.; BELLA, F.; LAMBERTI, A. Homo-tandem-bifacial dye-sensitized solar cell: A new paradigm to boost photoconversion efficiency above limit. *Solar Energy*, v. 265, p. 112116, 2023. DOI: 10.1016/j.solener.2023.112116.

GUO, S.; LIU, K.; RAO, L.; HU, X.; CHEN, Y. Preparation of Perovskite Solar Cells in the Air: Degradation Mechanism and Prospects on Large-Area Fabrication†. *Chinese Journal of Chemistry*, v. 41, n. 5, p. 599–617, 2023. DOI: 10.1002/cjoc.202200442.

HAO, D.; QI, L.; TAIRAB, A. M.; AHMED, A.; AZAM, A.; LUO, D.; PAN, Y.; ZHANG, Z.; YAN, J. Solar energy harvesting technologies for PV self-powered applications: A comprehensive review. *Renewable Energy*, v. 188, p. 678–697, 2022. DOI: 10.1016/j.renene.2022.02.066.

HO KIM, J.; WOO PARK, H.; KOO, S. J.; LEE, D.; CHO, E.; KIM, Y. K.; SHIN, M.; WOO CHOI, J.; JUNG LEE, H.; SONG, M. High efficiency and stable solid-state fiber dye-sensitized solar cells obtained using TiO_2 photoanodes enhanced with metal organic frameworks. *Journal of Energy Chemistry*, v. 67, p. 458–466, 2022. DOI: 10.1016/j.jechem.2021.10.034.

HUANG, P.; XU, S.; ZHANG, M.; ZHONG, W.; XIAO, Z.; LUO, Y. Carbon quantum dots improving photovoltaic performance of CdS quantum dot-sensitized solar cells. *OPTMAT*, v. 110, n. October, p. 110535, 2020. DOI: 10.1016/j.optmat.2020.110535.

HUO, Y.; XIU, S.; MENG, L. Y.; QUAN, B. Solvothermal synthesis and applications of micro/nano carbons: A review. *Chemical Engineering Journal*, v. 451, n. P2, p. 138572, 2023. DOI: 10.1016/j.cej.2022.138572.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Renewables 2024. IEA. Disponível em <<https://www.iea.org/reports/renewables-2024>>. Acessado em 1/9/2025.

JAVED, N.; O’CARROLL, D. M. Carbon Dots and Stability of Their Optical Properties. *Particle and Particle Systems Characterization*, v. 38, n. 4, p. 1–12, 2021. DOI: 10.1002/ppsc.202000271.

JIANG, J.; CHEN, Z.; HU, Y.; XIANG, Y.; ZHANG, L.; WANG, Y.; WANG, G. C.; SHI, J. Flexo-photovoltaic effect in MoS_2 . *Nature Nanotechnology*, v. 16, n. 8, p. 894–901, 2021. DOI: 10.1038/s41565-021-00919-y.

KANT, N.; SINGH, P. Review of next generation photovoltaic solar cell technology and comparative materialistic development. *Materials Today: Proceedings*, v. 56, p. 3460–3470,

2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.116.

KARIM, S.; MACHKOUR, N.; ZEGRARI, M.; AITELMAHJOUB, A.; SABIRI, Z. Modeling photovoltaic system using MATLAB/Simulink. SSRN Electronic Journal, n. May 2021, 2018. DOI: 10.2139/ssrn.3185323.

KAUR, A.; PANDEY, K.; KAUR, R.; VASHISHAT, N.; KAUR, M. Nanocomposites of carbon quantum dots and graphene quantum dots: Environmental applications as sensors. Chemosensors, v. 10, n. 9, 2022. DOI: 10.3390/chemosensors10090367.

KHOJASTEH, H.; AHMADIAZAR, S.; ASPOUKEH, P.; ABDULRAHMAN, A. F.; HAMAD, S. M. Rapid synthesis of carbon quantum dots using organic solvents via combustion method and their role in enhancing polyurethane elasticity. Journal of Materials Science, v. 60, n. 11, p. 5125–5136, 2025. DOI: 10.1007/s10853-025-10752-6.

KUMAR, M. S.; SINGH, S.; GUPTA, M. K.; NIMDEO, Y. M.; RAUSHAN, R.; DEORANKAR, A. V.; KUMAR, T. M. A.; ROUT, P. K.; CHANOTIYA, C. S.; PAKHALE, V. D.; NANNAWARE, A. D. Solar energy: A promising renewable source for meeting energy demand in Indian agriculture applications. Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 55, n. November 2022, p. 102905, 2023. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102905.

KUMAR, N. S.; NAIDU, K. C. B. A review on perovskite solar cells (PSCs), materials and applications. Journal of Materiomics, v. 7, n. 5, p. 940–956, 2021. DOI: 10.1016/j.jmat.2021.04.002.

LIU, N.; TANG, M. Toxicity of different types of quantum dots to mammalian cells in vitro: An update review. Journal of Hazardous Materials, v. 399, n. March, p. 122606, 2020. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122606.

LUO, C.; ZHENG, G.; GAO, F.; WANG, X.; ZHAN, C.; GAO, X.; ZHAO, Q. Engineering the buried interface in perovskite solar cells via lattice-matched electron transport layer. Nature Photonics, v. 17, n. 10, p. 856–864, 2023. DOI: 10.1038/s41566-023-01247-4.

MAALOUF, A.; OKOROAFOR, T.; JEHL, Z.; BABU, V.; RESALATI, S. A comprehensive review on life cycle assessment of commercial and emerging thin-film solar cell systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 186, n. October 2022, p. 113652, 2023. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113652.

MANIKANDAN, V.; LEE, N. Y. Green synthesis of carbon quantum dots and their environmental applications. Environmental Research, v. 212, n. PB, p. 113283, 2022. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113283.

MARTINS, P. A. da S.; QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; QUERINO, J. K. A. da S.; MOURA, A. R. de M. Variabilidade espaço-temporal de variáveis climáticas na mesorregião sul do Amazonas. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 10, n. 2, p. 169–184, 2019. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2019.002.0015.

MAZIVIERO, F. V.; MELO, D. M. A.; MEDEIROS, R. L. B. A.; OLIVEIRA, Â. A. S.; MACEDO, H. P.; BRAGA, R. M.; MORGADO, E. Advancements and prospects in perovskite solar cells: From hybrid to all-inorganic materials. Nanomaterials, v. 14, n. 4, p. 332, 2024. DOI: 10.3390/nano14040332.

MENG, F.; SHI, J.; LIU, Z.; CUI, Y.; LU, Z. High mobility transparent conductive W-doped In₂O₃ thin films prepared at low substrate temperature and its application to solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 122, p. 70–74, 2014. DOI: 10.1016/j.solmat.2013.11.030.

- MIRANDA, J. M. A. de; OLIVEIRA, P. P. Energia Solar como fonte de abastecimento de energia elétrica. *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, v. 6, n. 1, 2024. DOI: 10.61164/rmm.v6i1.2463.
- MOHANDOSS, S.; ROY, P.; AHMAD, N.; ANBU, P. L.; GOMEZ, M.; SAKTHI, K.; SOMU, P.; KIM, S. A comprehensive review of multifunctional carbon quantum dots (CQDs): heteroatom, metal, and lanthanide doping for advanced sensing applications. *Inorganic Chemistry Communications*, v. 183, n. P1, p. 115698, 2026. DOI: 10.1016/j.inoche.2025.115698.
- NETO, A. B.; ROCHA, Á. G.; OLIVEIRA, B. G. de. Conciliando produção de energia fotovoltaica e agronegócio: Desafios para o crescimento energético sustentável e uso do solo para produção agrícola. *Estudios Rurales. Publicación del Centro de Estudios de la Argentina Rural*, v. 14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.48160/22504001er30.540>.
- NOBRE, F. X.; GIL PESSOA, W. A.; RUIZ, Y. L.; IMBIRIBA BENTES, V. L.; SILVA-MORAES, M. O.; COSTA SILVA, T. M.; MIRANDA ROCCO, M. L.; GONZÁLEZ LARRUDÉ, D. R.; DE MATOS, J. M. E.; DA COSTA COUCEIRO, P. R.; BRITO, W. R. Facile synthesis of nTiO₂ phase mixture: Characterization and catalytic performance. *Materials Research Bulletin*, v. 109, n. September 2018, p. 60–71, 2019. DOI: 10.1016/j.materresbull.2018.09.019.
- NREL. Best Research-Cell Efficiency Chart. Disponível em <<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency>>. Acessado em 21/7/2025.
- NYIEKAA, E. A.; AIKA, T. A.; ORUKPE, P. E.; AKHABUE, C. E.; DANLADI, E. Development on inverted perovskite solar cells: A review. *Heliyon*, v. 10, n. 2, p. e24689, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24689.
- O'REGAN, B.; GRATZEL, M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature*, v. 353, p. 737–740, 1991. DOI: 10.1038/353737a0.
- OLIVEIRA, U. A. de; SOUZA, T. M.; VEIGA-JUNIOR, V. F. Da; YAMAGUCHI, K. K. de L. Análise dos desafios na produção e comercialização do açaí no médio solimões. *P2P e Inovação*, n. 2011, p. 1–19, 2025. DOI: 10.21728/p2p.2025v11n2e-7242 Data.
- PANG, Z.; FU, Y.; YU, H.; LIU, S.; YU, S.; LIU, Y.; WU, Q.; LIU, Y.; NIE, G.; XU, H.; NIE, S.; YAO, S. Efficient ethanol solvothermal synthesis of high-performance nitrogen-doped carbon quantum dots from lignin for metal ion nanosensing and cell imaging. *Industrial Crops & Products*, v. 183, n. September 2021, p. 114957, 2022. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.114957.
- PASTUSZAK, J.; WEGIEREK, P. Photovoltaic cell generations and current research directions for their development. *Materials*, v. 15, p. 1–30, 2022.
- PAZOKI, M.; CAPPEL, U. B.; JOHANSSON, E. M. J.; HAGFELDT, A.; BOSCHLOO, G. Environmental science characterization techniques for dye-sensitized solar cells. *Energy & Environmental Science*, v. 10, p. 672–709, 2017. DOI: 10.1039/c6ee02732f.
- QIAO, F.; CHU, H.; XIE, Y.; WENG, Z. Recent progress of transparent conductive electrodes in the construction of efficient flexible organic solar cells. *International Journal of Energy Research*, v. 46, n. 4, p. 4071–4087, 2022. DOI: 10.1002/er.7516.
- RAPHAEL, E.; SILVA, M.; SZOSTAK, R.; SCHIAVON, M. A.; NOGUEIRA, A. F. Células Solares de Perovskitas: Uma nova tecnologia emergente. *Química Nova*, v. 41, n. 1, p. 61–74, 2017. DOI: 10.21577/0100-4042.20170127.

- RASAL, A. S.; YADAV, S.; YADAV, A.; KASHALE, A. A.; MANJUNATHA, S. T.; ALTAEE, A.; CHANG, J. Y. Carbon quantum dots for energy applications: A review. *ACS Applied Nano Materials*, v. 4, n. 7, p. 6515–6541, 2021. DOI: 10.1021/acsanm.1c01372.
- REHMAN, F.; SYED, I. H.; KHANAM, S.; IJAZ, S.; MEHMOOD, H.; ZUBAIR, M.; MASSOUD, Y.; MEHMOOD, M. Q. Fourth-generation solar cells: a review. *Energy Advances*, v. 2, n. 9, 2023. DOI: 10.1039/d3ya00179b.
- RIBEIRO, P. de F. R. V.; BRAGA, R. F.; REZENDE, E. N. A importância da energia solar no desenvolvimento sustentável e os rumos da política pública para incentivo a essa fonte renovável no Brasil. *Revista de Direito e Sustentabilidade*, v. 8, n. 1, p. 23–43, 2022. DOI: 10.26668/IndexLawJournals/2525-9687/2022.v8i1.8810.
- ROCCO, D.; MOLDOVEANU, V. G.; FEROCI, M.; BORTOLAMI, M.; VETICA, F. Electrochemical synthesis of carbon quantum dots. *ChemElectroChem*, v. 10, n. 3, 2023. DOI: 10.1002/celec.202201104.
- ROSA, E. H. dos S.; TOLEDO, L. F. R. B. Uma revisão dos princípios de funcionamento de células solares orgânicas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 43, p. 1–6, 2021. DOI: 10.1590/1806-9126-rbef-2020-0519.
- ROSSI, I. S.; COSTA, J. B.; NASCIMENTO, L. G. L.; CARVALHO, A. F. de. Estabilidade de antocianinas do açaí: uma breve revisão. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, v. 8, n. 9, p. 14880–01a, 2022. DOI: 10.18540/jcecvl8iss9pp14880-01a.
- SAHU, A.; KUMAR, D. Core-shell quantum dots: A review on classification, materials, application, and theoretical modeling. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 924, p. 166508, 2022. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.166508.
- SEO, H. W.; RUDRA, S.; KHANAM, S.; SARKER, S.; KIM, D. M. Revisiting the Shockley-Queisser limit: Understanding solar cell efficiency in one sun and indoor environments. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, v. 16, p. 11795–11812, 2025. DOI: 10.1021/acs.jpcclett.5c01792.
- SETIANTO, S.; MEN, L. K.; BAHTIAR, A.; PANATARANI, C.; JONI, I. M. Carbon quantum dots with honeycomb structure: a novel synthesis approach utilizing cigarette smoke precursors. *Scientific Reports*, v. 14, n. 1, p. 1–8, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-52106-3.
- SHAH, N.; SHAH, A. A.; LEUNG, P. K.; KHAN, S.; SUN, K.; ZHU, X.; LIAO, Q. A Review of Third Generation Solar Cells. *Processes*, v. 11, n. 6, 2023. DOI: 10.3390/pr11061852.
- SHAHADA, K. P. N.; ARISH, D.; PREMKUMAR, A. T.; RENUKA, N. K.; RAPHAEL, S. J. Blue luminescent carbon quantum dots derived from diverse banana peels for selective sensing of Fe(III) ions. *Sensors International*, v. 6, n. July 2024, p. 100301, 2025. DOI: 10.1016/j.sintl.2024.100301.
- SHAHZAD, N.; PERVEEN, T.; PUGLIESE, D.; HAQ, S.; FATIMA, N.; MUHAMMAD, S.; TAGLIAFERRO, A.; IMRAN, M. Counter electrode materials based on carbon nanotubes for dye-sensitized solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 159, n. December 2021, p. 112196, 2022. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112196.
- SHARMA, D.; MEHRA, R.; RAJ, B. Comparative analysis of photovoltaic technologies for high efficiency solar cell design. *Superlattices and Microstructures*, v. 153, n. March, p. 106861, 2021. DOI: 10.1016/j.spmi.2021.106861.

SHARMA, Prabhakar; MISHRA, R. K. Comprehensive study on photovoltaic cell's generation and factors affecting its performance: A Review. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, v. 14, n. 1, p. 1–28, 2025. DOI: 10.1007/s40243-024-00292-5.

SHARMA, Preetika; GOYAL, P. Evolution of PV technology from conventional to nano-materials. *Materials Today: Proceedings*, , p. 1–5, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.846.

SHEN, Y.; DENG, K.; LI, L. Spiro-OMeTAD-Based hole transport layer engineering toward stable perovskite solar cells. *Small Methods*, v. 6, n. 11, p. 1–22, 2022. DOI: 10.1002/smt.202200757.

SHESHMANI, S.; MARDALI, M.; SHOKROLLAHZADEH, S.; BIDE, Y. Synthesis, optical, and photocatalytic properties of cellulose-derived carbon quantum dots. *Scientific Reports*, , p. 1–13, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04453-y>.

SHILPA, G.; KUMAR, P. M.; KUMAR, D. K.; DEEPTHI, P. R.; SADHU, V.; SUKHDEV, A.; KAKARLA, R. R. Recent advances in the development of high efficiency quantum dot sensitized solar cells (QDSSCs): A review. *Materials Science for Energy Technologies*, v. 6, p. 533–546, 2023. DOI: 10.1016/j.mset.2023.05.001.

SHOCKLEY, W.; QUEISSER, H. J. Detailed Balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *Journal of Applied Physics*, v. 32, n. 3, p. 510–519, 1961. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1736034>.

SILVA CEDRIM, P. C. A.; BARROS, E. M. A.; DO NASCIMENTO, T. G. Antioxidant properties of acai (*Euterpe oleracea*) in the metabolic syndrome. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 21, 2018. DOI: 10.1590/1981-6723.09217.

SILVA, A. O. da; MERA, W. Y. W. de L.; SANTOS, D. C. R.; SOUZA, D. P. de; SILVA, C. G. N.; RAIOL, L. L. Estudo da produção de açaí (*Euterpe oleracea* Mart): aspectos econômicos e produtivos baseados nos anos de 2015 a 2017. *Brazilian Journal of Development Brazilian Journal of Development*, , p. 1629–1641, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n1-112.

SILVA, J. A. da. Inserção dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) da ONU 2030 dos trabalhos de reciclagem de uma ONG de Ilha Solteira. *EnGeTeC*, v. 2, p. 1–8, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14938520>.

SON, Y. J.; KANG, J. S.; YOON, J.; KIM, J.; JEONG, J.; KANG, J.; LEE, M. J.; PARK, H. S.; SUNG, Y. Influence of TiO₂ particle size on dye-sensitized solar cells employing an organic sensitizer and a cobalt(III/II) redox electrolyte. *The Journal of Physical Chemistry C*, v. 122, n. 13, p. 7051–7060, 2018. DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b12206.

SONAI, G. G.; MELO JR., M. A.; NUNES, J. H. B.; MEGIATTO JR., J. D.; NOGUEIRA, A. F. Solar cells sensitized with natural dyes: an introductory experiment about solar energy for undergraduate students. *Química Nova*, v. 38, n. 10, p. 1357–1365, 2015. DOI: 10.5935/0100-4042.20150148.

SOUZA, T. I. R. de; JUNIOR, J. A. C.; A. SCHIAVON, M. Células solares cossensibilizadas por pontos quânticos: contextualização e perspectivas. *Revista Virtual de Química*, v. 16, n. 4, p. 620–634, 2024. DOI: 10.21577/1984-6835.20240016.

SU, R.; BECHSTEIN, R.; SØ, L.; VANG, R. T.; SILLASSEN, M.; ESBJÖRNSSON, B.; PALMQVIST, A.; BESENBACHER, F. How the anatase-to-rutile ratio influences the photoreactivity of TiO₂. *The Journal of Physical Chemistry C*, v. 115, n. 49, p. 24287–24292, 2011. DOI: 10.1021/jp2086768.

SUKHAREVSKA, N.; BEDERAK, D.; GOOSSENS, V. M.; MOMAND, J.; DUIM, H.; DIRIN, D. N.; KOVALENKO, M. V.; KOOI, B. J.; LOI, M. A. Scalable PbS quantum dot solar cell production by blade coating from stable inks. *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 13, n. 4, p. 5195–5207, 2021. DOI: 10.1021/acsami.0c18204.

SUN, Q. Y.; CHENG, J. X.; QI, S. Y.; CHEN, J. F.; HU, D. Y. Advances in carbon quantum dot technology for food safety: preparation, modification, applications and mechanisms. *Nano Express*, v. 5, n. 1, p. 1–14, 2024. DOI: 10.1088/2632-959X/ad15a4.

TADESSE, A.; HAGOS, M.; RAMADEVI, D.; BASAVIAIAH, K.; BELACHEW, N. Fluorescent-nitrogen-doped carbon quantum dots derived from citrus lemon juice: Green synthesis, mercury(II) ion sensing, and live cell imaging. *ACS Omega*, v. 5, n. 8, p. 3889–3898, 2020. DOI: 10.1021/acsomega.9b03175.

TARIQ, S.; NOMAN, M. Influence of layer thickness , defect density , doping concentration , interface defects , work function , working temperature and reflecting coating on lead-free perovskite solar cell. *Solar Energy*, v. 237, n. April, p. 29–43, 2022. DOI: 10.1016/j.solener.2022.03.069.

TEIXEIRA, M. A. C.; RAMOS, H. R.; AGUIAR, A. de O. e. Perspectives of new alternative materials to silicon for the production of photovoltaic solar cells. *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, v. 9, n. 71, 2021. DOI: 10.17271/2318847297120212953.

TORRES, D. G. B.; LUCA, B. H. de; MALACARNE, J. A.; SOUZA, J.; CASAROLLI, D.; SILVA, E. D. C.; GUERRA, T. Células fotovoltaicas: Desenvolvimento e as três gerações. *Revista Técnico-Científica CREA-PR*, v. 1, p. 1–6, 2019.

ULLATTIL, S. G.; PERIYAT, P. Sol-gel materials for energy, environment and electronic applications. Cham, Springer International Publishing, 2017(Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies).

VASCONCELOS, M. A. M. de; GALEÃO, R. R.; CARVALHO, A. V.; NASCIMENTO, V. Práticas de colheita e manuseio do açaí. Embrapa Amazônia Oriental Práticas de colheita e manuseio do Açaí. 1ª Edição. Belém, PA, Embrapa Amazônia Oriental. 1ª Edição. p. 23, 2006.

VITORETI, A. B. F.; CORRÊA, L. B.; RAPHAEL, E.; PATROCÍNIO, A. O. T.; NOGUEIRA, A. F.; SCHIAVON, M. A. Células solares sensibilizadas por pontos quânticos. *Química Nova*, v. 40, n. 4, p. 436–446, 2016. DOI: 10.21577/0100-4042.20160192.

WANG, K.; ZHENG, L.; HOU, Y.; NOZARIASBMARZ, A.; POUDEL, B.; YOON, J.; YE, T.; YANG, D.; POGREBNYAKOV, A. V.; GOPALAN, V.; PRIYA, S. Overcoming Shockley-Queisser limit using halide perovskite platform? *Joule*, v. 6, n. 4, p. 756–771, 2022. DOI: 10.1016/j.joule.2022.01.009.

WANG, Xiao; FENG, Y.; DONG, P.; HUANG, J. A mini review on carbon quantum dots: Preparation, properties, and electrocatalytic application. *Frontiers in Chemistry*, v. 7, n. October, p. 1–9, 2019. DOI: 10.3389/fchem.2019.00671.

WANG, Xiaoli; HE, K.; HU, Y.; TANG, M. A review of pulmonary toxicity of different types of quantum dots in environmental and biological systems. *Chemico-Biological Interactions*, v. 368, n. August, p. 110247, 2022. DOI: 10.1016/j.cbi.2022.110247.

WU, C.; WANG, K.; BATMUNKH, M.; BATI, A. S. R.; YANG, D.; JIANG, Y.; HOU, Y.; SHAPTER, J. G.; PRIYA, S. Multifunctional nanostructured materials for next generation photovoltaics. *Nano Energy*, v. 70, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104480>.

- XU, Q.; NIU, Y.; LI, J.; YANG, Z.; GAO, J.; DING, L.; NI, H.; ZHU, P.; LIU, Y.; TANG, Y.; LV, Z. P.; PENG, B.; HU, T. S.; ZHOU, H.; XU, C. Recent progress of quantum dots for energy storage applications. *Carbon Neutrality*, v. 1, n. 1, p. 1–18, 2022. DOI: 10.1007/s43979-022-00002-y.
- XU, X.; RAY, R.; GU, Y.; PLOEHN, H. J.; GEARHEART, L.; RAKER, K.; SCRIVENS, W. A. Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments. *Journal of the American Chemical Society*, v. 126, n. 40, p. 12736–12737, 2004. DOI: 10.1021/ja040082h.
- XU, Y.; GONG, T.; MUNDAY, J. N. The generalized Shockley-Queisser limit for nanostructured solar cells. *Scientific Reports*, v. 5, p. 1–9, 2015. DOI: 10.1038/srep13536.
- YADAV, P. K.; CHANDRA, S.; KUMAR, V.; KUMAR, D.; HASAN, S. H. Carbon quantum dots: synthesis, structure, properties, and catalytic applications for organic synthesis. *Catalysts*, v. 13, n. 422, p. 1–22, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal13020422>.
- YAMAGUCHI, K. K. de L.; PEREIRA, L. F. R.; LAMARÃO, C. V.; LIMA, E. S.; JUNIOR, V. F. da V. Amazon açaí : Chemistry and biological activities : A review. *Food Chemistry*, v. 179, p. 137–151, 2015. DOI: 10.1016/j.foodchem.2015.01.055.
- YAO, J. D.; ZHENG, Z. Q.; YANG, G. W. Production of large-area 2D materials for high-performance photodetectors by pulsed-laser deposition. *Progress in Materials Science*, v. 106, n. April, p. 100573, 2019. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2019.100573.
- YOO, B.; KIM, K.; LEE, S. H.; KIM, W. M.; PARK, N. ITO/ATO/TiO₂ triple-layered transparent conducting substrates for dye-sensitized solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 92, n. 8, p. 873–877, 2008. DOI: 10.1016/j.solmat.2008.02.013.
- YUYAMA, L. K. O.; AGUIAR, J. P. L.; FILHO, D. F. S.; YUYAMA, K.; DE JESUS VAREJÃO, M.; FÁVARO, D. I. T.; VASCONCELLOS, M. B. A.; PIMENTEL, S. A.; CARUSO, M. S. F. Caracterização físico-química do suco de açaí de euterpe precatoria mart. oriundo de diferentes ecossistemas amazônicos. *Acta Amazonica*, v. 41, n. 4, p. 545–552, 2011. DOI: 10.1590/S0044-59672011000400011.
- ZHANG, C.; WEI, K.; HU, J.; CAI, X.; DU, G.; DENG, J. A review on organic hole transport materials for perovskite solar cells : Structure , composition and reliability. *Materials Today*, v. 67, n. August, p. 518–547, 2023. DOI: 10.1016/j.mattod.2023.06.009.
- ZHAO, F.; LI, X.; ZUO, M.; LIANG, Y.; QIN, P.; WANG, H.; WU, Z.; LUO, L.; LIU, C.; LENG, L. Preparation of photocatalysts decorated by carbon quantum dots (CQDs) and their applications: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 11, n. 2, p. 109487, 2023. DOI: 10.1016/j.jece.2023.109487.
- ZOU, H.; DAI, G.; WANG, A. C.; LI, X.; ZHANG, S. L.; DING, W.; ZHANG, L.; ZHANG, Y.; WANG, Z. L. Alternating current photovoltaic effect. *Advanced Materials*, v. 32, n. 11, p. 1–11, 2020. DOI: 10.1002/adma.201907249.

APÊNDICE

MÁSCARA PARA DEPOSIÇÃO DE OURO IMPRESSA EM 3D

