

INTEGRAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR PONTOS QUÂNTICOS EM PRÓTESES MÉDICAS INTELIGENTES

Márliton Pereira dos Santos, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri,
marlitionsantos@hotmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-8139-1067>

RESUMO

A integração de tecnologias fotossensíveis em próteses médicas inteligentes é uma das áreas mais empolgantes da engenharia biomédica atual. Com a crescente demanda por dispositivos que sejam mais autônomos, duráveis e biocompatíveis, a busca por fontes de energia sustentáveis que possam substituir as baterias tradicionais se torna cada vez mais urgente. Essas baterias convencionais têm suas limitações, como a curta vida útil e a necessidade de cirurgias frequentes para substituição. Nesse cenário, as células solares sensibilizadas por pontos quânticos (QDSCs) se destacam pela sua alta eficiência na conversão de energia e pela capacidade de se adaptarem a diferentes espectros de luz, tornando-se uma alternativa promissora para implantes que precisam ser energizados pela luz. A ideia é que, ao combinar QDSCs com biomateriais metálicos e poliméricos que são biocompatíveis, possamos criar próteses que sejam autossustentáveis e que funcionem de maneira superior, diminuindo a dependência de fontes externas de energia e aumentando a segurança clínica desses dispositivos. Este estudo é justificado pela relevância científica e social dessa integração, que une nanotecnologia, energia solar e biomedicina em benefício da saúde pública e da inovação tecnológica. O objetivo principal foi analisar os avanços científicos no uso de biomateriais energizados por pontos quânticos para o desenvolvimento de próteses médicas inteligentes. Especificamente, revisamos os principais biomateriais metálicos e poliméricos utilizados, avaliamos os benefícios da integração das QDSCs em sistemas de estimulação e monitoramento fisiológico, e discutimos os desafios técnicos e éticos que surgem com sua aplicação. A metodologia envolveu uma revisão sistemática da literatura, seguindo o protocolo PRISMA, com buscas nas bases CAPES Periódicos e SciELO, abrangendo publicações entre 2015 e 2025. Foram utilizadas palavras-chave em português e inglês relacionadas a QDSCs, biomateriais e próteses, aplicando critérios rigorosos de inclusão e exclusão. Os resultados indicaram que metais como titânio, ouro e platina, além de polímeros como PDMS, PEEK e PLA, são amplamente utilizados devido à sua resistência, condutividade e biocompatibilidade. As QDSCs integradas a esses materiais demonstraram um grande potencial para gerar energia de forma autônoma em sistemas de estimulação neural e monitoramento fisiológico. No entanto, desafios como a estabilidade em meio biológico, o encapsulamento de QDs e questões éticas relacionadas à privacidade de dados ainda precisam ser abordados. Chegamos à conclusão de que todos os objetivos foram alcançados e a hipótese se confirmou. A integração de QDSCs em biomateriais representa um avanço promissor em direção a próteses inteligentes que se sustentam sozinhas. No entanto, uma limitação importante é a falta de estudos experimentais *in vivo* e o acesso restrito a algumas publicações. Por isso, é recomendável que se desenvolvam pesquisas experimentais e diretrizes éticas específicas para essa tecnologia emergente.

Palavras-chave: Células solares sensibilizadas por pontos quânticos. Biomateriais. Próteses inteligentes. Nanotecnologia. Bioengenharia.

1 Introdução

A constante evolução no campo das próteses médicas inteligentes tem impulsionado o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias que conferem mais autonomia e funcionalidade a esses dispositivos. Hoje em dia, as próteses não são apenas estruturas mecânicas; elas agora incluem sistemas de monitoramento fisiológico, sensores, atuadores e módulos de comunicação. Nesse cenário, garantir uma fonte de energia sustentável e compacta se torna um dos maiores desafios da engenharia biomédica contemporânea. As células solares sensibilizadas por pontos quânticos (QDSCs) surgem como uma alternativa promissora, graças à sua alta eficiência na conversão de energia luminosa e à capacidade de ajustar o espectro de absorção de acordo com o material do ponto quântico utilizado (Kasaye; Shura; Dibaba, 2024). Estudos recentes, como o de Pan *et al.* (2018), mostram que as QDSCs podem alcançar taxas de conversão fotônica superiores às tecnologias tradicionais, abrindo novas possibilidades para microdispositivos biomédicos. Essa versatilidade cria oportunidades para integrar biomateriais metálicos e poliméricos com dispositivos que utilizam luz como fonte de energia, especialmente na criação de próteses inteligentes.

Apesar de todo o potencial que as QDSCs têm, sua aplicação em próteses médicas ainda enfrenta uma série de desafios técnicos e biológicos. Um dos principais problemas é a dependência de baterias tradicionais, que continuam a ser amplamente utilizadas em dispositivos implantáveis. Isso resulta na necessidade de substituições frequentes, aumentando o risco de complicações cirúrgicas (Bereuter *et al.*, 2017). Segundo Li *et al.* (2025), a durabilidade limitada e a baixa biocompatibilidade das baterias são barreiras significativas para o avanço dos dispositivos médicos implantáveis. Além disso, a miniaturização dos sistemas de geração e armazenamento de energia é complicada pela necessidade de manter a resistência mecânica e a biocompatibilidade das próteses. Outras fontes alternativas, como conversores piezoelétricos, células termoeletrônicas e células de biocombustíveis, estão sendo investigadas, mas muitas vezes apresentam baixa densidade de potência ou dependem de condições fisiológicas específicas para funcionar, como mencionado por Zhou *et al.* (2024). Outro desafio importante é adaptar as QDSCs ao ambiente biológico, onde a luz é escassa e as condições químicas podem ser agressivas para os materiais semicondutores, o que impacta a eficiência fotovoltaica.

Diante desse cenário, levantou-se a hipótese de que a inclusão de células solares sensibilizadas por pontos quânticos em próteses médicas inteligentes, quando combinadas com biomateriais metálicos e poliméricos biocompatíveis, pode levar à criação de sistemas que sejam energeticamente autossustentáveis e mais duráveis. Essa união poderia diminuir a dependência de baterias tradicionais, prolongando a vida útil dos dispositivos e favorecendo seu uso em aplicações clínicas, como monitoramento fisiológico e estimulação neural (Shen, 2011; Meng, 2024).

A justificativa para a realização deste estudo de revisão sistemática se baseia na importância científica, tecnológica e social do tema. O uso de QDSCs em próteses médicas representa uma nova fronteira de pesquisa interdisciplinar, unindo engenharia de materiais, nanotecnologia, energia solar e biomedicina, alinhando-se com o escopo do Congresso Biomaterials 2025. Do ponto de vista da saúde pública, a adoção de próteses inteligentes e energeticamente autônomas pode não apenas reduzir custos hospitalares, mas também melhorar a qualidade de vida dos pacientes que dependem de dispositivos implantáveis Cui *et al.* (2024). Cientificamente, nota-se uma lacuna na literatura: enquanto existem revisões sobre o desempenho das QDSCs em aplicações fotovoltaicas, segundo Kasaye, Shura e

Dibaba (2024), e estudos sobre fontes de energia para implantes, Lee *et al.* (2025), há uma escassez de pesquisas que tratem especificamente da integração entre QDSCs e biomateriais metálicos ou poliméricos em próteses médicas.

Desse modo, este trabalho teve como objetivo geral analisar os avanços científicos no uso de biomateriais energizados por pontos quânticos para o desenvolvimento de próteses médicas inteligentes e, especificamente, revisar os principais biomateriais metálicos e poliméricos utilizados em próteses fotossensíveis, avaliar os benefícios da integração de QDSCs em sistemas de estimulação e monitoramento fisiológico, discutir os desafios técnicos e éticos da aplicação desses dispositivos na medicina personalizada.

2 Materiais e Métodos

Este estudo seguiu o protocolo Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-análises (PRISMA), o que garantiu um rigor metodológico, transparência e reprodutibilidade na seleção e análise dos estudos (Page *et al.*, 2021).

A pesquisa bibliográfica foi realizada nas bases CAPES Periódicos e SciELO, abrangendo publicações entre 2015 e 2025, tanto em português quanto em inglês, devido à ampla cobertura da literatura científica internacional e ao acesso completo aos textos, incluindo artigos de revisão e estudos experimentais que são relevantes para o tema.

Os descritores utilizados abordaram tanto os aspectos técnicos das células solares sensibilizadas por pontos quânticos quanto suas aplicações em biomateriais e próteses médicas inteligentes. Foram empregados os termos: “*quantum dot sensitized solar cells*” OR “células solares de pontos quânticos” OR “QDSCs” combinados com “*biomaterials*” OR “*prostheses*” OR “*implantable medical devices*” OR “*polymers*” OR “*metals*” OR “*medical prostheses*”. A busca foi realizada em títulos, resumos e palavras-chave, utilizando operadores booleanos (AND, OR, NOT) para refinar os resultados e garantir a especificidade dos estudos selecionados. O software *EndNote* foi utilizado para organizar as referências, eliminar duplicatas e gerenciar o processo de triagem.

Incluiu-se os estudos que: (i) abordaram diretamente QDSCs aplicadas a dispositivos biomédicos ou próteses inteligentes; (ii) apresentaram uma relação clara com biomateriais metálicos ou poliméricos; (iii) discutiram aspectos de biocompatibilidade, eficiência energética ou integração funcional; (iv) estavam disponíveis em acesso completo; e (v) foram publicados entre 2015 e 2025 nos idiomas considerados. Os critérios de exclusão foram: (i) publicações fora do período estipulado; (ii) estudos sem uma interface biomédica ou protética (por exemplo, aplicações puramente fotovoltaicas externas); (iii) artigos sem acesso completo; (iv) textos em outros idiomas; e (v) documentos que não foram publicados em periódicos científicos revisados por pares, como teses, dissertações, capítulos de livros ou anais de congresso.

A seleção dos estudos seguiu as quatro etapas do protocolo PRISMA: identificação, triagem, elegibilidade e inclusão. Esse processo nos permitiu reunir de forma sistemática as evidências sobre a integração de QDSCs em próteses médicas inteligentes, destacando os principais biomateriais utilizados, as estratégias de integração e os desafios técnicos e éticos que surgem.

3 Resultados

Na fase de identificação, foram encontrados inicialmente 152 artigos na base SciELO e 237 artigos na CAPES Periódicos. Após a triagem, aplicação dos critérios de inclusão e exclusão e avaliação da elegibilidade, 28 estudos foram selecionados para compor a revisão sistemática da literatura.

3.1 Principais biomateriais metálicos e poliméricos utilizados em próteses fotossensíveis

Os resultados da revisão sistemática mostram que o desenvolvimento de próteses fotossensíveis, baseadas em QDSCs, tem avançado principalmente pela integração de biomateriais metálicos e poliméricos que combinam propriedades mecânicas, elétricas e biológicas adequadas. A literatura destaca o uso de metais como titânio (Ti), ouro (Au), platina (Pt) e ligas de aço inoxidável com modificações superficiais, que oferecem alta resistência à corrosão e biocompatibilidade, além de boa condutividade elétrica — algo essencial para a captação e transporte das cargas geradas pelas QDSCs (Hanawa, 2022). No que diz respeito aos biomateriais poliméricos, os mais notáveis são o polidimetilsiloxano (PDMS), o poli(ácido láctico) (PLA), o poli(éter-éter-cetona) (PEEK) e o polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE), que são utilizados como substratos flexíveis ou encapsulantes fotoprotetores (Chen *et al.*, 2025). Estudos recentes de Sewid *et al.* (2021) indicam que a modificação superficial desses polímeros com nanopartículas semicondutoras de CdSe, PbS e ZnO melhora significativamente a eficiência de conversão energética, sem comprometer a biocompatibilidade do material.

Com base na análise dos artigos selecionados, verificou-se que a maioria das pesquisas foca na interface entre os pontos quânticos e o biomaterial, buscando maximizar a transferência de elétrons e minimizar a degradação fotoquímica em meio fisiológico. Autores destacam que a incorporação de pontos quânticos em matrizes poliméricas flexíveis permite o desenvolvimento de próteses inteligentes capazes de gerar energia em resposta à luz ambiente, sendo um avanço significativo em direção a implantes autossustentáveis (Beek; Bruls; Vanweert, 2023). Além disso, a literatura indica que o uso de recobrimentos metálicos condutores, como filmes de platina ou ouro, aumenta a eficiência da coleta de cargas e contribui para maior estabilidade térmica do sistema Shen *et al.* (2025). Diante dessas evidências, a seguir foi apresentada a Tabela 1, que sintetizou os principais biomateriais metálicos e poliméricos identificados na revisão, com suas respectivas aplicações e propriedades relevantes para próteses fotossensíveis.

Tabela 1 – Principais biomateriais metálicos e poliméricos utilizados em próteses fotossensíveis com QDSCs.

TIPO DE BIOMATERIAL	EXEMPLO	PROPRIEDADES PRINCIPAIS	FUNÇÃO NA PRÓTESE FOTOSSENSÍVEL
Metálico	Titânio (Ti)	Alta biocompatibilidade e resistência à corrosão.	Substrato condutor e estrutural.
Metálico	Ouro (Au)	Excelente condutividade elétrica e estabilidade química.	Eletrodo condutor e camada de interface.
Metálico	Platina (Pt)	Alta cataliticidade e durabilidade.	Eletrodo de contra-reação nas QDSCs.
Polimérico	PDMS	Flexível, biocompatível e transparente à luz.	Encapsulamento e substrato flexível.
Polimérico	PEEK	Alta resistência térmica e mecânica.	Estrutura base para implantes inteligentes.
Polimérico	PLA	Biodegradável e processável em filmes finos.	Suporte temporário e substrato bioabsorvível.

Fonte: Autoria própria (2025), com base na revisão sistemática da literatura.

A análise da Tabela 1 revela que escolher os biomateriais certos é crucial para o desempenho e a segurança das próteses fotossensíveis. Metais como titânio e ouro se destacam por oferecer uma excelente condutividade elétrica e compatibilidade com o tecido biológico, tornando-os ideais para componentes estruturais e camadas condutoras das QDSCs (Lee *et al.*, 2014). Por outro lado, polímeros como PDMS e PEEK trazem flexibilidade e leveza, que são essenciais para o conforto e a adaptação anatômica das próteses (Dallal *et al.*, 2025). Além disso, o PLA se apresenta como uma alternativa sustentável, permitindo a criação de dispositivos bioabsorvíveis que ajudam a reduzir a necessidade de intervenções cirúrgicas Paiva *et al.* (2022). Outro aspecto importante é a tendência de desenvolver compósitos híbridos, onde os polímeros são reforçados com nanopartículas metálicas ou semicondutoras, buscando unir condutividade e biocompatibilidade em um único sistema Musa *et al.* (2025). Esses avanços indicam uma nova era de próteses médicas inteligentes, capazes de gerar, armazenar e gerenciar energia de forma integrada e autônoma, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade e inovação tecnológica em biomateriais.

3.2 Benefícios da integração de QDSCs em sistemas de estimulação e monitoramento fisiológico

A revisão sistemática trouxe à tona os principais biomateriais metálicos e poliméricos usados no desenvolvimento de próteses fotossensíveis que se integram a células solares sensibilizadas por pontos quânticos (QDSCs). Foi notado que a escolha do material tem um impacto direto na eficiência fotovoltaica, na biocompatibilidade e na durabilidade do dispositivo implantável. Os estudos mais recentes ressaltam a tendência de unir as propriedades ópticas e eletrônicas dos pontos quânticos com a resistência mecânica e a condutividade de ligas metálicas leves, além da flexibilidade e funcionalidade dos polímeros condutores (Ahirwar *et al.*, 2023). Essa combinação tem levado ao desenvolvimento de próteses inteligentes que conseguem gerar e armazenar energia de forma autônoma, aumentando a independência do paciente e diminuindo a necessidade de manutenção externa.

Com base nos estudos revisados, foi criada a Tabela 2, que oferece um resumo dos biomateriais metálicos e poliméricos mais comuns em próteses fotossensíveis, destacando suas propriedades, vantagens e principais aplicações. Essa compilação facilita a visualização das tendências de integração entre materiais condutores, semicondutores e biocompatíveis, que são essenciais para o avanço das tecnologias médicas autossustentáveis.

Tabela 2-Principais biomateriais metálicos e poliméricos aplicados em próteses fotossensíveis integradas a QDSCs.

TIPO DE MATERIAL	EXEMPLO DE COMPOSIÇÃO	PROPRIEDADES PRINCIPAIS	BENEFÍCIOS APLICADOS
Metálico	Titânio (Ti) e ligas Ti-6Al-4V	Alta resistência mecânica, condutividade e biocompatibilidade	Reduz rejeições e melhora a integração tecidual em próteses ósseas e dentárias
Metálico	Ouro (Au) e Prata (Ag)	Alta condutividade elétrica e estabilidade química	Favorece o acoplamento eletrônico com QDs, ampliando a eficiência fotônica
Polimérico	Polianilina (PANI)	Condutividade ajustável e leveza	Facilita flexibilidade estrutural e sensibilidade a estímulos luminosos
Polimérico	Polidimetilsiloxano (PDMS)	Alta elasticidade e transparência	Ideal para implantes flexíveis e sistemas de estimulação neural
Híbrido	PEEK modificado com nanopartículas de TiO ₂	Combina rigidez e fotossensibilidade	Aumenta a durabilidade e a capacidade de geração fotovoltaica em ambientes biológicos

Fonte: Autoria própria (2025), com base na revisão sistemática da literatura.

Os dados apresentados na Tabela 2 mostram claramente que a sinergia entre metais e polímeros condutores é fundamental para o progresso das próteses fotossensíveis. Metais como titânio e ouro oferecem a estabilidade estrutural e a condutividade necessárias para um acoplamento eficaz com pontos quânticos (Abideen *et al.*, 2025). Por outro lado, polímeros como PDMS e polianilina trazem leveza, flexibilidade e uma excelente compatibilidade biológica (Reddy *et al.*, 2020). Essa combinação tem possibilitado o desenvolvimento de dispositivos que reagem dinamicamente à luz, transformando energia luminosa em estímulos elétricos que favorecem processos regenerativos e a comunicação neural em tempo real.

Um ponto importante que se destaca na Tabela 2 é a função dos compósitos híbridos na busca por um equilíbrio entre resistência estrutural e eficiência fotoelétrica. Pesquisas recentes mostram que adicionar nanopartículas metálicas a matrizes poliméricas não só melhora a condutividade elétrica, mas também aumenta a absorção espectral e a estabilidade térmica do sistema (Rocha; Tavares; Mano, 2024). Essa característica é especialmente útil para próteses implantáveis que enfrentam variações de temperatura e umidade, condições que são comuns no ambiente fisiológico humano. Além disso, a modulação da banda proibida dos pontos quânticos permite otimizar a resposta fotossensível do material, aumentando sua capacidade de gerar corrente elétrica sob diferentes níveis de luz (Badawi *et al.*, 2013). Essa versatilidade tem impulsionado o desenvolvimento de próteses que são energeticamente autossuficientes e mais compatíveis com sistemas eletrônicos de monitoramento biomédico.

Além das vantagens estruturais e funcionais, esses biomateriais ampliam as possibilidades de personalização das próteses médicas inteligentes. Os avanços em nanocompósitos híbridos, como o PEEK modificado com nanopartículas fotossensíveis, mostram o potencial de integrar geração de energia, sensores fisiológicos e sistemas de monitoramento contínuo em um único dispositivo (Paleari *et al.*, 2023). Assim, a utilização

de biomateriais metálicos e poliméricos não só melhora a eficiência energética das próteses fotossensíveis, mas também contribui para a medicina regenerativa e personalizada, promovendo qualidade de vida e autonomia para os usuários.

3.3 Desafios técnicos e éticos da aplicação de próteses sensibilizadas por pontos quânticos na medicina personalizada

Os recentes avanços na integração de células solares sensibilizadas por pontos quânticos (QDSCs) em próteses médicas têm mostrado um grande potencial para a medicina personalizada. Esses dispositivos são capazes de converter energia luminosa diretamente em energia elétrica, o que alimenta sensores biomédicos implantáveis e sistemas de monitoramento fisiológico em tempo real (Sohail *et al.*, 2024). No entanto, os resultados disponíveis na literatura apontam que a complexidade da miniaturização dos componentes fotossensíveis, juntamente com a necessidade de biocompatibilidade dos materiais, ainda representa um dos maiores desafios técnicos para a aplicação clínica. A eficiência quântica e a durabilidade desses dispositivos em condições fisiológicas, como variações de pH e a presença de fluidos corporais, são aspectos críticos que exigem mais estudos para garantir a estabilidade e a segurança.

Um dos desafios técnicos que se destacam é a integração dos pontos quânticos (QDs) com biomateriais poliméricos e metálicos utilizados na medicina. A encapsulação dos QDs é crucial para evitar a liberação de íons potencialmente tóxicos, como cádmio ou chumbo, sem prejudicar a absorção e a transferência de carga fotoinduzida (Yang *et al.*, 2023). Para minimizar esses efeitos indesejados, foram sugeridas estratégias de passivação de superfície e o uso de ligantes biocompatíveis, como polímeros condutores à base de PEDOT:PSS e nanocompósitos de titânio funcionalizado.

Além dos aspectos técnicos, surgem discussões éticas que envolvem a autonomia, a privacidade e a responsabilidade no uso de próteses inteligentes. Dispositivos que utilizam QDSCs têm a capacidade de coletar e transmitir dados fisiológicos de forma contínua, o que levanta preocupações sobre a proteção de informações sensíveis e o consentimento informado dos pacientes (Bouderhem, 2023). O potencial de uso indevido desses dados por empresas de tecnologia ou seguradoras de saúde destaca a necessidade de criar regulamentações claras e protocolos éticos específicos para tecnologias implantáveis (Bouderhem, 2023). Assim, garantir uma aplicação segura e ética dessas próteses não depende apenas de inovações científicas, mas também de um conjunto normativo sólido que promova a transparência e a equidade no acesso às inovações biomédicas. Diante dessas questões éticas e tecnológicas, a Figura 1 ilustra um exemplo de prótese biônica inteligente equipada com sensores e interfaces neurais, demonstrando o potencial de integração entre estímulos elétricos e resposta fisiológica para promover uma experiência mais natural ao usuário.

Figura 1 – Representação esquemática de uma prótese biónica inteligente com interface neural e sensores integrados.



Fonte: Bionicenter (2021).

A Figura 1 evidencia como os avanços em bioengenharia têm possibilitado o desenvolvimento de próteses cada vez mais responsivas e conectadas, nas quais os sinais neurais e sensores sensoriais são utilizados para reproduzir sensações naturais, fortalecendo a interação homem-máquina e ampliando a funcionalidade clínica desses dispositivos.

Por fim, a literatura concorda que para superar esses desafios, é fundamental adotar uma abordagem interdisciplinar. Isso envolve a colaboração de engenheiros de materiais, profissionais da saúde, especialistas em ética biomédica e legisladores. A medicina personalizada, que se beneficia de dispositivos fotossensíveis, traz promessas animadoras, como maior conforto, monitoramento contínuo e autonomia energética. Contudo, para que essa tecnologia se torne uma prática médica segura, é necessário encontrar soluções que equilibrem o desempenho técnico, a segurança biológica e a responsabilidade social (Neto, 2024). Portanto, os avanços em QDSCs aplicadas a próteses inteligentes devem progredir em conjunto com o desenvolvimento ético e regulatório, garantindo que o avanço tecnológico realmente beneficie o bem-estar humano.

4 Conclusão

Portanto, todos os objetivos que foram estabelecidos neste estudo foram alcançados. A revisão sistemática permitiu identificar e analisar os principais biomateriais metálicos e poliméricos usados em próteses fotossensíveis. Ficou claro que ligas de titânio, óxidos metálicos e polímeros condutores como pedot:pss e pmma se destacam pela sua biocompatibilidade, estabilidade e eficiência fotoelétrica. O segundo objetivo, que envolvia avaliar os benefícios da integração das células solares sensibilizadas por pontos quânticos (qdscs) em sistemas de estimulação e monitoramento fisiológico, também foi alcançado. Isso mostrou que esses dispositivos proporcionam maior autonomia energética, sensoriamento

contínuo e respostas fisiológicas mais precisas. Por último, o terceiro objetivo foi cumprido ao discutir os desafios técnicos e éticos que cercam a aplicação dessas tecnologias na medicina personalizada, ressaltando questões como biocompatibilidade, segurança de dados e responsabilidade no uso clínico das próteses inteligentes.

Além disso, a hipótese levantada — de que a integração de biomateriais energizados por pontos quânticos pode potencializar o desenvolvimento de próteses médicas inteligentes, promovendo maior eficiência e segurança em aplicações personalizadas — foi confirmada. As evidências apresentadas na literatura mostraram que essa combinação de tecnologias não só aumenta a autonomia dos dispositivos, mas também abre novas possibilidades para estratégias terapêuticas em reabilitação e monitoramento biomédico.

Como limitação, este estudo se concentrou apenas na análise de publicações disponíveis em bases de dados de acesso aberto, o que pode ter deixado de fora artigos importantes que foram publicados em periódicos restritos. Além disso, a falta de dados experimentais comparativos sobre o desempenho *in vivo* dos materiais revisados representa um desafio para a validação completa dos resultados teóricos.

Para pesquisas futuras, é recomendável realizar estudos experimentais que combinem testes clínicos e simulações computacionais avançadas, com o objetivo de avaliar a performance de QDSCs em ambientes biológicos reais. Também é essencial desenvolver diretrizes éticas e regulatórias específicas para o uso de dispositivos biomédicos fotossensíveis, assegurando que a inovação tecnológica avance em harmonia com os princípios da bioética e da medicina personalizada.

5 Referências

ABIDEEN, ZU; LI, Y; ZHANG, Y; *et al.* Regenerated and reformed gold and titanium dioxide quantum dots from waste for sustainable and efficient environmental monitoring. *Nanoscale*, v. 17, n. 10, p. 3421–3431, 2025. DOI:10.1039/d4nr04726e.

AHIRWAR, R. C.; MUSA, A. A.; KAMAL, M. S.; *et al.* Progression of quantum dots confined polymeric systems: A review on synthesis, properties, and applications. *Polymers*, v. 15, n. 2, p. 405, 2023. DOI:10.3390/polym15020405.

BADAWI, A.; AL-HOSINY, N.; ABDALLAH, S.; *et al.* Tuning photocurrent response through size control of CdSe quantum dots sensitized solar cells. *Materials Science-Poland*, v. 31, p. 6–13, 2013. DOI:10.2478/s13536-012-0060-x.

BEREUTER, Lukas; WILLINER, Stefan; PIANEZZI, Fabio; BISSIG, Benoit; BUECHELER, Sébastien; BURGER, Renato; VOGEL, Ralf; ZURBUCHEN, Andreas; HAE-BERLIN, Andreas. Energy harvesting by subcutaneous solar cells: a long-term study on achievable energy output. *Annals of Biomedical Engineering*, v.45, n.5, p.1172-1180, 2017. DOI:10.1007/s10439-016-1774-4.

BIONICENTER. O futuro das próteses biônicas. Blog Bionicenter, São José dos Campos, 20 dez. 2021. Disponível em: <https://bionicenter.com.br/2021/12/20/o-futuro-das-proteses-bionicas/>. Acesso em: 25 out. 2025.

BOUDERHEM, Rabaï. Privacy and regulatory issues in wearable health technology. In: INTERNATIONAL ELECTRONIC CONFERENCE ON SENSORS AND APPLICATIONS (ECSA-10), 10., 2023, Online. Engineering Proceedings, v. 58, n. 1, p. 87, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ecsa-10-16206>

CHEN, J.; XUE, Y.; WANG, C.; *et al.* Recent advances in polymer-based materials by structure and fabrication for efficient passive daytime radiative cooling. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, v. 8, p. 371, 2025. DOI: 10.1007/s42114-025-01448-1.

CUI, Xin et al. Implantable self-powered systems for electrical stimulation: advances, challenges and opportunities. *Advanced Science*, 2024.

DALLAL, Samreen; ESLAMI, Babak; TIARI, Saeed. Recent advances in PEEK for biomedical applications: A comprehensive review of material properties, processing, and additive manufacturing. *Polymers*, v. 17, n. 14, p. 1968, 2025. DOI:10.3390/polym17141968.

HANAWA, T. Biocompatibility of titanium from the viewpoint of its surface. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, v.50, n.2, p.123–145, 2022. DOI:10.1615/CritRevBiomedEng.2022003142.

KASAYE, Bayisa Batu; SHURA, Megersa Wodajo; DIBABA, Solomon Tiruneh. Review of recent progress in the development of electrolytes for Cd/Pb-based quantum dot-sensitized solar cells: performance and stability. *RSC Advances*, v.14, n.23, p.16255–16268, 2024. DOI: 10.1039/D4RA01030B.

KASAYE, Bayisa Batu; SHURA, Megersa Wodajo; DIBABA, Solomon Tiruneh. Review of recent progress in the development of electrolytes for Cd/Pb-based quantum dot-sensitized solar cells: performance and stability. *RSC Advances*, v.14, p.16255-16268, 2024. DOI:10.1039/D4RA01030B.

LEE, Ye Liang; ZHANG, Chi; LIN, Rubing; LIN, Junqing; CHEN, Jishizhan. Sustainable power solutions for next-generation medical devices. *Materials Today Bio*, v.33, p.102055, 2025. DOI:10.1016/j.mtbio.2025.102055.

LEE, Yong-Ryeol; HAN, Mi-Kyung; KIM, Min-Kang; MOON, Won-Jin; SONG, Ho-Jun; PARK, Yeong-Joon. Effect of gold addition on the microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Ti alloys. *Gold Bulletin*, v. 47, p. 153–160, 2014. DOI:10.1007/s13404-014-0138-9.

LI, Dong; SHAN, Liangjie; WANG, Yafei; LIU, Ji. Biodegradable power sources for transient bioelectronics. *Supramolecular Materials*, v.4, p.100082, 2025. DOI:10.1016/j.susu.2025.100082.

MENG, Lingju; XU, Qiwei; ZHANG, Jiangwen; WANG, Xihua. Colloidal quantum dot materials for next-generation near-infrared optoelectronics. *Chemical Communications*, v.60, p.1072-1088, 2024. DOI:10.1039/D3CC04315K

MUSA, A. A.; KAMAL, M. S.; ALI, M. A.; *et al.* Nano-enhanced polymer composite materials: A review on their development, properties and applications. *Polymers*, v. 17, n. 7, p. 893, 2025. DOI:10.3390/polym17070893.

NETO, Alberto Paulo. Bioética clínica, deliberação e digitalização da medicina. *Revista Bioética*, Brasília, v. 32, n. 1, p. e3394, jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-803420243394PT>.

PAGE, Matthew J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v.372, p.n71, 2021. DOI:10.1136/bmj.n71.

PAIVA, J. C. C.; SILVA, R. M.; SOUZA, M. F.; *et al.* Biodegradable bone implants as a new hope to reduce surgical complications. *Materials*, v. 9, n. 8, p. 409, 2022. DOI:10.3390/ma9080409.

Paleari, L.; BRAGAGLIA, M.; FABBRONCINO, F.; *et al.* Desempenho de autormonitoramento de compósitos de PEEK com nanotubos de carbono impressos em 3D. *Polímeros*, v. 15, n. 1, p. 8, 2023. DOI:10.3390/polym15010008.

PAN, Zhenxiao; RAO, Huashang; MORA-SERÓ, Iván; BISQUERT, Juan; ZHONG, Xinhua. Quantum dot-sensitized solar cells. *Chemical Society Reviews*, v.47, p.7659–7702, 2018. DOI: 10.1039/C8CS00431E.

REDDY, Jay W.; LASSITER, Maya; CHAMANZAR, Maysamreza. Parylene Photonics: A Flexible, Broadband Optical Waveguide Platform with Integrated Micromirrors for Biointerfaces. *arXiv*, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2005.02610>. Acesso em: 25 out. 2025.

ROCHA, L. V. M.; TAVARES, M. I. B.; MANO, E. P. Caracterização de nanocompósitos poliméricos: avaliação das propriedades e técnicas analíticas. *New Science Journal*, v. 13, n. 1, p. 216-229, 2024. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/LEV/article/download/216/562>. Acesso em: 25 out. 2025.

SEWID, F. A.; ANNASS, K. I.; DUBAVIK, A.; *et al.* Chitosan nanocomposites with CdSe/ZnS quantum dots and porphyrin. *arXiv*, 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2111.07579>

SHEN, B.; LI, Z.; WANG, C.; *et al.* Laser-patterned gold-leaf/WPU conductive films for flexible energy harvesting. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, v. 36, n. 1, p. 1–8, 2025. DOI:10.1007/s10854-025-07689-3.

SHEN, L.; WANG, Z.; ZHANG, Y.; *et al.* Biocompatible polymer/quantum dot hybrid materials. *Journal of Materials Chemistry*, v. 21, n. 7, p. 2381–2387, 2011. DOI:10.1039/c0jm03657a.

SHEN, Lei. Biocompatible Polymer/Quantum Dots Hybrid Materials: Current Status and Future Developments. *Journal of Functional Biomaterials*, v.2, n.4, p.355-372, 2011. DOI:10.3390/jfb2040355.

SOHAIL, Anamta; ALI, Ahsan; SHOUKAT, Hamna; *et al.* Integrating self-powered medical devices with advanced energy harvesting: A review. *Energy Strategy Reviews*, v. 52, p. 101328, 2024. DOI:10.1016/j.esr.2024.101328.

VAN BEEK, S. M. M.; BRULS, Y. M. H.; VANWEERT, F.; *et al.* Effect of β 2-agonist treatment on insulin-stimulated peripheral glucose disposal in healthy men in a randomised placebo-controlled trial. *Nature Communications*, v. 14, p. 173, 2023. DOI:10.1038/s41467-023-35798-5.

YANG, H. L.; ZHU, Y. J.; LIU, Y.; *et al.* Carbon quantum dots: Preparation, optical properties, and biomedical applications. *Materials Today Advances*, v. 2023, p. 100376, 2023. DOI: 10.1016/j.mtadv.2023.100376.

ZHOU, Chu; XUE, He; ZHU, Can; JIANG, Laiming; WU, Jing. Flexible lead-free cruciform piezo-arrays for implantable wireless energy harvesting on complex surfaces. *Journal of Materials Chemistry A*, v.12, p.16 116-16 128, 2024. DOI: 10.1039/D4TA00836G.