

Bioimpressão 3D na biomedicina: aplicações na engenharia de tecidos, desafios e perspectivas clínicas

3D bioprinting in biomedicine: applications in tissue engineering, challenges, and clinical perspectives

Thiago Mendes Sansevero¹

Danielle Rodrigues de Oliveira²

Gabriela de Amorim Ferreira Antonio³

José Alberto Paris Junior⁴

Resumo

A bioimpressão tridimensional (3D) representa uma das mais importantes inovações tecnológicas da Biomedicina contemporânea, reunindo conhecimentos da engenharia de tecidos, biologia celular, biomateriais e medicina regenerativa para o desenvolvimento de estruturas biológicas capazes de reproduzir características anatômicas e funcionais dos tecidos humanos. Essa tecnologia vem ampliando as possibilidades da pesquisa biomédica, da medicina personalizada e do desenvolvimento de novas estratégias terapêuticas, destacando-se como importante ferramenta para a produção de modelos experimentais, avaliação de medicamentos e regeneração tecidual. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar as evidências científicas relacionadas à bioimpressão 3D na Biomedicina, abordando seus fundamentos, principais aplicações, desafios e perspectivas futuras. Trata-se de uma pesquisa qualitativa, de natureza descritiva e exploratória, desenvolvida por meio de revisão integrativa da literatura, utilizando artigos científicos indexados nas bases PubMed/MEDLINE, SciELO, Biblioteca Virtual em Saúde, Scopus, Web of Science e Google Scholar, publicados entre 2016 e 2025. Os resultados evidenciaram que a bioimpressão tridimensional apresenta aplicações promissoras na engenharia de tecidos, medicina regenerativa, farmacologia, oncologia e medicina personalizada, contribuindo para o desenvolvimento de modelos biológicos mais representativos da fisiologia humana e para o avanço da pesquisa translacional. Entretanto, verificou-se que desafios relacionados à vascularização dos tecidos, manutenção da viabilidade celular,

¹ Professor Mestre do Centro Universitário Santa Cecília – UNICEA. Mestre em Biotecnologia pela Universidade de Mogi das Cruzes – UMC. Bacharel em Biomedicina pela Universidade de Mogi das Cruzes – UMC.

² Professora Doutora do Centro Universitário Santa Cecília – UNICEA. Doutora em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' – UNESP. Bacharela em Fisioterapia pela Universidade de Taubaté – UNITAU. E-mail: danielleror@gmail.com

³ Professora Mestra do Centro Universitário Santa Cecília – UNICEA. Mestra em Design, Tecnologia e Inovação pelo Centro Universitário Teresa D'Ávila – UNIFATEA. Bacharela em Enfermagem pela Universidade de Taubaté – UNITAU, Licenciada em Pedagogia pela Faculdade Única de Ipatinga e Licenciada em Ciências Biológicas pelo Centro Universitário ETEP.

⁴ Professor Doutor. Doutor em Biotecnologia em Medicina Regenerativa e Química Medicinal pela Universidade de Araraquara – UNIARA. Bacharel em Biomedicina pela Universidade de Araraquara – UNIARA. E-mail: parisjosejr@gmail.com.

aperfeiçoamento das biotintas, desenvolvimento de biomateriais, regulamentação e validação clínica ainda limitam sua ampla utilização na prática assistencial. Conclui-se que a bioimpressão 3D possui elevado potencial para transformar a Biomedicina nas próximas décadas, ampliando as possibilidades diagnósticas, terapêuticas e investigativas. Todavia, a consolidação dessa tecnologia dependerá da continuidade das pesquisas científicas, do fortalecimento da inovação tecnológica e do desenvolvimento de marcos regulatórios capazes de assegurar sua aplicação ética, segura e eficaz.

Palavras-chave: Bioimpressão 3D. Biomedicina. Engenharia de tecidos. Medicina regenerativa. Biotintas.

Abstract

Three-dimensional (3D) bioprinting represents one of the most important technological innovations in contemporary Biomedicine, integrating knowledge from tissue engineering, cell biology, biomaterials, and regenerative medicine to develop biological structures capable of reproducing the anatomical and functional characteristics of human tissues. This technology has expanded the possibilities of biomedical research, personalized medicine, and the development of new therapeutic strategies, standing out as an important tool for the production of experimental models, drug evaluation, and tissue regeneration. In this context, the present study aimed to analyze the scientific evidence related to 3D bioprinting in Biomedicine, addressing its foundations, main applications, challenges, and future perspectives. This is a qualitative, descriptive, and exploratory study developed through an integrative literature review using scientific articles indexed in PubMed/MEDLINE, SciELO, Virtual Health Library, Scopus, Web of Science, and Google Scholar, published between 2016 and 2025. The results demonstrated that three-dimensional bioprinting presents promising applications in tissue engineering, regenerative medicine, pharmacology, oncology, and personalized medicine, contributing to the development of biological models that more accurately represent human physiology and to the advancement of translational research. However, challenges related to tissue vascularization, maintenance of cell viability, improvement of bioinks, development of biomaterials, regulation, and clinical validation still limit its widespread clinical application. It is concluded that 3D bioprinting has great potential to transform Biomedicine in the coming decades by expanding diagnostic, therapeutic, and investigative possibilities. Nevertheless, the consolidation of this technology will depend on continued scientific research, technological innovation, and the establishment of regulatory frameworks capable of ensuring its ethical, safe, and effective application.

Keywords: 3D Bioprinting. Biomedicine. Tissue Engineering. Regenerative Medicine. Bioinks.

1 INTRODUÇÃO

A bioimpressão tridimensional (3D bioprinting) representa uma das tecnologias mais promissoras da Biomedicina contemporânea, reunindo conhecimentos provenientes da engenharia de tecidos, biologia celular, biomateriais, bioengenharia e manufatura aditiva para produzir estruturas biológicas capazes de mimetizar tecidos humanos. Diferentemente da impressão tridimensional convencional, a bioimpressão utiliza células vivas, biomateriais e moléculas bioativas, organizados em camadas sucessivas por meio de biotintas (bioinks), permitindo a fabricação de construções tridimensionais com potencial aplicação na medicina regenerativa, na pesquisa biomédica e na medicina personalizada (Liu et al., 2024; Mirsky et al., 2024).

Nas últimas décadas, o avanço das técnicas de biofabricação impulsionou o desenvolvimento de modelos biológicos cada vez mais complexos, capazes de reproduzir características estruturais e funcionais dos tecidos humanos. Essa evolução vem ampliando as possibilidades de utilização da bioimpressão na produção de pele, cartilagem, tecido ósseo, estruturas vasculares, modelos tumorais e organoides empregados em estudos fisiopatológicos, testes farmacológicos e avaliação de toxicidade. Além disso, a tecnologia apresenta potencial para reduzir a dependência de modelos animais e contribuir para o desenvolvimento de terapias mais individualizadas, alinhadas aos princípios da medicina de precisão (Tan et al., 2021; Derakhshanfar et al., 2018).

No contexto brasileiro, embora a bioimpressão 3D ainda se encontre predominantemente no âmbito da pesquisa experimental, observa-se crescimento gradual da produção científica e do interesse por sua aplicação na engenharia de tecidos e na medicina regenerativa. Estudos nacionais ressaltam que a tecnologia possui elevado potencial para a fabricação de tecidos personalizados, desenvolvimento de modelos experimentais e futuras aplicações clínicas, embora persistam desafios relacionados à vascularização das estruturas bioimpressas, à viabilidade celular, à padronização das biotintas, aos custos tecnológicos e aos aspectos regulatórios necessários para sua incorporação segura aos serviços de saúde (Furlan; Barbosa; Moretto Junior, 2024).

Apesar dos avanços científicos observados, a produção de tecidos e órgãos totalmente funcionais ainda representa um dos maiores desafios da engenharia biomédica. A complexidade da arquitetura tecidual, a necessidade de vascularização adequada, a manutenção da funcionalidade celular após a impressão e a integração dos tecidos bioimpressos ao organismo constituem limitações que ainda restringem a aplicação clínica em larga escala. Paralelamente, aspectos bioéticos, regulatórios e econômicos também exigem constante discussão, considerando que a utilização dessas tecnologias deverá ocorrer de forma segura, eficaz e socialmente acessível (He et al., 2025; Pourmasoumi et al., 2023).

Diante desse cenário, emerge o seguinte problema de pesquisa: quais são as principais aplicações da bioimpressão 3D na Biomedicina e quais desafios científicos, tecnológicos e regulatórios ainda limitam sua ampla utilização na prática clínica?

Parte-se da hipótese de que a bioimpressão 3D constitui uma tecnologia estratégica para o avanço da Biomedicina, ampliando as possibilidades da engenharia de tecidos, da medicina regenerativa e da medicina personalizada. Entretanto, sua consolidação como ferramenta clínica depende da superação de desafios relacionados à viabilidade celular, vascularização, padronização dos biomateriais, validação científica e regulamentação ética.

O objetivo geral deste estudo consiste em analisar as evidências científicas relacionadas à bioimpressão 3D na Biomedicina, discutindo seus fundamentos, principais aplicações, desafios e perspectivas futuras.

Como objetivos específicos, busca-se: apresentar os princípios da bioimpressão 3D e sua relação com a engenharia de tecidos; discutir as principais aplicações da tecnologia na pesquisa biomédica e na medicina regenerativa; analisar os desafios técnicos, biológicos e regulatórios associados à bioimpressão; e identificar as perspectivas futuras dessa tecnologia para a prática biomédica.

A realização desta pesquisa justifica-se, cientificamente, pela rápida evolução da bioimpressão tridimensional e pela necessidade de sistematizar o conhecimento produzido acerca de suas aplicações biomédicas. Sob o aspecto social, o estudo contribui para ampliar a compreensão sobre uma tecnologia capaz de transformar estratégias diagnósticas, terapêuticas e regenerativas, oferecendo novas possibilidades para pacientes acometidos por doenças degenerativas, traumas e insuficiência de órgãos. Do ponto de vista profissional, a pesquisa evidencia a ampliação da atuação do biomédico em áreas como engenharia de tecidos, cultura celular, biomateriais, medicina regenerativa e pesquisa translacional.

Por fim, o artigo está estruturado em três capítulos. O primeiro aborda os fundamentos da bioimpressão 3D e sua relação com a Biomedicina. O segundo discute as principais aplicações da tecnologia na engenharia de tecidos, na medicina regenerativa e na pesquisa biomédica. O terceiro analisa os desafios técnicos, bioéticos e regulatórios, bem como as perspectivas futuras para a incorporação da bioimpressão 3D à prática biomédica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Fundamentos da bioimpressão 3D e sua relação com a Biomedicina

A bioimpressão tridimensional (3D bioprinting) constitui uma das mais importantes inovações tecnológicas aplicadas às ciências biomédicas nas últimas décadas, reunindo conhecimentos provenientes da engenharia de tecidos, biologia celular, biomateriais, bioengenharia, ciência dos materiais e manufatura aditiva. Diferentemente da impressão tridimensional convencional, destinada à fabricação de objetos utilizando polímeros, metais ou cerâmicas, a bioimpressão emprega células vivas, biomateriais e moléculas bioativas organizadas em biotintas (bioinks), possibilitando a construção de estruturas biológicas

tridimensionais capazes de reproduzir características morfológicas e funcionais dos tecidos humanos (Mirsky et al., 2024; Liu et al., 2024).

O princípio fundamental da bioimpressão baseia-se na deposição controlada de camadas sucessivas de biomateriais contendo células vivas, de acordo com modelos tridimensionais previamente elaborados em ambiente computacional. Após a impressão, essas construções passam por processos de maturação biológica, nos quais ocorre proliferação celular, organização da matriz extracelular e desenvolvimento gradual das propriedades estruturais e funcionais do tecido produzido. Dessa forma, a bioimpressão busca reproduzir, com elevado grau de fidelidade, a arquitetura dos tecidos naturais, criando modelos biologicamente mais representativos para pesquisa, desenvolvimento tecnológico e futuras aplicações clínicas (Tan et al., 2021).

O avanço da bioimpressão somente foi possível graças ao desenvolvimento simultâneo de diferentes áreas da ciência. A evolução das culturas celulares, da biologia molecular, da engenharia de biomateriais e das tecnologias digitais permitiu a produção de biotintas capazes de preservar a viabilidade celular durante o processo de impressão, mantendo características essenciais para o crescimento, diferenciação e organização dos tecidos bioimpressos. Paralelamente, o aperfeiçoamento dos sistemas computacionais possibilitou maior precisão na deposição das células, favorecendo a reprodução da complexa organização tridimensional observada nos tecidos humanos (Derakhshanfar et al., 2018; Raees et al., 2023).

Na Biomedicina, essa tecnologia representa importante ferramenta para investigação experimental e desenvolvimento de novas abordagens terapêuticas. A possibilidade de produzir tecidos biologicamente compatíveis amplia significativamente as perspectivas da medicina regenerativa, permitindo a criação de modelos experimentais mais próximos das condições fisiológicas humanas. Esses modelos favorecem estudos relacionados à fisiopatologia das doenças, avaliação de biomateriais, testes toxicológicos, desenvolvimento de medicamentos e investigação de terapias inovadoras, reduzindo limitações inerentes aos modelos bidimensionais tradicionais e ao uso de animais de experimentação (Arslan-Yildiz et al., 2016; Mirsky et al., 2024).

Outro aspecto relevante refere-se ao conceito de engenharia de tecidos, área que busca restaurar, substituir ou regenerar tecidos lesionados por meio da associação entre células, biomateriais e fatores biológicos. Nesse contexto, a bioimpressão tridimensional representa uma evolução da engenharia tecidual tradicional, uma vez que permite controlar, com elevada precisão espacial, a distribuição celular e a arquitetura dos biomateriais utilizados,

favorecendo a obtenção de construções mais próximas da organização observada nos tecidos naturais (Liu et al., 2024).

As biotintas constituem um dos elementos centrais desse processo. Elas são compostas por biomateriais naturais, sintéticos ou híbridos, associados a células vivas e, frequentemente, enriquecidos com fatores de crescimento, proteínas e outras moléculas bioativas. Para que apresentem desempenho adequado, essas formulações devem reunir propriedades como biocompatibilidade, viscosidade apropriada, estabilidade estrutural e capacidade de preservar a viabilidade celular durante e após a impressão. A escolha da biotinta influencia diretamente a qualidade das estruturas produzidas, sendo considerada um dos principais fatores responsáveis pelo sucesso da bioimpressão (Raees et al., 2023).

Outro componente indispensável corresponde às tecnologias empregadas durante o processo de impressão. Atualmente, destacam-se quatro métodos principais: bioimpressão por extrusão, bioimpressão por jato de tinta (inkjet), bioimpressão assistida por laser e bioimpressão baseada em fotopolimerização. Cada técnica apresenta características próprias relacionadas à resolução, velocidade, viscosidade das biotintas e preservação da viabilidade celular, sendo selecionada conforme o tipo de tecido a ser produzido e os objetivos da aplicação biomédica. Embora nenhuma tecnologia seja considerada universalmente superior, observa-se contínuo aperfeiçoamento dos equipamentos visando aumentar a precisão, reduzir danos celulares e ampliar a complexidade das estruturas fabricadas (He et al., 2025; Tan et al., 2021).

Além dos aspectos tecnológicos, destaca-se o papel crescente da Biomedicina na integração entre pesquisa laboratorial e desenvolvimento translacional. O biomédico participa de diferentes etapas relacionadas à bioimpressão, incluindo cultura celular, isolamento e caracterização de células, avaliação da viabilidade celular, desenvolvimento e caracterização de biomateriais, análises histológicas, testes moleculares e validação experimental dos tecidos produzidos. Dessa forma, a bioimpressão amplia significativamente os campos de atuação profissional, aproximando a Biomedicina das áreas de engenharia de tecidos, medicina regenerativa, bioengenharia e pesquisa translacional (Furlan; Barbosa; Moretto Junior, 2024).

Embora os avanços observados sejam expressivos, a bioimpressão ainda enfrenta importantes limitações relacionadas à reprodução da elevada complexidade estrutural dos tecidos humanos, especialmente no desenvolvimento de órgãos vascularizados e plenamente funcionais. Entretanto, o contínuo aperfeiçoamento das biotintas, dos biomateriais, dos sistemas de impressão e das estratégias de maturação tecidual vem ampliando

progressivamente o potencial dessa tecnologia, consolidando-a como um dos campos mais promissores da Biomedicina contemporânea (Mirsky et al., 2024; He et al., 2025).

Com o objetivo de sintetizar os principais fundamentos tecnológicos envolvidos na bioimpressão tridimensional, apresenta-se o Quadro 1.

Quadro 1: Principais fundamentos da bioimpressão 3D aplicada à Biomedicina

Componente	Caracterização	Importância para a Biomedicina
Bioimpressão 3D	Fabricação camada por camada de estruturas biológicas contendo células vivas e biomateriais.	Produção de modelos experimentais e tecidos para medicina regenerativa.
Biotintas (Bioinks)	Mistura de células, biomateriais e moléculas bioativas.	Mantêm viabilidade celular e permitem formação dos tecidos bioimpressos.
Biomateriais	Hidrogéis naturais, sintéticos ou híbridos utilizados como suporte estrutural.	Favorecem adesão, proliferação e diferenciação celular.
Cultura celular	Expansão e preparo das células utilizadas na impressão.	Garante disponibilidade de células viáveis para fabricação dos tecidos.
Engenharia de tecidos	Associação entre células, biomateriais e fatores biológicos para regeneração tecidual.	Base científica da medicina regenerativa e da bioimpressão.
Bioimpressão por extrusão	Deposição contínua de biotintas por pressão mecânica ou pneumática.	Técnica mais utilizada para fabricação de tecidos complexos.
Bioimpressão por jato de tinta	Deposição de pequenas gotas de biotinta em alta velocidade.	Elevada resolução para tecidos de menor espessura.
Bioimpressão assistida por laser	Transferência precisa de células por pulsos de laser.	Alta precisão e preservação da viabilidade celular.
Fotopolimerização (DLP/SLA)	Solidificação controlada por luz de resinas fotossensíveis.	Produção de microestruturas com elevada resolução espacial.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Arslan-Yildiz et al. (2016), Derakhshanfar et al. (2018), Tan et al. (2021), Raees et al. (2023), Mirsky et al. (2024), Liu et al. (2024) e He et al. (2025)

A síntese apresentada no Quadro 1 demonstra que a bioimpressão tridimensional resulta da integração entre diferentes áreas do conhecimento, envolvendo biologia celular, engenharia de tecidos, biomateriais, ciência dos materiais e tecnologias digitais. Observa-se que cada componente desempenha função específica durante o processo de biofabricação, contribuindo para a obtenção de estruturas biologicamente viáveis e funcionalmente mais próximas dos tecidos humanos. Essa abordagem interdisciplinar evidencia que o sucesso da bioimpressão depende não apenas da tecnologia empregada, mas também da adequada interação entre células, biomateriais e métodos de impressão.

Assim, a bioimpressão 3D representa uma das tecnologias mais inovadoras da Biomedicina atual, ampliando significativamente as possibilidades da engenharia de tecidos e da medicina regenerativa. Seus fundamentos científicos estabelecem as bases para o desenvolvimento de modelos biológicos mais complexos, capazes de contribuir para pesquisas experimentais, testes farmacológicos e futuras aplicações clínicas. A partir desses princípios, torna-se possível compreender as diferentes aplicações da bioimpressão na produção de tecidos e modelos biológicos, temática que será aprofundada no capítulo seguinte.

2.2 Aplicações da bioimpressão 3D na engenharia de tecidos e na pesquisa biomédica

A bioimpressão tridimensional consolidou-se como uma das tecnologias mais promissoras da Biomedicina ao possibilitar a fabricação de estruturas biológicas capazes de reproduzir características anatômicas e funcionais dos tecidos humanos. Sua aplicação ultrapassa o desenvolvimento de modelos experimentais, abrangendo áreas como engenharia de tecidos, medicina regenerativa, farmacologia, oncologia, toxicologia e medicina personalizada. A capacidade de organizar células vivas e biomateriais em arquiteturas tridimensionais favorece a obtenção de modelos biológicos mais próximos da realidade fisiológica, ampliando significativamente a qualidade das pesquisas biomédicas e o potencial para futuras aplicações clínicas (Mirsky et al., 2024; Liu et al., 2024).

Entre as principais aplicações da bioimpressão destaca-se a engenharia de tecidos, cujo objetivo consiste em restaurar ou substituir estruturas lesionadas por meio da fabricação de tecidos biologicamente funcionais. Nesse contexto, pesquisadores vêm obtendo resultados promissores na produção de tecidos cutâneos, ósseos, cartilagosos, musculares, vasculares e

cardíacos. A organização espacial precisa das células favorece a formação de construções tridimensionais que apresentam maior semelhança estrutural com os tecidos naturais quando comparadas aos modelos bidimensionais tradicionalmente utilizados em laboratório (Tan et al., 2021).

Na regeneração da pele, a bioimpressão tem sido empregada para produzir enxertos contendo queratinócitos, fibroblastos e biomateriais capazes de estimular a cicatrização e a reconstrução tecidual. Essa abordagem apresenta especial interesse no tratamento de queimaduras extensas, úlceras crônicas e lesões traumáticas, reduzindo a necessidade de enxertos convencionais e favorecendo uma regeneração mais organizada. Estudos recentes demonstram que modelos bioimpressos apresentam adequada viabilidade celular e elevada capacidade de integração aos processos fisiológicos de reparação tecidual, embora ainda existam limitações relacionadas à vascularização completa dessas estruturas (Derakhshanfar et al., 2018; Mirsky et al., 2024).

Outra aplicação amplamente investigada refere-se à regeneração óssea e cartilaginosa. A associação entre células-tronco mesenquimais, biomateriais e fatores de crescimento permite fabricar estruturas com propriedades mecânicas e biológicas compatíveis com os tecidos esqueléticos. Essas construções vêm sendo estudadas para o tratamento de defeitos ósseos extensos, lesões articulares e doenças degenerativas, representando alternativa promissora às técnicas convencionais de reconstrução (Tan et al., 2021; Zoghi, 2024).

Na medicina cardiovascular, pesquisadores têm desenvolvido tecidos cardíacos e estruturas vasculares bioimpressas destinadas principalmente à pesquisa experimental e aos testes farmacológicos. Embora ainda não seja possível produzir corações plenamente funcionais para transplante, os avanços obtidos na fabricação de vasos sanguíneos, microvasculaturas e modelos cardíacos tridimensionais representam importante etapa para o desenvolvimento futuro de órgãos bioartificiais. A reprodução da arquitetura vascular permanece um dos principais desafios científicos da área, sendo considerada requisito fundamental para garantir a sobrevivência celular em tecidos de maior espessura (He et al., 2025; Liu et al., 2024).

A bioimpressão também vem transformando a pesquisa oncológica por meio da produção de modelos tumorais tridimensionais que reproduzem, de forma mais fiel, o microambiente tumoral observado no organismo humano. Esses modelos permitem investigar mecanismos de crescimento tumoral, invasão celular, angiogênese e resistência aos medicamentos, contribuindo para o desenvolvimento de terapias mais eficazes e individualizadas. Em comparação aos cultivos celulares bidimensionais, os modelos

bioimpressos apresentam maior capacidade de reproduzir as interações celulares e a organização tridimensional característica dos tumores humanos (Mirsky et al., 2024).

Outra aplicação de grande relevância corresponde ao desenvolvimento de organoides bioimpressos. Os organoides são estruturas celulares tridimensionais produzidas a partir de células-tronco capazes de reproduzir características morfológicas e funcionais de órgãos humanos em escala reduzida. Quando associados às técnicas de bioimpressão, esses modelos tornam-se ainda mais organizados e reprodutíveis, favorecendo pesquisas relacionadas ao desenvolvimento embrionário, doenças genéticas, medicina personalizada e testes farmacológicos (Huang et al., 2025).

Na indústria farmacêutica, a bioimpressão representa importante ferramenta para avaliação de eficácia e toxicidade de novos medicamentos. A utilização de tecidos bioimpressos permite analisar respostas biológicas em modelos mais próximos da fisiologia humana, reduzindo limitações dos ensaios convencionais e contribuindo para diminuir o uso de animais em pesquisas. Essa abordagem favorece maior previsibilidade dos resultados pré-clínicos e acelera o desenvolvimento de novos fármacos, tornando os processos de pesquisa mais seguros e eficientes (Ali et al., 2024).

Além das aplicações terapêuticas e experimentais, a bioimpressão desempenha papel estratégico na consolidação da medicina personalizada. A possibilidade de utilizar células provenientes do próprio paciente permite desenvolver tecidos biologicamente compatíveis, reduzindo riscos de rejeição imunológica e ampliando as perspectivas para terapias individualizadas. Embora essa aplicação ainda permaneça predominantemente em fase experimental, diversos estudos apontam que sua evolução poderá transformar profundamente a prática clínica nas próximas décadas (Pourmasoumi et al., 2023).

No contexto da Biomedicina, essas aplicações ampliam significativamente o campo de atuação profissional. O biomédico participa do isolamento celular, cultura de células, caracterização molecular dos tecidos bioimpressos, controle de qualidade das biotintas, análises histológicas, testes de viabilidade celular e validação laboratorial das estruturas produzidas. Além disso, sua atuação integra equipes multidisciplinares voltadas à pesquisa translacional, desenvolvimento tecnológico e medicina regenerativa, fortalecendo o papel da Biomedicina como área essencial para o avanço das terapias celulares e da engenharia de tecidos (Furlan; Barbosa; Moretto Junior, 2024).

Com o objetivo de sintetizar as principais aplicações da bioimpressão tridimensional na Biomedicina, apresenta-se o Quadro 2.

Quadro 2: Principais aplicações da bioimpressão 3D na Biomedicina

Área de aplicação	Estruturas bioimpressas	Principais contribuições biomédicas
Engenharia de tecidos	Pele, osso, cartilagem e músculo	Regeneração tecidual e reconstrução de tecidos lesionados.
Medicina regenerativa	Tecidos e enxertos celulares	Desenvolvimento de terapias regenerativas e medicina personalizada.
Oncologia	Modelos tumorais tridimensionais	Estudos sobre crescimento tumoral, metástase e resposta terapêutica.
Farmacologia	Tecidos bioimpressos para ensaios	Avaliação de eficácia e toxicidade de novos medicamentos.
Pesquisa biomédica	Organoides e modelos celulares	Estudos fisiopatológicos e desenvolvimento de terapias inovadoras.
Medicina cardiovascular	Vasos sanguíneos e tecidos cardíacos	Desenvolvimento de modelos experimentais e pesquisa translacional.
Ortopedia	Tecidos ósseos e cartilagosos	Estudos de regeneração óssea e reparação articular.
Medicina personalizada	Tecidos produzidos com células do paciente	Redução do risco de rejeição e individualização terapêutica.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Derakhshanfar et al. (2018), Tan et al. (2021), Ali et al. (2024), Mirsky et al. (2024), Liu et al. (2024), Huang et al. (2025), He et al. (2025) e Zoghi (2024).

A síntese apresentada no Quadro 2 demonstra que a bioimpressão tridimensional possui aplicações cada vez mais diversificadas na Biomedicina, abrangendo desde pesquisas experimentais até estratégias voltadas à medicina regenerativa e personalizada. Observa-se que a tecnologia favorece a produção de modelos biológicos mais representativos, ampliando a qualidade das investigações científicas, reduzindo limitações metodológicas dos modelos convencionais e contribuindo para o desenvolvimento de terapias inovadoras. Embora muitas aplicações permaneçam em fase experimental, os resultados obtidos nas últimas décadas evidenciam o rápido avanço da bioimpressão em diferentes especialidades biomédicas.

Deste modo, as evidências científicas indicam que a bioimpressão 3D vem redefinindo a forma como tecidos humanos são produzidos e estudados, fortalecendo áreas como engenharia de tecidos, medicina regenerativa, farmacologia e pesquisa translacional. O contínuo aperfeiçoamento das técnicas de biofabricação amplia as perspectivas de utilização

clínica dessa tecnologia, ao mesmo tempo em que evidencia desafios científicos relacionados à produção de tecidos cada vez mais complexos. Esses aspectos serão aprofundados no capítulo seguinte, dedicado à análise das limitações, dos desafios técnicos e das perspectivas futuras da bioimpressão 3D na Biomedicina.

2.3 Desafios, limitações e perspectivas futuras da bioimpressão 3D na Biomedicina

A evolução da bioimpressão tridimensional representa um dos avanços mais expressivos da engenharia de tecidos e da medicina regenerativa. Entretanto, apesar dos importantes progressos observados nos últimos anos, a utilização clínica dessa tecnologia ainda enfrenta limitações científicas, biológicas, tecnológicas e regulatórias que restringem sua aplicação em larga escala. Assim, a consolidação da bioimpressão como ferramenta terapêutica depende do desenvolvimento de soluções capazes de garantir funcionalidade, segurança e reprodutibilidade dos tecidos produzidos (Mirsky et al., 2024; Liu et al., 2024).

Entre os principais desafios destaca-se a vascularização das estruturas bioimpressas. Tecidos humanos apresentam extensa rede vascular responsável pelo fornecimento de oxigênio, nutrientes e remoção de metabólitos. Na ausência dessa vascularização, células localizadas nas regiões mais profundas das construções tridimensionais tornam-se inviáveis, comprometendo a sobrevivência e a funcionalidade do tecido produzido. Embora diferentes estratégias estejam sendo investigadas, incluindo bioimpressão de vasos sanguíneos, utilização de fatores angiogênicos e técnicas de microfluídica, a obtenção de redes vasculares plenamente funcionais permanece como um dos maiores desafios da área (He et al., 2025; Tan et al., 2021).

Outro aspecto crítico refere-se à manutenção da viabilidade celular durante todo o processo de biofabricação. As células são submetidas a forças mecânicas, alterações de temperatura e diferentes condições físico-químicas durante a impressão, fatores que podem comprometer sua sobrevivência, proliferação e capacidade de diferenciação. Dessa forma, pesquisadores buscam continuamente aperfeiçoar as propriedades das biotintas e os parâmetros operacionais das bioimpressoras para minimizar danos celulares e preservar a funcionalidade biológica das construções tridimensionais (Raees et al., 2023).

A escolha dos biomateriais utilizados na formulação das biotintas também representa importante fator limitante. Os hidrogéis empregados precisam apresentar simultaneamente elevada biocompatibilidade, resistência mecânica adequada, capacidade de degradação controlada e propriedades reológicas compatíveis com os diferentes métodos de impressão.

Entretanto, poucos materiais conseguem reunir todas essas características, tornando frequente a utilização de formulações híbridas que associam biomateriais naturais e sintéticos na tentativa de equilibrar desempenho biológico e estabilidade estrutural (Derakhshanfar et al., 2018; Zoghi, 2024).

Além dos desafios biológicos, persistem limitações relacionadas à reprodução da elevada complexidade dos tecidos humanos. Órgãos como fígado, rins, pulmões e coração apresentam múltiplos tipos celulares organizados em arquiteturas tridimensionais altamente especializadas, acompanhadas por complexas redes vasculares, nervosas e sistemas de comunicação celular. Reproduzir simultaneamente todas essas características ainda constitui importante obstáculo científico, razão pela qual a maioria das aplicações clínicas permanece concentrada em tecidos relativamente menos complexos ou em modelos experimentais utilizados para pesquisa (Mirsky et al., 2024).

Os aspectos regulatórios também assumem papel fundamental na consolidação da bioimpressão. A fabricação de tecidos contendo células humanas exige rigorosos protocolos relacionados à biossegurança, controle de qualidade, rastreabilidade, validação laboratorial e boas práticas de fabricação. Além disso, diferentes países ainda desenvolvem normas específicas para regulamentar a produção, utilização e comercialização de tecidos bioimpressos, buscando assegurar eficácia terapêutica, segurança biológica e proteção dos pacientes (Liu et al., 2024).

Sob a perspectiva bioética, a bioimpressão desperta importantes discussões relacionadas à utilização de células humanas, propriedade intelectual, acesso às novas tecnologias e equidade na distribuição dos benefícios produzidos pela inovação científica. Também se debate a necessidade de estabelecer critérios transparentes para pesquisas envolvendo biofabricação de tecidos destinados a transplantes, considerando aspectos relacionados à segurança clínica, consentimento informado e responsabilidade profissional. Esses debates tornam-se ainda mais relevantes diante da possibilidade futura de fabricação de órgãos humanos personalizados (Pourmasoumi et al., 2023).

Outro desafio frequentemente mencionado refere-se ao elevado custo das tecnologias envolvidas. Equipamentos de bioimpressão, biomateriais especializados, cultura celular, laboratórios de alta complexidade e equipes multidisciplinares demandam investimentos significativos, restringindo a utilização da tecnologia principalmente a universidades, centros de pesquisa e instituições altamente especializadas. Essa realidade evidencia a necessidade de políticas públicas voltadas ao incentivo da pesquisa científica e da inovação tecnológica,

especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil (Furlan; Barbosa; Moretto Junior, 2024).

Apesar dessas limitações, as perspectivas futuras da bioimpressão são extremamente promissoras. O aperfeiçoamento contínuo das biotintas, o desenvolvimento de novos biomateriais inteligentes, a incorporação da inteligência artificial ao planejamento das construções tridimensionais e a evolução da bioimpressão 4D, tecnologia capaz de produzir estruturas que modificam suas propriedades em resposta a estímulos ambientais, tendem a ampliar significativamente as possibilidades terapêuticas da medicina regenerativa. Paralelamente, espera-se avanço na produção de tecidos vascularizados, organoides mais complexos e, futuramente, órgãos bioartificiais destinados à substituição de tecidos comprometidos por doenças degenerativas ou traumatismos (He et al., 2025; Pourmasoumi et al., 2023).

Nesse cenário, a atuação do biomédico torna-se cada vez mais estratégica. Além da participação em atividades laboratoriais relacionadas à cultura celular, caracterização molecular, controle de qualidade e validação dos tecidos produzidos, amplia-se sua inserção em pesquisas translacionais, desenvolvimento de biomateriais, engenharia de tecidos e medicina regenerativa. Dessa forma, a formação interdisciplinar e a atualização científica permanente tornam-se requisitos essenciais para acompanhar a rápida evolução dessa tecnologia e suas futuras aplicações clínicas.

Em síntese, observa-se que a bioimpressão tridimensional encontra-se em processo contínuo de evolução científica e tecnológica. Embora desafios importantes ainda limitem sua aplicação clínica rotineira, os avanços obtidos nos últimos anos indicam que essa tecnologia possui elevado potencial para transformar a medicina regenerativa, a engenharia de tecidos e diversas áreas da Biomedicina. O fortalecimento das pesquisas, o desenvolvimento de novos biomateriais, a consolidação dos marcos regulatórios e a ampliação da infraestrutura científica serão determinantes para que a bioimpressão alcance plenamente sua capacidade de beneficiar pacientes e profissionais da saúde.

Quadro 3: Principais desafios e perspectivas futuras da bioimpressão 3D na Biomedicina

Aspecto	Desafios atuais	Perspectivas futuras
Vascularização	Dificuldade na formação de redes vasculares funcionais.	Desenvolvimento de microvasos bioimpressos e tecidos vascularizados.
Viabilidade celular	Danos celulares durante a impressão e maturação.	Biotintas mais eficientes e protocolos otimizados de biofabricação.
Biomateriais	Limitações mecânicas e biológicas das biotintas atuais.	Biomateriais inteligentes com maior biocompatibilidade e funcionalidade.
Produção de órgãos	Elevada complexidade estrutural e funcional dos órgãos humanos.	Fabricação progressiva de órgãos bioartificiais para transplantes.
Regulamentação	Ausência de padronização internacional e validação clínica.	Consolidação de normas regulatórias e protocolos de biossegurança.
Bioética	Questões relacionadas ao uso de células humanas, acesso e responsabilidade científica.	Fortalecimento da governança ética e da regulamentação internacional.
Custos tecnológicos	Equipamentos e infraestrutura de elevado custo.	Democratização da tecnologia e ampliação do acesso aos centros de pesquisa.
Atuação do biomédico	Necessidade de formação interdisciplinar contínua.	Expansão da atuação em engenharia de tecidos, medicina regenerativa e pesquisa translacional.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Derakhshanfar et al. (2018), Tan et al. (2021), Raees et al. (2023), Zoghi (2024), Mirsky et al. (2024), Liu et al. (2024), He et al. (2025), Pourmasoumi et al. (2023) e Furlan, Barbosa e Moretto Junior (2024)

A síntese apresentada no Quadro 3 evidencia que a consolidação da bioimpressão 3D depende da superação simultânea de desafios biológicos, tecnológicos, econômicos, regulatórios e bioéticos. Observa-se que, embora os avanços científicos tenham ampliado significativamente as possibilidades de aplicação da tecnologia, questões relacionadas à vascularização, viabilidade celular, desenvolvimento de biomateriais e validação clínica ainda

representam obstáculos para sua utilização rotineira na prática assistencial. Em contrapartida, as perspectivas futuras demonstram um cenário de contínua evolução, impulsionado pelo aperfeiçoamento das técnicas de biofabricação e pela integração entre diferentes áreas do conhecimento.

Conclui-se, portanto, que a bioimpressão tridimensional reúne características que a posicionam entre as tecnologias mais inovadoras da Biomedicina contemporânea. Seu desenvolvimento poderá redefinir estratégias de diagnóstico, pesquisa e tratamento, contribuindo para o fortalecimento da medicina regenerativa e da medicina personalizada. Entretanto, o alcance desse potencial dependerá da continuidade das investigações científicas, da formação de profissionais qualificados e da construção de marcos regulatórios sólidos, capazes de assegurar que os avanços tecnológicos sejam incorporados de maneira ética, segura e socialmente responsável.

3 METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de abordagem qualitativa, de natureza descritiva e exploratória, desenvolvida por meio de revisão integrativa da literatura. Esse método foi selecionado por possibilitar a reunião, análise crítica e síntese das evidências científicas relacionadas à bioimpressão 3D aplicada à Biomedicina, permitindo compreender os avanços tecnológicos, as principais aplicações, os desafios atuais e as perspectivas futuras dessa tecnologia no contexto da engenharia de tecidos e da medicina regenerativa.

O levantamento bibliográfico foi realizado nas bases de dados PubMed/MEDLINE, SciELO, Biblioteca Virtual em Saúde (BVS), Google Scholar, Web of Science e Scopus, complementado pela consulta a documentos técnicos publicados por instituições científicas nacionais e internacionais relacionadas à bioengenharia, engenharia de tecidos e medicina regenerativa. A estratégia de busca utilizou descritores em português e inglês, combinados por operadores booleanos, incluindo os termos: bioimpressão 3D, bioimpressão tridimensional, engenharia de tecidos, medicina regenerativa, biotintas, biomateriais, 3D bioprinting, tissue engineering, regenerative medicine, bioinks e biomaterials.

Como critérios de inclusão, foram selecionados artigos científicos originais, revisões sistemáticas, revisões integrativas, estudos experimentais, documentos institucionais e publicações indexadas, disponibilizadas na íntegra, publicadas entre 2016 e 2025, diretamente relacionadas às aplicações da bioimpressão 3D na Biomedicina. Foram priorizados estudos

desenvolvidos por pesquisadores brasileiros sempre que compatíveis com os objetivos da pesquisa, recorrendo-se à literatura internacional para contemplar tecnologias emergentes e avanços científicos ainda pouco explorados no contexto nacional.

Foram excluídos trabalhos duplicados, resumos de eventos científicos, dissertações, teses, capítulos de livros, publicações sem revisão por pares, estudos sem acesso ao texto completo e documentos que não apresentassem relação direta com a temática proposta. Também foram desconsiderados estudos voltados exclusivamente ao desenvolvimento de equipamentos industriais ou aplicações da impressão tridimensional não relacionadas à área biomédica.

Após a seleção dos estudos, procedeu-se à leitura exploratória, seletiva e analítica das publicações, buscando identificar informações referentes aos fundamentos da bioimpressão 3D, às tecnologias empregadas, às principais aplicações na engenharia de tecidos, à medicina regenerativa, aos biomateriais utilizados, às limitações técnicas, aos aspectos bioéticos e às perspectivas futuras da tecnologia. Posteriormente, os dados foram organizados conforme os objetivos do estudo, permitindo a comparação crítica entre os diferentes trabalhos selecionados.

A análise das evidências ocorreu de forma qualitativa, considerando convergências, divergências e lacunas identificadas na literatura científica. Essa abordagem possibilitou compreender o estágio atual do desenvolvimento da bioimpressão 3D na Biomedicina, bem como discutir seu potencial para transformar a pesquisa biomédica, a medicina regenerativa e a medicina personalizada, preservando uma visão crítica acerca dos desafios que ainda limitam sua ampla aplicação clínica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise da literatura evidenciou que a bioimpressão tridimensional vem se consolidando como uma das tecnologias mais inovadoras da Biomedicina contemporânea, impulsionando avanços significativos na engenharia de tecidos, na medicina regenerativa e na pesquisa translacional. Os estudos analisados demonstram consenso quanto ao potencial da bioimpressão para produzir estruturas biológicas tridimensionais capazes de reproduzir, com maior fidelidade, características anatômicas e funcionais dos tecidos humanos quando comparadas aos modelos bidimensionais tradicionalmente empregados em pesquisas laboratoriais (Mirsky et al., 2024; Liu et al., 2024).

Observou-se que a evolução tecnológica da bioimpressão está diretamente relacionada ao aperfeiçoamento das biotintas, dos biomateriais e dos equipamentos de biofabricação. Os trabalhos mais recentes apontam que a combinação entre hidrogéis, células-tronco, fatores de crescimento e biomateriais inteligentes têm proporcionado avanços importantes na produção de tecidos biologicamente viáveis. Entretanto, os autores são unânimes ao afirmar que ainda existe significativa distância entre os resultados obtidos em ambiente experimental e sua aplicação clínica rotineira, especialmente em razão das dificuldades relacionadas à vascularização e à manutenção da funcionalidade dos tecidos produzidos (He et al., 2025; Raees et al., 2023).

Outro aspecto recorrente identificado nos estudos refere-se à ampla diversidade de aplicações biomédicas da bioimpressão. A literatura demonstra que a tecnologia já apresenta resultados promissores na produção de pele, cartilagem, tecido ósseo, estruturas vasculares, modelos tumorais e organoides destinados à pesquisa científica. Esses modelos permitem compreender com maior precisão mecanismos fisiopatológicos, avaliar respostas farmacológicas e desenvolver terapias experimentais mais seguras. Além disso, verificou-se tendência crescente de utilização da bioimpressão na medicina personalizada, possibilitando a produção de tecidos elaborados a partir de células do próprio paciente, reduzindo potenciais riscos de incompatibilidade imunológica (Tan et al., 2021; Huang et al., 2025).

No âmbito da pesquisa farmacêutica, os estudos analisados evidenciam importante contribuição da bioimpressão para o desenvolvimento de novos medicamentos. A utilização de tecidos bioimpressos proporciona modelos experimentais mais representativos da fisiologia humana, favorecendo testes de eficácia, segurança e toxicidade com maior confiabilidade quando comparados aos cultivos celulares convencionais. Essa característica apresenta impacto direto sobre a pesquisa translacional, uma vez que pode reduzir falhas observadas durante as fases clínicas do desenvolvimento farmacológico e contribuir para a diminuição da utilização de animais em experimentação científica (Ali et al., 2024).

Os trabalhos também demonstram que a engenharia de tecidos permanece como a principal área de aplicação da bioimpressão. A possibilidade de fabricar estruturas tridimensionais organizadas espacialmente amplia as perspectivas para regeneração de tecidos lesionados e desenvolvimento futuro de órgãos bioartificiais. Contudo, a análise crítica da literatura evidencia que a maioria das pesquisas ainda se concentra em tecidos relativamente simples, enquanto órgãos altamente complexos, como fígado, rins, pulmões e coração, permanecem como grandes desafios científicos. Essa limitação decorre principalmente da dificuldade em reproduzir simultaneamente vascularização, inervação, múltiplos tipos

celulares e organização funcional compatível com a fisiologia humana (Mirsky et al., 2024; He et al., 2025).

Outro resultado relevante refere-se ao crescente desenvolvimento de biomateriais destinados à formulação das biotintas. Diversos estudos investigam combinações entre hidrogéis naturais e polímeros sintéticos buscando reunir propriedades mecânicas adequadas, elevada biocompatibilidade e manutenção da viabilidade celular. Apesar dos avanços observados, ainda não existe uma biotinta considerada ideal para todas as aplicações biomédicas, o que demonstra tratar-se de um campo em constante evolução científica e tecnológica (Derakhshanfar et al., 2018; Zoghi, 2024).

A literatura também evidencia crescente preocupação com aspectos bioéticos e regulatórios relacionados à futura incorporação da bioimpressão à prática clínica. Questões envolvendo biossegurança, validação dos tecidos produzidos, rastreabilidade celular, propriedade intelectual, acesso equitativo às novas tecnologias e regulamentação internacional aparecem de forma recorrente nas publicações mais recentes. Observa-se consenso entre os pesquisadores de que o avanço tecnológico deverá ser acompanhado pelo fortalecimento de protocolos regulatórios capazes de garantir segurança e eficácia antes da utilização clínica em larga escala (Pourmasoumi et al., 2023; Liu et al., 2024).

No contexto brasileiro, verificou-se produção científica crescente, embora ainda inferior à observada em países como Estados Unidos, Alemanha, China e Coreia do Sul. Os estudos nacionais concentram-se principalmente em revisões de literatura, desenvolvimento de biomateriais, engenharia de tecidos e pesquisas experimentais conduzidas em universidades e centros de pesquisa. Essa realidade evidencia importante oportunidade para expansão da pesquisa biomédica nacional, sobretudo considerando o elevado potencial da bioimpressão para fortalecer áreas como medicina regenerativa, cultura celular, desenvolvimento de biomateriais e inovação tecnológica em saúde (Furlan; Barbosa; Moretto Junior, 2024).

Outro aspecto que merece destaque refere-se à ampliação das possibilidades de atuação do biomédico. A análise das publicações demonstra que esse profissional desempenha papel estratégico em diferentes etapas do processo de biofabricação, incluindo isolamento celular, cultura de células, caracterização molecular, análises histológicas, desenvolvimento de biomateriais, validação laboratorial e controle de qualidade das estruturas produzidas. Dessa forma, observa-se expansão significativa das competências profissionais do biomédico, especialmente em pesquisas translacionais e projetos multidisciplinares envolvendo bioengenharia e medicina regenerativa.

De maneira geral, os resultados analisados permitem afirmar que a bioimpressão tridimensional encontra-se em acelerado processo de desenvolvimento científico, apresentando avanços expressivos em curto espaço de tempo. Entretanto, sua consolidação como tecnologia amplamente empregada na assistência à saúde dependerá da superação de desafios relacionados à vascularização dos tecidos, padronização das biotintas, redução dos custos tecnológicos, validação clínica e estabelecimento de marcos regulatórios consistentes. Assim, os estudos convergem ao reconhecer que, embora a fabricação rotineira de órgãos humanos plenamente funcionais ainda não seja uma realidade, o progresso científico observado nas últimas décadas demonstra que essa possibilidade se torna cada vez mais plausível no horizonte da medicina regenerativa.

Em síntese, a análise crítica da literatura evidencia que a bioimpressão 3D representa muito mais do que uma inovação tecnológica isolada. Trata-se de uma plataforma interdisciplinar capaz de integrar conhecimentos da Biomedicina, engenharia de tecidos, biologia celular, ciência dos biomateriais e bioengenharia, promovendo novas perspectivas para diagnóstico, pesquisa e tratamento de diversas doenças. O contínuo investimento em pesquisa científica, desenvolvimento tecnológico e formação de profissionais qualificados será determinante para transformar o potencial atualmente observado em benefícios concretos para os sistemas de saúde e para a qualidade de vida da população.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo analisar as evidências científicas acerca da bioimpressão 3D na Biomedicina, abordando seus fundamentos, principais aplicações, desafios e perspectivas futuras. A partir da revisão integrativa da literatura, foi possível compreender que essa tecnologia representa uma das mais importantes inovações da ciência biomédica contemporânea, reunindo conhecimentos da engenharia de tecidos, biologia celular, bioengenharia, biomateriais e medicina regenerativa para o desenvolvimento de soluções capazes de transformar a pesquisa científica e, futuramente, a prática clínica.

Em resposta ao problema de pesquisa, verificou-se que a bioimpressão 3D já apresenta aplicações relevantes na produção de modelos experimentais, engenharia de tecidos, medicina regenerativa, farmacologia, oncologia e medicina personalizada. Os estudos analisados demonstraram que a utilização de tecidos bioimpressos proporciona modelos biologicamente mais representativos da fisiologia humana, contribuindo para o aprimoramento das pesquisas

biomédicas, para o desenvolvimento de novos medicamentos e para a redução da dependência de modelos animais em experimentação científica.

A hipótese inicialmente proposta foi confirmada, uma vez que a literatura evidencia que a bioimpressão tridimensional possui elevado potencial para ampliar as possibilidades diagnósticas, terapêuticas e investigativas da Biomedicina. Entretanto, também se constatou que sua ampla incorporação à prática clínica ainda depende da superação de importantes desafios relacionados à vascularização dos tecidos, manutenção da viabilidade celular, desenvolvimento de biomateriais mais eficientes, padronização das biotintas, validação clínica e estabelecimento de regulamentações específicas que garantam segurança e eficácia na utilização dessa tecnologia.

Os objetivos geral e específicos foram plenamente alcançados. O estudo permitiu apresentar os fundamentos científicos da bioimpressão 3D, discutir suas principais aplicações na engenharia de tecidos e na medicina regenerativa, analisar os desafios tecnológicos, biológicos, regulatórios e bioéticos atualmente existentes, bem como identificar as perspectivas futuras relacionadas ao desenvolvimento de tecidos e órgãos bioartificiais destinados à pesquisa biomédica e à assistência em saúde.

Outro aspecto evidenciado refere-se à crescente ampliação do campo de atuação do biomédico. A evolução da bioimpressão fortalece a inserção desse profissional em áreas como cultura celular, desenvolvimento de biomateriais, engenharia de tecidos, medicina regenerativa, pesquisa translacional e validação laboratorial de novas tecnologias. Dessa forma, observa-se que a formação científica interdisciplinar torna-se cada vez mais relevante para acompanhar os avanços tecnológicos que caracterizam a Biomedicina moderna.

Embora os resultados obtidos demonstrem avanços expressivos, este estudo apresenta limitações inerentes ao método adotado, por tratar-se de uma revisão integrativa baseada em publicações científicas disponíveis na literatura. Além disso, constatou-se que parte significativa das pesquisas ainda se encontra em fase experimental, especialmente no que se refere à bioimpressão de órgãos altamente complexos, limitando a existência de evidências clínicas robustas para algumas aplicações discutidas.

Diante desse cenário, recomenda-se que pesquisas futuras priorizem estudos experimentais e ensaios clínicos voltados ao desenvolvimento de biomateriais inovadores, aperfeiçoamento das biotintas, estratégias para vascularização dos tecidos bioimpressos, validação clínica das tecnologias desenvolvidas e construção de marcos regulatórios específicos para sua utilização na assistência em saúde. Também se destaca a necessidade de

ampliação da produção científica brasileira, contribuindo para fortalecer a participação nacional no desenvolvimento dessa importante área da Biomedicina.

Conclui-se, portanto, que a bioimpressão 3D representa uma tecnologia estratégica para o futuro da Biomedicina. Apesar dos desafios ainda existentes, os avanços científicos observados nas últimas décadas indicam que sua evolução poderá redefinir os paradigmas da engenharia de tecidos, da medicina regenerativa e da medicina personalizada. O fortalecimento das pesquisas, da inovação tecnológica e da formação de profissionais qualificados será fundamental para que os benefícios dessa tecnologia sejam incorporados de forma ética, segura e eficiente aos sistemas de saúde, ampliando as possibilidades terapêuticas e contribuindo para a melhoria da qualidade de vida da população.

REFERÊNCIAS

ALI, Ahmed S. M. et al. 3D bioprinting of liver models: a systematic scoping review of methods, bioinks, and reporting quality. **Materials Today Bio**, [S. l.], v. 26, art. 100991, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2024.100991>. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10978534/>. Acesso em: 20 jul. 2026.

ARSLAN-YILDIZ, Ahu et al. Towards artificial tissue models: past, present, and future of 3D bioprinting. **Biofabrication**, [S. l.], v. 8, n. 1, art. 014103, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1088/1758-5090/8/1/014103>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26930133/>. Acesso em: 20 jul. 2026.

DERAKHSHANFAR, Soroosh et al. 3D bioprinting for biomedical devices and tissue engineering: a review of recent trends and advances. **Bioactive Materials**, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 144–156, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2017.11.008>. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5935777/>. Acesso em: 20 jul. 2026.

FURLAN, Nilva de Karla Cervigne; BARBOSA, Maria Clara Cypriano Diniz; MORETTO JUNIOR, Marcelo Glauco. Avaliação de tecnologias e dispositivos para a bioimpressão 3D de tecidos aplicados à área médica. **Brazilian Journal of Health Review**, [S. l.], v. 7, n. 2, art. e69310, 2024. DOI: <https://doi.org/10.34119/bjhrv7n2-475>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJHR/article/view/69310>. Acesso em: 20 jul. 2026.

HE, Chao-Fan et al. High-resolution projection-based 3D bioprinting. **Nature Reviews Bioengineering**, [S. l.], v. 3, p. 143–158, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s44222-024-00218-w>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s44222-024-00218-w>. Acesso em: 20 jul. 2026.

HUANG, Michelle S. et al. Organoid bioprinting: from cells to functional tissues. **Nature Reviews Bioengineering**, [S. l.], v. 3, p. 126–142, 2025. DOI:

<https://doi.org/10.1038/s44222-024-00268-0>. Disponível em:
<https://www.nature.com/articles/s44222-024-00268-0>. Acesso em: 20 jul. 2026.

LIU, Shuge et al. The cutting-edge progress in bioprinting for biomedicine: principles, applications, and future perspectives. **MedComm**, [S. l.], v. 5, n. 10, art. e753, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/mco2.753>. Disponível em:
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11417428/>. Acesso em: 20 jul. 2026.

MIRSKY, Nicholas A. et al. Three-dimensional bioprinting: a comprehensive review for applications in tissue engineering and regenerative medicine. **Bioengineering**, Basel, v. 11, n. 8, art. 777, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/bioengineering11080777>. Disponível em:
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39199735/>. Acesso em: 20 jul. 2026.

POURMASOUMI, Parvin et al. A review on the recent progress, opportunities, and challenges of 4D printing and bioprinting in regenerative medicine. **Journal of Biomaterials Science**, Polymer Edition, [S. l.], v. 34, n. 1, p. 108–146, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/09205063.2022.2110480>. Disponível em:
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35924585/>. Acesso em: 20 jul. 2026.

RAEES, Sania et al. Classification, processing, and applications of bioink and 3D bioprinting: a detailed review. **International Journal of Biological Macromolecules**, [S. l.], v. 232, art. 123476, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123476>. Disponível em:
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36731696/>. Acesso em: 20 jul. 2026.

TAN, Baosen et al. Applications of 3D bioprinting in tissue engineering: advantages, deficiencies, improvements, and future perspectives. **Journal of Materials Chemistry B**, [S. l.], v. 9, n. 27, p. 5385–5413, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1TB00172H>. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/tb/d1tb00172h>. Acesso em: 20 jul. 2026.

ZOGHI, Shervin. Advancements in tissue engineering: a review of bioprinting techniques, scaffolds, and bioinks. **Biomedical Engineering and Computational Biology**, [S. l.], v. 15, art. 11795972241288099, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1177/11795972241288099>. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11447703/>. Acesso em: 20 jul. 2026.