

Capítulo 15

DIGITAL TWINS E CIRURGIA DE PRECISÃO: A TRANSFORMAÇÃO DO PLANEJAMENTO OPERATÓRIO NA MEDICINA MODERNA

HENRIQUE TOFOLI VIEIRA MACHADO¹
LÍGIA QUINTINO DE CASTRO¹
MARCELO AUGUSTO PRADO CRISTÓFARO
FILHO¹
JÚLIA OLIVEIRA RESTANHO¹
ROGERIO DE OLIVEIRA BARBOSA²
RAFAELA CASADO DE PAULA³
VICTORIA AKEMI DA SILVA SUZUKI⁴

RENATA SOUZA MARTINS³
MARCELA ALVES DE ALCÂNTARA¹
ANA LÍVIA CURY BARBOSA⁵
ISABELA MATIAS BALASSO⁵
VITÓRIA RIBEIRO SOARES¹
MARIANA GODOI RIGHETO¹
YASMIM MAMEDE SANTAROSA¹
MANUELA RETT CAMPINHA⁶

¹Discente – Medicina da Universidade de Marília (UNIMAR).

²Discente – Medicina da Faculdade Ceres (FACERES).

³Discente – Medicina da Universidade de Rio Verde (UniRV), Campus Formosa.

⁴Discente – Medicina da Universidade Cesumar (UNICESUMAR).

⁵Discente – Medicina do Centro Universitário de Votuporanga (UNIFEV).

⁶Discente – Medicina da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR).

Palavras-chave: *Inteligência Artificial; Procedimentos Cirúrgicos Operatórios; Medicina Personalizada.*

INTRODUÇÃO

No contexto cirúrgico, essa tecnologia apresenta particular relevância porque os procedimentos operatórios são altamente dependentes da anatomia individual, da extensão da doença, das relações entre estruturas e das características fisiológicas de cada paciente. A mesma técnica pode apresentar diferentes níveis de dificuldade e risco dependendo da anatomia, localização da lesão, cirurgias prévias e características clínicas (KATSOULAKIS *et al.*, 2024; LAUBENBACHER *et al.*, 2024).

A utilização de modelos digitais específicos do paciente pode, nesse contexto, permitir que diferentes estratégias sejam avaliadas antes da intervenção. O cirurgião poderia simular virtualmente trajetórias, acessos, ressecções, implantes ou reconstruções e analisar possíveis consequências de cada alternativa. Essa capacidade transforma o planejamento de uma etapa predominantemente descritiva em um processo potencialmente preditivo e baseado em simulação (TANG *et al.*, 2024; VENKATESH *et al.*, 2022).

Revisão brasileira publicada em 2026 especificamente sobre gêmeos digitais na cirurgia personalizada identificou aplicações relacionadas ao planejamento pré-operatório, suporte intraoperatório, monitoramento pós-operatório, treinamento cirúrgico e medicina de precisão. Os autores também destacaram desafios relacionados à validação clínica, padronização, interoperabilidade, custos, segurança dos dados e aspectos éticos (SGORLA; LIMA, 2026).

Apesar do entusiasmo crescente, é importante destacar que os digitais *twins* cirúrgicos ainda estão em fase de desenvolvimento e validação. Revisões recentes demonstram que muitas aplicações permanecem experimentais e que a integração clínica efetiva ainda é limitada

(KATSOULAKIS *et al.*, 2024; SADÉE *et al.*, 2025).

O objetivo deste capítulo é revisar a literatura disponível sobre a utilização dos digitais *twins* na cirurgia de precisão, discutindo seus fundamentos, aplicações no planejamento operatório, possibilidades de integração com inteligência artificial e cirurgia robótica, limitações atuais e perspectivas para sua incorporação na prática cirúrgica.

MÉTODO

Foi realizada uma revisão bibliográfica narrativa da literatura científica sobre *digital twins*, medicina personalizada, cirurgia de precisão e planejamento operatório.

Foram considerados estudos nacionais e internacionais publicados em periódicos científicos e indexados em bases de literatura biomédica e multidisciplinar. As buscas foram orientadas por combinações dos termos “*digital twin*”, “*digital twins*”, “*surgery*”, “*surgical planning*”, “*precision surgery*”, “*personalized medicine*”, “*artificial intelligence*”, “*robotic surgery*”, “*patient-specific modeling*” e “*virtual simulation*”, além de seus correspondentes em português.

Foram priorizados artigos relacionados diretamente aos fundamentos dos gêmeos digitais, aplicações médicas, planejamento cirúrgico, simulação individualizada, cirurgia robótica, navegação, modelagem biomecânica, oncologia e desafios de implementação.

A literatura selecionada foi analisada qualitativamente, buscando identificar os principais mecanismos de utilização dos *digital twins*, suas aplicações potenciais no período perioperatório e os obstáculos para implementação clínica.

Não foi realizada metanálise em razão da heterogeneidade dos estudos, das diferentes definições utilizadas para *digital twin* e da diversidade das tecnologias e aplicações descritas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fundamentos dos *digital twins* na medicina

O conceito de *digital twin* surgiu no contexto da engenharia e da indústria e posteriormente foi incorporado a diferentes áreas do conhecimento. Na medicina, sua aplicação requer a construção de uma representação virtual individualizada capaz de incorporar dados provenientes do paciente real (LAUBENBACHER *et al.*, 2024; MACHADO; BERSANETI, 2023).

A construção desse modelo pode envolver informações anatômicas, fisiológicas, clínicas e, dependendo da aplicação, moleculares ou genéticas. O modelo pode utilizar técnicas de modelagem matemática, inteligência artificial, aprendizado de máquina, simulação computacional e processamento de imagens (SUN *et al.*, 2023; TANG *et al.*, 2024).

Um aspecto fundamental diferencia o *digital twin* de uma simples reconstrução digital: a possibilidade de estabelecer uma relação dinâmica entre o indivíduo físico e sua representação virtual. Idealmente, o modelo é atualizado conforme novos dados são disponibilizados, permitindo que sua representação permaneça relacionada ao estado atual do paciente (LAUBENBACHER *et al.*, 2024; TANG *et al.*, 2024).

A literatura ainda apresenta heterogeneidade na definição de *patient digital twin*. Revisões recentes demonstram que não existe consenso absoluto sobre quais componentes são indispensáveis para que uma representação seja considerada efetivamente um gêmeo digital médico. Essa ausência de padronização consti-

tui um dos desafios para comparação entre estudos e validação de aplicações clínicas (KATSOULAKIS *et al.*, 2024; MACHADO; BERSANETI, 2023).

A inteligência artificial desempenha papel relevante nesse processo. Algoritmos podem auxiliar na segmentação de estruturas anatômicas, identificação de lesões, extração de características e modelagem de relações complexas. Entretanto, a utilização de inteligência artificial isoladamente não caracteriza um *digital twin*. O elemento central é a existência de uma representação individualizada conectada ao paciente físico e potencialmente atualizável (SADÉE *et al.*, 2025; VENKATESH *et al.*, 2022).

A revisão de Machado e Berssaneti demonstra justamente que o campo dos *digital twins* em saúde ainda está em consolidação e apresenta diferentes linhas de desenvolvimento, com destaque para modelos centrados no paciente e medicina de precisão (MACHADO; BERSANETI, 2023).

Digital twins e planejamento pré-operatório

O planejamento pré-operatório é provavelmente uma das aplicações mais intuitivas dos *digital twins*. Atualmente, exames de imagem são amplamente utilizados para determinar localização de lesões, relações anatômicas e extensão de doenças. Entretanto, na maioria das situações, a análise permanece dependente da interpretação médica de imagens bidimensionais ou de reconstruções tridimensionais relativamente estáticas (KATSOULAKIS *et al.*, 2024; SGORLA; LIMA, 2026).

O *digital twin* pode ampliar essa capacidade ao permitir que o paciente seja representado em um ambiente virtual no qual diferentes cenários possam ser testados. Em vez de simplesmente visualizar a anatomia, o cirurgião pode potencialmente avaliar como determinada intervenção

modificaria estruturas anatômicas ou parâmetros biomecânicos (TANG *et al.*, 2024; VENKATESH *et al.*, 2022).

Essa abordagem pode ser particularmente útil em procedimentos complexos. Em trauma ortopédico, por exemplo, modelos específicos do paciente podem integrar imagens tridimensionais e simulações biomecânicas para comparar diferentes estratégias de estabilização. Aubert *et al.* demonstraram a construção de um *digital twin* relacionado a uma fratura do platô tibial, utilizando modelagem por elementos finitos para avaliar diferentes cenários de estabilização e condições de consolidação (AUBERT *et al.*, 2021).

Em cirurgia ortopédica, modelos específicos do paciente também podem integrar imagens, informações biomecânicas e simulações para auxiliar na avaliação de estratégias terapêuticas. Esses exemplos demonstram uma mudança importante: o planejamento deixa de ser apenas uma representação anatômica e passa a incorporar hipóteses sobre o comportamento do sistema após a intervenção (AUBERT *et al.*, 2021).

No contexto brasileiro, Sgorla e Lima destacaram o planejamento pré-operatório como uma das principais aplicações potenciais dos gêmeos digitais na cirurgia personalizada, reforçando a perspectiva de utilização de modelos virtuais individualizados como instrumentos de apoio à decisão (SGORLA & LIMA, 2026).

Simulação de diferentes estratégias operatórias

Uma das maiores vantagens potenciais dos *digital twins* é a possibilidade de comparar diferentes alternativas antes da realização da cirurgia. Em procedimentos complexos, frequentemente existem múltiplas possibilidades técnicas. A escolha depende da anatomia, extensão da doença, experiência da equipe, recursos disponíveis e características clínicas do paciente.

Um modelo virtual individualizado poderia permitir que diferentes estratégias fossem simuladas antes que uma decisão definitiva fosse tomada (KATSOULAKIS *et al.*, 2024; TANG *et al.*, 2024).

Esse conceito é particularmente relevante em cirurgia de precisão, na qual o objetivo não é simplesmente realizar uma operação tecnicamente possível, mas selecionar a estratégia que ofereça a melhor relação entre benefício, risco e preservação funcional para determinado indivíduo (SADÉE *et al.*, 2025; VENKATESH *et al.*, 2022).

Modelos computacionais podem auxiliar na avaliação de diferentes trajetórias cirúrgicas, posicionamento de implantes, extensão de ressecções ou estratégias de reconstrução. Em modelos musculoesqueléticos, podem ser avaliadas forças e tensões; em determinados modelos fisiológicos, podem ser simuladas alterações funcionais; e em reconstruções anatômicas podem ser analisadas relações espaciais entre estruturas (AUBERT *et al.*, 2021; TANG *et al.*, 2024).

Pesquisas recentes também exploram a combinação de realidade virtual e simulações diferenciáveis para planejamento cirúrgico. Essa integração permite que o ambiente virtual seja utilizado não apenas para visualização, mas também para testar possibilidades de intervenção em modelos específicos do paciente.

Assim, o *digital twin* pode funcionar como um laboratório virtual individualizado, no qual hipóteses cirúrgicas são avaliadas antes de sua aplicação no paciente (KATSOULAKIS *et al.*, 2024; SGORLA & LIMA, 2026).

Aplicações em cirurgia oncológica

A cirurgia oncológica constitui uma das áreas potencialmente mais beneficiadas pela individualização do planejamento. Tumores apresentam grande variabilidade quanto à localização, tamanho, invasão de estruturas adjacentes

e características biológicas. Consequentemente, decisões sobre extensão de ressecção e preservação de estruturas podem ser particularmente complexas (SADÉE *et al.*, 2025).

Os digitais *twins* podem contribuir para integrar informações anatômicas e biológicas, permitindo representar a doença dentro do contexto específico de cada paciente. Em oncologia, modelos matemáticos, imagens biomédicas e inteligência artificial podem ser integrados para representar diferentes aspectos da evolução da doença (LAUBENBACHER *et al.*, 2024; VENKATESH *et al.*, 2022).

Essa integração pode ser utilizada para explorar hipóteses relacionadas à progressão tumoral, resposta ao tratamento e planejamento terapêutico. Na cirurgia, uma representação mais completa da doença pode contribuir para o planejamento da extensão da ressecção e avaliação das relações anatômicas relevantes (SADÉE *et al.*, 2025).

Em urologia oncológica, por exemplo, revisões recentes descrevem aplicações potenciais envolvendo simulação do crescimento tumoral, modelagem tridimensional para nefrectomia parcial e suporte à navegação cirúrgica.

Em cirurgia oncológica, entretanto, é fundamental diferenciar potencial tecnológico de evidência clínica. A possibilidade de simular determinado comportamento tumoral não significa que a previsão seja suficientemente precisa para substituir a avaliação multidisciplinar. Atualmente, o papel mais plausível dos *digital twins* é atuar como ferramenta complementar de suporte à decisão (KATSOULAKIS *et al.*, 2024; SADÉE *et al.*, 2025).

Integração com cirurgia robótica e navegação intraoperatória

A evolução dos *digital twins* pode ser particularmente relevante quando associada à cirurgia robótica. Sistemas robóticos já permitem movimentos precisos, visualização ampliada e

execução de procedimentos minimamente invasivos. A integração com um modelo virtual individualizado poderia acrescentar uma camada de informação preditiva ao procedimento (SADÉE *et al.*, 2025; SGORLA; LIMA, 2026).

No cenário ideal, o modelo pré-operatório seria atualizado durante a intervenção por meio da incorporação de novos dados. Isso permitiria comparar continuamente o estado real do paciente com o modelo virtual e adaptar o planejamento conforme alterações identificadas durante a cirurgia (TANG *et al.*, 2024).

A chamada cirurgia assistida por *digital twin* propõe justamente a integração entre representação virtual, modelagem, inteligência artificial, internet das coisas médicas, computação em nuvem e tecnologias de realidade estendida.

Em cirurgia robótica à distância, pesquisas experimentais também vêm avaliando modelos de *digital twin* para sincronização e compensação de latência. Essas aplicações demonstram como a tecnologia pode ultrapassar o planejamento pré-operatório e participar de sistemas de suporte durante a própria intervenção.

No entanto, a utilização intraoperatória exige níveis ainda maiores de precisão e segurança. Pequenas discrepâncias entre o modelo virtual e a anatomia real podem ter consequências clínicas relevantes. Dessa maneira, mecanismos de atualização em tempo real, validação e supervisão humana são indispensáveis (VENKATESH *et al.*, 2022).

***Digital twins* no período pós-operatório**

A utilidade dos *digital twins* não necessariamente termina após o encerramento do procedimento. Uma das características mais importantes da tecnologia é a possibilidade de acompanhar longitudinalmente o indivíduo (KATSOULAKIS *et al.*, 2024; SGORLA; LIMA, 2026).

No pós-operatório, o modelo poderia integrar sinais vitais, exames laboratoriais, imagens, evolução clínica e outros dados para identificar mudanças que indiquem complicações. Em um cenário futuro, a comparação entre o estado observado e o comportamento esperado poderia contribuir para alertar a equipe sobre alterações relevantes (SUN *et al.*, 2023; VENKATESH *et al.*, 2022).

Essa capacidade amplia o conceito de planejamento cirúrgico. O procedimento deixa de ser um evento isolado e passa a fazer parte de um ciclo contínuo de previsão, intervenção, monitoramento e atualização do modelo (TANG *et al.*, 2024).

A revisão brasileira de Sgorla e Lima também identifica o monitoramento pós-operatório como uma das possibilidades de aplicação dos gêmeos digitais na cirurgia personalizada (SGORLA; LIMA, 2026).

Entretanto, modelos capazes de acompanhar o paciente em tempo real, ainda apresentam importantes limitações técnicas. A aquisição contínua de dados, interoperabilidade entre sistemas e necessidade de validação clínica constituem obstáculos importantes para implementação em larga escala (KATSOULAKIS *et al.*, 2024; SUN *et al.*, 2023).

Principais benefícios para a cirurgia de precisão

A incorporação dos *digital twins* pode proporcionar diversas vantagens potenciais. Primeiramente, destaca-se a individualização do planejamento. O procedimento pode ser planejado considerando a anatomia e as características específicas do paciente, em vez de depender exclusivamente de modelos populacionais (LAUBENBACHER *et al.*, 2024; SADÉE *et al.*, 2025).

Outro benefício é a simulação pré-operatória. Diferentes estratégias podem ser compara-

das virtualmente antes da intervenção, potencialmente reduzindo incertezas relacionadas à escolha técnica (KATSOULAKIS *et al.*, 2024; TANG *et al.*, 2024).

A tecnologia também pode favorecer a antecipação de riscos. Quando modelos computacionais são capazes de representar determinadas propriedades biomecânicas ou fisiológicas, podem ser utilizados para identificar cenários potencialmente desfavoráveis (AUBERT *et al.*, 2021; VENKATESH *et al.*, 2022).

A integração de dados multimodais constitui outra vantagem importante. Imagens, dados clínicos, parâmetros fisiológicos e informações longitudinais podem ser incorporados a uma representação única (MACHADO; BERSSANETI, 2023; SUN *et al.*, 2023).

Por fim, existe potencial para aprendizado contínuo. Dados obtidos durante e após os procedimentos podem contribuir para atualizar os modelos e aprimorar futuras previsões (LAUBENBACHER *et al.*, 2024; TANG *et al.*, 2024).

A revisão de Machado e Berssaneti demonstra que a medicina de precisão constitui uma das principais áreas de concentração da produção científica sobre *digital twins* em saúde, reforçando a relação entre a tecnologia e a busca por modelos individualizados de cuidado (MACHADO & BERSSANETI, 2023).

Limitações e desafios

Apesar do potencial, existem obstáculos importantes para a implementação dos *digital twins* na cirurgia.

O primeiro é a qualidade dos dados. Um modelo individualizado depende da qualidade das informações utilizadas para sua construção. Imagens inadequadas, dados incompletos ou informações desatualizadas podem comprometer a representação virtual (KATSOULAKIS *et al.*, 2024; SUN *et al.*, 2023).

A integração de diferentes fontes de dados também constitui um desafio. Informações provenientes de sistemas hospitalares, equipamentos de imagem, dispositivos médicos e plataformas de inteligência artificial precisam ser interoperáveis (KATSOULAKIS *et al.*, 2024; TANG *et al.*, 2024).

Outro problema é a validação clínica. Um modelo computacional pode apresentar excelente desempenho técnico sem necessariamente produzir benefício clínico. Por isso, são necessários estudos prospectivos que avaliem desfechos relevantes, como complicações, mortalidade, tempo operatório, qualidade de vida, custos e resultados funcionais (KATSOULAKIS *et al.*, 2024; SADÉE *et al.*, 2025; VENKATESH *et al.*, 2022).

A privacidade dos dados é igualmente importante. Um *digital twin* pode concentrar grande quantidade de informações pessoais e médicas, tornando essencial a implementação de mecanismos robustos de segurança e governança (SUN *et al.*, 2023; VENKATESH *et al.*, 2022).

Questões relacionadas à propriedade dos dados, consentimento e compartilhamento também precisam ser estabelecidas. Além disso, a utilização de modelos de inteligência artificial introduz preocupações relacionadas à explicabilidade e ao viés algorítmico (SADÉE *et al.*, 2025; VENKATESH *et al.*, 2022).

Existe ainda o desafio da responsabilidade profissional. Caso uma decisão apoiada por um modelo digital resulte em um desfecho desfavorável, será necessário determinar claramente a responsabilidade entre profissionais, instituições e desenvolvedores (VENKATESH *et al.*, 2022).

A literatura nacional também reconhece esses obstáculos. Sgorla e Lima apontam validação clínica, padronização, interoperabilidade, custos, segurança de dados e aspectos éticos

como limitações importantes para a implementação dos gêmeos digitais na cirurgia personalizada (SGORLA; LIMA, 2026).

Finalmente, existe a possibilidade de viés algorítmico. Modelos treinados em populações específicas podem apresentar desempenho inferior em indivíduos ou grupos pouco representados nos bancos de dados (SADÉE *et al.*, 2025).

Perspectivas futuras

O futuro dos *digital twins* na cirurgia provavelmente dependerá da integração progressiva entre inteligência artificial, robótica, realidade aumentada, realidade virtual, computação de alto desempenho e sistemas de aquisição de dados em tempo real (LAUBENBACHER *et al.*, 2024; TANG *et al.*, 2024).

Um possível cenário é o desenvolvimento de modelos capazes de acompanhar continuamente o paciente desde a avaliação pré-operatória até a recuperação. O *digital twin* poderia receber informações diagnósticas, simular diferentes intervenções, auxiliar na seleção da estratégia cirúrgica, fornecer suporte durante o procedimento e acompanhar a evolução pós-operatória (KATSOULAKIS *et al.*, 2024; SGORLA & LIMA, 2026).

Essa perspectiva representa uma mudança paradigmática: o planejamento deixaria de ser uma etapa estática anterior à cirurgia e passaria a constituir um processo dinâmico e adaptativo (TANG *et al.*, 2024).

No Brasil, a consolidação dessa área dependerá também do desenvolvimento de infraestrutura digital, integração de sistemas de saúde, formação de profissionais e produção de estudos nacionais capazes de avaliar a aplicabilidade dessas tecnologias dentro das características do sistema de saúde brasileiro.

A revisão nacional de Machado e Berssanezi já apontava a necessidade de avançar em

áreas pouco exploradas e desenvolver estruturas mais abrangentes para que os *digital twins* possam atingir objetivos mais complexos na saúde (MACHADO & BERSANETI, 2023).

Mais recentemente, a literatura internacional continua demonstrando que a aplicação clínica efetiva permanece limitada, apesar do crescimento acelerado da área. Uma revisão sistemática publicada em 2026 encontrou 26 estudos elegíveis sobre *digital twins* em saúde, observando que a integração clínica real ainda era rara e destacando como desafios centrais a validação, interoperabilidade, privacidade e equidade.

Portanto, o futuro da tecnologia não deve ser avaliado apenas pela sofisticação dos modelos computacionais, mas pela capacidade de produzir benefícios clinicamente relevantes de maneira segura, reproduzível e economicamente sustentável (KATSOULAKIS *et al.*, 2024; SADÉE *et al.*, 2025).

CONCLUSÃO

Os *digital twins* representam uma das tecnologias mais promissoras para a evolução da cirurgia de precisão, especialmente por possibilitarem a construção de representações virtuais individualizadas capazes de integrar informações anatômicas, fisiológicas, clínicas e, potencialmente, moleculares. Ao associar modelagem computacional, inteligência artificial, processamento de imagens e simulação, essa abordagem pode transformar o planejamento operatório de uma atividade predominantemente baseada na interpretação de exames em um processo mais integrado, dinâmico, preditivo e personalizado. Nesse contexto, o paciente deixa de ser analisado exclusivamente a partir de informações estáticas e passa a ser representado em um ambiente virtual no qual diferentes hipóte-

ses diagnósticas e terapêuticas podem ser avaliadas antes de sua aplicação na prática clínica (LAUBENBACHER *et al.*, 2024; SADÉE *et al.*, 2025).

As aplicações descritas na literatura abrangem diferentes etapas do cuidado cirúrgico, incluindo planejamento pré-operatório, reconstrução anatômica tridimensional, simulação de estratégias operatórias, avaliação biomecânica, cirurgia robótica, navegação intraoperatória, trauma, ortopedia, oncologia e acompanhamento pós-operatório. Essa amplitude demonstra que os *digital twins* não devem ser compreendidos apenas como ferramentas de visualização tridimensional, mas como sistemas potencialmente capazes de integrar múltiplas fontes de informação e fornecer suporte à tomada de decisões ao longo do período perioperatório. A possibilidade de testar virtualmente diferentes abordagens pode ser particularmente relevante em procedimentos de elevada complexidade, nos quais pequenas diferenças anatômicas ou fisiológicas podem modificar substancialmente o risco e o resultado cirúrgico (KATSOULAKIS *et al.*, 2024; TANG *et al.*, 2024).

Outro aspecto de grande relevância é a possibilidade de incorporar modelos biomecânicos e fisiológicos à representação virtual do paciente. Estudos experimentais demonstram que essa abordagem pode permitir a avaliação de diferentes estratégias terapêuticas e a análise de possíveis respostas do organismo à intervenção. No trauma ortopédico, por exemplo, modelos específicos do paciente já foram utilizados para simular diferentes condições relacionadas à estabilização e consolidação de fraturas, demonstrando como a modelagem computacional pode ultrapassar a simples reconstrução anatômica e incorporar hipóteses sobre o comportamento do sistema após a intervenção (AUBERT *et al.*, 2021).

A integração com inteligência artificial representa outra perspectiva relevante para o desenvolvimento dos *digital twins*. Algoritmos podem contribuir para segmentação automática de estruturas anatômicas, identificação de alterações patológicas, processamento de grandes volumes de dados, reconhecimento de padrões e geração de modelos preditivos. Entretanto, é fundamental estabelecer uma distinção conceitual entre inteligência artificial e *digital twin*. A inteligência artificial constitui uma tecnologia que pode compor o sistema, enquanto o *digital twin* pressupõe a existência de uma representação individualizada relacionada ao paciente físico e, idealmente, capaz de ser atualizada continuamente conforme novas informações são obtidas (MACHADO; BERSANETI, 2023; VENKATESH; RAZA; KVEDAR, 2022).

Nesse sentido, a principal contribuição dos *digital twins* para a cirurgia de precisão pode estar justamente na possibilidade de transformar o planejamento em um processo de experimentação virtual. Em vez de selecionar uma estratégia exclusivamente com base na experiência profissional, em protocolos e na interpretação convencional dos exames, o cirurgião poderia utilizar o modelo individualizado para comparar diferentes possibilidades e analisar suas potenciais consequências. Essa capacidade não significa substituir o julgamento clínico, mas ampliar a quantidade e a qualidade das informações disponíveis para a tomada de decisão (SADÉE *et al.*, 2025; TANG *et al.*, 2024).

Apesar desse potencial, a evidência disponível ainda não permite considerar os *digital twins* como tecnologia plenamente incorporada à prática cirúrgica. Grande parte dos estudos permanece experimental, apresenta diferentes definições para o conceito e utiliza metodologias, plataformas e fontes de dados heterogêneas. A ausência de padronização dificulta a comparação entre pesquisas e a determinação

de quais características são indispensáveis para que um modelo seja considerado efetivamente um *digital twin* médico. Além disso, a demonstração de desempenho técnico de um modelo não necessariamente significa que sua utilização produzirá benefício clínico mensurável (KATSOULAKIS *et al.*, 2024; LAUBENBACHER *et al.*, 2024).

A validação clínica constitui, portanto, um dos principais desafios para a consolidação da tecnologia. Estudos futuros deverão demonstrar não apenas a capacidade dos modelos de reproduzir ou simular determinadas características do paciente, mas também seu impacto sobre desfechos clínicos relevantes. Redução de complicações, diminuição do tempo operatório, melhora dos resultados funcionais, redução de custos, maior segurança dos procedimentos e melhoria da qualidade de vida devem ser considerados em estudos prospectivos e, posteriormente, em avaliações comparativas. A adoção ampla dos *digital twins* dependerá da demonstração de que sua utilização produz benefícios superiores ou complementares às ferramentas atualmente disponíveis (KATSOULAKIS *et al.*, 2024; SADÉE *et al.*, 2025).

A qualidade e a integração dos dados também constituem fatores determinantes. Um *digital twin* depende diretamente das informações utilizadas para sua construção e atualização. Dados incompletos, inconsistentes, desatualizados ou provenientes de sistemas incompatíveis podem gerar representações inadequadas e comprometer a confiabilidade das previsões. Nesse contexto, interoperabilidade entre prontuários eletrônicos, sistemas de diagnóstico por imagem, dispositivos médicos, plataformas robóticas e ferramentas de inteligência artificial será fundamental para o desenvolvimento de modelos mais completos e clinicamente úteis (SUN *et al.*, 2023; TANG *et al.*, 2024).

Outro ponto crítico envolve segurança, privacidade e governança dos dados. Um *digital twin* médico pode concentrar informações altamente relevantes sobre o indivíduo, incluindo imagens, dados clínicos, parâmetros fisiológicos e informações longitudinais. Dessa forma, sua utilização exige mecanismos robustos de proteção, controle de acesso, armazenamento seguro, rastreabilidade e definição clara das responsabilidades relacionadas ao uso dessas informações. Além disso, aspectos regulatórios e éticos precisarão acompanhar a evolução tecnológica, especialmente diante da utilização de modelos preditivos em decisões potencialmente relacionadas ao tratamento cirúrgico (VENKATESH *et al.*, 2022).

A responsabilidade profissional também merece atenção. Mesmo que sistemas computacionais sejam capazes de oferecer recomendações ou estimativas, a decisão cirúrgica permanece dependente da avaliação clínica e das circunstâncias individuais do paciente. A incorporação de *digital twins* deverá, portanto, ocorrer dentro de modelos de supervisão humana, nos quais o cirurgião mantenha papel central na interpretação das informações e na decisão terapêutica. O desenvolvimento de sistemas explicáveis, auditáveis e transparentes será especialmente importante para garantir confiança e segurança na utilização dessas ferramentas (SADÉE *et al.*, 2025; VENKATESH *et al.*, 2022).

No Brasil, a expansão dessa tecnologia apresenta oportunidades, mas também desafios particulares. A consolidação dos *digital twins* na cirurgia dependerá da disponibilidade de infraestrutura computacional, qualidade dos sistemas de informação em saúde, interoperabilidade entre diferentes plataformas, formação de profissionais capacitados e produção de evidências nacionais. Estudos brasileiros recentes demonstram interesse crescente pelo tema e apontam aplicações relacionadas ao planejamento

pré-operatório, suporte intraoperatório, treinamento, monitoramento pós-operatório e medicina de precisão. Entretanto, ainda são necessários estudos clínicos e experimentais que avaliem a aplicabilidade dessas soluções em diferentes realidades assistenciais brasileiras (MACHADO; BERSSANETI, 2023; SGORLA; LIMA, 2026).

As perspectivas futuras apontam para modelos cada vez mais dinâmicos, nos quais o *digital twin* poderá acompanhar o paciente desde a avaliação inicial até o período de recuperação. Nesse cenário, informações provenientes de exames de imagem, prontuários, sensores, dispositivos médicos e sistemas de monitoramento poderiam ser continuamente incorporadas ao modelo. A representação virtual poderia então ser utilizada para apoiar o planejamento, simular intervenções, auxiliar na navegação intraoperatória e acompanhar a evolução pós-operatória. Essa integração representaria uma mudança importante no conceito tradicional de planejamento cirúrgico, transformando-o em um processo contínuo de previsão, intervenção, monitoramento e atualização (KATSOULAKIS *et al.*, 2024; TANG *et al.*, 2024).

Dessa forma, os *digital twins* devem ser compreendidos atualmente como ferramentas de suporte à decisão, e não como substitutos da avaliação clínica ou da experiência do cirurgião. Seu verdadeiro potencial não está apenas na criação de uma cópia virtual do paciente, mas na capacidade de utilizar essa representação para testar, antecipar, comparar e aperfeiçoar decisões antes de aplicá-las no indivíduo real. Essa característica aproxima a cirurgia de um modelo no qual o tratamento pode ser planejado considerando de maneira integrada a anatomia, fisiologia, características da doença, riscos e objetivos específicos de cada paciente (SADÉE *et al.*, 2025; TANG *et al.*, 2024).

Em síntese, os *digital twins* apresentam potencial para contribuir significativamente para a consolidação da cirurgia de precisão e para a evolução da medicina personalizada. Entretanto, sua incorporação definitiva dependerá menos da capacidade de desenvolver modelos computacionais cada vez mais sofisticados e mais da demonstração de que essas ferramentas são clinicamente úteis, seguras, reproduzíveis, interoperáveis e economicamente sustentáveis.

O futuro da tecnologia deverá, portanto, ser construído pela integração entre inovação computacional, pesquisa clínica, engenharia biomédica e experiência médica, garantindo que a transformação digital da cirurgia esteja efetivamente orientada para melhores resultados e maior segurança para o paciente (LAUBENBACHER *et al.*, 2024; KATSOULAKIS *et al.*, 2024).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUBERT, K.; GERMANEAU, A.; ROCHETTE, M. *et al.* Development of Digital Twins to Optimize Trauma Surgery and Postoperative Management. A Case Study Focusing on Tibial Plateau Fracture. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, v. 9, 722275, 2021. DOI: 10.3389/fbioe.2021.722275.
- KATSOULAKIS, E.; WANG, Q.; WU, H. *et al.* Digital Twins for Health: a Scoping Review. *npj Digital Medicine*, v. 7, n. 1, 77, 2024. DOI: 10.1038/s41746-024-01073-0.
- LAUBENBACHER, R.; MEHRAD, B.; SHMULEVICH, I. *et al.* Digital Twins in Medicine. *Nature Computational Science*, v. 4, n. 3, p. 184–191, 2024. DOI: 10.1038/s43588-024-00607-6.
- MACHADO, T. M.; BERSANETI, F. T. Literature Review of Digital Twin in Healthcare. *Heliyon*, v. 9, n. 9, e19390, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e19390.
- PAPACHRISTOU, K.; KATSAKIORI, P. F.; PAPADIMITROULAS, P. *et al.* Digital Twins’ Advancements and Applications in Healthcare, Towards Precision Medicine. *Journal of Personalized Medicine*, v. 14, n. 11, 1101, 2024. DOI: 10.3390/jpm14111101.
- SADÉE, C.; TESTA, S.; BARBA, T. *et al.* Medical Digital Twins: Enabling Precision Medicine and Medical Artificial Intelligence. *The Lancet Digital Health*, v. 7, n. 7, p. e481–e490, 2025. DOI: 10.1016/j.landig.2025.02.004.
- SGORLA, G. S.; LIMA, H. F. Gêmeos Digitais na Cirurgia Personalizada. *International Journal of Health and Surgical Research*, v. 2, n. 7, p. 70–82, 2026. DOI: 10.5281/zenodo.21348545.
- SUN, T.; HE, X.; LI, Z. Digital Twin in Healthcare: Recent Updates and Challenges. *Digital Health*, v. 9, 20552076221149651, 2023. DOI: 10.1177/20552076221149651.
- TANG, C.; YI, W.; OCCHIPINTI, E. *et al.* A Roadmap for the Development of Human Body Digital Twins. *Nature Reviews Electrical Engineering*, v. 1, p. 199–207, 2024. DOI: 10.1038/s44287-024-00025-w.
- VENKATESH, K. P.; RAZA, M. M.; KVEDAR, J. C. Health Digital Twins as Tools for Precision Medicine: Considerations for Computation, Implementation, and Regulation. *npj Digital Medicine*, v. 5, n. 1, 150, 2022. DOI: 10.1038/s41746-022-00694-7.