

Edição III

Clínica Médica & Cirurgia

Capítulo 23

IMPACTO ECONÔMICO DA CIRURGIA ROBÓTICA E DAS NOVAS TECNOLOGIAS OPERATÓRIAS

ANA CATARINA GARMATZ¹
ANTÔNIA DOS SANTOS BOBROWSKI¹
ISADORAZORTÉA¹
JÚLIA ROSSATO AVILA SANTOS¹

¹Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS)

Palavras-chave: Cirurgia Robótica; Economia de Saúde; Inovações Tecnológicas.

CIRURGIA ROBÓTICA

Os avanços tecnológicos na cirurgia têm promovido importantes transformações no tratamento das neoplasias malignas, especialmente nos cânceres do trato gastrointestinal. Nesse contexto, a cirurgia robótica e outras tecnologias operatórias minimamente invasivas passaram a ocupar papel de destaque na cirurgia oncológica moderna, oferecendo benefícios relacionados à precisão cirúrgica, menor trauma tecidual e recuperação pós-operatória mais rápida. Entretanto, paralelamente aos ganhos clínicos observados, cresce o debate acerca do impacto econômico dessas tecnologias nos sistemas de saúde, principalmente devido aos elevados custos associados à aquisição, manutenção e utilização dos equipamentos robóticos.

Historicamente, a cirurgia aberta convencional foi considerada o padrão terapêutico para o tratamento cirúrgico dos tumores gastrointestinais. Contudo, essa abordagem está associada a maior morbidade perioperatória, maior tempo de internação hospitalar e recuperação mais prolongada. A introdução da videolaparoscopia representou importante avanço ao reduzir o trauma cirúrgico e melhorar os desfechos pós-operatórios. Posteriormente, a cirurgia robótica ampliou as possibilidades da cirurgia minimamente invasiva ao incorporar visualização tridimensional em alta definição, maior ergonomia, instrumentos articulados e movimentos mais precisos, favorecendo procedimentos complexos em áreas anatômicas de difícil acesso.

Apesar dos benefícios clínicos descritos na literatura, a cirurgia robótica apresenta custos significativamente superiores aos das técnicas convencionais e laparoscópicas. Estudos econômicos recentes demonstram que os principais fatores responsáveis pelo aumento dos custos incluem aquisição e manutenção das plataformas robóticas, uso de materiais descartáveis e

maior investimento em treinamento e capacitação profissional. Em contrapartida, alguns estudos sugerem que a redução de complicações pós-operatórias, menor tempo de internação e recuperação funcional mais rápida podem compensar parcialmente os custos adicionais, especialmente em centros de alto volume cirúrgico e em procedimentos oncológicos complexos.

No Brasil, a incorporação da cirurgia robótica ainda enfrenta importantes desafios estruturais e financeiros, sobretudo no Sistema Único de Saúde (SUS). Pesquisas nacionais apontam que, embora a tecnologia apresente benefícios funcionais e assistenciais, seus ganhos clínicos frequentemente são modestos frente ao elevado custo operacional, limitando sua ampla implementação. Além disso, a necessidade de infraestrutura especializada, certificação profissional e curva de aprendizado prolongada contribuem para ampliar os custos relacionados à adoção dessas tecnologias.

Dessa forma, compreender o impacto econômico da cirurgia robótica e das novas tecnologias operatórias torna-se fundamental para avaliar sua sustentabilidade, custo-efetividade e aplicabilidade na cirurgia oncológica contemporânea. Assim, o objetivo deste estudo foi analisar os impactos econômicos relacionados à utilização da cirurgia robótica e de tecnologias operatórias minimamente invasivas, avaliando seus custos, benefícios clínicos e desafios para incorporação nos sistemas de saúde, especialmente no contexto do tratamento cirúrgico dos cânceres do trato gastrointestinal.

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura, realizada no período de maio a junho de 2026, com o objetivo de analisar o impacto econômico da cirurgia robótica e de outras tecnologias operatórias minimamente invasivas no tratamento cirúrgico dos cânceres do trato gastrointestinal. A pesquisa bibliográfica foi realizada nas bases de dados PubMed/MEDLINE,

Scopus e Biblioteca Virtual em Saúde (BVS). Para a estratégia de busca, foram utilizados os descritores obtidos a partir dos Descritores em Ciências da Saúde (DeCS) e do *Medical Subject Headings (MeSH)*: "*Robotic Surgical Procedures*", "*Robotic Surgery*", "*Gastrointestinal Neoplasms*", "*Costs and Cost Analysis*", "*Cost-Benefit Analysis*", "*Cost-Effectiveness*" e "*Minimally Invasive Surgical Procedures*", combinados pelos operadores booleanos AND e OR.

Inicialmente, foram identificados 35 artigos. Após a remoção dos estudos duplicados e a aplicação dos critérios de elegibilidade, os artigos restantes foram submetidos à leitura dos títulos e resumos, seguida da leitura na íntegra dos estudos potencialmente relevantes. Foram adotados como critérios de inclusão artigos publicados nos idiomas inglês, português e espanhol, no período de 2014 a 2026, disponibilizados na íntegra e que abordassem aspectos relacionados aos custos, à custo-efetividade e ao impacto econômico da cirurgia robótica aplicada ao tratamento das neoplasias do trato gastrointestinal. Foram incluídos estudos observacionais, ensaios clínicos, revisões sistemáticas e meta-análises. Como critérios de exclusão, foram considerados artigos duplicados, editoriais, cartas ao editor, relatos de caso, publicações disponíveis apenas na forma de resumo e estudos que não abordavam diretamente a temática proposta ou que não atendiam aos critérios de inclusão estabelecidos.

Após a aplicação de todos os critérios de seleção, XX artigos compuseram a amostra final desta revisão. Os estudos selecionados foram submetidos à leitura minuciosa e à extração dos dados referentes ao tipo de estudo, população analisada, tipo de procedimento cirúrgico, custos diretos e indiretos, indicadores de custo-efetividade e principais desfechos clínicos e econômicos. Os resultados foram organizados em

tabelas e quadros sinóticos e analisados de forma descritiva, sendo discutidos em quatro categorias temáticas: custos diretos da cirurgia robótica; impacto econômico relacionado aos desfechos pós-operatórios; custo-efetividade em comparação com as técnicas aberta e laparoscópica; e desafios para a incorporação da cirurgia robótica nos sistemas de saúde, com especial enfoque no contexto brasileiro.

EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA

Primórdios: robótica industrial adaptada à medicina (1980–1993)

Os primeiros sistemas robóticos utilizados em medicina foram adaptações de tecnologias industriais. Em 1985, o robô industrial PUMA 560 (*Programmable Universal Machine for Assembly*), originalmente desenvolvido pela Unimation para a General Motors, foi empregado na realização de biópsias cerebrais estereotáxicas guiadas por tomografia computadorizada — marcando a primeira aplicação cirúrgica documentada de robótica. A intervenção explorou a precisão posicional da máquina para acessar alvos cerebrais de forma mais segura do que os métodos manuais disponíveis.

Na ortopedia, o ROBODOC (*Integrated Surgical Systems, Sacramento, CA*) foi desenvolvido em 1988 e utilizado comercialmente a partir de 1992 para fresagem de cavidades femorais em artroplastias totais de quadril. Programado com base em dados de imagem pré-operatória e atualizado em tempo real durante o procedimento, representou o primeiro sistema robótico ativo aprovado pela FDA para aplicação cirúrgica. Simultaneamente, o sistema PROBOT, desenvolvido no Reino Unido para ressecção transuretral da próstata guiada por ultrassonografia intraoperatória, exemplificou a aplicação de robótica em urologia ainda na década de 1980.

Esses sistemas pioneiros compartilhavam uma característica comum: operavam como sistemas ativos, executando tarefas pré-programadas de forma semi-autônoma. Embora representassem avanços expressivos em precisão, eram limitados a estruturas anatômicas fixas e a procedimentos altamente padronizados.

A era laparoscópica e o desenvolvimento do braço robótico (1993–1999)

O avanço da cirurgia minimamente invasiva laparoscópica nas décadas de 1980–1990 criou novos desafios — entre eles, a perda do controle do campo visual pelo cirurgião, delegado a um assistente responsável pela câmera. Em 1993, Yulun Wang fundou a empresa Computer Motion e, com financiamento parcial da DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*), desenvolveu o AESOP (Automated Endoscopic System for Optimal Positioning): um braço robótico controlado por voz equipado com endoscópio, aprovado pela FDA em 1994. O AESOP devolvia ao cirurgião o controle da imagem do campo operatório, eliminando a dependência de um assistente humano para essa função.

Em 1998, a Computer Motion lançou o ZEUS, sistema mais complexo composto por três braços — um para a câmera (derivado do AESOP) e dois para instrumentos cirúrgicos — operado por um console remoto. Paralelamente, nos laboratórios da SRI International (*Stanford Research Institute*), financiados pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos com vistas à telemedicina em zonas de combate, foi desenvolvido um sistema de telemanipulação que viria a se tornar o da Vinci. Em 1999, a Intuitive Surgical foi fundada, e no ano 2000 o sistema da Vinci recebeu aprovação da FDA para uso em cirurgia laparoscópica — tornando-se o primeiro sistema mestre-escravo multi-braço aprovado para procedimentos de tecidos moles.

Consolidação do sistema da Vinci e formação de um mercado (2000–2015)

O da Vinci se diferenciou do ZEUS por características técnicas determinantes: visão binocular tridimensional em alta definição e, sobretudo, instrumentos articulados com sete graus de liberdade no punho — superando os cinco graus de liberdade da mão humana e permitindo movimentos precisos em espaços anatômicos exíguos. Essa inovação, aliada à filtragem de tremor fisiológico das mãos do cirurgião e ao escalonamento de movimentos, conferiu ao sistema uma vantagem competitiva decisiva.

Em 2003, a Intuitive Surgical adquiriu a Computer Motion, incorporando as patentes do ZEUS e do AESOP e encerrando o único competidor relevante do período. A partir desse momento, o da Vinci passou a dominar o mercado de cirurgia robótica por aproximadamente duas décadas. Gerações sucessivas do sistema foram lançadas — da Vinci S (2006), da Vinci Si (2009), da Vinci Xi (2014) e da Vinci X —, cada uma incorporando melhorias em ergonomia, visualização, modularidade dos braços e compatibilidade com diferentes acessos cirúrgicos. A empresa acumulou mais de 7.000 patentes, criando barreiras significativas à entrada de concorrentes. Estima-se que o sistema tenha sido utilizado em mais de 11 milhões de cirurgias em todo o mundo.

A expansão clínica do da Vinci foi notável: da urologia (prostatectomia radical robótica, descrita por Guillonnet *et al.* em 2001, e cistectomia radical robótica por Menon *et al.* em 2003) à ginecologia, cirurgia geral, cirurgia cardíaca, pediatria e cirurgia ortopédica. Em cada especialidade, os estudos demonstraram benefícios como menor perda sanguínea, redução da dor pós-operatória, menor tempo de internação e recuperação mais rápida, em comparação com abordagens abertas.

Novos sistemas e quebra do monopólio (2015–presente)

A expiração progressiva das patentes seminais da Intuitive Surgical, aliada ao avanço tecnológico generalizado em robótica e miniaturização, abriu espaço para uma nova geração de sistemas competidores a partir de meados da década de 2010. Plataformas como Versius (CMR Surgical, Reino Unido), Senhance (TransEnterix/Asensus Surgical), Hugo™ RAS (Medtronic) e Ion (Intuitive Surgical, para broncoscopia robótica) introduziram diferentes arquiteturas — braços modulares independentes, menor pegada física, maior portabilidade e, em alguns sistemas, feedback háptico integrado.

Em 2022, a EndoQuest Robotics apresentou o primeiro sistema robótico flexível para cirurgia endoluminal e por orifícios naturais (*NOTES — Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery*), minimizando incisões externas. Em 2023, a Levita Magnetics introduziu o MARS (*Magnetic-Assisted Robotic Surgery*), o primeiro sistema a combinar tecnologia magnética e robótica para procedimentos abdominais minimamente invasivos, recebendo aprovação da FDA.

Inteligência artificial e a nova fronteira da autonomia cirúrgica

A integração da inteligência artificial (IA) aos sistemas robóticos cirúrgicos representa o eixo de inovação mais ativo da atualidade. Os primeiros sistemas de IA aplicados à cirurgia robótica focaram na automação de tarefas específicas — como sutura e dissecação tecidual — com o objetivo de aumentar a consistência e reduzir a carga cognitiva do cirurgião. Os sistemas contemporâneos incorporam funcionalidades como reconhecimento de imagem em tempo real, planejamento e otimização de trajetória de instrumentos, detecção automática de estruturas anatômicas e feedback háptico aprimorado

por IA, que replica a sensação de resistência tecidual por meio de sensores e algoritmos de controle.

A telecirurgia ganhou novo impulso com a disseminação das redes 5G, que reduzem a latência de transmissão a níveis clinicamente aceitáveis. Estudos prospectivos publicados em 2024–2025 documentaram prostatectomias radicais robóticas realizadas remotamente por cirurgiões operando a distâncias intercontinentais. Paralelamente, tecnologias de realidade aumentada (AR) e realidade virtual (VR) estão sendo integradas às plataformas robóticas para planejamento cirúrgico, treinamento de residentes e navegação intraoperatória guiada por imagem sobreposta ao campo cirúrgico.

O conceito de autonomia cirúrgica — em que o robô executa etapas definidas do procedimento com supervisão, mas sem controle manual contínuo do cirurgião — avança em pesquisa pré-clínica e em aplicações iniciais como posicionamento automático de câmera.

BENEFÍCIOS CLÍNICOS

Entre os benefícios clínicos mais frequentes descritos nas evidências disponíveis destacam-se a redução do tempo de internação hospitalar, menor perda sanguínea intraoperatória, menor necessidade de transfusões e recuperação pós-operatória mais rápida. Além disso, em procedimentos complexos, especialmente na urologia, há evidências de melhor preservação de estruturas anatômicas e potencial melhora dos resultados funcionais dos pacientes (SADRI, *et. al.*, 2023).

Estudos recentes também demonstram que os benefícios da cirurgia robótica podem se refletir na redução de complicações pós-operatórias e na melhora da qualidade de vida durante o período de recuperação. Em cirurgias oncológicas e hepatobiliares, técnicas robóticas e laparoscópicas apresentaram menor incidência e

gravidade de complicações quando comparadas à cirurgia aberta, além de favorecerem uma recuperação funcional mais precoce (XIA, *et. al.*, 2025).

Esses resultados estão relacionados à maior acurácia técnica possibilitada pelos sistemas robóticos, que oferecem visão tridimensional ampliada, instrumentos articulados com ampla liberdade de movimento e filtragem do tremor fisiológico do cirurgião, proporcionando maior precisão durante a dissecação dos tecidos e melhor identificação das estruturas anatômicas. Com menor agressão tecidual, redução da resposta inflamatória e menor dor, as novas tecnologias contribuem para os melhores desfechos (SADRI, *et al.*, 2023; MARCHEGANI, *et. al.*, 2023).

Contudo, apesar dos achados promissores, ainda são necessários estudos maiores e de maior qualidade metodológica para confirmar a superioridade clínica dessas tecnologias em relação às técnicas cirúrgicas convencionais.

IMPACTO ECONÔMICO

A incorporação da cirurgia robótica no tratamento dos cânceres do trato gastrointestinal representa um importante avanço tecnológico, porém seu impacto econômico permanece um dos principais fatores limitantes para sua ampla adoção. Os custos diretos da cirurgia robótica são substancialmente superiores aos da cirurgia aberta e laparoscópica, principalmente devido ao elevado investimento inicial para aquisição da plataforma robótica, aos contratos de manutenção periódica e ao uso de instrumentos descartáveis específicos. Além disso, a necessidade de treinamento especializado das equipes cirúrgicas e a curva de aprendizado prolongada contribuem para o aumento dos gastos institucionais.

Por outro lado, a avaliação econômica não deve se restringir apenas aos custos operatórios.

Nesse contexto, estudos comparando técnicas minimamente invasivas demonstram que procedimentos laparoscópicos e robóticos estão associados à menor perda sanguínea, recuperação mais rápida da função intestinal e redução do tempo de internação hospitalar quando comparados à cirurgia aberta. Essas vantagens podem gerar economia indireta por meio da redução de complicações pós-operatórias, menor necessidade de reoperações, menor utilização de leitos hospitalares e retorno mais precoce às atividades habituais.

Entretanto, as evidências disponíveis sugerem que essas economias frequentemente não são suficientes para compensar integralmente os custos adicionais da tecnologia robótica, especialmente em centros com baixo volume cirúrgico. As literaturas analisadas demonstram que os custos perioperatórios das abordagens minimamente invasivas tendem a ser maiores devido ao aumento do tempo cirúrgico e ao uso de equipamentos específicos, embora os custos totais possam se aproximar dos observados na cirurgia convencional em determinados contextos de alta eficiência operacional.

Outro aspecto relevante é a relação entre volume cirúrgico e custo-efetividade. Centros de referência que realizam grande número de procedimentos robóticos conseguem diluir os custos fixos da plataforma, reduzindo o custo por cirurgia e aumentando a viabilidade econômica da tecnologia. Além disso, em procedimentos oncológicos complexos, como ressecções colorretais baixas, hepáticas e pancreáticas, a maior precisão técnica pode traduzir-se em melhores resultados funcionais e menor morbidade, favorecendo a relação custo-benefício a longo prazo.

No contexto brasileiro, os desafios são ainda mais expressivos. A limitação de recursos financeiros, a concentração dos sistemas robóticos em hospitais privados e universitários e a

ausência de ampla incorporação pelo Sistema Único de Saúde (SUS) dificultam a expansão da tecnologia. Assim, embora a cirurgia robótica apresente benefícios clínicos relevantes, sua sustentabilidade econômica depende de análises de custo-efetividade bem estruturadas, levando em consideração não apenas os custos imediatos do procedimento, mas também os impactos sobre complicações, qualidade de vida, tempo de recuperação e utilização global dos recursos de saúde (SADRI *et al.*, 2023).

DESAFIOS E PERSPECTIVAS

Acesso à Tecnologia e Barreiras Econômicas

O acesso à cirurgia assistida por robô (RAS) é marcado por um paradoxo: embora a tecnologia prometa democratizar a precisão cirúrgica, o custo inicial de aquisição permanece como a barreira mais significativa para sua adoção global. Além do investimento em capital, os custos de manutenção anual e a alta dependência de materiais descartáveis encarecem o procedimento. A literatura aponta que a viabilidade econômica da RAS é altamente dependente do volume cirúrgico. Centros de alto volume conseguem diluir os custos fixos, tornando a tecnologia potencialmente custo-efetiva em longo prazo. No entanto, isso gera uma divisão urbano-rural, onde pacientes fora dos grandes centros acadêmicos e urbanos enfrentam dificuldades de acesso, já que os cirurgiões mais experientes e as plataformas robóticas de ponta tendem a se concentrar nessas regiões. Um desenvolvimento promissor é a quebra do monopólio que está em andamento. Novos sistemas robóticos (Versius, Senhance, Revo-I, Hinotori) estão entrando no mercado global, com potencial de reduzir custos de aquisição e manutenção em 30-50% nos próximos anos. A regionalização de cuidados em centros de alto volume não apenas melhora resultados clínicos, mas também

reduz significativamente complicações e custos operacionais. A entrada de novos fabricantes e modelos de robôs especializados deve forçar a redução dos preços de aquisição e de instrumentais, criando um ambiente de competição mais saudável (AMESTOY *et al.*, 2010).

Impacto no Sistema Único de Saúde (SUS)

A implementação da cirurgia robótica no SUS enfrenta desafios críticos de sustentabilidade financeira. Estudos realizados em pólos de referência, como o ICESP/HCFMUSP, demonstram que a robótica gera incrementos de custos substanciais em comparação à laparoscopia tradicional e à cirurgia aberta. Por exemplo:

- Esofagectomias: Incremento médio de R\$ 15.691,08
- Gastrectomias: Incremento médio de R\$ 14.644,03
- Prostatectomias: Incremento médio de R\$ 9.660,99

A única exceção notável foram as lobectomias pulmonares, que apresentaram uma economia de R\$ 420,60 devido à redução nas complicações e no tempo de internação. Este exemplo ilustra que a robótica pode ser custo-efetiva em procedimentos específicos quando reduz complicações, tempo de internação e acelera a recuperação funcional. De modo geral, o monopólio de fabricantes e o custo de instrumentais tornam a tecnologia pouco sustentável para a realidade pública atual, com benefícios clínicos que muitas vezes são considerados modestos em relação ao impacto orçamentário no tratamento do câncer. A análise de custo-efetividade de longo prazo deve considerar não apenas custos hospitalares imediatos, mas também recuperação funcional, qualidade de vida, retorno ao trabalho e redução de reintervenções em períodos de 5 a 10 anos. As decisões de saúde pública devem migrar de uma análise pura-

mente baseada em custos para uma avaliação de valor em saúde, considerando desfechos centrais no paciente.

Questões Éticas e Responsabilidade Ambiental

A evolução tecnológica traz consigo o dilema da equidade, agora considerada o "quinto componente" de um sistema de saúde de qualidade, ao lado de segurança, efetividade, centralidade no paciente e eficiência. É ético investir recursos massivos em uma tecnologia de elite enquanto necessidades básicas de saúde enfrentam subfinanciamento? Um paradoxo adicional emerge: hospitais frequentemente adotam robótica por competição de mercado e marketing direto ao paciente, não necessariamente por evidência robusta de superioridade clínica. Esta dinâmica pode distorcer prioridades de investimento em saúde, favorecendo tecnologias de alto apelo comercial em detrimento de intervenções com maior impacto populacional. Outro ponto emergente é o impacto ambiental. Tecnologias intensivas como a RAS contribuem para o aumento de resíduos (devido aos descartáveis), maior consumo de energia e elevadas emissões de gases de efeito estufa. A pegada de carbono da cirurgia robótica ainda não foi adequadamente quantificada, mas representa uma preocupação crescente em um contexto de crise climática global. Além disso, a segurança do paciente impõe a necessidade de processos de certificação rigorosos. A transição para a robótica não deve ocorrer sem treinamento exaustivo (simuladores e tutoramento), garantindo que a curva de aprendizado não comprometa a segurança dos pacientes.

Inteligência Artificial (IA) e Automação

O futuro da cirurgia robótica não reside apenas em novos braços mecânicos, mas na fusão com a Inteligência Artificial. Acredita-se que a interface superior entre cirurgião e

máquina se-rá alcançada pela integração de IA capaz de interpretar dados cirúrgicos em tempo real (ANDRAS *et al.*, 2020; ARAÚJO *et al.*, 2014).

Aplicações atuais de IA em cirurgia robótica

- Reconhecimento anatômico em tempo real: Sistemas de visão computacional identificam automaticamente estruturas críticas (vasos sanguíneos, nervos, tumores) durante o procedimento, reduzindo o risco de lesões iatrogênicas.

- Detecção de erros e alertas de segurança: Algoritmos de aprendizado de máquina podem alertar sobre movimentos de risco, sangramento iminente ou desvios de planos cirúrgicos estabelecidos.

- Avaliação automatizada de habilidades: Sistemas de IA fornecem feedback objetivo durante o treinamento cirúrgico, analisando métricas de desempenho e reduzindo a curva de aprendizado.

- Navegação aumentada: Integração de imagens pré-operatórias (tomografia computadorizada, ressonância magnética) com visão intraoperatória em tempo real, criando mapas anatômicos personalizados.

- Predição de desfechos: Modelos de IA podem prever complicações pós-operatórias, tempo de recuperação e resultados oncológicos com base em dados intraoperatórios (BELLOS *et al.*, 2024; ARAÚJO UCHÔA, 2011; BONATO, 2011; BARBA *et al.*, 2022)

Níveis de autonomia em cirurgia robótica

Uma revisão sistemática de 129 estudos categorizou as aplicações de IA por nível de autonomia:

- Nível 1 (Assistência Robótica): 75% das aplicações atuais - sistemas que auxiliam mas não tomam decisões autônomas

- Nível 2 (Autonomia de Tarefa): 23% - execução de subtarefas específicas como sutura automatizada

- Nível 3 (Autonomia Condicional): 2% - ainda experimental, testado apenas em modelos animais

Um marco importante foi alcançado em 2022, quando um sistema autônomo realizou anastomoses intestinais laparoscópicas em modelos suínos com maior consistência e precisão do que cirurgiões experientes. No entanto, todas as aplicações de IA ainda estão em fase pré-clínica (estágio 0 de desenvolvimento); até 2023, nenhum estudo clínico em humanos havia sido publicado (FAIRAG *et al.*, 2024).

Perspectivas futuras

- Interfaces visão-linguagem-ação: Tecnologias emergentes permitirão programar assistência cirúrgica usando linguagem natural, facilitando a personalização de protocolos para cada caso.

- Automação de tarefas repetitivas: A IA poderá executar etapas padronizadas, reduzindo a fadiga do cirurgião e aumentando a precisão em procedimentos longos.

- Análise de dados em tempo real: O uso de métricas de desempenho de alto nível permitirá que hospitais avaliem não apenas o desfecho clínico, mas a eficiência técnica do procedimento (ARAÚJO; UCHÔA, 2011).

Desafios para implementação clínica

Apesar do potencial, a tradução da IA para a prática clínica enfrenta obstáculos significativos: necessidade de *datasets* robustos e diversos, sistemas projetados em torno de usuários humanos, alinhamento regulatório claro e definição de responsabilidades em caso de erros. A medida definitiva do sucesso da IA cirúrgica será o impacto em desfechos de pacientes, incluindo redução de complicações, aquisição rápida de proficiência e melhoria na consistên-

cia de resultados em diferentes contextos (BONATO, 2011; ANDRAS *et al.*, 2020)

Telecirurgia: Superando Fronteiras

A expansão da telecirurgia é uma das perspectivas mais promissoras para mitigar as desigualdades geográficas. Com o avanço das redes de comunicação, especialmente a tecnologia 5G, especialistas localizados em grandes centros podem realizar ou supervisionar procedimentos em hospitais remotos, promovendo uma verdadeira democratização do acesso a cirurgias de alta complexidade.

Evidências de viabilidade

Um ensaio clínico randomizado multicêntrico chinês (2023-2024) demonstrou que a telecirurgia urológica robótica foi não-inferior à cirurgia local em termos de probabilidade de sucesso cirúrgico. O estudo incluiu 72 pacientes submetidos a prostatectomia radical ou nefrectomia parcial, com distâncias entre 1.000 e 2.800 km, latência média de rede de 20,1-47,5 ms e perda de quadros de 0-1,5 por procedimento (JIANG *et al.*, 2025)

Outro estudo prospectivo com 29 nefrectomias radicais realizadas remotamente (2021) reportou:

- Distância média de 187 km entre cirurgião e paciente
- Latência mediana de ida e volta de 26 ms
- Taxa de sucesso de 100% sem conversão para outros procedimentos
- Ausência de complicações maiores intra ou pós-operatórias

Um estudo controlado de telecolecistectomias robóticas via 5G (2023) demonstrou taxa de sucesso de 95% no grupo remoto versus 100% no grupo local, com latência média de rede de 43,4 ms, jitter de 4 ms e perda de pacotes 1% (KNUDSEN *et al.*, 2024b).

Requisitos técnicos: Uma revisão sistemática de telecirurgia em humanos (2001-2020) identificou que a latência de sinal reportada va-

riou de 28 ms a 280 ms. Estudos mais recentes sugerem que latências de até 86,6 ms são aceitáveis para distâncias regionais (300 km) e até 162,5 ms para procedimentos transcontinentais (5.000 km) (AMESTOY *et al.*, 2010).

Aplicações além da cirurgia remota

- Treinamento e mentoria remotos: Supervisão em tempo real de cirurgiões em treinamento por especialistas à distância.
- Padronização de técnicas: Especialistas podem orientar procedimentos complexos, garantindo qualidade uniforme.
- Acesso a áreas remotas: Potencial revolucionário para o interior da Amazônia ou áreas rurais remotas do Brasil.

Barreiras atuais

Apesar dos avanços, a telecirurgia enfrenta desafios significativos:

- Infraestrutura: Necessidade de redes 5G/6G confiáveis e redundantes
- Cibersegurança: Vulnerabilidades que podem comprometer a segurança do paciente
- Regulamentação: Ausência de frameworks legais claros sobre responsabilidade médica transfronteiriça
- Custos: Duplicação de equipamentos (console remoto + robô no local)
- Viés de publicação: A maioria dos estudos reporta casos de sucesso, com análise limitada de falhas ou desfechos adversos
- Tecnologia 6G: A próxima geração de comunicação sem fio promete latência de 1 ms, viabilizando cirurgias transcontinentais de alta complexidade com segurança comparável à cirurgia local (AMESTOY *et al.*, 2010; LANE, 2018)

No Brasil, a telecirurgia poderia revolucionar o atendimento em regiões de difícil acesso, permitindo que especialistas de centros de referência realizem ou supervisionem procedimentos em hospitais do interior, reduzindo custos de

deslocamento e ampliando o acesso a cuidados especializados.

Perspectivas Futuras: Inovação e Sustentabilidade

Para que a cirurgia robótica se consolide no Brasil e globalmente, as fontes sugerem um caminho baseado em pilares complementares:

Educação e Treinamento

Integração obrigatória da RAS nos currículos de residência médica para preparar as futuras gerações de cirurgiões. Programas de treinamento devem incluir simuladores de alta fidelidade, tutoramento estruturado e certificação baseada em competências, garantindo que a curva de aprendizado não comprometa a segurança dos pacientes.

Competição de Mercado

A entrada de novos fabricantes e modelos de robôs especializados deve quebrar o monopólio atual, forçando a redução dos preços de aquisição e de instrumentais. Plataformas modulares especializadas para procedimentos endoluminais, microcirurgia e cirurgia pediátrica podem otimizar custos e desempenho.

Avaliação de Valor

As decisões de saúde pública devem migrar de uma análise puramente baseada em custos para uma avaliação de custo-efetividade de longo prazo, considerando a recuperação funcional, qualidade de vida, retorno ao trabalho e redução de reintervenções após 5 a 10 anos.

Inovações Tecnológicas Emergentes

- Realidade aumentada e navegação cirúrgica: Integração de imagens pré-operatórias em tempo real, fluorescência de infravermelho próximo para visualização vascular e modelos anômicos específicos do paciente (ARAÚJO; UCHÔA, 2011; BELLOS *et al.*, 2024; BONATO, 2011).
- Sistemas multi-console: Permitindo colaboração simultânea de múltiplos cirurgiões, útil

para treinamento e casos complexos AMES-TOY *et al.*, 2010).

- *Feedback* háptico avançado: Sensores de tensão nos braços robóticos para restaurar sensação tátil, atualmente ausente na maioria dos sistemas (ARAÚJO *et al.*, 2014; ARAÚJO; UCHÔA, 2011).

- Ecossistemas integrados de dados: Plataformas que conectam dados pré, intra e pós-operatórios para otimizar fluxos de trabalho, prever complicações e personalizar cuidados (ANDRAS *et al.*, 2020; BONATO, 2011).

Sustentabilidade Ambiental

Desenvolvimento de instrumentais reutilizáveis, otimização do consumo energético e quantificação da pegada de carbono são necessários para tornar a tecnologia ambientalmente responsável.

Equidade e Acesso

Modelos de implementação que priorizem centros de alto volume, telecirurgia para áreas remotas e parcerias público-privadas podem democratizar o acesso sem comprometer a sustentabilidade financeira do sistema de saúde.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A cirurgia robótica e as novas tecnologias operatórias têm promovido avanços importan-

tes dentro da medicina, oferecendo benefícios clínicos como menor trauma cirúrgico, redução de complicações pós-operatórias, menor tempo de internação e recuperação funcional mais rápida. Entretanto, apesar dos resultados promissores, a ampla incorporação dessas tecnologias ainda enfrenta desafios significativos, especialmente relacionados aos elevados custos de aquisição, manutenção, treinamento profissional e infraestrutura necessária para sua utilização. As evidências analisadas sugerem que os ganhos clínicos, embora relevantes, nem sempre são suficientes para compensar integralmente o impacto financeiro associado à cirurgia robótica, sobretudo em centros com baixo volume cirúrgico e em sistemas públicos de saúde.

Dessa forma, a adoção dessas tecnologias deve ser acompanhada por avaliações e estudos contínuos de custo-efetividade, considerando não apenas os custos imediatos, mas também os desfechos clínicos, a qualidade de vida dos pacientes e a utilização global dos recursos de saúde. Assim, a cirurgia robótica representa uma ferramenta promissora para a cirurgia moderna, porém sua expansão sustentável depende do equilíbrio entre inovação tecnológica, benefícios assistenciais e viabilidade econômica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMESTOY, S.C. *et al.* Paralelo entre educação permanente em saúde e administração complexa. *Revista Gaúcha de Enfermagem*, v. 31, p. 383, 2010.
- ANDRAS, I. *et al.* Artificial intelligence and robotics: a combination that is changing the operating room. *World Journal of Urology*, v. 38, n. 10, p. 2359-2366, 2020.
- ARAÚJO, L.U.A. *et al.* Avaliação da qualidade da atenção primária à saúde sob a perspectiva do idoso. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 19, p. 3521, 2014.
- ARAÚJO, P.T.B.; UCHÔA, S.A.C. Avaliação da qualidade da prescrição de medicamentos de um hospital de ensino. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 16, p. 1107, 2011.
- BARBA, P. *et al.* Remote telesurgery in humans: a systematic review. *Surgical Endoscopy*, v. 36, n. 5, p. 2771-2777, 2022.
- BELLOS, T. *et al.* Artificial intelligence in urologic robotic oncologic surgery: a narrative review. *Cancers*, v. 16, n. 9, p. 1775, 2024.
- BONATO, V.L. Gestão de qualidade em saúde: melhorando assistência ao cliente. *O Mundo da Saúde*, v. 35, p. 319, 2011.
- CELLA, L. *et al.* The future of robotic surgery in the age of artificial intelligence. *Nature Reviews Urology*, 2026.
- CHATTERJEE, S. *et al.* Advancements in robotic surgery: innovations, challenges and future prospects. *Journal of Robotic Surgery*, v. 18, p. 28, 2024.
- FAIRAG, M. *et al.* Robotic revolution in surgery: diverse applications across specialties and future prospects review article. *Cureus*, v. 16, n. 1, p. e52148, 2024.
- GUMBS, A.A. *et al.* Artificial intelligence surgery: how do we get to autonomous actions in surgery? *Sensors*, v. 21, n. 16, p. 5526, 2021.
- JIANG, *et al.* Current application status and innovative development of surgical robot. *Medical Research*, 2025. DOI: 10.1002/mdr2.70014.
- KNUDSEN, J.E. *et al.* Artificial intelligence: revolutionizing robotic surgery. *Annals of Medicine & Surgery*, v. 86, n. 9, p. 5401-5409, 2024.
- KNUDSEN, J.E. *et al.* Clinical applications of artificial intelligence in robotic surgery. *Journal of Robotic Surgery*, v. 18, p. 102, 2024.
- LANE, T. A short history of robotic surgery. *Annals of the Royal College of Surgeons of England*, v. 100, n. 6 Suppl, p. 5-7, 2018.
- LEE, A. *et al.* Levels of autonomy in FDA-cleared surgical robots: a systematic review. *NPJ Digital Medicine*, v. 7, n. 1, p. 103, 2024.
- LESZCZYŃSKA, A. *et al.* The integration of artificial intelligence into robotic cancer surgery: a systematic review. *Journal of Clinical Medicine*, v. 14, n. 17, p. 6181, 2025.
- LI, J. *et al.* Application of improved robot-assisted laparoscopic telesurgery with 5G technology in urology. *European Urology*, v. 83, n. 1, p. 41-44, 2023.
- LIU, Y. *et al.* Evolution of surgical robot systems enhanced by artificial intelligence: a review. *Advanced Intelligent Systems*, v. 6, p. 2300268, 2024.
- LIU, Y. *et al.* Remote robotic surgery: a systematic review. *Surgical Endoscopy*, v. 40, n. 4, p. 2782-2806, 2026.

MARCHEGIANI, F. *et al.* New robotic platforms in general surgery: what's the current clinical scenario? *Medicina*, v. 59, n. 7, p. 1264, 2023.

MARCUS, H.J. *et al.* The IDEAL framework for surgical robotics: development, comparative evaluation and long-term monitoring. *Nature Medicine*, v. 30, n. 1, p. 61-75, 2024.

PETRELLA, F.; RIZZO, S. Artificial intelligence in oncologic thoracic surgery: clinical decision support and emerging applications. *Cancers*, v. 18, n. 2, p. 246, 2026.

PUGIN, F.; BUCHER, P.; MOREL, P. History of robotic surgery: from AESOP® and ZEUS® to da Vinci®. *Journal of Visceral Surgery*, v. 148, n. 5 Suppl, p. e3-e8, 2011.

REDDY, K. *et al.* Advancements in robotic surgery: a comprehensive overview of current utilizations and upcoming frontiers. *Cureus*, v. 15, n. 12, p. e50415, 2023.

SADRI, H. *et al.* A systematic review of full economic evaluations of robotic-assisted surgery in thoracic and abdominopelvic procedures. *Journal of Robotic Surgery*, v. 17, n. 6, p. 2671-2685, 2023.

SAEIDI, H. *et al.* Autonomous robotic laparoscopic surgery for intestinal anastomosis. *Science Robotics*, v. 7, n. 62, p. eabj2908, 2022.

VASEY, B. *et al.* Intraoperative applications of artificial intelligence in robotic surgery: a scoping review of current development stages and levels of autonomy. *Annals of Surgery*, v. 278, n. 6, p. 896-903, 2023.

WANG, Y. *et al.* Reliability of urological telesurgery compared with local surgery: multicentre randomised controlled trial. *BMJ*, v. 392, p. e083588, 2026.

WIERZBICKI, M.A. *et al.* Advances in robotic surgery: a review of new surgical platforms. *Electronics*, v. 13, n. 23, p. 4675, 2024.

XIA, F. *et al.* Clinical and economic outcomes of robotic-assisted, laparoscopic, and open liver resection in BCLC 0/A hepatocellular carcinoma: a nationwide cohort study. *Journal of the Society of Laparoscopic & Robotic Surgeons*, v. 1, n. 1, p. e0003938, 2025.

YANG, J. *et al.* The safety and feasibility of telerobotic cholecystectomy via a 5G network: a prospective controlled clinical trial. *Surgical Endoscopy*, v. 39, n. 11, p. 7336-7346, 2025.