



Robótica Cirúrgica: Estado da Arte e Perspectivas Científicas

Elder Elisandro Schemberger¹, Evandro André Konopatzki¹

ARTIGO ORIGINAL

RESUMO

A robótica cirúrgica marca um significativo avanço na medicina, introduzindo precisão e eficiência aos procedimentos cirúrgicos. Esta inovação oferece benefícios notáveis, como a realização de procedimentos minimamente invasivos, redução dos riscos de cortes e incisões, menor dor e recuperação acelerada. Além disso, a robótica aprimora capacidades cirúrgicas, proporcionando uma visão tridimensional e ampliada do campo operatório, facilitando a coleta e análise de dados em tempo real. E a evolução da robótica cirúrgica tem se acelerado com a integração de Inteligência Artificial e o Aprendizado de Máquina, aprimorando a análise de dados e o planejamento cirúrgico. Entretanto, desafios persistem, como os altos custos de implementação e manutenção e a necessidade de treinamento especializado para cirurgiões. Muito também é preciso debater e evoluir sob o ponto de vista ético e regulatório, para acompanhar os avanços tecnológicos, especialmente em relação à responsabilidade por falhas ou erros. Este artigo apresenta o estado da arte da cirurgia robótica, destacando alguns exemplos e aplicações, limitações técnicas, desafios operacionais e de custo, considerações éticas e regulatórias, e perspectivas para a área. Apresenta ainda perspectivas científicas aliadas a algumas observações gerais que podem guiar pesquisadores por áreas cruciais e com pouca pesquisa científica ou de inovação realizadas. Tais avanços transformarão o papel dos cirurgiões e melhorarão os resultados para os pacientes, diminuindo custos e tornando a cirurgia robótica mais democratizada.

Palavras-chave: Medicina. Saúde. Inteligência Artificial. Engenharia. Interdisciplinaridade



Surgical Robotics: State of the Art and Scientific Perspectives

ABSTRACT

Surgical robotics marks a significant advance in medicine, introducing precision and efficiency to surgical procedures. This innovation offers notable benefits, such as performing minimally invasive procedures, reducing the risks of cuts and incisions, less pain and accelerated recovery. Furthermore, robotics enhances surgical capabilities, providing a three-dimensional and expanded view of the operative field, facilitating real-time data collection and analysis. And the evolution of surgical robotics has accelerated with the integration of Artificial Intelligence and Machine Learning, improving data analysis and surgical planning. However, challenges persist, such as high implementation and maintenance costs and the need for specialized training for surgeons. Much is also needed to debate and evolve from an ethical and regulatory point of view, to keep up with technological advances, especially in relation to responsibility for failures or errors. This article presents the state of the art of robotic surgery, highlighting some examples and applications, technical limitations, operational and cost challenges, ethical and regulatory considerations, and perspectives for the area. It also presents scientific perspectives combined with some general observations that can guide researchers in crucial areas with little scientific or innovation research carried out. Such advances will transform the role of surgeons and improve outcomes for patients, reducing costs and making robotic surgery more democratized.

Keywords: *Medicine. Health. Artificial Intelligence. Engineering. Interdisciplinarity.*

Instituição afiliada – ¹UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Dados da publicação: Artigo recebido em 05 de Dezembro e publicado em 15 de Janeiro de 2024.

DOI: <https://doi.org/10.36557/2674-8169.2023v6n1p1161-1175>

Autor correspondente: Elder Elisandro Schemberger eschemberger@utfpr.edu.br

INTRODUÇÃO

A robótica em cirurgias representa um avanço significativo na medicina moderna, introduzindo uma era de precisão e eficiência em procedimentos cirúrgicos (GOH; ALI, 2022). Essa integração, robótica em ambiente cirúrgico, tem transformado fundamentalmente a maneira como cirurgias são realizadas, oferecendo significativas melhorias tanto para os pacientes quanto para os profissionais de saúde, oferecendo progresso contínuo na fusão da tecnologia com as práticas médicas (BRAVI et al., 2021).

Entre os principais benefícios do uso da robótica em ambientes cirúrgicos, destaca-se a capacidade de se realizar procedimentos minimamente invasivos e com maior precisão (MAYOR et al., 2022). Os sistemas robóticos, como o conhecido Sistema Cirúrgico Da Vinci, oferecem uma precisão aprimorada através de braços robóticos que eliminam tremores humanos e permitem movimentos extremamente delicados e controlados (MORREL et al., 2021). Tal precisão é crucial, especialmente em cirurgias complexas e em áreas de difícil acesso, o que reduz significativamente os riscos associados a cortes e incisões e demais efeitos indesejados nos pacientes (BRAVI et al., 2021). Também, a natureza minimamente invasiva desses procedimentos robóticos resulta em menor perda de sangue, diminuição dos riscos de infecção, menor tempo de recuperação além de cicatrizes menores, proporcionando também melhor conforto físico e virtual (MECCARIELLO et al., 2017).

Além da precisão, a robótica em cirurgias expande as capacidades dos cirurgiões, permitindo-lhes realizar procedimentos que podem ser além dos limites da habilidade humana manual. A tecnologia robótica oferece uma visão ampliada, tridimensional e de alta definição do campo cirúrgico, superando as limitações da visão humana. Isso não só melhora a compreensão do cirurgião sobre a área operada, mas também aumenta a segurança do procedimento (BUSTOS et al., 2020). Neste sentido, a robótica em cirurgias facilita a coleta e análise de dados em tempo real durante os procedimentos, potencializando a tomada de decisões informadas e a precisão cirúrgica (ZHU et al., 2019).

Contudo, apesar dos avanços significativos, a robótica em cirurgias enfrenta desafios, incluindo altos custos de implementação e manutenção, bem como a necessidade de treinamento especializado para os cirurgiões. Esses desafios levantam questões sobre a acessibilidade e a escalabilidade dessas tecnologias em diferentes contextos de saúde (MAYOR et al., 2022). No entanto, o potencial para melhorar os resultados dos pacientes e revolucionar práticas cirúrgicas torna a robótica um campo indispensável e em contínua evolução na medicina moderna. À medida que a tecnologia avança e se torna mais acessível, espera-se que a adoção da robótica cirúrgica se expanda, beneficiando um espectro mais amplo de pacientes e profissionais de saúde (BRAVI et al., 2021).

Em contrapartida, no que tange o desenvolvimento e evolução tecnológicos, especialmente no campo da eletrônica e engenharia de computação, a evolução de dispositivos eletrônicos avançados e sistemas de computação potentes tem contribuído no avanço de sistemas computacionais e dispositivos robóticos para realização de procedimentos cirúrgicos mais precisos, seguros e minimamente invasivos (COLLIN et al., 2019). A integração de sensores eletrônicos de alta precisão, junto com algoritmos de processamento de dados sofisticados tem possibilitado o desenvolvimento de

equipamentos cirúrgicos altamente especializados, como robôs controlados remotamente e sistemas de imagens 3D. Esses avanços tecnológicos aumentam a eficácia dos procedimentos cirúrgicos além de reduzir significativamente riscos para os pacientes (MAYOR et al., 2022).

A interseção, conforme Crigger et al. (2022), da engenharia de computação e eletrônica com a medicina tem contribuído para o desenvolvimento de sistemas inteligentes capazes de auxiliar os cirurgiões desde o planejamento e execução de cirurgias. A aplicação de Inteligência Artificial (IA) e Aprendizado de Máquina (AM) em dados cirúrgicos tem produzido melhores decisões clínicas, refletindo nos resultados cirúrgicos (NATARANJAN et al., 2021). Isto é notório, por exemplo, ao analisar grandes volumes de dados cirúrgicos com técnicas de AM e seu reflexo positivo no entendimento das complexidades de diferentes procedimentos cirúrgicos, permitindo personalizar abordagens cirúrgicas em atendimento de necessidades específicas de pacientes (COLLIN et al., 2019).

Neste contexto, este trabalho apresenta o estado da arte do uso da robótica em cirurgias, com destaque para os desafios e perspectivas da área, aborda as tecnologias robóticas atuais no contexto da engenharia de computação e engenharia eletrônica voltadas para a área de saúde, destaca desafios e limitações sob os vieses técnico, operacional e de custo, além de apresentar preocupações éticas e regulatórias que envolvem tal área, culminando sobre perspectivas futuras e uma visão sobre tendências emergentes nesta área.

ESTADO DA ARTE

Há uma interseção importante entre a tecnologia avançada e a medicina, a qual tem representado significativa transformação na prática cirúrgica nas últimas décadas (ZHU et al., 2019). Desde suas mais remotas aplicações até os avanços mais atuais, a robótica cirúrgica consiste numa revolucionária forma na prática de realizações cirúrgicas, em especial oferecendo precisão aprimorada, menor invasividade, acarretando em recuperação mais rápida aos pacientes (MECCARIELLO et al., 2017).

O precursor desta área, em 1985, foi o PUMA 560 – um braço robótico industrial adaptado, usado inicialmente para orientar uma agulha em uma biópsia cerebral, sendo desta forma um marco na neurocirurgia. Após esta incursão inicial na robótica cirúrgica, em 1988 houve a primeira cirurgia laparoscópica assistida por robô em um procedimento que inaugurava a era da cirurgia minimamente invasiva auxiliada por robótica (MAYOR et al., 2022).

Nesta linha, o desenvolvimento da robótica para cirurgias ganhou um significativo impulso com o desenvolvimento do Sistema da Vinci, em 2006 (MORREL et al., 2021). Este sistema consistiu em uma plataforma precursora e pioneira no uso de braços robóticos controlados remotamente, proporcionando aos médicos cirurgiões uma precisão inalcançável para mãos humanas além de uma visão expandida e tridimensional do campo operatório (ZHU et al., 2019). Em decorrência, o escopo da cirurgia robótica expandiu-se exponencialmente, abrangendo diversas outras especialidades, tais como urologia, ginecologia, cardiologia, sistema digestivo, entre outras. A capacidade de realizar procedimentos complexos através de incisões pequenas

oferece inúmeros benefícios, como redução da dor pós-operatória, menor risco de infecção, cicatrizes menores e um tempo de recuperação mais rápido (MAYOR et al., 2022).

Apesar de seus muitos e notórios benefícios, a robótica cirúrgica enfrenta ainda desafios e limitações. Entre eles, entre os principais está o custo de aquisição e manutenção desses sistemas, limitando sua disponibilidade em determinadas regiões e instituições. Também é uma limitação a curva de aprendizado para os cirurgiões, os quais precisam se adaptar às nuances e novidades da cirurgia robótica. Questões éticas e regulatórias também se destacam nesta crescente automação cirúrgica, apresentando questões sobre responsabilidade e segurança do paciente (VARGHESE et al., 2019).

Entretanto, tais desafios não são impeditivos para a evolução nesta área, haja vista os benefícios que ela disponibiliza. Avanços contínuos na área da inteligência artificial e na tecnologia de sensores e atuadores indicam que os sistemas cirúrgicos robóticos têm lastro para evoluir serem mais preciso, acessíveis e adaptáveis. Também a pesquisa em materiais e engenharia está abrindo caminho para robôs mais leves, flexíveis e com maior capacidade de resposta, adaptando-se melhor às complexidades do corpo humano (MAYOR et al., 2022).

Outra área de interseção, de grande importância, é a integração de sistemas robóticos com técnicas de imagem avançadas e realidade aumentada, as quais estão pavimentando um caminho assertivo para procedimentos ainda mais precisos, nos quais cirurgiões poderão ter uma visão mais detalhada e em tempo real de áreas anatômicas e de difícil acesso. Ainda há a tele cirurgia, campo emergente e possibilitado pela robótica, o qual ultrapassa barreiras geográficas e permite que cirurgiões especializados realizem procedimentos em locais remotos e subdesenvolvidos (CONDINO et al., 2022).

Há também grande importância da aplicação da robótica no contexto educacional, no qual os simuladores robóticos são ferramentas indispensáveis na formação de cirurgiões, permitindo que eles pratiquem e aprimorem suas habilidades em um ambiente controlado e sem risco para pacientes. Tal abordagem educacional acelera a curva de aprendizado e aumenta a proficiência dos cirurgiões no uso de tecnologias robóticas (CONDINO et al., 2022).

Robótica Cirúrgica – Exemplos e aplicações

As tecnologias robóticas na cirurgia englobam uma variedade de sistemas, cada qual com características distintas adaptadas para diferentes tipos de procedimentos cirúrgicos. O aspecto crucial dessas tecnologias é a melhor precisão, permitindo intervenções cirúrgicas minimamente invasivas. Tais sistemas geralmente consistem em braços robóticos controláveis, uma estação de controle operada pelo cirurgião e um sistema de visualização com imagens tridimensionais do campo cirúrgico (CONDINO et al., (2022); NATARANJAN et al. (2021)).

Um avanço notável é a integração da Inteligência Artificial (IA) com a robótica cirúrgica, permitindo análises mais detalhadas e assistência em tempo real durante as operações. Isso inclui, mas não se limita, ao reconhecimento de padrões para identificação de tecidos, assistência na tomada de decisões e AM para melhorar continuamente a eficiência das cirurgias (NATARANJAN et al., 2021). Ainda, a incorporação de sensores avançados e sistemas de *feedback* tátil fornecem aos cirurgiões uma sensação realista dos procedimentos, algo que há alguns anos era uma

grande limitação nos sistemas robóticos (KUCHENBECKER et al., 2010).

O Sistema da Vinci é um dos exemplos mais conhecidos, amplamente utilizado e precursor na área de tecnologia robótica em cirurgia. Se caracteriza por conter alta precisão e braços robóticos flexíveis. Continua sendo empregado especialmente em procedimentos de urologia, ginecologia e cirurgia geral, com movimentos mais precisos e controlados do que mãos humanas, resultando em menor trauma localizado, fundamentais em prostatectomias, histerectomias e gastrectomias, por exemplo (MORREL et al., 2021).

Outro sistema de destaque é o Mako – especializado em cirurgias ortopédicas, particularmente de joelho e quadril. O Mako proporciona um planejamento cirúrgico personalizado baseado em imagens tridimensionais do local, permitindo aos cirurgiões planejar e executar intervenções com grande precisão no posicionamento do implante, algo crucial para a eficácia do procedimento e a longevidade do implante (MORREL et al., 2021).

Há também evolução destacada no aprimoramento de micro robôs, projetados para navegar por áreas de acesso dificultado do corpo humano, particularmente úteis em procedimentos cardiovasculares e endoscópicos. Tais micro robôs possibilitam a realização de cirurgias em locais que seriam de outra forma inacessíveis ou de grande risco associado nas abordagens cirúrgicas convencionais (GOH; ALI, 2022).

Também tem sido destaque o crescente potencial e aprimoramento da tele cirurgia, possibilitado pela tecnologia robótica. Este campo de estudo e prática permite que cirurgiões realizem procedimentos em pacientes à distância, por meio de robôs controlados remotamente. Embora ainda em estágios iniciais e enfrentando desafios significativos, como a latência de comunicação e questões de segurança cibernética, a tele cirurgia representa uma promessa significativa para o futuro, especialmente em áreas com escassez de especialistas cirúrgicos (GOH; ALI, 2022).

Limitações Técnicas em Cirurgia Robótica

Apesar das evidentes vantagens da cirurgia robótica, são enfrentados desafios técnicos significativos que limitam seu uso e eficiência. Tais desafios podem ser sistematizados em:

- **Hardware:** Limitações de hardware nesta área são significativamente tangíveis. Sistemas robóticos para cirurgias são grandes e exigem um espaço operacional considerável, o que também acarreta em um desafio para salas de cirurgia já congestionadas. Ainda, a delicadeza dos componentes robóticos torna-os suscetíveis a danos e desgastes, acarretando em manutenção contínua e de altos valores. Ainda há limitações diversas no *feedback* tátil para os cirurgiões, não oferecendo a sensação direta da pressão ou textura de tecidos, fundamental em alguns procedimentos cirúrgicos (KUCHENBECKER et al., 2010);
- **Software:** A programação e a operação de sistemas robóticos utilizados em cirurgia são complexas. Desafios quanto à interpretação de dados, latência na resposta do sistema e dificuldades na manipulação de interfaces de software podem impactar na precisão e na eficácia da cirurgia. Há também desafios na compatibilidade de software e atualizações regulares necessárias a fim de manter a segurança e eficiência do sistema, tornando

tais sistemas bastante onerosos e rapidamente defasados (NATARANJAN et al., 2021);

- **Integração de Sistemas:** A correta integração de sistemas robóticos com outros equipamentos de ambientes cirúrgicos e sistemas de registros médicos eletrônicos é um desafio adicional. Tal integração é crucial para um fluxo de trabalho suave e para a manutenção de registros precisos, podendo ser dificultada pela incompatibilidade entre diferentes sistemas e plataformas (ROOSAN, 2022).

Desafios Operacionais e de Custo na Cirurgia Robótica

Também são eminentes os desafios operacionais e de alto custo no âmbito da robótica cirúrgica. Esses desafios para a implementação da cirurgia robótica são multifacetados, englobando desde a necessidade de treinamento especializado de pessoal, a implantação dos sistemas e sua manutenção regular, acarretando especialmente em alto custo global.

A fim de haver um uso eficiente da tecnologia robótica em cirurgias, em se tratando de pessoal, o treinamento extensivo e especializado para os cirurgiões e a equipe de apoio é fundamental. Cabe salientar que este treinamento é crucial não apenas para a operação eficiente do equipamento, mas especialmente para garantir a segurança do paciente (BUSTOS et al., 2020). A curva de aprendizado pode ser íngreme, com alta demanda temporal e financeira, e ocorrem tanto para os treinamentos iniciais operacionais até nos momentos de atualizações contínuas de habilidades (ZHU et al., 2019).

Em tratando-se da manutenção e custos associados aos sistemas robóticos em si, estes são complexos e requerem manutenção regular, geralmente onerosa. Essa manutenção não está restrita ao reparo de peças físicas, mas também a atualizações de software e verificações nos protocolos computacionais de segurança (CRIGGER et al., 2022). Estes custos associados àquele inicial de aquisição dos sistemas robóticos são fatores que mitigam sua adoção em algumas instituições de saúde, especialmente as públicas (PITASSI et al., 2016).

Entretanto, ao comparar a cirurgia robótica com os métodos tradicionais, é inteligente considerar não apenas os custos diretos, mas também os benefícios a longo prazo e a eficácia do tratamento (MORREL et al., 2021).

Em termos comparativos, em especial acerca dos custos diretos, é notório que inicialmente os custos associados à cirurgia robótica são mais elevados do que os métodos tradicionais de intervenção cirúrgica, pois incluem o custo de aquisição do equipamento, despesas de manutenção e o treinamento do pessoal, conforme supra descrito. Associado a isso, há ainda situações de que cada procedimento pode ter um custo operacional potencializado devido ao uso de equipamentos especializados (ZHU et al., 2019).

Em contrapartida, é preciso destacar a eficiência e os benefícios a médio e longo prazo. A cirurgia robótica oferece vantagens significativas, incluindo maior precisão, redução da invasividade, diminuição do risco de complicações, menor tempo de internação hospitalar e recuperação mais rápida (MARI et al., 2019). Tais vantagens perante os métodos tradicionais podem se traduzir em economias de custo neste médio e longo prazo, tanto para as instituições de saúde quanto para os pacientes. Além disso,

a capacidade de realizar procedimentos complexos com maior precisão e menor risco pode levar a melhores resultados de saúde (MARI et al., 2019).

Considerações Éticas e Regulatórias na Cirurgia Robótica

O uso da robótica no campo da medicina trouxe diversas questões éticas e regulatórias complexas (VARGHESE et al., 2019). Estas questões são centrais para garantir a segurança dos pacientes, a integridade profissional e a confiança pública na utilização de tais tecnologias (BUSTOS et al., 2020).

No que diz respeito à **questões éticas**, alguns pontos se destacam, a saber:

- **Autonomia e Consentimento Informado:** Entre os pilares éticos da medicina está o respeito pela autonomia do paciente, o que inclui o consentimento informado (PITASSI et al., 2016). Na cirurgia robótica, faz-se necessário esclarecer os pacientes sobre a natureza dos procedimentos, riscos e benefícios inerentes, bem como o papel que a tecnologia desempenha na operação. Os pacientes devem estar cientes de que, apesar do uso de robôs, os cirurgiões estão no controle do procedimento;
- **Responsabilidade e Accountability:** Também é inerente ao contexto questões sobre a responsabilidade em caso de erros ou complicações (MARI et al., 2019). Determinar a *accountability*, isto é, a quem recai a responsabilização – sobre o cirurgião, a instituição, ou o fabricante do dispositivo – é crucial para manter padrões éticos e legais no contexto de cirurgias robotizadas;
- **Equidade no Acesso à Saúde:** A disponibilidade limitada e o custo elevado da cirurgia robótica podem criar disparidades no acesso a esses serviços avançados de saúde. Tal característica maximiza preocupações éticas sobre a equidade no acesso aos cuidados de saúde e a distribuição justa dos recursos médicos ante as disparidades sociais a nível mundial (PITASSI et al., 2016).

Isto posto, no aspecto que tange o cenário regulatório, sistemas robóticos cirúrgicos são classificados e regulamentados como dispositivos médicos. Há países que tais sistemas estão sujeitos à aprovação e supervisão da *Food and Drug Administration* (FDA). Leis e códigos de ética profissionais, como os estabelecidos pela Associação Médica Americana (AMA) e outras organizações semelhantes em todo o mundo, também desempenham um papel importante na definição de normas éticas para a prática cirúrgica. No Brasil há muito caminho para ser trilhado no sentido de evolução ética e regulatória neste contexto (VARGHESE et al., 2019).

À medida que a cirurgia robótica continua a evoluir, e diante do crescimento acelerado que fez saltar de 24 mil em 2021 para 27 mil cirurgias com auxílio de plataformas robotizadas no Brasil¹, o cenário regulatório também deve se adaptar. Isso inclui a atualização contínua de normas e diretrizes para abordar novas capacidades tecnológicas, como a automação aumentada e o uso de inteligência artificial (COLLIN et

¹ **Estado de Minas: Saúde e bem viver:** https://www.em.com.br/app/noticia/saude-e-bem-viver/2023/10/09/interna_bem_viver,1574039/cirurgia-robotica-conheca-a-pratica-que-cresceu-12-5-no-brasil.shtml

al., 2019). As agências reguladoras devem equilibrar a promoção da inovação com a garantia da segurança do paciente e da eficácia clínica.

A evolução regulatória deve considerar também o aumento da complexidade nos sistemas de responsabilidade. Com a integração de algoritmos de IA, por exemplo, torna-se mais desafiador atribuir culpa ou responsabilidade em casos de falhas ou erros. Essa complexidade exige uma abordagem regulatória que seja suficientemente ágil e adaptável para acompanhar os rápidos avanços tecnológicos (CONDINO et al., 2022).

Perspectivas na Robótica Cirúrgica

A robótica cirúrgica, desde a sua concepção, tem transformado de forma contínua o panorama da cirurgia moderna, fornecendo ferramentas inovadoras que aumentam a precisão, a segurança e a eficiência dos procedimentos cirúrgicos. À medida que a tecnologia avança, novas perspectivas emergem (MAYOR et al., 2022).

Os elevados avanços em IA, especialmente no que tange o AM, estão entre os avanços mais latentes, e poderão proporcionar maior precisão diagnóstica, planejamento cirúrgico personalizado e capacidade de adaptação em tempo real durante os procedimentos (COLLIN et al., 2019). A IA cada vez mais poderá auxiliar na identificação de padrões anatômicos, otimizando abordagens cirúrgicas e reduzindo o risco de complicações (NATARANJAN et al., 2021).

Também se emerge o desenvolvimento de sistemas robóticos cada vez menos invasivos e microscópicos, promovendo a realização de procedimentos cirúrgicos complexos com mínima intervenção, diminuindo a dor e o tempo de recuperação do paciente, diretamente mitigando os riscos associados à cirurgia (MECCARIELLO et al., 2017).

Há também perspectivas de melhorias relacionadas à interoperabilidade e flexibilidade dos sistemas, em uma constante busca de desenvolvimento de protocolos computacionais e eletrônicos a fim de aumentar a interoperabilidade com outros equipamentos médicos e plataformas de software, potencializando a eficiência e a flexibilidade dos procedimentos cirúrgicos (CRIGGER et al., 2022). A adaptabilidade dos sistemas permitirá sua aplicação em uma gama mais ampla de procedimentos, das pequenas e simples às intervenções mais complexas (MORREL et al., 2021).

Outro item que se mostra promissor e de fundamental evolução são as tecnologias que trazem um *feedback* háptico, a fim de possibilitar aos cirurgiões sentir a textura e a resistência dos tecidos durante a cirurgia, melhorando a precisão e a segurança dos procedimentos. Este avanço representará um marco significativo, superando uma das limitações atuais dos sistemas robóticos (KUCHENBECKER et al., 2010).

Tais perspectivas acarretam em uma adaptação no papel do cirurgião, que passa por uma transformação de executor direto dos procedimentos para um supervisor e controlador de sistemas altamente sofisticados. Tal fato exigirá treinamentos especializados desde as cadeiras da universidade e cada vez mais constantes durante o exercício da profissão, especialmente enfatizando habilidades como tomada de decisão baseada em dados, gerenciamento de sistemas complexos e habilidades de supervisão (MAYOR et al., 2022).

Entretanto, para que haja maior propagação dos benefícios, é preciso citar como perspectiva a potencialização do acesso e a redução de custos inerentes, com as

inovações em robótica cirúrgica. Com o potencial aumento de acesso a procedimentos cirúrgicos de alta qualidade, com sistemas mais eficientes e menos invasivos, é provável que haja uma redução nos custos gerais associados à cirurgia, tornando-a acessível a uma parcela maior da população. Com procedimentos mais precisos e menos invasivos, espera-se uma redução nas taxas de complicações, tempo de internação hospitalar e tempo de recuperação, além de melhores resultados funcionais e estéticos (MECCARIELLO et al., 2017).

PERSPECTIVAS CIENTÍFICAS E OBSERVAÇÕES GERAIS

Ao explorar o estado da arte acerca da cirurgia robótica, campo em constante evolução e que representa um marco na intersecção entre tecnologia e medicina, especialmente relativos aos desafios técnicos, operacionais e de custo, além de observar princípios éticos e regulatórios, é possível traçar proposições de pesquisa acerca de observações sobre a área.

Há de fato destaque especial para o impacto transformador da robótica na precisão e eficiência dos procedimentos cirúrgicos. Os sistemas robóticos, como o da Vinci e o Mako, demonstram a capacidade da tecnologia em aprimorar a precisão cirúrgica e reduzir a invasividade dos procedimentos, contribuindo para uma recuperação mais rápida e menos dolorosa para os pacientes (MARI et al., 2019). Essa evolução tecnológica, contudo, não está isenta de desafios. Aspectos como o alto custo de implementação e manutenção, a necessidade de treinamento especializado e a integração de sistemas complexos representam barreiras significativas que necessitam de atenção contínua (MORREL et al., 2021).

As considerações éticas e regulatórias emergem como componentes críticos neste cenário. Questões como consentimento informado, responsabilidade em caso de falhas e acesso equitativo aos cuidados avançados de saúde são fundamentais para a integração ética e responsável da robótica na cirurgia (VARGHESE et al., 2019). O cenário regulatório, que atualmente supervisiona os dispositivos médicos e as práticas cirúrgicas, deve evoluir para acompanhar o ritmo acelerado das inovações tecnológicas, garantindo a segurança dos pacientes e a eficácia dos procedimentos (ZHU et al., 2019).

Acerca das perspectivas futuras, a cirurgia robótica premedita avanços ainda mais significativos. A integração da IA e o AM, o desenvolvimento de sistemas menos invasivos e aprimoramentos no *feedback* tátil são apenas algumas das inovações previstas que têm o potencial de revolucionar ainda mais a prática cirúrgica (NATARANJAN et al., 2021). Esses avanços trarão não apenas melhorias nos resultados dos pacientes, mas também mudanças no papel dos cirurgiões, que passarão a ser supervisores e controladores de sistemas tecnológicos complexos (KUCHENBECKER et al., 2010). São áreas de muitas lacunas abertas, com vasto campo de aplicação de pesquisas científicas e tecnológicas (ROOSAN, 2022).

Entretanto deve-se reconhecer que, apesar dos desafios e incertezas, a cirurgia robótica está pavimentando o caminho para uma nova era na medicina. Este campo não apenas melhora a qualidade do atendimento ao paciente, mas também abre portas para procedimentos que antes eram considerados extremamente arriscados ou tecnicamente impossíveis. A evolução contínua da robótica cirúrgica promete ampliar

as fronteiras da medicina, oferecendo novas esperanças e possibilidades para pacientes das mais diversas patologias clínicas (BRAVI et al., 2021).

Não obstante, é fundamental que o progresso neste campo seja acompanhado por uma reflexão ética constante e uma adaptação regulatória ágil. À medida que se avança no escopo tecnológico com papel cada vez mais destacado na saúde, deve-se evoluir no campo científico para que os benefícios da cirurgia robótica sejam acessíveis de forma justa e segura, respeitando os princípios éticos fundamentais da medicina (VARGHESE et al., 2019).

A fim de mitigar tais limitações surgem abordagens destinadas a superar as limitações de hardware, para as quais estão sendo desenvolvidos sistemas robóticos mais compactos e flexíveis, que ocupam menos espaço e são mais adaptáveis às diferentes configurações de sala de cirurgia. Além disso, a introdução de *feedback* háptico nos sistemas de controle está sendo explorada para proporcionar aos cirurgiões uma sensação tátil durante os procedimentos, melhorando assim a sua capacidade de manipulação e precisão (KUCHENBECKER et al., 2010).

Quanto às melhorias previstas em softwares, o desenvolvimento de algoritmos mais avançados e a implementação de IA estão contribuindo para melhorar a eficiência e a segurança dos sistemas robóticos, as quais incluem a capacidade de processamento mais rápido, menor latência e interfaces de usuário mais intuitivas, facilitando a operação pelos cirurgiões (MORREL et al., 2021). A segurança cibernética é outra área de foco, que devem garantir que os sistemas estejam protegidos contra ameaças externas, sendo fundamentais que pesquisas científicas no campo da bioinformática explorem esta área (ROOSAN, 2022).

No que se refere aos desafios e avanços na integração de sistemas, há um movimento em direção a plataformas mais interoperáveis e padrões universais, abordagem que facilita a comunicação e a compatibilidade entre diferentes dispositivos e sistemas de software usados em ambientes cirúrgicos. Além disso, a integração de registros eletrônicos de saúde com sistemas robóticos precisa ser aprimorada, permitindo um fluxo de dados mais eficiente e uma melhor coordenação do atendimento ao paciente (MAYOR et al., 2022).

Também se observa que para o desenvolvimento contínuo na área de robótica cirúrgica se faz necessária uma colaboração interdisciplinar entre engenheiros eletrônicos, eletrônicos, de computação e de materiais, programadores, cirurgiões e outros profissionais de saúde (CRIGGER et al., 2022). Por meio de pesquisa científica e desenvolvimento tecnológico contínuos, é possível criar soluções inovadoras que abordem as limitações existentes, com componentes robóticos mais duráveis, menos suscetíveis a danos ao paciente, melhores controlados e mais acessíveis financeiramente (COLLIN et al., 2019).

Propõe-se também que haja aprimoramento e investimentos em treinamentos e educação dos cirurgiões, que desempenham papel central. Programas de treinamento específicos e simulações realistas podem preparar os cirurgiões para atuar com a complexidade dos sistemas robóticos, aumentando a segurança e eficácia dos procedimentos, haja vista que o uso da robótica em cirurgias não se trata de uma façanha tecnológica, mas um passo significativo no caminho ao qual as cirurgias são mais seguras, menos invasivas e mais acessíveis.

Também há um vasto campo para discussões e evolução nas considerações

éticas e regulatórias para a integração bem-sucedida da robótica na cirurgia. Além de garantir a segurança e eficácia dos procedimentos, é essencial abordar as implicações éticas relacionadas à autonomia do paciente, responsabilidade, e equidade no acesso aos cuidados de saúde. Simultaneamente, o cenário regulatório precisa evoluir em conjunto com os avanços tecnológicos, garantindo que as diretrizes sejam atualizadas e relevantes. Essa evolução regulatória é fundamental para manter a confiança do público na cirurgia robótica e assegurar que os benefícios dessa tecnologia sejam acessíveis de maneira justa e segura. A cirurgia robótica, enquanto um avanço promissor na medicina moderna, exige uma consideração cuidadosa das implicações éticas e uma adaptação contínua do quadro regulatório. Essas medidas são indispensáveis para assegurar que os avanços tecnológicos na cirurgia robótica sejam implementados de forma responsável e ética, beneficiando pacientes, profissionais de saúde e a sociedade como um todo (VARGHESE et al., 2019).

As perspectivas futuras na robótica cirúrgica indicam um avanço contínuo e significativo na medicina. Com a integração de IA, desenvolvimento de sistemas menos invasivos, melhorias na interoperabilidade e no *feedback* háptico, a cirurgia robótica está se encaminhando para transformar não apenas a maneira como os procedimentos cirúrgicos são realizados, mas também o papel dos cirurgiões e os resultados para os pacientes (KUCHENBECKER et al., 2010). Enquanto esses avanços trazem desafios, especialmente em termos de treinamento e regulamentação, eles também oferecem oportunidades sem precedentes para melhorar a qualidade e a acessibilidade da assistência cirúrgica. A continuação da pesquisa e desenvolvimento nessa área é fundamental para realizar plenamente o potencial da robótica cirúrgica, abrindo novos horizontes para tratamentos mais seguros, eficazes e acessíveis (PITASSI et al., 2016).

CONCLUSÕES

A integração da robótica na prática cirúrgica não é uma substituição do cirurgião, mas uma extensão de suas capacidades, oferecendo precisão, flexibilidade e controle que vão além das limitações humanas. À medida que a tecnologia continua a avançar, espera-se que a robótica desempenhe um papel ainda mais central na medicina, abrindo campo para novas possibilidades em tratamentos cirúrgicos, melhorando os resultados para os pacientes das mais diversas patologias (MORREL et al., 2021).

A robótica cirúrgica está expandindo limites do que é possível no campo da medicina. Com a contínua evolução dessas tecnologias, o potencial para cirurgias mais seguras, eficientes e menos invasivas está sendo modificado. Os avanços na IA aliada ao AM, na tele cirurgia e nos micros robôs estão abrindo novos horizontes, prometendo não apenas melhorar os resultados para os pacientes, mas também democratizar o acesso a procedimentos cirúrgicos de alta qualidade (NATARANJAN et al., 2021). À medida que essas tecnologias amadurecem e se tornam mais integradas na prática médica, é crucial que sejam acompanhadas por uma consideração cuidadosa das implicações éticas e regulatórias, garantindo que o uso da robótica em cirurgias continue a ser uma força positiva no avanço da saúde humana (VARGHESE et al., 2019).

Para que a evolução na área de cirurgia robótica continue avançando, inovações contínuas em hardware, software e integração de sistemas especializados nesta área



são cruciais. Isso só é possível com a interdisciplinaridade de conhecimentos e investimento na pesquisa aplicada. Ressalta-se que, enquanto os custos diretos da cirurgia robótica são altos, os benefícios indiretos e de longo prazo podem justificar o investimento, melhorando significativamente a qualidade do atendimento ao paciente e os resultados cirúrgicos, o que, em última análise, pode equilibrar os custos iniciais (ROOSAN, 2022). À medida que a tecnologia avança e se torna mais difundida, é provável que os custos diminuam, tornando a cirurgia robótica mais acessível, segura e democrática.

REFERÊNCIAS

BUSTOS, R.; PAPAMICHAIL, M.; MANGANO, A.; VALLE, V.; GIULIANOTTI, P. C. Robotic approach to treat median arcuate ligament syndrome: a case report. *Journal of Surgical Case Reports*, v. 2020, n. 5, 2020. DOI: 10.1093/jscr/rjaa088.

BRAVI, C. A. et al. Perioperative outcomes of open, laparoscopic, and robotic partial nephrectomy: a prospective multicenter observational study (The RECORd 2 Project). *European urology focus*, v. 7, n. 2, p. 390-396, 2021.

COLLIN J., LEVY J., STEFANIDIS D., et al. **Utilising the Delphi process to develop a proficiency-based progression train-the-trainer course for robotic surgery training.** *Eur Urol.* 2019; pp. 775–785.

CONDINO S., PIAZZA R., CARBONE M., BATH J., et al. Bioengineering, augmented reality, and robotic surgery in vascular surgery: A literature review. *Front Surg.* 2022. DOI: 10.3389/fsurg.2022.966118.

CRIGGER, E. et al. Trustworthy Augmented Intelligence in Health Care. *Journal of Medical Systems*, v. 46, n. 2, 2022. DOI: 10.1007/s10916-021-01790-z.

GOH, Elizabeth Z.; ALI, Tariq. Robotic surgery: an evolution in practice. *Journal of Surgical Protocols and Research Methodologies*, v. 2022, n. 1, 2022. DOI: 10.1093/jsprm/snac003.

KUCHENBECKER K, GEWIRTZ J, McMAHAN W et al. **VerroTouch: high-frequency acceleration feedback for telerobotic surgery** *Lecture Notes in Computer Science.* Vol 6191 LNCS; 2010; pp. 189–196.

MARI A, CAMPI R, SCHIAVINA R, AMPARORE D, ANTONELLI, A, et al. Nomogram for predicting the likelihood of postoperative surgical complications in patients treated with partial nephrectomy: a prospective multicentre observational study. *BJU international.* 2019; pp. 93-102.

MAYOR, N., COPPOLA, A.S. CHALLAMCOMBR, B. Past, present and future of surgical robotics. *Trends Urology & Men Health*; 2022. DOI: 10.1002/tre.834.



MECCARIELLO, G.; CAMMAROTO, G.; MONTEVECCHI, F.; HOFF, P.T.; SPECTOR, M.E.; NEGM, H. et al. Transoral robotic surgery for the management of obstructive sleep apnea: a systematic review and meta-analysis. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, v. 274, n. 2, pp. 647-653, 2017. DOI: 10.1007/s00405-016-4113-3.

MORRELL, A. L., MORRELL-JUNIOR, A. C., MENDES, J. M., TUSTUMI, F. et al. The history of robotic surgery and its evolution: when illusion becomes reality. *Revista do Colégio Brasileiro de Cirurgiões*, 2021. DOI: 10.1590/0100-6991e-20202798.

NATARANJAN P., FRENZEL J., SMALTZ D. **Demystifying big data and machine learning for healthcare**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2021.

PITASSI, C., AUGUSTO GONÇALVES, A., PEREIRA BARBOSA J., et al. A Cirurgia Robótica nas Organizações Públicas de Saúde: O Caso do Instituto Nacional do Câncer (INCA) *Administração Pública e Gestão Social*, v. 8, n. 3, 2016. Universidade Federal de Viçosa, Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=351557812006>. Acesso em 05 de janeiro de 2024.

ROOSAN, Don. The Applications of Augmented Reality and Artificial Intelligence in Pharmacy and Healthcare. *Applied Sciences*, 2022. Disponível em: https://www.mdpi.com/journal/applsci/special_issues/Augmented_Reality_AI_Pharmacy_Healthcare. Acesso em 03 de janeiro de 2024.

VARGHESE, A., DOGLIOLI, M., FADER, A. Updates and controversies of robotic-assisted surgery in gynecologic surgery. *Clinical obstetrics and gynecology*, v. 62, n. 4, 2019.

ZHU, X.L.; YAN, P.J.; YAO, L.; LIU, R.; WU, D.W.; DU, B.B. et al. Comparison of short-term outcomes between robotic-assisted and laparoscopic surgery in colorectal cancer. *Surgical Innovations*, v. 26, n. 1, pp. 57-65, 2019. DOI: 10.1177/1553350618806438.