

A VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DA ROBÓTICA PARA A CIRURGIA FETAL MINIMAMENTE INVASIVA

THE VIABILITY OF THE APPLICATION OF ROBOTICS FOR MINIMALLY INVASIVE FETAL SURGERY

MARIA EDUARDA FERREIRA LEMOS¹, LAMARA LAGUARDIA VALENTE ROCHA^{2*}

1. Acadêmica do 3º período do curso de Medicina da Faculdade Ciências Médicas de Minas Gerais (FCMMG); 2. Orientadora, Doutora em Biologia Celular e Estrutural, professora do curso de Pós-Graduação em Cirurgia Robótica da Faculdade de Ciências Médicas (FCMMG) e professora titular do curso de Medicina da FCMMG.

* Vila Onze, 36, Centro, Caratinga, Minas Gerais, Brasil. CEP: 35300-100. lamara.laguardia@gmail.com

Recebido em 25/08/2020. Aceito para publicação em 24/09/2020

RESUMO

Introdução: A cirurgia fetal é muito importante para o tratamento de anomalias congênitas capazes de levar o feto à morte. Algumas doenças fetais identificadas durante o pré-natal podem ser tratadas cirurgicamente, como a Hérnia Diafragmática Congênita, a Síndrome de Transfusão Feto-fetal e a Mielomeningocele. Para uma abordagem minimamente invasiva a aplicação robótica está sendo analisada. **Objetivo:** Identificar evidências científicas na literatura sobre o auxílio da robótica na cirurgia fetal para analisar o prognóstico dos fetos com malformações congênitas. **Método:** Foram selecionados 20 artigos a partir das seguintes bases de dados: Scielo, PubMed, IEEE Xplore, BVS e Cambridge Core com os descritores “feto”, “cirurgia”; “cirurgia fetal”, “robótica” e “robô”, com o conector “E”. **Discussão:** Evidencia-se grande quantidade de robôs desenvolvidos para a cirurgia fetal compostos por articulações semelhantes ao movimento do punho humano que poderão agregar vantagens para a saúde materno-fetal durante e após a operação. Entretanto, alguns ainda necessitam de certas modificações. **Conclusão:** A robótica traz benefícios significativos para um procedimento fetal minimamente invasivo, como a redução dos riscos cirúrgicos e de tremores fisiológicos dos cirurgiões e uma maior precisão. Porém, experiências em fetos humanos durante a gestação com os robôs propostos ainda são necessárias para confirmar esses avanços.

PALAVRAS-CHAVE: Cirurgia fetal, robótica, robô, cirurgia minimamente invasiva.

ABSTRACT

Introduction: Fetal surgery is very important for the treatment of congenital anomalies capable of causing fetal death. Some fetal diseases identified during prenatal care can be treated surgically, such as Congenital Diaphragmatic Hernia, Twin-twin Transfusion Syndrome and Myelomeningocele. For a minimally invasive approach the robotic application is being analyzed. **Objective:** To identify scientific evidence in the literature about the help of robotics in fetal surgery to analyze the prognosis of fetuses with congenital malformations. **Method:** Twenty articles were selected from the following databases: Scielo, PubMed, IEEE Xplore, BVS and Cambridge Core with the keywords “fetus”, “surgery”; “fetal surgery”, “robotic” and “robot”, with the “E” connector. **Discussion:** A large amount of robots

developed for fetal surgery is evidenced, composed of joints similar to the movement of the human wrist that add advantages for maternal-fetal health during and after the operation. However, some still need certain modifications. **Conclusion:** Robotics brings benefits to a minimally invasive fetal procedure, such as the reduction of surgical risks and physiological tremors of surgeons and greater precision. However, experiments on human fetuses during pregnancy with the proposed robots are still needed to confirm these advances.

KEYWORDS: Fetal surgery, robotics, robot, minimally invasive surgery.

1. INTRODUÇÃO

A cirurgia fetal surgiu com o intuito de aprofundar os conhecimentos sobre o feto e suas patologias e teve seu início em torno da década de 1960. O aperfeiçoamento dos métodos diagnósticos pré-natais contribuiu para expandir a utilização da técnica que hoje é muito praticada na área da medicina fetal¹.

Muitas anomalias congênitas fetais são passíveis de identificação através da ultrassonografia pré-natal e dos programas de triagem, caso não sejam tratadas podem levar à morte do feto ou causar deficiências sérias. Em alguns casos, a cirurgia fetal é uma opção favorável para a intervenção e tratamento dos distúrbios².

Michael Harrison, considerado o “pai da cirurgia fetal”³, fundou na Universidade da Califórnia (UCSF) o “The Fetal Treatment Center”, que é considerado o local de nascimento de cirurgia fetal. No início dos anos 1980 Harrison realizou a primeira cirurgia fetal bem sucedida em um feto humano com obstrução do trato genitourinário⁴.

Além da obstrução do trato genitourinário, várias outras doenças também podem ser tratadas durante o pré-natal, dentre elas temos a Hérnia Diafragmática Congênita (HDC), a Mielomeningocele/Espinha bífida, a Síndrome de Transfusão Feto-fetal (STFF) e o Teratoma Sacrococcígeo⁵.

As premissas elaboradas há 4 décadas para a realização da cirurgia materno-fetal permanecem as mesmas, porém com algumas pequenas alterações: (1) possibilidade precisa de um diagnóstico pré-natal; (2)

distúrbio bem definido; (3) malformação tratável que, caso não tratada, pode levar ao óbito fetal, distúrbio intrauterino irreversível dos órgãos ou patologia grave após o nascimento; (4) inexistência de anomalias correlacionadas graves; e (5) relação risco-benefício para a mãe e o feto admissível. Há algumas contraindicações para várias intervenções cirúrgicas materno-fetais, como fatores de risco maternos, por exemplo placentomegalia e síndrome do espelho materno⁶.

O método aberto de cirurgia fetal tratou com êxito muitos fetos, porém, possui procedimentos invasivos, que podem levar ao trabalho de parto prematuro ou à rotura prematura de membrana, como a laparotomia materna seguida de histerotomia⁷.

Dessa forma, foi introduzida a participação da robótica em alguns procedimentos da cirurgia fetal com o objetivo de permitir uma cirurgia minimamente invasiva (CMI) em casos em que esta não é possível devido aos instrumentos manuais com articulações limitadas^{8,9}.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura acerca do uso da robótica na cirurgia fetal minimamente invasiva. A pergunta norteadora para a elaboração desta revisão integrativa foi: “O desenvolvimento e aplicações da cirurgia minimamente invasiva assistida por robô tem melhorado o prognóstico em fetos com malformações congênitas?”. A revisão foi realizada em seis fases: (1) definição da pergunta norteadora; (2) busca nas bases de dados e estabelecimento dos critérios de inclusão e exclusão; (3) coleta dos dados de cada artigo selecionado; (4) análise crítica; (5) discussão dos resultados; (6) apresentação da revisão¹⁰.

O levantamento bibliográfico foi realizado no primeiro semestre de 2020 e como fonte de material para a elaboração do artigo, foram utilizadas as bases de dados SciELO, PubMed, BVS, Cambridge Core e IEEE Xplore. As palavras-chave iniciais foram pesquisadas em português e inglês: “feto”, “cirurgia”; “robótica” e o conector “E” foi usado nas associações. Neste momento, apareceram na BVS 33 artigos diferentes relacionados ao tema e no PubMed 34 resultados, sendo que a busca foi datada de 2000 até 2020.

Posteriormente foram pesquisados em português e inglês os seguintes descritores: “cirurgia fetal”, “robótica” e “robô”, também com o conector “E”, sendo assim, disponibilizado pela base de dado BVS 15 resultados, pelo PubMed 325, pelo IEEE Xplore 10 e pelo Cambridge Core 659, dentre os quais foram selecionados aqueles que melhor atendiam a pergunta norteadora a partir da leitura na íntegra.

Em uma segunda parte, pesquisou-se, na base de dados SciELO artigos dos últimos cinco anos relacionados apenas com a cirurgia fetal a fim de esclarecer melhor o assunto, usando o descritor “cirurgia fetal” nos dois idiomas, como nas pesquisas

anteriores, obtendo 300 artigos.

Os critérios de inclusão definidos para a seleção dos artigos foram: artigos publicados em português, inglês e francês que relacionam a cirurgia fetal e cirurgia robótica, artigos na íntegra que retratassem a temática referente à revisão integrativa e artigos publicados e indexados nos referidos bancos de dados nos últimos vinte anos. Já os critérios de exclusão foram os estudos que não respondiam à questão norteadora, dissertações e teses.

Primeiramente, 33 artigos foram selecionados e após a leitura completa e a análise crítica dos respectivos estudos, foram selecionados 20, que respondiam à pergunta norteadora, para compor a amostra da revisão integrativa.

3. RESULTADOS

A amostra deste estudo foi constituída após a aplicação dos princípios de inclusão e exclusão. Na tabela 1 estão as características de cada artigo.

Dentre os 20 artigos selecionados, dez são da base de dados PubMed (50%), sete da IEEE Xplore (35%), dois da BVS (10%) e um da Cambridge core (5%). Já os países de origem e o ano de publicação podem ser observados nas figuras 1 e 2 respectivamente.

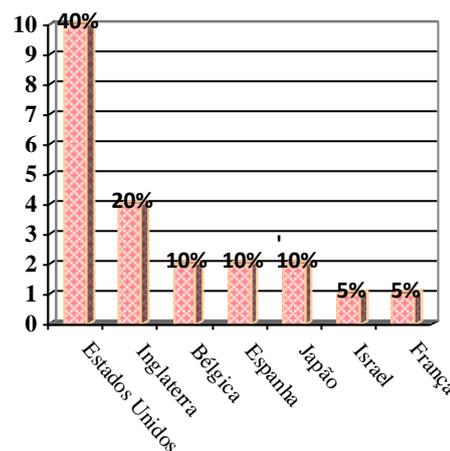


Figura 1. Países de origem dos artigos selecionados

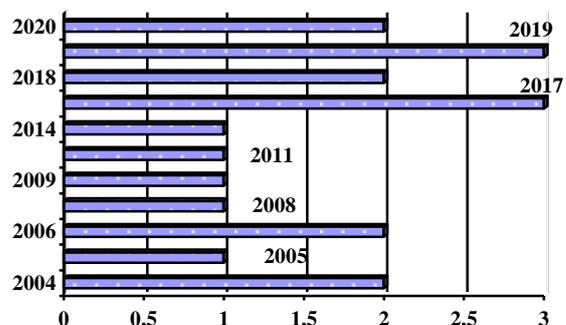


Figura 2. Ano de publicação dos artigos escolhidos.

Tabela 1. Identificação dos 20 artigos incluídos na amostra.

Autor/Ano	Título	Base de dados	Tipos de estudo	Objetivos	Resultado/ Conclusão
Iyengar, Keshav, Dwyer, George, Stoyanov, Danail, 2020	Investigating exploration for deep reinforcement learning of concentric tube robot control	PubMed	Experimental usando simulação.	Investigar diferentes tipos de ruído para aprendizado para controle de robôs de tubos concêntricos em cirurgias.	Foi demonstrado um controle, sem modelo, viável e eficaz para robô de tubo concêntrico para intervenções fetais e outras intervenções CMI.
Ahmad, Mirza, et al., 2020	Deep learning-based monocular placental pose estimation: towards collaborative robotics in fetoscopy	BVS	Experimental usando simulação.	Propor uma abordagem robótica “mínima” para STFF ao em vez de uma solução robótica maciça e cara.	Estabeleceu-se um alinhamento aprimorado e viável em comparação com a operação manual, em para aplicações fetoscópicas.
Sayols, Narcís, et al., 2019	Vision Based Robot Assistance in STFF Fetal Surgery	BVS	Tecnológica com desenvolvimento e avaliação de um sistema robótico teleoperado usando simulação.	Sistema robótico teleoperado para auxiliar cirurgiões na localização, coagulação e revisão das anastomoses.	O algoritmo proposto pode ser usado como estabilização de imagem e localização precisa de interesse durante cirurgias fetoscópicas.
Dewan, Michael, Wellons, John, 2019	Fetal surgery for spina bifida	PubMed	Descritiva, revisão bibliográfica.	Revisar resultados clínicos e qualidade de vida em amostras de fetos e pós-termos incluídos no estudo MOMS.	A área de cirurgia fetal não deve deixar de pesquisar sobre reparo de mielomeningocele fetal (fMMr) por melhor que já sejam os resultados.
Dwyer, George, et al., 2019	Robotic Control of a Multi-Modal Rigid Endoscope Combining Optical Imaging with All-Optical Ultrasound	IEEE Xplore	Tecnológica desenvolvimento e avaliação de um novo endoscópio através de um modelo de simulação usando placenta fantasma.	Apresentar o projeto, controle e operação de um endoscópio robótico multimodal.	A integração entre os sensores de imagem e o manipulador de robôs serão utilizados para restringir o robô à cena cirúrgica e para introduzir trajetórias de digitalização adaptáveis.
Grujthuijsen, Caspar, et al., 2018	Haptic Guidance based on All-Optical Ultrasound Distance Sensing for Safer Minimally Invasive Fetal Surgery	PubMed	Estudo tecnológico para desenvolver nova tecnologia de sensoriamento à distância, para estimar a superfície da placenta.	Propor o uso de orientações hápticas para aumentar a segurança da CMI e simplificar o manuseio do instrumento.	Resultados preliminares mostram que situações perigosas podem ser combatidas e habilidades processuais podem ser aprimoradas para usuários iniciantes.
Elangovan, H., Yao, W., Nicolaides, K., 2018	A Multimodality Navigation System for Endoscopic Fetal Surgery: A Phantom Case Study for Congenital Diaphragmatic Hernia	PubMed	Descritivo, estudo de caso.	Introduzir um sistema que suporta equipamentos de rastreamento, robótica e feedback visual em tempo real para CMI.	Os resultados sugerem que os sujeitos demonstraram um aumento na precisão de alcance médio e uma redução geral no tempo gasto.
Dwyer, George, et al., 2017	A Continuum Robot and Control Interface for Surgical Assist in Fetoscopic Interventions	IEEE Xplore	Pesquisa tecnológica avaliando o uso de um novo sistema mecatrônico através de placentas humanas imersas em água.	Relatar um projeto mecatrônico para um instrumento comanipulado para o tratamento da STFF.	Resultados mostram que o sistema dos pesquisadores é promissor e pode ser desenvolvido ainda para múltiplas necessidades clínicas em procedimentos fetoscópicos.
Sem, Sudipta, et al., 2017	Fetal Surgery and Robotic Surgery	Cambridge core	Descritivo, revisão bibliográfica.	Revisar na literatura sobre a cirurgia fetal e seus avanços.	Atualmente esforços estão sendo feitos para melhorar cirurgia fetal, como o desenvolvendo procedimentos CMI.
Javaux, Allan, et al., 2017	Body Wall Force Sensor for Simulated Minimally Invasive Surgery: Application to Fetal	IEEE Xplore	Pesquisa tecnológica que registra a apresentação e validação	Investigar como o estresse exercido na parede do corpo pelo instrumento	Resultados sugerem que o uso de instrumentos flexíveis em vez de rígidos, podem ter um impacto significativo no

	Surgery		experimental de um inovador sensor de força da parede corporal.	cirúrgico pode ser reduzido para melhorar o resultado.	tensões que ocorrem na parede do corpo.
Joyeuxa, L., et al., 2014	La chirurgie maternofoetale du spina bifida : perspectives d'avenir	PubMed	Descritiva, revisão bibliográfica.	Atualização sobre cirurgia aberta materna para mielomeningocele, revisar suas indicações pré-natais e avaliação da viabilidade desta cirurgia na França.	Com os recentes desenvolvimentos em endoscopia minimamente invasiva, robótica e bioengenharia, o tratamento mielomeningocele poderia reduzir os riscos associados à cirurgia fetal aberta.
Bo, Zhang, et al., 2011	Development of 6-DOF wire-driven robotic manipulator for minimally invasive fetal surgery	IEEE Xplore	Tecnológica apresentando e validando o uso de um manipulador robótico.	Desenvolver um manipulador barato, simples e fino para uma inserção mais fácil e rápida do balão em casos de HDC.	Em trabalhos posteriores, a precisão do controle de flexão deve ser melhorada e o sistema de cirurgia fetal será ser desenvolvido e avaliado através de experiências in vivo.
Bo, Zhang, et al., 2009	Robotic patch-stabilizer using wire driven mechanism for minimally invasive fetal surgery	IEEE Xplore	Pesquisa tecnológica	Propor um novo sistema robótico para cirurgia fetal com estabilizador de adesivo e manipulador a laser.	Como resultado, a tensão dos fios acionados foi controlada abaixo de 0,3 N, o adesivo de colágeno pode ser estabilizado na lesão superfície sem os danos dos tecidos fetais.
Liao, Hongen, et al., 2008	Fetus-supporting flexible manipulator with balloon-type stabilizer for endoscopic intrauterine surgery	PubMed	Pesquisa tecnológica	Propor um robô de suporte ao feto, para evitar que ele flutue na operação.	Apesar de melhorias serem necessárias, o manipulador tem potencial de ser utilizado em CMI, como na fetal.
Berris, M, Shoham, M, 2006	Febotics – a marriage of fetal surgery and robotics	PubMed	Descritivo, revisão bibliográfica.	Destacar as práticas recentes na intervenção pré-natal e várias iniciativas para integrar a robótica na cirurgia fetal.	Um micro-robô possui o potencial de eliminar ou resolver complicações relacionadas à intervenções cirúrgicas e, assim, avançar ainda mais o cuidado fetal.
Harada, Kanako, et al., 2006	Bending Laser Manipulator for Intrauterine Surgery	IEEE Xplore	Pesquisa tecnológica	Propor um manipulador de laser de flexão para realizar a cirurgia com alta destreza.	Embora o manipulador tenha alguns problemas técnicos, o resultado coloca a cirurgia robótica intrauterina em realidade possível.
Harada, Kanako Tsubouchi, Kota, Masakatsu, Fujie, 2005	Micro Manipulators for Intrauterine Fetal Surgery in an Open MRI	IEEE Xplore	Pesquisa tecnológica	Propor um novo sistema robótico para cirurgia fetal intrauterina em ressonância magnética aberta.	Apesar de o manipulador precisar de ajustes, o movimento suave e alta rigidez torna possível a CMI fetal.
Kant, Adrien, Klein, Michael, Langenburg, Scott, 2004	Robotics in pediatric surgery: perspectives for imaging	PubMed	Descritivo, revisão bibliográfica.	Revisar a história e os antecedentes da robótica em cirurgia, discutir benefícios e usos atuais.	Robôs poderão ser capazes de certas funções cirúrgicas quase independentemente e os pacientes menores poderão algum dia ter maiores benefícios.
Knight, Colin, et al., 2004	Robot-Enhanced Fetoscopic Surgery	PubMed	Experimental individual.	Explorar usando uma plataforma de cirurgia robótica em modelo animal fetal.	Problemas com o útero da ovelha e o posicionamento fetal sugerem que trabalhar em um modelo de primatas pode ser o próximo passo na cirurgia robótica fetal.
Aaronsona, Oran, et al., 2002	Robot-Assisted Endoscopic Intrauterine Myelomeningocele Repair: A Feasibility Study	PubMed	Experimental individual.	Examinar a viabilidade técnica de um endoscópico assistido por robô em animal com mielomeningocele	Instrumentos "em forma de punho" do aparelho da Vinci e a ótica 3D tornam viável executar operações com a precisão que só se poderia esperar obter através de cirurgia aberta no passado.

Tabela 1. Apresentação dos artigos utilizados na revisão integrativa em relação ao autor e ano, título, bases de dados, tipo de estudo e resultados/conclusão.

4. DISCUSSÃO

Segundo Sem *et al.* (2017)¹¹ a prática com robôs na cirurgia fetal é limitada, no entanto, a vontade e as experiências robóticas dos cirurgiões nessa área vêm aumentando de forma acentuada devido aos avanços na tecnologia robótica¹¹. Dos 20 estudos selecionados, 50% são pesquisas tecnológicas, 20% são experimentais e 30% são revisões bibliográficas.

I – Novos instrumentos robóticos para melhorar os resultados da cirurgia fetal

Robôs de tubo concêntrico são adequados para CMIs, como a cirurgia fetal, devido ao seu pequeno diâmetro, porém têm grandes desafios em alcançar o confiável controle por causa do erro de modelagem da cinemática. Sendo assim, Iyengar e colaboradores (2020)¹², analisaram quatro tipos em relação aos ruídos: (1) Henceforth, (2) Gaussiano com um único desvio padrão, (3) Gaussiano com vários padrões desvios e (4) Ornstein-Uhlenbeck. Concluíram que apesar do tipo 2 ter melhor desempenho em relação à taxa de sucesso, os tipos 3 e 4 têm a menor taxa de erro. Logo, propuseram um novo método cinemático inverso, sendo um robô de três tubos com ruído tipo 4, que pode ajudar no planejamento futuro do caminho robótico e teleoperação para intervenções fetais.

O tratamento mais efetivo para a STFF é a ablação fetoscópica eletiva de anastomoses placentárias a laser, todavia, em casos mais complicados da doença, a instrumentação e o método atual enfrentam desafios. Por isso, Ahmad *et al.* (2020)¹³, propuseram uma nova abordagem para aplicações fetoscópicas, nas quais uma ponta dobrável distal é controlada autonomamente através de uma rede neural convolucional que estima a orientação da superfície placentária. Realizaram experiências da rede com dados gerados em um ambiente simulado com um modelo fantasma de sílica e com um conjunto de banco dados in vivo e observaram que os resultados com o controlador autônomo foram superiores aos do controle manual e que o instrumento funcionou adequadamente dentro das faixas de desempenho desejados. Além disso, a obtenção de dados e a baixa qualidade das imagens no instrumento podem gerar obstáculos para o controle em tempo real, porém, de acordo com os autores isso pode ser resolvido.

Com o intuito de auxiliar os cirurgiões durante a cirurgia fetoscópica de fotocoagulação a laser (para tratar a STFF) na localização, coagulação e revisão da anastomose placentária, Sayols *et al.* (2019)¹⁴ apresentaram um sistema robótico teleoperado. Foi utilizado um algoritmo que possibilita lidar com a baixa qualidade das imagens, ruidosas e borradas, obtidas pelo fetoscópio e cenários reais e sua técnica de rastreamento foi testada a partir de vídeos reais de cirurgia de fotocoagulação. A cada duas imagens sequenciais em tempo real dos vasos placentários visíveis, o braço robótico de 6 graus de liberdade que segura o fetoscópio permite a translação, rotação do eixo da câmera e dimensionamento. A inclusão da

estabilização de imagem aumenta a precisão da fotocoagulação das anastomoses, enquanto a localização fina ajuda os cirurgiões a fazer uma navegação correta, reduzindo o tempo da cirurgia. Nas próximas pesquisas o completo sistema de teleoperação será testado em um cenário cirúrgico real pelos cirurgiões envolvidos no projeto.

O campo de visão da cirurgia fetoscópica pode muitas vezes ser restrito devido ao ambiente dinâmico e aos endoscópios com baixo diâmetro. Desse modo, um endoscópio robótico multimodal com imagem de ultrassom totalmente óptico e luz óptica branca integrada foi introduzido por Dwyer, G., *et al.* (2019)¹⁵. O dispositivo é manipulado por um braço robótico de 7 graus de liberdade através de um software para um centro remoto de movimento e uma placenta de cera em gel é usada para demonstrar sua atuação. Os pesquisadores mostraram o resultado das imagens 3D do ultrassom manipulado roboticamente, as quais eles acreditam ser as maiores digitalizações apresentadas na literatura e concluíram que os vasos da placenta podem ser nitidamente identificados. Porém, o aparelho necessita parar o movimento para sincronizar os dados do ultrassom com a posição do degrau, o que aumenta o tempo de cirurgia. Trabalhos futuros focarão na diminuição do endoscópio e no fornecimento de luz a laser, além de integrar o robô e os sensores de imagem para obter velocidades mais rápidas.

Para aumentar a segurança e facilitar o uso dos instrumentos no tratamento a laser de distúrbios placentários um sistema controlado simultaneamente por um dispositivo robótico e um operador humano foi proposto e analisado em um ambiente experimental fantasma por Gruijthuisen *et al.* (2018)¹⁶. Segundo os autores o sistema composto por um sensoramento à distância, um algoritmo de estimativa de placenta e uma abordagem de orientação háptica, melhorou o desempenho na terapia com laser da STFF e reduziu o tempo da tarefa em 1/3 e os erros de distância entre a ponta do instrumento e a placenta em 2/3. Além disso fornece orientação em tempo real, o que é importante para procedimentos fetais. Porém, houveram problemas com a confiabilidade do sensor de distância sob grandes ângulos, fazendo com que mantivessem o ângulo perpendicular à placenta, o que na prática clínica não é possível. Portanto, pesquisas futuras focarão em melhorar a faixa de angulação permitida.

Um esquema constituído por rastreamento óptico e imagem ultrassonográfica em um novo software de navegação multimodal foi apresentado por Elangovan e colaboradores (2019)¹⁷, para ajudar no pré-planejamento cirúrgico e na definição e orientação de metas em tempo real. Foi realizada uma simulação, com e sem orientação do sistema de rastreamento, de um procedimento fetal simples para tratar HDC, a partir da inserção de um fetoscópio na traqueia do simulador fetal e inflação de um balão. Em comparação com os dois procedimentos, o sistema de navegação proposto resultou em traços mais finos e uma taxa menor de erros devido à redução de movimentos

oscilantes do instrumento cirúrgico. Desse modo, o sistema proposto poderia ajudar a aumentar a precisão e a confiança dos cirurgiões, além de reduzir o tempo necessário para o procedimento.

Os dispositivos usados para o tratamento da STFF com laser possuem articulações limitadas e uma área pequena para a visualização dos vasos placentários importantes. Assim, Dwyer, G., *et al.* (2017)⁹, desenvolveram um robô de tubo concêntrico, com uma câmera na ponta distal, que melhora a agilidade do fetoscópio, viabilizando graus de liberdade na ponta e o aprimoramento da ergonomia do sistema por um braço com restrição de centro remoto de movimento. Para o experimento foi utilizada uma placenta humana após o parto cesáreo e evidenciou-se que o robô de pequeno diâmetro (2,4 mm), que tem como objetivo minimizar lesões de acesso, proporciona uma visão estável da placenta com orientação constante, o que facilitará a assistência cirúrgica na entrega do laser de fotocoagulação para o tratamento de STFF. O robô ainda não possui integração de um laser terapêutico e uma fonte de luz na ponta, além de um sistema de controle para comanipulação, dessa forma, pesquisas futuras focarão em planejá-los.

Com o objetivo de medir a interação de forças entre o instrumento cirúrgico e a parede do corpo durante intervenções simuladas de CMI um novo sensor de força com 6 graus de liberdade foi projetado por Javaux *et al.* (2017)¹⁸. Para legitimar o potencial do dispositivo um estudo de cirurgia fetal (STFF) simulada em tecido sintético foi realizado por três cirurgiões com um endoscópio rígido tradicional sem assistência robótica e um endoscópio flexível pela assistência robótica com suporte háptico. A tecnologia usada gerou diminuição importante das forças, porém, apesar da precisão aceitável houve uma diferença na qualidade da medição da força em função da direção. Seria relevante repetir os experimentos em um tecido biológico, o que aumentaria o realismo do experimento.

Zhang *et al.* (2011)⁷ desenvolveram um manipulador robótico para inserir um balão de silicone destacável na traqueia fetal para o tratamento de HDC de forma minimamente invasiva, além de avaliar quantitativamente a fragilidade do tecido fetal, com o intuito de melhorar o robô para operações mais complexas. O tecido fetal é tão frágil que a ponta do manipulador robótico de 6 graus de liberdade deve ser controlada pela força de contato para não danificá-lo ao passar pela parede abdominal, faringe e tecido da laringe até a traqueia. Como resultado, a força de contato na ponta do manipulador robótico foi controlada para ser inferior a 0,3 N, logo, ele pode ser manuseado sobre o tecido fetal sem danificá-lo. Em futuros trabalhos o sistema desenvolvido será avaliado através de experiências in vivo.

Tendo como propósito um procedimento muito menos invasivo para anexar um adesivo de colágeno na pele fetal com espinha bifida foi desenvolvido por Zhang *et al.* (2009)¹⁹ um novo sistema robótico cirúrgico com estabilizador de adesivo e manipulador a

laser. A força estabilizadora foi analisada em um modelo fetal sob a água, semelhante ao ambiente intrauterino pelo controle de tensão dos fios acionados. Concluiu-se que a tensão era controlada abaixo de 0,3 N e o adesivo de colágeno poderia ser estabilizado na superfície da lesão sem os danos dos tecidos fetais e a influência do líquido do âmnion. O experimento em fetos humanos será desenvolvido em próximas pesquisas.

Liao *et al.* (2008)²⁰ propõem um novo manipulador cirúrgico para o tratamento de mielomeningocele para estabilizar o feto e impedi-lo de flutuar durante a cirurgia. O protótipo, de mecanismos flexíveis de articulação e flexão e um estabilizador de balão macio, permite alcançar alvos dentro do útero por uma pequena incisão. Na avaliação da precisão o erro máximo de flexão foi tão pequeno quanto 7 mm. Usando um modelo fetal, o manipulador pode ser bem controlado com a ajuda de ultrassom e seu mecanismo de flexão com o estabilizador de balão pode ser bem visualizado enquanto estabiliza o modelo. O manipulador tem o potencial de ser usado em CMI intrauterinas, embora outras melhorias e experimentos ainda precisam ser realizados.

Em casos placenta anterior, para não haver lesões, a parede abdominal materna é amplamente aberta para um acesso pela parede uterina posterior. Durante a cirurgia fetoscópica, muito realizada para tratar a STFF, o útero é exposto e girado. Para evitar isso Harada *et al.* (2006)²¹ apresentaram um manipulador a laser dobrável de 2.4 mm. A abertura no útero não precisa ser suturada quando o diâmetro externo do instrumento usado é menor que 3 mm, pois a força de contração do próprio órgão a fecha sem ajuda, caso seja maior, dor acentuada na mãe e vazamento de líquido amniótico podem ocorrer. Logo, tem como vantagem o diâmetro pequeno, porém como desvantagem o controle de posicionamento, influenciado pelo material inserido no manipulador. O resultado torna a cirurgia robótica intrauterina uma realidade possível e este manipulador será utilizado não só na terapia STFF, mas a outros tipos de cirurgia fetal.

Harada e colaboradores (2005)²² apresentaram um novo sistema robótico para cirurgia fetal intrauterina em uma ressonância magnética de campo aberto com alvo no tratamento da mielomeningocele. Com o objetivo de realizar uma CMI, ao invés das paredes abdominal e uterina serem amplamente abertas, ferramentas cirúrgicas seriam inseridas em pequenos orifícios nas duas. O micro manipulador tem diâmetro pequeno (2,4 mm), é capaz de dobrar 90° em qualquer direção, tem facilidade de fabricação, alta rigidez e aplicabilidade para procedimentos cirúrgicos. O recurso do protótipo demonstrou a viabilidade da cirurgia fetal intrauterina robótica apesar de não ser compatível com ressonância magnética.

Em comparação com a cirurgia fetal aberta, a cirurgia fetoscópica traz menos morbidades maternas. A cirurgia endoscópica é facilitada pela robótica por meio da filtragem de tremores, ergonomia aprimorada,

escala de movimento, movimento indexado e articulação. Knight *et al.* (2004)²³ analisaram técnicas fetoscópicas, com insuflação de líquido ou gás, em ovelhas prenhas usando o sistema de cirurgia robótica Zeus. Com o útero exteriorizado, o movimento era imprevisível e o fluido vazava. Já no totalmente percutâneo, turvação do campo visual e dificuldade de imobilizar o feto foram desafiadores. Conclui-se que o óxido nitroso é mais eficaz e vantagens da cirurgia robótica podem ser aplicáveis, mas trabalhos em modelos primatas são requeridos, pois nesse ambiente, pode ser mais fácil apreciar os benefícios da cirurgia robótica.

Muitos déficits dos endoscópios tradicionais foram superados com as evoluções tecnológicas que incluíram o auxílio de robôs nesses dispositivos, como o sistema robótico cirúrgico “da Vinci”. Os movimentos dos cirurgiões durante a cirurgia são traduzidos em um computador, com o intuito de excluir os tremores e aumentar a precisão e depois transferidos para os dispositivos manipulados roboticamente. Além do aparelho da Vinci apresentar câmeras duplas que possibilitam uma visão 3D do campo cirúrgico, ele simula movimentos da mão humana, como os de pulso. Aaronson *et al.* (2002)²⁴ revisitaram o significado de reparo intrauterino endoscópico com a inclusão desses dispositivos.

Portanto, evidencia-se que o pequeno diâmetro dos robôs como os de tubo concêntrico, juntamente com suas habilidades articulares, são de grande valor para a cirurgia fetal, uma vez que possibilitam uma abordagem minimamente invasiva evitando complicações comuns provenientes das cirurgias abertas. Além disso, os recursos de imagem e a possibilidade de um procedimento conectado em tempo real com softwares contribuem para uma maior precisão da técnica. Os modelos robóticos propostos acima para a realização das cirurgias fetais ainda necessitam de algumas melhorias e de experimentos in vivo que suas eficácias sejam comprovadas.

II - Avaliação dos resultados da robótica na cirurgia fetal por revisão bibliográfica

Segundo Dewan e colaborador (2019)²⁵ neurocirurgiões pediátricos devem sempre analisar de forma criteriosa as modificações no procedimento original para o tratamento de espinha bífida com o objetivo de definir e disseminar as melhores práticas. Ademais, os autores tem como objetivo para o paciente que recebe um diagnóstico pré-natal de espinha bífida eliminar a hidrocefalia, normalizar a função neurológica, o parto a termo para a criança e a capacidade da mãe voltar a um risco normal de gravidez subsequente.

De acordo com Sem *et al.* (2017)¹¹ dois tipos de aparelhos robóticos para procedimentos cirúrgicos são usados: (1) Zeus e (2) da Vinci, porém nenhum dos dois opera sem o controle do cirurgião. Com a familiarização do segundo sistema pelos cirurgiões e enfermeiros, o tempo gasto com a preparação e a

duração da operação diminuam. Entretanto, apresentam alto custo, os cirurgiões e sua equipe precisam de um treinamento para aprender a manuseá-los e há um aumento no tempo de instalação e encaixe do sistema. Além disso, mães de fetos que passaram por cirurgia futuramente, caso tenham mais filhos terão que realizar cesárea. Com o desenvolvimento de novas tecnologias e técnicas mais evoluídas a morbidade materna e o risco geral provavelmente diminuirão.

Segundo Joyeux *et al.* (2014)²⁶ o risco materno relacionado à aplicação de anestésico e ao procedimento de duas cesáreas seria minimizado por uma cirurgia minimamente invasiva por via endoscópica, robótica ou percutânea. O útero seria protegido, diminuindo a ocorrência de complicações graves como a ruptura uterina e possibilitaria o parto natural às mães. Entretanto, aumentaria o risco de prematuridade para o feto.

Muitas vantagens técnicas na cirurgia fetal podem ser proporcionadas pela robótica. Segundo Berris e colaboradora (2006)⁸ ela ajuda no manejo das estruturas fetais delicadas, aumentando o campo cirúrgico simultaneamente, filtrando o tremor das mãos, ampliando as forças sutis e adicionando um feedback háptico nos dispositivos endoscópicos. Uma alternativa mais benigna à cirurgia fetoscópica pode ser obtida através do auxílio de um micro robô. O dispositivo poderia ser guiado de forma remota pelo cirurgião para visualizar diferentes porções do feto, além de poder ser dotado de recursos de intervenção e imagem tendo como objetivo melhorar o desempenho da terapia fetal usando técnicas menos invasivas. Porém, a consideração preeminente para qualquer projeto de robô fetal será garantir a segurança materna e fetal.

Para Kant e colaboradores (2004)²⁷ a capacidade de executar uma microcirurgia essencialmente sem tremores em estruturas pequenas com precisão delicada poderá ser possível com a ajuda da cirurgia robótica, além de ela poder permitir operações nunca antes possíveis em crianças, neonatos e fetos. A cirurgia fetal é um exemplo de campo que pode ser bem favorecido pela possibilidade de operar de forma exclusiva por ultrassom ou ressonância magnética, além das oportunidades criadas por unidades robóticas autônomas. Acredita-se que um dia a robótica possibilitará realizar a cirurgia por métodos menos invasivos possíveis e operar em áreas cada vez menores, incluindo várias inacessíveis com as tecnologias atuais.

Vale ressaltar que a robótica permite uma operação menos invasiva tanto para o feto quanto para mãe, o que contribui para incisões menores, diminuição dos tremores e ampliação do campo de visão cirúrgico, o que minimiza complicações durante e após a cirurgia. Para isso, é importante que os cirurgiões estejam sempre cientes das novas e melhores técnicas para abordar cada anomalia congênita intrauterina para o melhor resultado e bem-estar materno-fetal. Ademais, verifica-se que os aparelhos robóticos Zeus e Da Vinci

contribuem para a diminuição do tempo cirúrgico após os profissionais estarem familiarizados com a sua utilização. Logo, a introdução dos aparelhos robóticos poderá acrescentar inúmeros benefícios para a cirurgia fetal.

5. CONCLUSÃO

Conclui-se que a cirurgia fetal é de extrema importância para o tratamento de anomalias congênitas capazes de levar o feto à morte ou a deficiências permanentes. Desse modo, como é uma cirurgia muito delicada, uma boa visão do campo cirúrgico e uma precisão de movimento são imprescindíveis. Tais fatores são aprimorados pela robótica.

A introdução de robôs na cirurgia fetal permite uma abordagem minimamente invasiva, capaz de evitar o parto prematuro, por exemplo, mais comum em cirurgias abertas, como a laparotomia materna seguida de histerotomia. Além de que os aparelhos robóticos juntamente com o auxílio de softwares contam com a diminuição dos tremores fisiológicos dos cirurgiões, análise de imagens e redirecionamento do aparelho em tempo real, o que é fundamental, uma vez que o ambiente uterino é muito dinâmico.

Em vista disso, os robôs mencionados nessa revisão são avanços expressivos nessa área cirúrgica devido aos resultados significativos que trazem consigo. Entretanto, ainda são necessários experimentos em fetos humanos durante a gestação para comprovar tais benefícios para o procedimento cirúrgico.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Rocha LSN, *et al.* Cirurgia fetal no contexto atual. *Revista de Medicina*. 2018; 97(2): 216-225.
- [2] Deka D, *et al.* The art of fetoscopy: a step toward minimally invasive fetal therapy. *J Obstet Gynaecol India*. 2012; 62(6):655-659.
- [3] Lee H, Hirschl RB. Innovations in Fetal and Neonatal Surgery, An Issue of Clinics in Perinatology-E-Book. Elsevier Health Sciences. 2012; 39(2): 269.
- [4] Harrison MR. The University of California at San Francisco Fetal Treatment Center: a personal perspective. *Fetal diagnosis and therapy*. 2004; 19(6):513-524.
- [5] Baumgarten H, Flake AW. Fetal surgery. *Pediatric Clinics*. 2019; 66(2): 295-308.
- [6] Partridge EA, Flake AW. Maternal-fetal surgery for structural malformations. *Best Practice & Research: Clinical Obstetrics & Gynaecology*. 2012;26(5):669–82.
- [7] Zhang B, *et al.* Development of 6-DOF wire-driven robotic manipulator for minimally invasive fetal surgery. In: 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE. 2011; 2892-2897.
- [8] Berris M, Shoham M. Febotics—a marriage of fetal surgery and robotics. *Computer Aided Surgery*. 2006; 11(4): 175-180.
- [9] Dwyer G, *et al.* A continuum robot and control interface for surgical assist in fetoscopic interventions. *IEEE robotics and automation letters*. 2017; 2(3)1656-1663.
- [10] Souza MT, Silva MD, Carvalho R. Revisão integrativa: o que é e como fazer. *Einstein (São Paulo)*. 2010; 8(1):102-106.
- [11] Sem S, *et al.* Fetal Surgery and Robotic Surgery. In A. Kaye & R. Urman (Eds.), *Perioperative Management in Robotic Surgery*. Cambridge: Cambridge University Press. 2017; 200-209.
- [12] Iyengar K, Dwyer G, Stoyanov D. Investigating exploration for deep reinforcement learning of concentric tube robot control. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2020.
- [13] Ahmad MA, *et al.* Deep learning-based monocular placental pose estimation: towards collaborative robotics in fetoscopy. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2020; 1-11.
- [14] Sayols N, *et al.* Vision based robot assistance in STFF fetal surgery. In: 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). 2019; 5855-5861.
- [15] Dwyer G, *et al.* Robotic Control of a Multi-Modal Rigid Endoscope Combining Optical Imaging with All-Optical Ultrasound. In: 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2019; 3882-3888.
- [16] Gruijthuisen C, *et al.* Haptic guidance based on all-optical ultrasound distance sensing for safer minimally invasive fetal surgery. *Journal of medical robotics research*. 2018; 3: 1841001.
- [17] Elangovan H, Yao W, Nicolaidis K. A multimodality navigation system for endoscopic fetal surgery: a phantom case study for congenital diaphragmatic hernia. *Surgical innovation*. 2019; 26(1): 27-36.
- [18] Javaux A, *et al.* Body wall force sensor for simulated minimally invasive surgery: application to fetal surgery. In: 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2017; 145-152.
- [19] Zhang B, *et al.* Robotic patch-stabilizer using wire driven mechanism for minimally invasive fetal surgery. In: 2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 2009; 5076-5079.
- [20] Liao H, *et al.* Fetus-supporting flexible manipulator with balloon-type stabilizer for endoscopic intrauterine surgery. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*. 2008; 4(3) 214-223.
- [21] Harada K, *et al.* Bending laser manipulator for intrauterine surgery. In: The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics. 2006; 238-242.
- [22] Harada K, *et al.* Micro manipulators for intrauterine fetal surgery in an open MRI. In: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2005; 502-507.
- [23] Knight CG, *et al.* Robot-enhanced fetoscopic surgery. *Journal of pediatric surgery*. 2004; 39(10): 1463-1465.
- [24] Aaronson OS, *et al.* Robot-assisted endoscopic intrauterine myelomeningocele repair: a feasibility study. *Pediatric neurosurgery*. 2002; 36(2): 85-89.
- [25] Dewan MC, Wellons JC. Fetal surgery for spina bifida: JNSPG 75th Anniversary Invited Review Article. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*. 2019; 24(2): 105-114.
- [26] Joyeux L, *et al.* La chirurgie maternofetale du spina bifida: perspectives d'avenir. *Journal de gynécologie obstétrique et biologie de la reproduction*. 2014; 43(6): 443-454.
- [27] Kant AJ, Klein MD, Langenburg SE. Robotics in pediatric surgery: perspectives for imaging. *Pediatric radiology*. 2004; 34(6):454-461.