

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

TECHNOLOGICAL SURVEY OF ROBOTS FOR OFFSHORE INTERNAL PIPE INSPECTION

AUTORES:

João Pedro Volpato Goulart, Esdras Salgado da Silva, Julio Cesar Frantz, Gustavo Valdatti Souza, Henrique Simas, Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Daniel Martins

INSTITUIÇÃO:

Laboratório de Robótica Aplicada, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina

TECHNOLOGICAL SURVEY OF ROBOTS FOR INTERNAL PIPE INSPECTION USING LEGGED LOCOMOTION

Resumo

Os dutos são essenciais para transportar fluidos com segurança sob condições marítimas extremas, especialmente os risers na indústria de petróleo, mas enfrentam desafios como alta salinidade, pressões variáveis e interações mecânicas adversas, tornando-os suscetíveis a falhas estruturais. A manutenção e inspeção são complicadas devido aos ambientes perigosos e operações manuais complexas em espaços confinados, tornando essenciais as tecnologias avançadas de inspeção para a detecção precoce de defeitos, prevenção de desastres ambientais e melhoria da eficiência das operações offshore. Robôs se destacam como soluções promissoras devido à sua capacidade de navegar em ambientes complexos e realizar inspeções precisas usando sensores. Contudo, ainda há necessidade de robôs que operem de maneira eficiente, segura e precisa em ambientes confinados. Este estudo mapeia tecnologias de dispositivos de locomoção com pernas para operações em dutos, identificando o estado da arte e avaliando características-chave. A metodologia inclui uma revisão detalhada da literatura acadêmica, levantamento de produtos comerciais e investigação de patentes, destacando a importância de inovações em design mecânico e propondo o desenvolvimento de robôs avançados para dutos, incluindo pequenos diâmetros. O estudo sintetiza avanços atuais e estabelece bases para pesquisas futuras, sugerindo que novas tecnologias podem melhorar significativamente a segurança e o desempenho dos sistemas robóticos em ambientes industriais.

Palavras-chave: robô, inspeção, dutos, riser.

Abstract

Pipelines are essential for safely transporting fluids under extreme maritime conditions, especially risers in the oil industry, but they face challenges such as high salinity, variable pressures, and adverse mechanical interactions, making them susceptible to structural failures. Maintenance and inspection are complicated due to hazardous environments and complex manual operations in confined spaces, making advanced inspection technologies crucial for early defect detection, preventing environmental disasters, and improving offshore operations efficiency. Robots stand out as promising solutions due to their ability to navigate complex environments and perform precise inspections using sensors. However, there is still a need for robots that operate efficiently, safely, and accurately in confined environments. This study maps the technologies of legged locomotion devices for pipeline operations, identifying the state of the art and evaluating key characteristics. The methodology includes a detailed review of academic literature, a survey of commercial products, and patent investigation, highlighting the importance of innovations in mechanical design and proposing the development of advanced robots for pipelines, including small diameters. The study synthesizes current advances and lays the groundwork for future research, suggesting that new technologies can significantly enhance the safety and performance of robotic systems in industrial environments.

Keywords: robot, inspection, pipelines, riser.

Introdução

Os risers são componentes vitais no transporte seguro de fluidos entre unidades de produção e o leito oceânico, especialmente no setor offshore de petróleo e gás. Operando sob condições marítimas severas — caracterizadas por alta salinidade, correntes marítimas intensas, pressões variáveis e interações mecânicas adversas —, esses dutos enfrentam constantes desafios em termos de desgaste e integridade estrutural. A falha de um riser pode resultar em vazamentos catastróficos, com impactos ambientais devastadores e prejuízos econômicos consideráveis. Dada a crescente exploração de reservas de petróleo em águas profundas e ultraprofundas, garantir a integridade desses componentes torna-se ainda mais crítico, exigindo tecnologias avançadas de monitoramento e inspeção.

Historicamente, as inspeções de risers foram realizadas de forma manual por meio de técnicas de acesso por corda, como rapel, ou com o auxílio de mergulhadores profissionais. Esses métodos, além de envolverem riscos significativos à segurança dos trabalhadores, são frequentemente limitados pela acessibilidade dos dutos e pelas condições ambientais adversas (Lou *et al.*, 2019; Vagata, 2023). Além disso, os custos associados a essas operações tendem a ser elevados, especialmente quando executadas em águas mais profundas. Nesse contexto, a necessidade de tecnologias inovadoras para inspeção de risers, que proporcionem maior segurança, eficiência e precisão, tem se tornado uma prioridade crescente para a indústria offshore.

Nos últimos anos, robôs de inspeção surgiram como uma solução promissora para superar as limitações dos métodos tradicionais. Esses sistemas robóticos, equipados com sensores avançados, têm a capacidade de navegar por ambientes confinados e realizar inspeções detalhadas, detectando falhas estruturais com alta precisão e confiabilidade (Bogue, 2020). A utilização de robôs reduz não apenas os riscos à segurança, mas também os custos operacionais e o tempo necessário para concluir as inspeções, o que representa um avanço significativo para as operações offshore (Medeiros *et al.*, 2021).

Entretanto, o desenvolvimento de robôs para inspeção de risers ainda enfrenta desafios técnicos consideráveis, especialmente em ambientes altamente restritivos e de difícil acesso. Os risers flexíveis, por exemplo, estão sujeitos a uma variedade de fatores operacionais adversos, como corrosão, fadiga, abrasão e impactos com objetos flutuantes ou em suspensão (Drumond *et al.*, 2018). Métodos convencionais, como o uso de veículos operados remotamente (ROVs) e mergulhadores, continuam a ser empregados, mas apresentam limitações em termos de abrangência, custo e capacidade de operar em profundidades extremas (Medeiros *et al.*, 2021).

Neste cenário, a busca por robôs de inspeção com maior adaptabilidade, capacidade de locomoção em ambientes hostis e precisão operacional tem impulsionado pesquisas e inovações tecnológicas. Diferentes sistemas de locomoção têm sido desenvolvidos para esses robôs, como rodas, esteiras (caterpillar), robôs estilo cobra, pernas articuladas e mecanismos de compressão semelhantes ao tipo "pig" (Moghaddam e Hadi, 2005). Além disso, robôs híbridos, combinando duas ou mais tecnologias de locomoção, têm sido investigados para garantir maior eficiência em diferentes tipos de superfícies e diâmetros (Santos *et al.*, 2020). Cada tipo de locomoção oferece vantagens específicas para determinados ambientes e requisitos operacionais, tornando a escolha do sistema de propulsão uma variável crítica no design desses dispositivos.

Assim, o objetivo deste trabalho é mapear o estado da arte das tecnologias de locomoção robótica baseadas em pernas para inspeção de dutos offshore, com ênfase em risers. A pesquisa envolve uma análise detalhada da literatura científica, uma avaliação de dispositivos comerciais disponíveis no mercado e uma investigação de patentes, buscando identificar lacunas tecnológicas e oportunidades de inovação.

Metodologia

Nesta seção, descrevemos os procedimentos adotados para realizar o estado da arte, que envolve o mapeamento de artigos científicos, patentes e produtos comerciais. Para a busca de patentes, foi

essencial adotar uma metodologia específica, desenvolvida pelo Laboratório de Robótica da UFSC (Hoeltgebaum *et al.*, 2016; Frantz *et al.*, 2019).

Inicialmente, a busca abrangeu 332 patentes em bases de dados como Google Patents, Espacenet, INPI e Patent Scope. Após a análise dos documentos, restaram 21 patentes relevantes, com a exclusão de patentes relacionadas a outros tipos de robôs de inspeção, como *underwater vehicles*, que não se enquadram no escopo deste trabalho. As classificações internacionais IPC mais alinhadas ao escopo do projeto foram B25J5/00 e F16L55/34.

A pesquisa de produtos comerciais visou identificar e analisar soluções aplicáveis a robôs operando dentro de dutos. Esta etapa compreendeu:

1. **Definição dos critérios de seleção:** Foram estabelecidos critérios claros para a seleção dos produtos a serem analisados, garantindo a obtenção dos resultados desejados. Esses critérios incluíram o tipo de mobilidade, funcionalidade principal e capacidade de operação em tubos cilíndricos.
2. **Coleta de dados:** A coleta de dados foi realizada por meio de pesquisa online, utilizando motores de busca e visitando sites de empresas renomadas no setor de robótica e inspeção. Palavras-chave específicas, como *"robot for internal pipe inspection"*, foram utilizadas para identificar empresas relevantes no setor comercial.
3. **Análise dos dados:** Os dados foram organizados em uma tabela para comparação entre os produtos, considerando características técnicas e adequação a diferentes tipos de tubos e condições operacionais.

A busca preliminar na literatura acadêmica foi realizada por meio da análise de artigos vinculados às patentes selecionadas. Como é comum que artigos acadêmicos detalhem as descobertas reivindicadas nas patentes, muitas vezes esses artigos podem ser encontrados diretamente na página da patente.

Seguindo a mesma linha metodológica, plataformas de busca como *Google Scholar*, *Science Direct* e *ResearchGate* foram utilizadas para localizar artigos publicados pelos inventores das patentes previamente identificadas. Os artigos que atendiam aos critérios de busca estabelecidos foram selecionados, considerando:

- Tipo de mobilidade (rodas, esteiras, etc.)
- Funcionalidade principal (inspeção, manutenção, soldagem, etc.)
- Capacidade de operação em tubos cilíndricos

Posteriormente, as mesmas plataformas foram empregadas para a pesquisa de produtos similares, utilizando as palavras-chave mais recorrentes nos artigos previamente encontrados. Os dados obtidos são apresentados na seção de resultados.

Resultados e Discussão

Nesta seção, são apresentados os resultados das buscas de patentes, artigos e produtos comerciais, realizadas com o objetivo de mapear as tecnologias mais recentes e inovadoras aplicadas à inspeção de dutos. O Quadro 1 apresenta os principais resultados das patentes analisadas. O Quadro 2 apresenta os resultados obtidos com a pesquisa de produtos comerciais, e detalhes técnicos do produto, principalmente no quesito tipo de propulsão. O Quadro 3 apresenta os resultados obtidos com a pesquisa de literatura acadêmica, e detalhes técnicos do produto, principalmente no quesito tipo de propulsão.

Quadro 1. Resultados da busca de patentes

Patente nº	Ano	Tipo de Propulsão	Campo da invenção
JPH06278057A	1992	Mecanismo por patas	Ambientes com pluralidade de superfícies
PI9904364-5 A2	2001	Mecanismo por patas	Desobstrução e inspeção de dutos
US6427602	2002	Movimento por garras	Robô de inspeção
KR101273672B1	2013	Movimento por patas	Robô de transporte utilizado em tubulação
US09657884	2015	Movimento por patas	Relacionado a pipe crawler mais especificamente a tubulações de esgoto
ES2901649T3	2017	Movimento por patas	Inspeção e tratamentos superfícies industriais
CN116447431A	2023	Movimento por patas	Inspeção de dutos
US11781698B2	2023	Movimento pipe crawler	Sistema de inspeção de tubos

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Quadro 2. Resultados da busca por produtos comerciais

Fabricante	Tipo de Propulsão	Aplicação
Techgel (2024)	2 grupos de 3 rodas	Jateamento interno de tubos
Fapesp (2024)	3 esteiras	Inspeção in loco em alto-mar
Orion (2024)	Rodas e travamento para soldas	Melhorar resistência das soldas
AISUS (2024)	Inspeção interna (e externa) com rodas - grupo britânico	Inspeção interna e externa de tubos
Nexxis (2024)	2 grupos de 3 rodas	Soluções personalizadas de inspeção
Inspector-systems (2024)	8 rodas	Inspeção ultrassônica de tubos
Sewervue (2024)	4 esteiras	Inspeção multisensor de tubulações

Ournova (2024)	Rodas + esteiras	Inspeção de tubulações
Jettyrobot (2024)	6 esteiras	Inspeção de pipelines
Endocontrol (2024)	2 grupos de 3 pares de rodas	Controle e inspeção endoscópica
NDT Global (2024)	PIG com rodas de guia	Aplicações de inspeção de pipelines
IPR (2024)	3 esteiras	Inspeção robótica de tubulações

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Quadro 3. Resultados da busca na literatura acadêmica

Autores	Tipo de Propulsão	Aplicação
Horodince et al. (2002)	3 pares de rodas	Inspeção de dutos
Kwon et al. (2007)	3 esteiras	Inspeção de dutos
Qiao et al. (2013)	Inchworm	Inspeção de dutos
Okamoto et al. (1999)	PIG	Inspeção de dutos
Nagaya et al. (2012)	Força de adsorção	inspeção de dutos
Allen et al. (2020)	Movimentação por patas	Inspeção de dutos

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Conclusões

Com base na pesquisa realizada, foram identificadas 8 patentes, com a mais antiga datando de 1992 e a mais recente publicada em 2023, demonstrando uma evolução contínua desses dispositivos para diversas aplicações. Além disso, foram encontrados 12 produtos comerciais com variadas configurações e sistemas de propulsão, e 6 artigos científicos relevantes, evidenciando o potencial dessa área como um campo promissor para pesquisas futuras. Em geral, estudos sobre novas formas de propulsão e configurações distintas podem contribuir significativamente para o desenvolvimento de dispositivos mais eficientes e adaptáveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) - Brasil pelo financiamento. Projeto nº 0378/23.

Referências Bibliográficas

- ALLEN, J.; SKYE, R.-B.; HADI, F. Robotic Inspection Crawler for Small Diameter Complex Piping. South Dakota School of Mines and Technology. In: Proceedings of the ASME 2021 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2021.
- AISUS. **Internal inspection**. Disponível em: <https://www.aisus.co.uk/services/internal-inspection-2/>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- ATUSHI, K.; SHUGEN M. Mobility of an In-pipe Robot with Screw Drive Mechanism inside Curved Pipes. In: IEEE Int. Conference of Robotics and Biomimetics, 2010, pp. 1530-1535.
- BOGUE, R. Robots in the offshore oil and gas industries: a review of recent developments. **Industrial Robot: the international journal of robotics research and application** 47.1: 1-6. 2020.
- BUERUNAA, N. **Device for effecting locomotive movement in space having plurality of faces**. Depositante: Siemens Ag. JPH06278057A. Depósito: 27 nov. 1992. Concessão: 04 out. 1994.
- CAO, G. *et al.* **Multi-posture pipeline inspection quadruped robot based on air cylinders and pneumatic muscles**. Depositante: . CN116447431A. Depósito: 04 mai. 2023. Concessão: 18 jul 2023.
- CHANG, Y. C., *et al.* **Robot for Internal Inspection of Pipeline**. Depositante: Korea University of Technology and Education Industry-University Cooperation Foundation. KR101273672B1. Depósito: 10 nov. 2011. Concessão: 11 jun. 2013.
- DAVID, B. C. *et al.* **Sewer Pipe Crawler**. Depositante: The United States of America as Represented by the Secretary of the Air Force. US09657884. Depósito: 27 abr. 2015. Concessão: 23 mai. 2017.
- DRUMOND, G. P. *et al.* Pipelines, risers and umbilicals failures: A literature review. **Ocean Engineering** 148: 412-425. 2018.
- ENDOCONTROL. **Produtos**. Disponível em: <https://endocontrol.de/produkte.html>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- FEKRMANDI, H.; HILLARD, P.; RUTAN-BEDARD, S. **Modular robotic crawler with hybrid locomotion for inspection of small diameter pipe**. Depositante: South Dakota Board of Regents. US11781698B2. Depósito: 19 nov. 2020. Concessão: 10 out. 2023.
- FRANTZ J. C. *et al.* Design of an assistive technology device for children with cerebral palsy. Advances in Mechanism and Machine Science (IFTOMM WC 2019). Mechanisms and Machine Science, vol 73. Springer, Cham.
- HOELTGEBAUM, T., SIMONI, R., MARTINS, D. A kinematic approach to variable compression ratio engines. **Mech. Mach. Theory** 96(2), 308–322 (2016).
- HORODINCA, M.; DOROFTEI, I.; MIGNON, E.; PREUMONT, A. A Simple Architecture for In-Pipe Inspection Robots. Active Structures Laboratory, Université Libre de Bruxelles. In: IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2002.
- HOVIS, G. L., *et al.* **Pipe Crawler Apparatus**. Depositante: Westinghouse Savannah River Company, LLC. US6427602. Depósito: 02 jul. 2001. Concessão: 06 ago. 2002.
- INSPECTOR SYSTEMS. **Ultrasonic inspection robots**. Disponível em: <https://inspector-systems.com/pipe-crawler/ultrasonic-inspection-robots.html>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- INPIPE ROBOT. Disponível em: <https://www.inpiperobot.com/>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- JETTYROBOT. **Inspection of pipelines**. Disponível em: <https://www.jettyrobot.com/industry/inspection-of-pipelines>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- QIAO, J.; SHANG, J.; GOLDENBERG, A. Development of Inchworm In-Pipe Robot Based on Self-Locking Mechanism. IEEE/ASME **Transactions On Mechatronics**, Vol. 18, No. 2, April 2013.
- OKAMOTO, J. J. *et al.* Autonomous system for oil pipelines inspection. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, 1999.

- JONG-HOON K., GOKARNA S., SITHARAMA I. **FAMPER**: A Fully Autonomous Mobile Robot for Pipeline Exploration, IEEE, 2010, pp. 517-523.
- KOSUKE, N. *et al.* Wireless Piping Inspection Vehicle Using Magnetic Adsorption Force. IEEE/ASME **Transactions On Mechatronics**, VOL. 17, NO. 3, JUNE 2012.
- LOOSARARIAN, M. *et al.* **Robot de inspección**. Depositante: Gecko Robotics, Inc. ES2901649T3. Depósito: 22 dez. 2017. Concessão: 23 mar. 2022.
- LOU, J. *et al.* Field Implementation of Above Water Riser Robotic Inspection Tools - Reducing Safety Risk While Improving Efficiency and Effectiveness. In: Offshore Technology Conference. 2019.
- MEDEIROS, V. S. *et al.* Automatic tool with adaptive suspension system for high-quality inspection of underwater risers. **Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application**, 48(3), 442–453. 2021.
- MOGHADDAM, M. M.; HADI, A. Control and guidance of a pipe inspection-PIC. In: Proc. Int. Symp. Automations, Robotics, 2005, pp. 11-14.
- NDT Global. **Applications**. Disponível em: <https://www.ndt-global.com/applications/>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- NEUBAUER, W. A spider-like robot that climbs vertically in ducts or pipes. **IEEE Robotics and Automation**. 1993.
- NEXXIS. **Custom solutions**. Disponível em: <https://nexxis.com/custom-solutions/>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- ORION. **Melhorando a resistência das soldas com retificação**. Disponível em: <https://orionsic.com.br/melhorando-a-resistencia-das-soldas-com-retificacao/>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- OURONOVA. **Pipe inspection**. Disponível em: <https://ouronova.com/pipe-inspection/>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- QIAO, J.; JIANZHONG, S.; GOLDENBERG, A. Development of Inchworm In-Pipe Robot Based on Self-Locking Mechanism, **IEEE/ASME Transactions On Mechatronics**, Vol. 18, No. 2, April 2013 799, pp. 799-806.
- REIS, N. R. S. dos. **Veículo telecomandado para operações no interior de dutos**. Depositante: Petróleo Brasileiro S.A. PI 9904364-5 A2. Depósito: 28 nov. 1999. Concessão: 05 jun. 2001.
- REVISTA PESQUISA FAPESP. **Inspeção in loco em alto-mar**. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/inspecao-in-loco-em-alto-mar/>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- SANTOS, A. *et al.* A Robot for Removing Hydrate and Paraffin Plugs in Offshore Flexible Lines: Development and Experimental Trials. **SPE Prod & Oper** 35 (03): 641–653. 2020.
- SEWERVUE. **Multi-sensor pipe inspection system**. Disponível em: <https://sewervue.com/multi-sensor-pipe-inspection-system.html>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- TECHGEL. **Jateamento interno de tubos Spin Blast**. Disponível em: <https://techgel.com.br/produto/jateamento/jateamento-interno-de-tubos-spin-blast/>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- VAGATA, A. Implementation of a Multi-Technology Approach for Flexible Risers Inspection - Improving Effectiveness and Efficiency. In: Offshore Technology Conference. 2023.
- YOUNG-SIK K., *et al.* A Flat Pipeline Inspection Robot with Two Wheel Chains. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011, pp. 5141-5146.
- YOUNG-SIK K., *et al.* Design of a Reconfigurable Indoor Pipeline Inspection Robot. School of Electrical Engineering and Computer Science, Hanyang University, Ansan, Korea. 2007.
- WATARU W., TOSHIHIRO K., AKIO I. Rapid and Cheap Learning by Exploiting Biarticular Muscles-A Case Study with a Two-Dimensional Serpentine Robot. **Advanced Robotics**, 2008, 22: 1683-1696.