

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



TÍTULO DO TRABALHO:

ADVANCES IN ROBOTIC TECHNOLOGY FOR SPLASH ZONE INSPECTION: A COMPREHENSIVE RESEARCH

AUTORES:

Carlos Humberto Pinzón Cuta, Vinicius Campbell de Lacerda, 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

ADVANCES IN ROBOTIC TECHNOLOGY FOR SPLASH ZONE INSPECTION: A COMPREHENSIVE RESEARCH

Resumo

Este artigo apresenta um estudo tecnológico sobre mecanismos, dispositivos e robôs projetados para inspeção de tubulações na zona de respingo em plataformas offshore, uma região sujeita a corrosão acelerada devido à exposição intermitente à água do mar e condições atmosféricas adversas. A pesquisa destaca avanços recentes em dispositivos robóticos, focando em mecanismos de fixação, superação de obstáculos, movimento longitudinal e capacidades de rotação ao redor das tubulações, essenciais para inspeções eficazes nesse ambiente turbulento. Essas características garantem posicionamento estável, cobertura abrangente da inspeção e detecção de defeitos de múltiplos ângulos. O estudo também analisa literatura científica, produtos comerciais e patentes para avaliar as capacidades e limitações de cada solução. Essa abordagem fornece um entendimento detalhado das tecnologias atuais e identifica áreas para inovações que melhorem o desempenho e a confiabilidade em ambientes marítimos. Ao enfatizar avanços em fixação, superação de obstáculos, movimento e capacidades de rotação, o estudo destaca a importância de melhorar a detecção de defeitos, a precisão e a eficiência das inspeções, reduzindo os riscos humanos.

Palavras-chave: inspeção de dutos, zona de respingo, offshore, robô.

Abstract

This paper presents a technological study on mechanisms, devices, and robots designed for pipe inspection in the Splash Zone on offshore platforms, a region prone to accelerated corrosion due to seawater and harsh atmospheric conditions. The research highlights recent advancements in robotic devices, focusing on attachment mechanisms, obstacle traversal, longitudinal movement, and rotational capabilities around pipes, essential for effective inspection in the turbulent splash zone environment. These features ensure stable positioning, comprehensive inspection coverage, and defect detection from multiple angles. The study also analyzes scientific literature, commercial products, and patents to evaluate the capabilities and limitations of each solution. This approach provides a detailed understanding of current technologies and identifies areas for innovation to enhance performance and reliability in maritime environments. Emphasizing technological advancements in attachment, traversal, movement, and rotational capabilities, the study underscores the importance of improving defect detection, accuracy, and inspection efficiency while reducing human risk.

Keywords: pipe inspection, splash zone, offshore, robot.

Introdução

A inspeção de tubulações na zona de respingo (*Splash Zone*) em plataformas *offshore* é um desafio significativo devido à corrosão acelerada causada pela exposição intermitente à água do mar e condições atmosféricas adversas. A zona de respingo é particularmente desafiadora para inspeção devido à corrosão severa que ocorre nas áreas de difícil acesso, como os espaços sob abraçadeiras e ganchos dos *risers*. Estudos anteriores destacaram a importância de técnicas avançadas de inspeção com dispositivos robóticos substituindo as de operações manuais por tarefas automatizadas, principalmente em novos campos, onde a extração está além do limite viável para mergulhadores (Ruangpattanatawee *et al.*, 2022).

Os robôs de escalada, como o MOORINSPECT, foram desenvolvidos para inspecionar correntes de ancoragem, operando acima e abaixo da superfície marinha, utilizando ondas guiadas de ultrassom

para testar a integridade dos elos da corrente. Este robô é projetado para subir correntes de ancoragem em condições adversas, proporcionando uma alternativa segura e eficiente às inspeções manuais realizadas por mergulhadores (Garcia e Sattar, 2018; Kimball *et al.*, 2018).

A integração de sistemas de visão estéreo em veículos subaquáticos autônomos (AUVs) tem mostrado progresso significativo na manipulação de tubulações submersas. Esses sistemas permitem a detecção, localização e rastreamento de objetos parcialmente visíveis, facilitando operações de inspeção e manipulação em ambientes subaquáticos desafiadores (Rizzini *et al.*, 2017).

Além disso, a aplicação de robôs em ambientes *offshore* tem avançado com o desenvolvimento de sistemas que podem superar obstáculos complexos e fornecer uma cobertura completa de inspeção. Robôs com capacidades de movimento longitudinal e rotação em torno de tubulações, como *risers*, são essenciais para garantir a detecção precisa de defeitos e a integridade estrutural das plataformas offshore (Ruangpattanatawee *et al.*, 2022; Kimball *et al.*, 2018).

Este artigo tem por objetivo realizar uma análise dos avanços recentes na tecnologia robótica adaptada para inspeção na zona de respingo. A metodologia inclui uma análise detalhada da literatura científica, pesquisa comercial para identificar produtos disponíveis e buscas de patentes para avaliar o estado da técnica de patentes.

O artigo está dividido na seguinte estrutura: Na metodologia apresenta-se os procedimentos adotados para o levantamento do estado da arte, incluindo patentes, produtos comerciais e artigos. Em seguida nos resultados apresenta-se os principais robôs encontrados, realizando-se uma análise detalhada de características destes robôs. Por fim apresenta-se as principais conclusões encontradas neste trabalho.

Metodologia

Para investigar os projetos existentes na tecnologia dos robôs de inspeção externa de *risers* na *Splash Zone* ou Zona de Respingo, esta seção apresenta um levantamento tecnológico sobre robôs de inspeção de *risers*, levando em conta as patentes existentes, os artigos publicados e os produtos comerciais disponíveis. Com base nesse levantamento tecnológico, foram extraídos alguns requisitos funcionais e construída uma matriz morfológica, que indica os princípios de solução encontrados para locomoção, formato do corpo e tipo de fixação para os robôs encontrados. Foi empregada a metodologia de busca de patentes desenvolvida no Laboratório de Robótica Aplicada (LAR) da UFSC (Hoeltgebaum *et al.*, 2016; Frantz *et al.*, 2019; de Souza *et al.*, 2023) e utilizou-se as bases de dados Patentscope, Espacenet, Google Patents, Lens.org e INPI.

A busca de patentes foi dividida em dois passos: busca preliminar e análise da busca preliminar. Na busca preliminar, foram selecionadas palavras-chave e gerados termos relevantes misturando-se os seguintes padrões: palavra 1-ação, palavra 2-objeto e palavra 3-aplicação. Também foram exploradas alternativas utilizando sinônimos através das ferramentas Thesaurus e do dicionário de sinônimos do Patentscope. Esta busca foi realizada sem a seleção de IPCs/CPCs específicos, com os objetivos: Obter uma maior quantidade de resultados; Reconhecer os IPCs/CPCs mais recorrentes; Verificar a existência de outros códigos complementares; Criar uma lista completa de IPCs/CPCs relevantes. Os resultados da busca preliminar foram avaliados quantitativamente com base nos seguintes parâmetros de qualidade:

- 5: Patente que corresponde exatamente ao que está sendo procurado.
- 4: Patente específica, mas aplicada em outra área.
- 3: Patente que pode ser adaptada à aplicação.
- 2: Patente que cumpre os requisitos, mas é pouco prática.
- 1: Patente não relacionada à aplicação.

Foram quantificadas as recorrências dos IPCs (International Patent Classification)/CPCs (Classificação Cooperativa de Patentes), ranqueando-as da maior à menor, e foi gerado um grau de importância de 1 a 5 dos códigos mais recorrentes. Para a busca de produtos comerciais, foram

utilizados os mesmos conjuntos de palavras-chave da busca de patentes e os nomes das empresas depositantes. Os produtos foram listados e avaliados quantitativamente da mesma forma que as patentes. A pesquisa preliminar da literatura acadêmica foi conduzida por meio da análise de artigos associados às patentes previamente selecionadas, para isso, foram utilizadas plataformas de busca como Google Scholar, Science Direct e ResearchGate para encontrar artigos publicados pelos inventores das patentes. Cada um dos conceitos encontrados na busca preliminar de patentes, produtos comerciais e revisão bibliográfica foi tabulado, extraído-se as seguintes informações importantes: Tipo de locomoção (rodas, correia, hélices, etc.), Tipo de formato (unilateral, bilateral, colar 360 graus, etc.), Tipo de fixação na tubulação (braço, garra, magnética, etc.). Além dessas informações, foram registradas observações adicionais, o endereço digital de onde foi encontrado o conceito e uma qualificação de 0 a 5 dependendo da compatibilidade do conceito com o que estava sendo procurado. Por fim, uma matriz morfológica foi implementada com base nas seguintes funções básicas: Suportar a estrutura do robô; Fixar o robô no tubo; Locomover-se longitudinalmente no *riser*; Transpor obstáculos; Rotacionar no *riser*.

Resultados e Discussão

Nesta seção apresenta-se os resultados atingidos a partir da metodologia de busca do estado da arte apresentada na seção anterior. Foram selecionadas palavras-chave como *inspection*, *weld*, *scanner*, *robot*, *riser*, entre outras, resultando em 12 termos relevantes listados na Tabela 1. Esse conjunto de termos foi utilizado para analisar e organizar 3.148 patentes, das quais 150 foram salvas e qualificadas conforme a metodologia estabelecida.

Tabela 1. Lista de termos relevantes.

Busca	FILTROS					Vistos	Salvados	Nota
	Ação	Objeto	Aplicação	Outro				
1.1	<i>Inspection</i>	<i>Robot</i>	<i>Ducts</i>			400	31	3,35
1.2	<i>Inspection</i>	<i>Robot</i>	<i>Risers</i>			400	22	3,77
1.3	<i>Inspection</i>	<i>Robot</i>	<i>Pipes</i>			500	26	3,56
1.4	<i>Inspection</i>	<i>Riser</i>	<i>Underwater</i>	<i>Robot</i>		240	9	4,44
1.5	<i>Inspection</i>	<i>Offshore</i>	<i>Robot</i>	<i>Riser</i>		325	16	4,50
1.6	<i>Inspection</i>	<i>Robot*</i>	<i>Out-pipe</i>			500	16	4,20
1.7	<i>Inspection</i>	<i>External</i>	<i>Oil-pipes</i>	<i>Robot</i>		500	21	4,14
1.8	<i>Weld*</i>	<i>Scanner</i>	<i>Underwater</i>	<i>Robot</i>	<i>Riser</i>	17	1	5,00
1.9	<i>Inspection</i>	<i>Robot</i>	<i>Underwater</i>	<i>Flowline</i>		62	1	3,00
1.10	<i>Work</i>	<i>Robot</i>	<i>Underwater</i>	<i>Flowline</i>		116	3	2,33
1.11	<i>Clean*</i>	<i>Robot*</i>	<i>Underwater</i>	<i>Flowline</i>		82	4	3,00
1.12	<i>Scanner</i>	<i>Robot*</i>	<i>Underwater</i>	<i>Flowline</i>		6	0	0,00

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Da Tabela 1, foram selecionados os termos relevantes com melhores resultados com base na nota média e na quantidade de patentes salvas, assim selecionado palavras chaves como: *Weld*; *Inspection*; *Scanner*; *Robot*; *External*; *Riser*; *Underwater*; *Out-pipe*; *Oil-pipes*. Observou-se que os termos mais próximos ao objetivo deste trabalho foram aqueles relacionados com robôs ou dispositivos mecânicos que cumpriam a tarefa de inspecionar ou escanear externamente os *risers* ou tubos. Além disso, foram identificados 221 IPCs e 295 CPCs diferentes que poderiam ser empregados em uma busca de patentes

detalhada. Esses IPCs/CPCs foram organizados do código mais frequente ao menos frequente, resultando na Tabela 2, que contém os cinco melhores IPCs e CPCs.

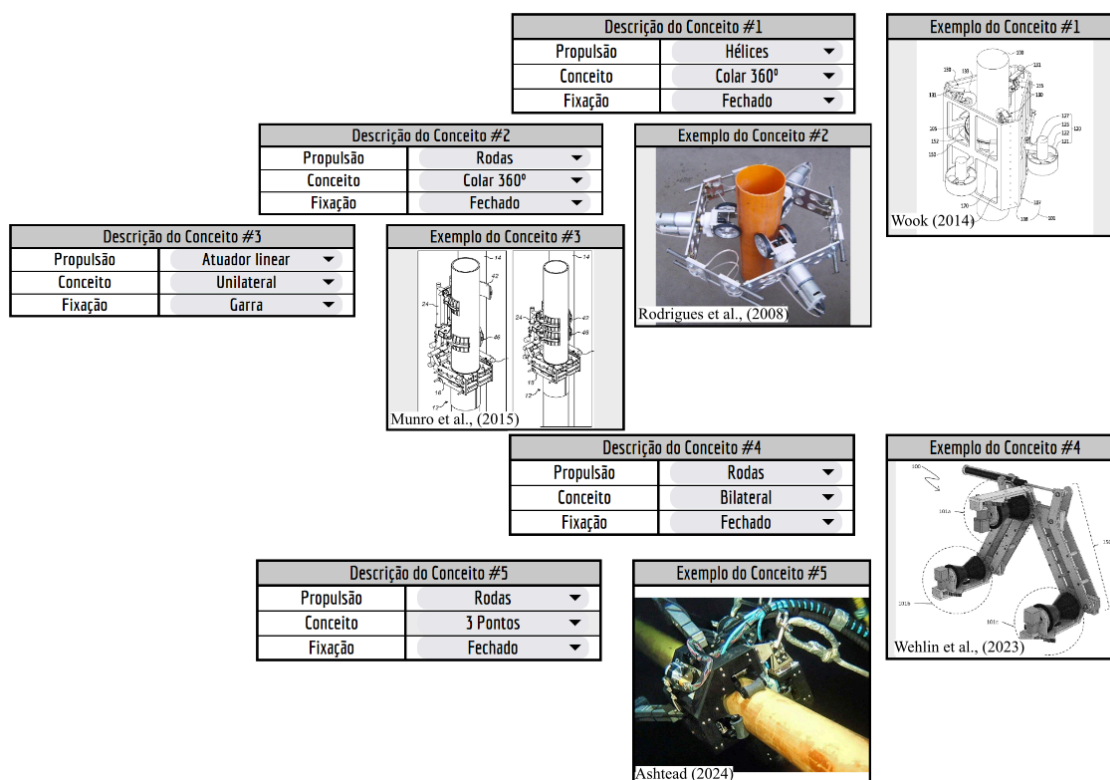
Tabela 2. Top 5 de IPCs/CPCs Encontrados com Maior Frequência.

TOP 5 IPC	QTD	CLASSE	QTD	TOP 5 CPC	QTD	CLASSE	QTD
B25J 5/00	27	B08B9	53	B25J 5/007	13	B08B9	66
B63C 11/52	12	B25J9	35	B25J 5/005	12	A47L9	56
B63G 8/00	12	F16L55	31	B08B 9/023	10	B25J9	54
B25J 11/00	11	B62D55	23	B63G 2008/005	10	B25J19	31
F16L 55/32	9	G01N21	20	B25J 11/00	8	F16L55	18

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Os IPCs/CPCs registrados na Tabela 2 são os que têm maior relação com a tarefa de inspecionar *risers* na *Splash Zone*. Consequentemente, foram escolhidos e agrupados conforme mostrado na Figura 1, que apresenta os conceitos que incluíam esses códigos.

Figura 1. Famílias de Conceitos Agrupadas em Função da Propulsão, Tipo de Conceito e Fixação.

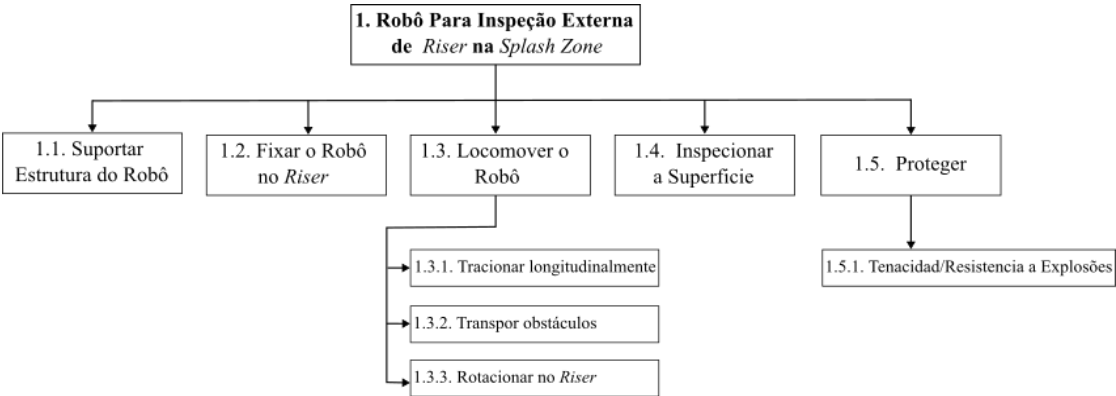


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Na Figura 1, também foram incluídos os produtos comerciais e os conceitos encontrados em artigos que conseguiram realizar a tarefa de inspecionar *risers* na *Splash Zone* ou tarefas próximas. Esta Figura, contém as famílias de conceitos analisados, o tipo de locomoção, o formato do dispositivo e o tipo de fixação ou ancoragem no *riser*. Ao observar as informações apresentadas na Figura 1, e analisar as diferentes famílias de conceitos, foram identificados alguns requisitos funcionais que um

robô operando na *Splash Zone* de uma plataforma petrolífera marítima *offshore* deve cumprir para realizar adequadamente a inspeção dos *risers*. Esses requisitos estruturais são mostrados na Figura 2.

Figura 2. Estructura de Funções de um Robô de Inspeção Externa de *Riser* na *Splash Zone*.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

As principais dificuldades encontradas após a análise das diferentes concepções no levantamento tecnológico foram a capacidade de transpor obstáculos, locomover-se em superfícies irregulares e a fixação no *riser* ao ser exposto à alta atividade marítima da *Splash Zone*.

Visando classificar os princípios de solução encontrados, construiu-se uma matriz morfológica (Figura 3) com base na definição de cinco funções primordiais que um sistema robótico para inspeção de *risers* na *Splash Zone* deve cumprir, conforme mostrado na Figura 2. Dentro de cada função, destacam-se mecanismos ou subsistemas provenientes das soluções exploradas, que serão detalhados a seguir.

Figura 3. Matriz Morfológica de Dispositivos robóticos Empregados para Inspeção.

Funções básicas	Princípios de solução					
	Mecanismo					
1.0 Suportar a estrutura do robô	 Unilateral Oceantech (2024)	 Bilateral Guimu (2024)	 Três Pontos Ashtead (2024)	 Colar Xiaoqiang et al. (2018)		
2.0 Fixar o robô no tubo	 Garra Garrubba et al. (2000)	 Baixa Pressão Garrubba et al. (2000)	 Pastilhas/Patas Espinasse et al. (2017)	 Hélices McDaniel et al. (2021)	 Manipulador Vogt et al. (2018)	 Scissor
3.1 Locomover longitudinalmente no tubo	 Rolos em V Wehlin et al. (2023)	 Hélices Wook (2014)	 Atuador Linear Munro et al. (2015)	 Pernas Picardi et al. (2020)	 Cabos (passivo)	 Rodas Rodrigues et al. (2008)
3.1.1 Transpor obstáculos	 Cremalheira	 Barra Roscada	 Atuador/Tesoura	 Atuador/Garra	 Atuador/Roda Nahwi et al. (2020)	
3.1 Rotacionar no tubo	 Rolo em V	 Tração multidirecional	 Rodas Mecanum Ryan et al. (2024)	 Não necessários (Colar)		

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

- a) Possuir estrutura mecânica: Entre os arquétipos explorados, destacam-se quatro principais, classificados como Unilateral, Bilateral, Trilateral e Circunferencial (estrutura que circunda toda a seção do *riser*). Entre os unilaterais, pode-se ressaltar a solução robótica remotamente operada para inspeção de soldas em *splash zones* da empresa norueguesa *OceanTech Innovation*. No arquétipo Trilateral, o sistema de limpeza de cordas e *risers* flexíveis da *Ashtead Technologies* (RCIS) é passivo e possui três pontos de contato ao redor dos tubos. Com respeito ao arquétipo circunferencial, duas patentes publicadas pela Universidade Chinesa de Hong Kong (Zheng *et al.*, 2018) apresentam estrutura mecânica que circunda toda a seção tubular, possibilitando a inspeção em 360°.
- b) Possuir capacidade de se locomover longitudinalmente: Dentre as soluções encontradas, pode-se salientar o uso de rolos côncavos, hélices propulsoras e atuadores lineares.
- c) Possuir capacidade de se fixar ao tubo: As principais tecnologias adotadas para fixar o sistema robótico aos tubos em *splash zone* foram garras, pastilhas e atuadores lineares.

As funções "possuir capacidade de se locomover radialmente" e "possuir capacidade de transpor obstáculos" não foram encontradas extensivamente na pesquisa bibliográfica realizada.

Conclusões

A investigação sobre tecnologias de robôs de inspeção de *risers* na *Splash Zone* proporcionou uma visão detalhada das soluções existentes. A metodologia, que incluiu buscas em bases de dados de patentes, revisão de literatura acadêmica e levantamento de produtos comerciais, permitiu identificar diversos mecanismos utilizados na inspeção de *risers*.

Os resultados mostraram que as soluções circunferenciais e trilaterais são as mais desenvolvidas, permitindo inspeções em 360° ao redor do tubo. As soluções unilaterais também foram relevantes, especialmente para inspeção de soldas, enquanto as soluções bilaterais específicas para *splash zones* não foram encontradas, sugerindo um potencial para futuras inovações. Como trabalhos futuros sugere-se o desenvolvimento de um mecanismo que ultrapasse as desvantagens de soluções existentes no mercado.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP)-Brasil pelo financiamento. Edital 0378/23.

Referências Bibliográficas

- ASHTHEAD TECHNOLOGY (Sweden). **Riser/Rope Cleaning and Inspection System**. 2023. Disponível em: <https://www.ashtead-technology.com/product/riser-rope-cleaning-and-inspection-system>. Acesso em: 26 jan. 2024.
- CHENGDU GUIMU ROBOT. **Cable climbing robot platform**. 2022. Disponível em: <https://en.gm-robot.com/mars/>. Acesso em: 26 jan. 2024.
- DE SOUZA, Marina Baldissera *et al.* The State-of-Art of Hydrostatic Transmissions In Micro-Hydropower Plants. In: 27th International Congress of Mechanical Engineering, 2023.
- ESPINASSE, Philippe *et al.* **Movable Device for Inspecting a Production Line Partially Submerged in an Expanse of Water, Suitable for Negotiating a Curve in the Production Line, and Associated Installation and Method**. Depositante: Technip France. US20200056745. Depósito: 21 Nov. 2017. Concessão: 05 sep. 2023.
- FRANTZ Julio Cesar *et al.* Design of an assistive technology device for children with cerebral palsy. Advances in Mechanism and Machine Science (IFTToMM WC 2019). **Mechanisms and**

- Machine Science**, vol 73. Springer, Cham.
- GARCIA, Alvaro Ruiz; SATTAR, Tariq Pervez. **Inspection of Floating Platform Mooring Chains with a Climbing Robot**. Centre for Automated and Robotic NDT, London South Bank University, 2018.
- GUIMU. **Cable climbing robot platform**. Disponível em: <<https://en.gm-robot.com/mars/>>. Acesso em: 25/04/2024.
- HOELTGEBAUM, Thiago; Simoni, Roberto; Martins, Daniel. A kinematic approach to variable compression ratio engines. **Mech. Mach. Theory** 96(2), 308–322 (2016).
- HOPKINS, K. G. *et al.* **Adherent Robot**. Depositante: HOPKINS, K. G. US6276478. Depósito: 1 fev. 2001. Concessão: 21 ago. 2001.
- KIMBALL, Matthew *et al.* **Mooring Chain Climbing Robot for NDT Inspection Applications**. InnotecUK, Hildersham Road, Cambridge, UK, 2018.
- MCDANIEL, Dwayne E; TELUSMA, Mackenson; LAGOS, Leonel E. **Robotic Inspection Device**. Depositante: McDaniel Dwayne E; The Florida International University Board of Trustees; Telusma, Mackenson; Lagos, Leonel E. US20210310895. Depósito: 02 abril 2021. Concessão: 18 abril 2023.
- MUNRO, S. J. *et al.* **Moving tools on offshore structures with a walking carriage**. Depositante: Subsea 7 LTD. GB2542605A. Depósito: 29 mai. 2015. Concessão: 29 mar. 2017.
- NAHWI, A. A. *et al.* **Underwater pipeline inspection crawler**. Depositante: Panasonic Corporation. US11235472B2. Depósito: 3 mai. 2019. Concessão: 18 jan. 2022.
- OCEANTECH INNOVATION. **OceanTech's splash zone tools**. 2017. Disponível em: <https://www.oceantech.no/splash-zone-network/articles/what-is-the-splash-zone/>. Acesso em: 26 jan. 2024.
- PICARDI, G. *et al.* Bioinspired underwater legged robot for seabed exploration with low environmental disturbance. **Sci. Robot.** (2020).
- RIZZINI, Dario Lodi *et al.* Integration of a Stereo Vision System into an Autonomous Underwater Vehicle for Pipe Manipulation Tasks. **Computers and Electrical Engineering**, v. 58, p. 560-571, 2017.
- RUANGPATTANATAWEE, Kamonwan *et al.* Advanced Inspection Technologies for Corrosion Underneath Splash Zone Riser Hangers and Clamps. In: Offshore Technology Conference Asia, 2022.
- RODRIGUES, H. L. *et al.* **Climbing Robot Concept**. Disponível em: <https://robotics.umng.edu.co/climbing.concept.html>. Acesso em: 24 jul. 2024.
- RODRIGUEZ, Hernando Leon; BRIDGE, Bryan; SATTAR, Tariq P. Climbing ring robot for inspection of offshore wind turbines. In: Advances in Mobile Robotics. 2008. p. 555-562.
- RYAN, K. J. *et al.* **Pipe Climbing Robot V4**. Disponível em: <https://www.sp.edu.sg/engineering-cluster/mae/courses/full-time-diplomas/mechatronics-and-robotics/project-gallery/pipe-climbing-robot-v4>. Acesso em: 24 jul. 2024.
- VOGT, Daniel M., *et al.* Shipboard design and fabrication of custom 3D-printed soft robotic manipulators for the investigation of delicate deep-sea organisms. **PloS one**, 2018, vol. 13, no 8, p. e0200386.
- WEHLIN, K. P. *et al.* **Pipe traversing apparatus, sensing, and controls**. Depositante: Arix technologies, INC. US18375286A1. Depósito: 29 set. 2023. Concessão: 25 jan. 2024.
- WOOK, K. J. **Cleaning appratus for underwater pipe**. Depositante: Daewoo shipbuilding & marine. KR20160015996A. Depósito: 1 ago. 2014. Concessão: 15 fev. 2016.
- XIAOQIANG, Yuan; NING, Ding, AIDONG, Zhang, ZHENLIANG, Zheng. **Climbing Formula Inspection Robot**. Depositante: The Chinese University of Hong Kong. CN208293420, Depósito: 10 abril 2018. Concessão: 28 dec. 2018.