

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



TÍTULO DO TRABALHO:

MANUFATURA ADITIVA E TESTES DE UM ROBÔ PARA INSPEÇÃO DE RISERS

AUTORES:

Esdras Salgado da Silva, Luís Felipe Schlindwein de Souza, Julio Cesar Frantz, João Pedro Volpato Goulart, 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

MANUFATURA ADITIVA E TESTES DE UM ROBÔ PARA INSPEÇÃO DE RISERS

Resumo

O presente trabalho trata sobre o desenvolvimento de soluções para inspeção de tubulações de petróleo no Brasil, com foco nas plataformas OffShore localizadas no pré-sal. Estudos destacam sobre os desafios tecnológicos na exploração offshore, a importância da inovação neste setor, automatizando tarefas que são muito desafiadoras para mergulhadores. A manutenção dos equipamentos, especialmente dos risers flexíveis, é crucial para evitar falhas neste tipo de operação. A integridade estrutural dos risers é monitorada para garantir operações seguras, sendo inspecionada por robôs, uma maneira de automatizar tais tarefas de inspeção. Assim, este trabalho tem como objetivo prototipar e validar um robô para inspeção de risers flexíveis e rígidos em plataformas offshore, utilizando manufatura aditiva e componentes mecânicos. Os procedimentos experimentais incluem o projeto do robô, fabricação dos componentes e montagem do protótipo. Os resultados mostram que o protótipo atende aos objetivos do projeto, possuindo um movimento coordenado do mecanismo de perna.

Palavras-chave: risers flexíveis, robôs de inspeção, manutenção, prototipagem.

Abstract

The present work addresses the development of solutions for the inspection of oil pipelines in Brazil, focusing on offshore platforms located in the pre-salt area. A study on technological challenges in offshore exploration highlights the importance of innovation in this sector, automating tasks that are very challenging for divers. Equipment maintenance, especially of flexible risers, is crucial to avoid failures in this type of operation. The structural integrity of the risers is monitored to ensure safe operations, being inspected by robots, which automate such inspection tasks. Thus, this work aims to prototype and validate a robot for the inspection of flexible and rigid risers on offshore platforms, using additive manufacturing and mechanical components. The experimental procedures include the robot's design, component fabrication, and prototype assembly. The results show that the prototype meets the project's objectives but requires some modifications for performance optimization, such as repositioning the base arms, using CNC methods for gear production, and selecting the appropriate materials for application in the assembly.

Keywords: flexible risers, inspection robots, prototyping, validation.

Introdução

Com o passar do tempo, percebeu-se cada vez mais uma dependência do mundo moderno em relação ao petróleo, no século XIX, ele emergiu como uma promissora fonte de energia, apresentando um vasto potencial de aproveitamento. Ao longo do tempo, ele se tornou um recurso crucial para o crescimento e desenvolvimento das nações. Com o avanço da indústria petrolífera global e sua

habilidade para catalisar mudanças políticas e econômicas nas sociedades, o Brasil começou a considerar o petróleo como uma oportunidade a ser explorada (Petrobras, 2023).

Após a descoberta do pré-sal no Brasil, situado nas bacias do Sul e Sudeste com cerca de 800 quilômetros de extensão e 200 quilômetros de largura, houveram diversas mudanças no cenário político e socioeconômico do Brasil. Este fenômeno trouxe diversos benefícios, com o crescimento da produção e extração do petróleo houve um aumento nas reservas e autossuficiência do país. Segundo a Empresa Brasileira de Administração de Petróleo e Gás Natural (PPSA) a produção diária de petróleo no pré-sal passou da média de aproximadamente 41 mil barris por dia, em 2010, para o patamar de 1,9 milhão de barris de óleo por dia em março de 2020. A exploração do pré-sal demandou significativos investimentos em infraestrutura, como plataformas de exploração e refinarias, gerando empregos e estimulando o setor de construção civil (IBP, 2024).

Uma das formas de exploração, que é amplamente utilizada, é a exploração em alto mar (*offshore*), os antecedentes desse tipo de extração remontam a 1947, marcando a instalação das primeiras plataformas no Golfo do México. Mesmo diante da crise petrolífera dos anos 70, o setor manteve um crescimento contínuo, impulsionado pela inovação constante. Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) são mais de 170 instalações espalhadas pelo litoral brasileiro dentre elas 55 já operam a mais de 25 anos.

Lima (2015) realizou um estudo referente aos desafios tecnológicos na exploração de petróleo em águas profundas. O grande desafio reside na inspeção e manutenção dos equipamentos para transporte de petróleo. Os materiais empregados nessas atividades são sofisticados e demandam uma manutenção especializada e constante, a ausência de manutenção adequada pode resultar em falhas nos equipamentos, interrupções nas operações e, potencialmente, acidentes graves (Lima, 2015). Para superar tais desafios, a manutenção *offshore* faz uso de tecnologias avançadas e conta com equipes altamente qualificadas.

Tendo em vista que um dos principais componentes para a extração é o *riser* flexível, que consiste, essencialmente, em um longo tubo formado por múltiplas camadas, sendo destinado ao transporte de petróleo em águas extremamente profundas. Baldan (2010), apresenta em seu trabalho um estudo sobre análise do processo de condicionamento e comissionamento de dutos flexíveis usados na exploração de petróleo, desde a fase de fabricação até a montagem em campo. No estudo em questão foram estudados os procedimentos de instalação de dutos nas configurações de *flowline*, *jumper* e *riser*, bem como os fatores considerados na decisão de utilizar ou não mergulhadores no processo de instalação. Por fim o autor concluiu que durante as etapas de fabricação, manipulação, transporte e instalação, é crucial seguir procedimentos específicos para garantir a integridade e funcionalidade dos dutos.

Considerando a relevância dos *risers* flexíveis, torna-se de grande importância, o monitoramento da integridade estrutural deles para a indústria petrolífera. Cavati (2012), aborda a criação de um modelo matemático para otimização de riscos e custos associados ao uso de risers em atividades de exploração *offshore* de petróleo e gás natural, com o intuito de garantir a operação segura desses componentes e avaliar sua integridade estrutural. Considerando variáveis como frequência de inspeção, métodos de monitoramento e histórico de falhas, foram identificados os principais fatores que influenciam a integridade dos *risers*, permitindo a implementação de estratégias de manutenção mais direcionadas e eficientes.

O desenvolvimento de soluções para inspeção de tubulações em plataformas offshore é de vital importância para a indústria petrolífera, especialmente na região do pré-sal. Rusu (2022) demonstra como os robôs de inspeção interna de tubos têm se mostrado úteis neste tipo de operação sem danificar a estrutura da tubulação, isso justifica o constante aumento em pesquisas destes tipos de dispositivos. O IPIR (in-pipe inspection robots), juntamente com testes visuais e outros testes não destrutivos (NDT), demonstraram ser vantajosos em comparação com a inspeção manual. Robôs impulsionados por rodas, robôs com esteiras, robôs de pressão de parede, robôs de medidores de inspeção de dutos (PIG) (pipe inspection gauge) e muitos outros *designs* inspirados na natureza estão disponíveis.

Moshayedi (2019) desenvolveu um robô para inspeção de tubulações capaz de se adaptar a diferentes diâmetros de tubos, visando a identificação e análise de defeitos, erosões, e obstruções com eficácia e eficiência, reduzindo o tempo de inspeção e manutenção. Para isso ele utilizou do software CATIA para modelagem, considerando mecanismos de movimento, adaptabilidade ao diâmetro dos tubos, e inclusão de uma câmera para coleta de dados visuais. Por fim, o robô desenvolvido apresentou um potencial significativo para inspeções de tubulação, oferecendo adaptabilidade, eficiência e capacidade de identificar problemas com precisão.

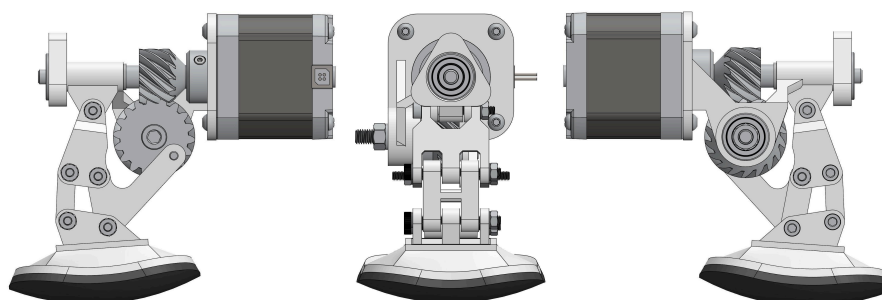
Considerando todos os pontos levantados, é perceptível que a utilização de robôs para a inspeção e verificação de *risers* nas plataformas *offshore* é uma tarefa muito importante. Sendo assim, este trabalho foca na criação de um robô prototipado através de manufatura aditiva, com o objetivo de realizar inspeções automatizadas de *risers*, reduzindo a necessidade de intervenção humana e aumentando a segurança operacional. O enfoque principal aqui apresentado é a estratégia de locomoção dentro de *risers*, as câmeras e sensores de inspeção a serem acoplados ao robô estão previstos em trabalhos futuros.

Metodologia

A metodologia deste estudo envolve a concepção, fabricação e validação de um robô para inspeção de *risers* em plataformas offshore. O processo inicia com a modelagem do robô utilizando softwares de CAD, seguido da impressão 3D dos componentes principais. Para a montagem do protótipo, são utilizados componentes impressos em ABS e resina, priorizando a resistência e durabilidade das peças e, posteriormente, a montagem é realizada, abrangendo os componentes impressos e elementos de prateleira. Os testes de validação incluem a verificação da movimentação do robô dentro de tubos simulados, medindo sua eficiência e adaptabilidade às condições operacionais.

A Figura 1 apresenta a modelagem do protótipo da perna de movimentação do robô desenvolvido, juntamente com os seus mecanismos de movimentação que se dão através de um par de engrenagens helicoidais alocado na base da perna de movimentação. Por se caracterizar como um robô para realizar a inspeção no interior dos *risers*, o mesmo possui um diâmetro de 6 (seis) polegadas ou aprox. 15,24 cm, sendo constituído de um mecanismo de pernas que atuam em conjunto para a locomoção deste no interior dos *risers* em plataformas *offshores*.

Para a fabricação dos componentes, foram escolhidas as impressoras S3X da marca Sathi3D, a impressora CR-10 Smart da marca Creality e a impressora LD 006, também da marca Creality. A qualidade e durabilidade final das peças são aspectos cruciais para a validação do projeto, o que justifica a escolha destas impressoras. As primeiras máquinas contam com uma área de impressão de 300 mm x 300 mm x 300 mm (Altura x Largura x Comprimento) e a terceira 192 mm x 120 mm x 250 mm.

Figura 1 - Protótipo da perna de movimentação do robô.

Fonte: Adaptado de Da Silva (2023).

Realizou-se a impressão dos componentes utilizando o filamento ABS premium na cor *Black 6C*, fabricado pela marca 3DLab, com densidade de 1,24 g/cm³, temperatura de fusão 185°C, tensão de escoamento 66 MPa e módulo de elasticidade 4350 MPa. Para as engrenagens helicoidais, foi utilizada impressão em resina, considerando sua precisão. Para a prova de conceito, esse tipo de impressão atende ao uso das engrenagens, entretanto para a fabricação do robô final o ideal é que essas sejam usinadas devido ao desgaste causado pelo atrito.

Por se tratar de uma peça mecânica que exige resistência e durabilidade, a definição dos parâmetros é de extrema importância para obter resultados satisfatórios, principalmente para a funcionalidade de cada componente. Neste projeto utilizou-se o Ultimaker Cura. Os parâmetros de impressão são apresentados na Tab. 3. Para o fatiamento das engrenagens foi utilizada o software chitubox, utilizado para impressoras de resina. Os parâmetros de impressão são apresentados na Tabela 4.

Tabela 3 - Parâmetros de impressão

Qualidade	Altura de camada	0,06 mm
	Altura da primeira camada	0,3 mm
Paredes	Número de filetes da parede	4
	Espessura Superior/Inferior	0,8 mm
Superior/Inferior	Camadas Superiores	6
	Camadas Inferiores	6
Preenchimento	Densidade preenchimento	60 %
	Padrão preenchimento	Linhas
Material	Temperatura de impressão	235 °C
	Temperatura da mesa de impressão	110 °C
Velocidade	Velocidade de impressão	60 mm/s
	Velocidade de preenchimento	60 mm/s
	Velocidade da parede	30 mm/s
	Velocidade superior/inferior	15 mm/s
	Velocidade percurso	120 mm/s
Percurso	Velocidade da camada inicial	30 mm/s
	Distância Retração	6 mm
Suporte	Colocação de suportes	Em todo lugar
	Padrão do suporte	Ziguezague
Aderência à mesa	Densidade Suporte	15 %
	Tipo	Brim
	Contagem linhas do Brim	4

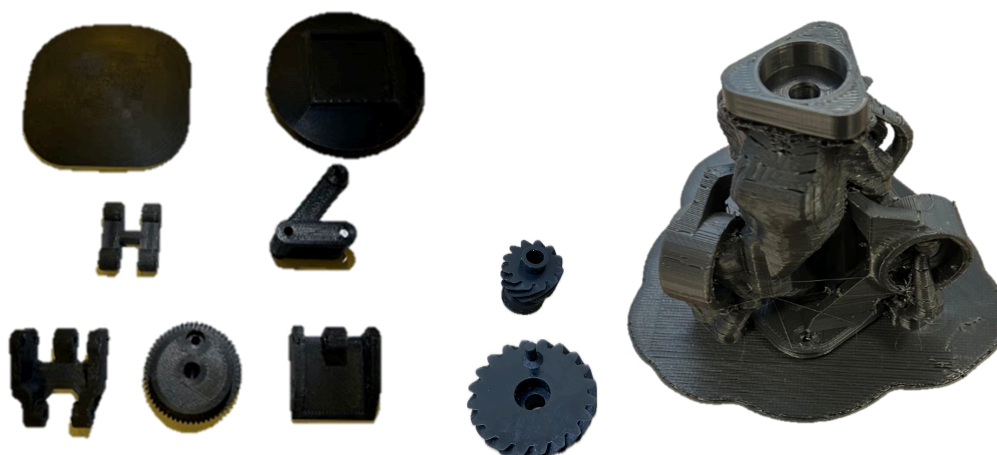
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Tabela 4 - Parâmetros de impressão resina

Altura camada:	0,050 mm
Camadas de base:	5
Tempo exposição:	3,000 s
Tempo exposição base:	20,000 s
Contagem de camadas Burn-in e Tempo. de transição:	10
Tipo de transição:	Linear V
Decremento do tempo de transição:	1,550 s
Modo de espera durante a impressão:	Temp... Y
Tempo de descanso antes da elevação:	0,000 s
Tempo de descanso após a elevação:	0,000 s
Tempo de descanso após a retração:	1,000 s
Dist elevação inferior:	7,000 mm
Distância elevação:	7,000 mm
Distância de retração inferior:	7,000 mm
Distância de retração:	7,000 mm
Vel. elevação inferior:	70,000 mm/min
Vel. elevação:	70,000 mm/min
Velocidade inferior:	150,000 mm/min
Vel. retração:	150,000 mm/min

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Após finalizada todas as peças utilizando métodos de manufatura aditiva, foi dado início a montagem do protótipo utilizando ferramentas simples. Na Figura 2 estão representados os componentes referentes ao mecanismo de locomoção antes de ser montado por completo.

Figura 2 - Peças do mecanismo de movimentação

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Conforme foram finalizadas as impressões, os testes de movimentação do protótipo se iniciaram. Nesta etapa, identificou-se alguns pontos de melhoria que foram aperfeiçoados por meio da modificação da modelagem anterior a prototipagem, adicionando durabilidade e resistência às peças que apresentaram fragilidade.

Resultados e Discussão

O mecanismo impresso em sua versão montada e sua trajetória de movimentação apresentada na Figura 3. Para o teste de movimentação, foi utilizada uma alavanca para a atuação do eixo central e verificou-se que a estrutura é efetiva para realizar a movimentação requerida.

Figura 3 - Trajetória de movimentação



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Mesmo que o mecanismo tenha funcionado, pontos de melhoria foram identificados:

- Inicialmente, o conjunto de atuação era composto por um par de parafuso sem fim e coroa, que posteriormente foi substituído por um conjunto de engrenagens helicoidais;
- Anéis de reforço foram acrescentados na base da estrutura para uma melhor fixação dos rolamentos;
- Algumas dimensões da base foram melhoradas para um aumento na resistência mecânica em pontos específicos.

Os testes realizados com o protótipo do robô indicaram que ele cumpre as funções básicas de locomoção e inspeção dentro dos risers. Modificações foram feitas nas engrenagens e no design das pernas para aumentar a eficiência e durabilidade. Os resultados sugerem que o robô possui um potencial significativo para inspeções em ambientes reais, realizando o movimento requerido para locomoção dentro de tubos. Otimizações adicionais podem ser realizadas para uma maior eficiência energética.

Conclusões

Conforme esperado, os testes com o protótipo mostraram que o robô cumpre sua função de exercer a trajetória para o mecanismo de caminhada segundo a simulação cinemática em ambiente virtual. Uma vez provado esse conceito, vale a verificação em um sistema multi-pernas para a análise do comportamento físico no espaço. Para trabalhos futuros, sugere-se a organização radial dessas pernas com um conjunto de 12 pernas organizadas em 4 conjuntos de três pernas de modo que esta se posicione e seja capaz de se locomover por dentro dos tubos. Além disso, a atuação por meio de motor e conjunto de baterias, associado a um sistema de comunicação e sensorialmente eficiente, proporciona uma estrutura efetiva, capaz de auxiliar na resolução dos desafios associados à inspeção interna em risers. Uma vez que o conceito da estratégia de locomoção se mostrou funcional, prevê-se a integração de sensores de inspeção para a verificação interna de possíveis pontos de trinca em tubos.

Agradecimentos

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

Referências Bibliográficas

- BALDAN, Ednaldo Lepaus; MACHADO, Kleyser Cuzzuol. **Condicionamento e Comissionamento de Dutos Flexíveis: Da Fabricação à Montagem em Campo**. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, Curso de Pós Graduação – Lato Sensu. Especialista em Engenharia de Condicionamento e Comissionamento, 2010.
- CAVATI, Ricardo de Souza. **Gerenciamento Inteligente da Integridade de Risers Flexíveis utilizados na produção de petróleo e gás natural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- DA SILVA, Esdras S. *et al.* Walking Robot Applied to the Tube Inspection Activity. In: Climbing and Walking Robots Conference. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 69-81.
- IBP. **Produção, importação e exportação de petróleo**. Rio de Janeiro - Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/producao-importacao-e-exportacao-de-petroleo/>. Acesso em: 12 fev. 2024.
- LIMA, Thaís Damasceno de; GOMES, Rogério. Desafios Tecnológicos na Exploração de Petróleo em Águas Profundas: O Sistema Petrobras de Inovação. In: XVI Congresso Latino Iberoamericano de Gestão da Tecnologia. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Unesp. 2015.
- MOSHAYEDI, Ata Jahangir *et al.* Design and Development of Pipe Inspection Robot Meant for Resizable Pipe Lines. **International Journal of Robotics and Control**, [S.l.], v. 2, n. 1, p. 25-35, Jan. 2019.
- RUSU, Calin; TATAR, Mihai Olimpiu. Adapting mechanisms for in-pipe inspection robots: a review. **Applied Sciences**, v. 12, n. 12, p. 6191, 2022.