

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



TÍTULO DO TRABALHO:

INNOVATIVE ANCHORING MECHANISMS FOR OFFSHORE PIPE INSPECTION:
APPLICATIONS OF GRAPH AND GROUP THEORIES IN THE PETROLEUM INDUSTRY

AUTORES:

Gustavo Valdatti Souza*, Carlos Humberto Pinzón Cuta, Julio Cesar Frantz, Vinicius Campbell de Lacerda, Henrique Simas, Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Daniel Martins.

INSTITUIÇÃO:

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

INNOVATIVE ANCHORING MECHANISMS FOR OFFSHORE PIPE INSPECTION: APPLICATIONS OF GRAPH AND GROUP THEORIES IN THE PETROLEUM INDUSTRY

Resumo

A inspeção e manutenção automatizadas de dutos offshore no setor de petróleo e gás são cruciais para garantir a integridade estrutural e a eficiência operacional em condições adversas. Dadas as condições extremas e o acesso restrito a esses locais, os robôs desempenham um papel fundamental, oferecendo soluções precisas e seguras que reduzem a necessidade de intervenção humana direta. Contudo, a ancoragem eficaz desses robôs em tubos sob condições marinhas desafiadoras permanece um obstáculo significativo. Tendo isso em vista, este estudo visa desenvolver mecanismos inovadores de ancoragem, empregando a técnica de síntese do número, apoiada pela teoria de grafos e grupos. A metodologia considera mecanismos com mobilidade unitária, sistema de helicoides de terceira ordem e três circuitos, buscando soluções de cadeia fechada mais eficientes que as tradicionais de cadeia aberta. Através da aplicação desta metodologia, busca-se gerar e analisar configurações de mecanismos filtradas por requisitos específicos, propondo novas soluções para sistemas de ancoragem robótica. Esta abordagem visa aumentar a eficácia e segurança das inspeções em ambientes submarinos, contribuindo significativamente para o avanço da robótica na indústria de petróleo e gás.

Palavras-chave: inspeção de risers, sistema de fixação, robô, síntese de mecanismos.

Abstract

Automated inspection and maintenance of offshore pipelines in the oil and gas sector are crucial for ensuring structural integrity and operational efficiency under extreme conditions. Given the extreme conditions and restricted access to these locations, robots play a fundamental role, offering precise and safe solutions that reduce the need for direct human intervention. However, the effective anchoring of these robots on pipes under challenging marine conditions remains a significant obstacle. With this in mind, this study aims to develop innovative anchoring mechanisms, employing the number synthesis technique, supported by graph and group theory. The methodology considers mechanisms with unit mobility, third-order screw system, and three circuits, seeking closed-chain solutions more efficient than traditional open-chain ones. The goal is to generate and analyze mechanism configurations filtered by specific requirements, proposing new solutions for robotic anchoring systems. This approach aims to increase the effectiveness and safety of inspections in underwater environments, contributing significantly to the advancement of robotics in the oil and gas industry.

Keywords: riser inspection, anchoring system, robot, mechanism synthesis.

Introdução

A integridade estrutural e a segurança operacional de tubulações em ambientes industriais, particularmente os risers, são de suma importância na indústria de óleo e gás. Risers, definidos como tubulações especializadas que transportam petróleo e gás entre o leito marinho e as plataformas de exploração offshore, estão sujeitos a condições ambientais extremas e requerem inspeções regulares e minuciosas. Estas estruturas complexas, compostas por camadas poliméricas e reforços de aço

helicoidal, enfrentam desafios contínuos que abrangem desde imperfeições de fabricação até danos operacionais (CAMERINI et al., 2010).

A inspeção de risers e tubulações industriais tem sido tradicionalmente realizada por meio de exames visuais da superfície externa, utilizando Veículos Operados Remotamente (ROVs) em águas profundas e mergulhadores em águas rasas. Estes métodos, embora eficazes na detecção de anomalias superficiais, apresentam limitações significativas em termos de custos operacionais, acessibilidade e estabilidade na inspeção em geometrias complexas. Os protocolos atuais incluem gravação em vídeo e documentação detalhada de não conformidades, processos que demandam recursos substanciais e estão sujeitos a variabilidades na interpretação humana (Santos et al., 2013).

Diante das limitações dos métodos convencionais de inspeção, a comunidade científica tem investigado abordagens alternativas para otimizar a eficiência e reduzir os custos associados a estas operações críticas. Uma das alternativas promissoras à utilização de ROVs tradicionais é o desenvolvimento de robôs especializados que utilizam a própria tubulação como guia para navegação. Esta abordagem inovadora oferece vantagens significativas, incluindo maior estabilidade em condições adversas, capacidade de operar em geometrias complexas, menor dependência do operador, possibilidade de missões automáticas e inspeções mais próximas e precisas (CAMERINI et al., 2010).

Recentes pesquisas em robôs de inspeção de tubos têm explorado diversas abordagens de fixação. Chatzakos et al. (2006) apresentaram um sistema com rodas omnidirecionais e estrutura modular leve, permitindo movimentação longitudinal e circunferencial em tubos revestidos sem danificar o isolamento. Este sistema mostrou-se eficaz em tubos retos, curvas e conexões ramificadas, superando limitações convencionais.

Silva et al. (2020) desenvolveram sistemas de fixação com pinças controladas por feedback de força, adaptáveis a diferentes diâmetros e irregularidades superficiais. O projeto JIRO aplicou esta tecnologia em ambientes submarinos para inspeção e limpeza de juntas flexíveis em risers, garantindo fixação robusta durante tarefas críticas.

Uma lacuna identificada neste tipo de dispositivo é o predomínio de cadeias cinemáticas abertas sobre fechadas. As cadeias abertas, onde há um único caminho para chegar aos elos, oferecem amplo espaço de trabalho e facilidade de controle, mas são mais suscetíveis a erros e têm menor rigidez. Cadeias fechadas proporcionam maior capacidade de carga, rigidez e precisão, embora com espaço de trabalho limitado e controle mais complexo (Kong e Gosselin, 2005).

Historicamente, o desenvolvimento de mecanismos dependia da experiência dos projetistas (Silva et al., 2023). Para sistematizar esse processo, diversas metodologias foram estabelecidas (Souza et al., 2023), com contribuições notáveis de Yan (1999), Tsai (2000), Murai (2019) e Ding et al., (2022). Este processo, conhecido como síntese de mecanismos, na teoria de mecanismos e máquinas (TMM), baseia-se fundamentalmente nos três tipos de síntese introduzidos por Hartenberg e Denavit (1964). Sendo estes tipos:

- **Síntese do Número** – É onde se define o número de corpos rígidos e pares cinemáticos necessários para obter o movimento desejado e as possibilidades de cadeias com essas características, que geralmente são representados por grafos.
- **Síntese do Tipo** - É onde se determina os tipos de pares cinemáticos que compõem o mecanismo, garantindo que os componentes escolhidos possam realizar as funções desejadas.
- **Síntese Dimensional** - É onde se especifica as dimensões exatas dos elos e componentes do mecanismo para atingir requisitos como os de movimento e força.

Este artigo propõe a geração de novas possibilidades para mecanismos, de cadeia fechada, de ancoragem em tubulações, utilizando conceitos da teoria de grafos e síntese de mecanismos. O objetivo é desenvolver sistemas que, em conjunto com elementos de locomoção como rodas convencionais e mecanum, por exemplo, possam eficientemente movimentar robôs ao longo de tubulações riser.

Metodologia

Para sintetizar o conjunto de mecanismos do dispositivo proposto, o desenvolvimento foi baseado na abordagem introduzida por (Murai, 2013) e complementada em (Murai, 2019). A metodologia trazida pelo autor, estrutura os passos necessários para, de maneira organizada, desenvolver qualquer tipo de mecanismo, baseando-se em requisitos de entrada.

De acordo com a metodologia proposta, as seguintes etapas foram realizadas:

1. **Levantamento do estado da arte:** O levantamento do estado da arte realizado, abrangeu patentes, pesquisas acadêmicas e produtos comerciais para inspeção externa de tubulações, com princípio de locomoção guiado pelo tubo. Este estudo fundamentou a extração de requisitos essenciais para a síntese numérica e fases subsequentes do projeto, baseando-se nos equipamentos existentes no mercado e academia.
2. **Identificação das características estruturais e de projeto:** Em relação aos mecanismos encontrados no estado da arte, além de buscar características estruturais, o objetivo aqui também foi identificar outros requisitos que pudessem ser úteis na filtragem dos mecanismos candidatos (grafos).
3. **Determinação dos requisitos estruturais e de projeto:** A partir da observação das características identificadas nos mecanismos do estado da arte e visando a inovação com mecanismos de cadeia fechada os requisitos de projeto foram delimitados e são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1- Requisitos de projeto.

Sigla	Requisito
DR1	Deve haver apenas um atuador, mobilidade é igual a 1
DR2	O mecanismo atuará no plano, espaço de trabalho igual a 3
DR3	Devem haver duas “garras” para abraçar o tubo
DR4	O movimento de entrada deve ser transmitido para as duas garras
DR5	O mecanismo de transmissão do movimento deve ser feito por um par de engrenagens
DR6	A cadeia cinemática deve ser simétrica considerando o elo de referência e as duas garras

Fonte: Os autores.

4. **Definição dos requisitos estruturais:** Estes requisitos são os parâmetros de entrada para as etapas iniciais da geração das cadeias cinemáticas candidatas a serem o mecanismo. Os requisitos SR1 e SR2 são consequência de DR1 e DR2, respectivamente. SR3 foi definido visando mecanismos que atendessem aos demais requisitos de projeto, e, também que sejam inovativos, ou seja, fora de proteções patentárias. A Tabela 1 apresenta os requisitos estruturais.

Tabela 1 - Requisitos estruturais.

Sigla	Requisito
SR1	Mobilidade (M) = 1
SR2	Espaço de trabalho planar (λ) = 3
SR3	Número de circuitos (v) = 3

Fonte: Os autores.

5. **Gerar todos os mecanismos possíveis:** A geração dos grafos foi realizada utilizando o Gerador Nauty (Mckay e Piperno, 2014), dentro do ambiente SageMath. Esta ferramenta é responsável por gerar todos os arranjos possíveis de elos e juntas, chamados de variações. Estes arranjos, ou cadeias cinemáticas, podem ser representados de diversas maneiras, sendo a forma mais comum pela representação visual de grafos não direcionados. Os parâmetros necessários para a utilização da ferramenta são o número de elos e o número de juntas. Partindo dos requisitos estruturais definidos, duas equações são utilizadas para determinar tais parâmetros. A primeira é a equação de mobilidade para pares expandidos (eq. 1), onde M representa a mobilidade, λ a dimensão do espaço de trabalho, n o número de elos e j o número de juntas. A segunda equação utilizada é a equação de Euler (eq. 2), sendo v o número de circuitos. Além do número de elos e juntas, que são dados de entrada essenciais, o gerador possui outros parâmetros opcionais. Dois desses parâmetros foram empregados como filtros: o primeiro para gerar apenas grafos bi-conectados (-C), e o segundo para gerar grafos sem triângulos (-t). O gerador produziu inicialmente 19 grafos, que foram posteriormente reduzidos a 16 após a exclusão daqueles que continham cadeias de Baranov, através das contribuições de (Morlin, 2021).

$$M = \lambda(n - j - 1) + j \quad (1)$$

$$v - 1 = j - n \quad (2)$$

6. **Avaliar e eliminar os mecanismos inviáveis:** Através de algoritmos que levam em consideração conceitos de teoria de grafo e grupos, tais como vizinhos, grau e órbitas, os requisitos DR3, DR5 e DR6 foram avaliados nos grafos resultantes. Aqueles que não atendem os requisitos impostos foram eliminados do conjunto. Aqui também se definem as inversões possíveis, onde se avalia, em cada variação, os elos que podem ser a referência.

7. **Selecionar o tipo de pares cinemáticos (síntese do tipo):** Este estudo visa demonstrar as potencialidades da síntese de mecanismos, através de grafos com ênfase na abordagem numérica, em detrimento de uma solução integralmente desenvolvida. Entretanto, para elucidar o processo de transformação das cadeias cinemáticas no mecanismo aplicado, selecionou-se uma cadeia, detalhando-se melhor sua configuração funcional.

As demais etapas são descritas pelo autor supracitado, bem como um detalhamento maior das etapas trazidas neste trabalho.

Resultados e Discussão

A síntese do número gerou 16 cadeias cinemáticas viáveis, representando o conjunto de cadeias não degeneradas que satisfazem os requisitos estruturais iniciais. Para validar essas cadeias quanto aos mecanismos de ancoragem, faz-se necessária uma avaliação criteriosa dos requisitos de projeto previamente estabelecidos. As cadeias resultantes distribuem-se em três partições distintas: [4, 4], [5, 2, 1] e [6, 0, 2]. A Tabela 2 apresenta a representação dos grafos obtidos para cada partição em formato graph6 (Mckay e Piperno, 2014). Sendo esta, uma representação codificada, compacta e eficiente de grafos não direcionados que utiliza caracteres ASCII, capaz de representar a estrutura de um grafo de forma textual e concisa.

Tabela 2 - Grafos gerados distribuídos em suas partições.

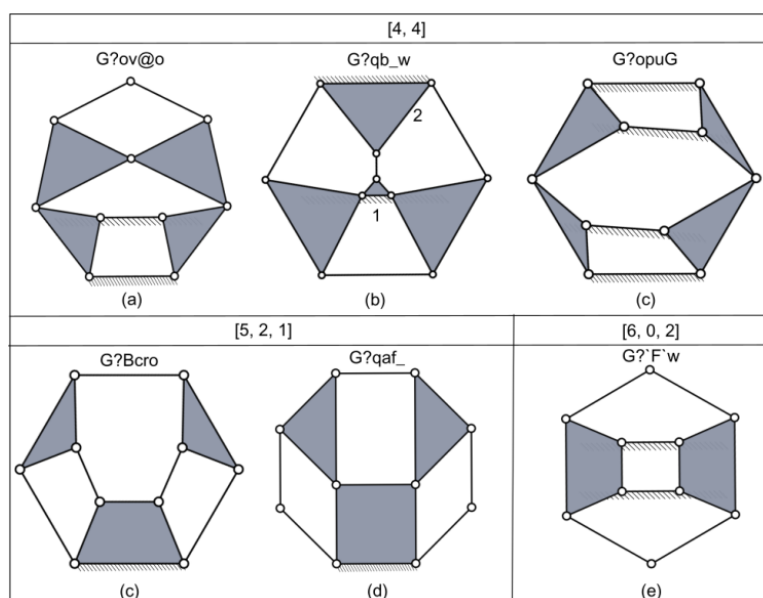
Partição	Variações (graph6)	Nº de variações
[4, 4]	G?qbe_ / G?qb_w / G?q`qg / G?ovD_ / G?ov@o / G?opuG / GCQbdO / GCQb`o / GCp`f?	9
[5, 2, 1]	G?Bcro / G?bB`w / G?`ebo / G?`cjo / G?qaf_	5
[6, 0, 2]	G?`F`w / GCOF?{	2

Fonte: Os autores.

Todas as cadeias cinemáticas nas diferentes partições foram submetidas a uma avaliação, considerando os requisitos estabelecidos por DR3, DR4, DR5 e DR6, que refletem características específicas nas estruturas cinemáticas. Após a aplicação destes critérios de filtragem, o conjunto resultante compreende 3 grafos da partição [4, 4], 2 grafos da partição [5, 2, 1] e 1 grafo da partição [6, 0, 2]. A Figura 1 ilustra a representação estrutural dos grafos para cada partição, destacando os possíveis elos de referência através de hachuras. Adicionalmente, apresenta-se a codificação correspondente de cada grafo no formato graph6. Estes grafos se apresentam como a estrutura cinemática dos mecanismos que satisfazem os requisitos de projeto e funcionais, podendo seguir no processo de síntese para se tornar o dispositivo de ancoragem.

Analisando a Figura 1, observa-se que na partição [4, 4], o grafo (a) gera apenas uma configuração única, apesar de dois potenciais elos de referência, devido ao isomorfismo. O grafo (b) permite duas inversões válidas, enquanto o grafo (c), embora com potencial para quatro mecanismos, resulta em apenas um distinto devido ao isomorfismo. Na partição [5, 2, 1], cada grafo gera uma única inversão viável, limitada pela presença de um par de engrenagens como único elo binário. O grafo da partição [6, 0, 2] apresenta duas inversões potenciais, mas isomórficas, resultando em um único mecanismo distinto.

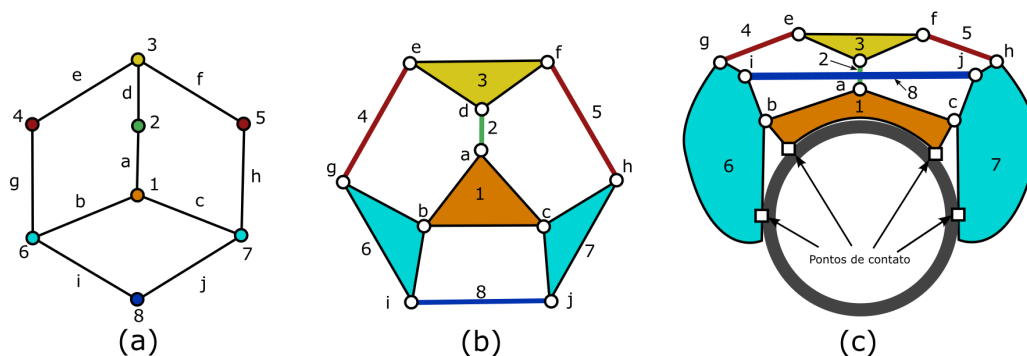
Figura 1 - Representação estrutural dos grafos restante e suas inversões



Fonte: Os autores

Para demonstrar a aplicabilidade na fixação de tubos, selecionou-se e detalhou-se melhor a inversão da segunda variação da partição [4, 4], com o elo 1 como referência (Fig. 1 (b)). A Figura 2 ilustra: (a) o grafo com elos e juntas nomeados, (b) a representação estrutural e (c) a representação funcional, evidenciando as relações entre estas. Na Figura 2(c), é possível enxergar uma representação de como o mecanismo se dispõe ao redor do tubo, fixando-se no mesmo através dos pontos de contato, que, na prática, são substituídos por elementos de locomoção. A expansão do par cinemático da engrenagem adiciona duas juntas e um corpo ao sistema. Na prática, as engrenagens são rigidamente ligadas aos elos 6 e 7, com o contato entre eles formando uma junta contraída. Para representar a expansão e os dois graus de liberdade adicionados, o par de engrenagens é representado por um elo distinto (8) e duas juntas (i e j).

Figura 2 - Representação funcional de um dos mecanismos de fixação



Fonte: Os autores

Conclusões

A metodologia empregada demonstrou-se eficaz na geração de possibilidades para novos mecanismos de ancoragem. Os resultados obtidos são uma etapa inicial no desenvolvimento do mecanismo de um produto complexo para a inspeção externa de tubulações *riser*. Os parâmetros de entrada e requisitos de projeto resultaram em estruturas promissoras com quatro pontos de contato, adequadas para aplicações como rodas omnidirecionais ou mecanum. Entretanto, a síntese do mecanismo foi realizada considerando o mecanismo isolado, sem contar a tubulação como um elemento da cadeia cinemática, como na Figura 2(c). Como trabalhos futuros, espera-se estudar outros mecanismos requisitos estruturais e de projeto diferentes dos levantados neste trabalho, a fim de otimizar a topologia através de simulações e comparações. Adicionalmente, a síntese também será feita utilizando técnicas e filtros que resultem apenas em mecanismos com mobilidade 0, quando o mecanismo entre em contato com o *riser*. Por fim, para os mecanismos mais promissores realizar as sínteses de tipo e dimensional, prototipagem e testes de campo, essenciais para a validação e otimização dos mecanismos propostos visando implementação em operações offshore

Agradecimentos

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

Referências Bibliográficas

- CHATZAKOS, P.; MARKOPOULOS, Y. P.; HRISSAGIS, K.; KHALID, A. On the development of a modular external-pipe crawling omni-directional mobile robot. **Industrial Robot: An International Journal**, v. 33, n. 4, p. 291-297, 2006.
- CAMERINI, C., FREITAS, M., LANGER, R. A., VON DER WEID, J. P., & MARNET, R. (2010). Autonomous underwater riser inspection tool. Proceedings of the 8th International Pipeline Conference, IPC2010-31485. Calgary, Alberta, Canada.
- DING, H; YANG, W; KECSKEMÉTHY, A. Automatic Structural Synthesis and Creative Design of Mechanisms. **Springer Tracts in Mechanical Engineering**. Singapore: Springer, 2022.
- HARTENBERG, R. S.; DENAVIT, J. **Kinematic Synthesis of Linkages**. New York: McGraw-Hill, 1964.
- KONG, X, & GOSSELIN, CM. Mobility Analysis of Parallel Mechanisms Based on Screw Theory and the Concept of Equivalent Serial Kinematic Chain. **Proceedings of the ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference**. Volume 7: 29th Mechanisms and Robotics Conference, Parts A and B. Long Beach, California, USA. Setembro 24–28, 2005. pp. 911-920. ASME. <https://doi.org/10.1115/DETC2005-85337>
- mCKAY, B. D.; PIPERNO, A. Practical graph isomorphism, II. **Journal of Symbolic Computation**, v. 60, p. 94–112, 2014. ISSN 0747-7171.
- MURAI, E. H. **Number synthesis methods for mechanism design: an alternative approach**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- MURAI, E. H. **Projeto de mecanismos de costura com acesso unilateral usando síntese do número e do tipo**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- SANTOS, M. F. et al. Development of an underwater riser inspection robot. **Industrial Robot**, v. 40, n. 4, p. 402–411, 2013.
- SILVA, E. S. da; SOUZA, G. V.; EXEL, G. P.; RINCON, L. M.; MARTINS, D. Development of a New Functional and Discrete Finger Prosthesis. In: BRAZILIAN SOCIETY OF MECHANICAL SCIENCES and ENGINEERING. 27TH ABCM International Congress of Mechanical Engineering. **Anais [...]** Florianópolis-SC, Brazil, 2023.
- SILVA, L. C. da; JESUS, L. da S. de; BARBOSA, L. A.; BORGES, I. S.; LIMA, C. S. C.; RUSSO, J. D. R.; CERQUEIRA, R. G. JIRO: joint inspection robot. In: Rio Oil & Gas Expo and Conference 2020. **Anais [...]** Rio de Janeiro: Brazilian Petroleum, Gas and Biofuels Institute - IBP, 2020.
- SOUZA, G. V.; ADAMI, L. G.; SILVA, E. S. da; MARTINS, D. Synthesis of a New Clamping Mechanism Design for Agricultural Harvest. In: BRAZILIAN SOCIETY OF MECHANICAL SCIENCES and ENGINEERING. 27TH ABCM International Congress of Mechanical Engineering. **Anais [...]** Florianópolis-SC, Brazil, 2023.
- TSAI, L.W. **Mechanism Design: Enumeration of Kinematic Structures According to Function**. CRC Press, 2000. (Mechanical and Aerospace Engineering Series). ISBN 9781420058420.
- YAN, H.-S. **Creative design of mechanical devices**. Singapore: Springer, 1999.