

METAMODELAGEM ADAPTATIVA PARA OTIMIZAÇÃO DO ESCOAMENTO DE PETRÓLEO EM DUTOS: UMA ABORDAGEM BASEADA EM SIMULAÇÃO E ALGORITMOS DE APRENDIZADO DE MÁQUINA.

Bruno Caluz Pechtel Galbiati – brunocpgalbiati@gmail.com

Palavras-chave: Metamodelagem adaptativa, Otimização computacional, Simulação a eventos discretos, Aprendizado de máquina, escoamento de petróleo em dutos.

1. INTRODUÇÃO

O transporte de petróleo em dutos é um processo crítico que envolve um conjunto de variáveis interdependentes, como pressão, temperatura, viscosidade e velocidade de escoamento. Essas condições determinam a eficiência e a segurança operacional do sistema, que, em larga escala, representam custos expressivos para a indústria. Em função da alta complexidade dos modelos de simulação tradicionalmente utilizados, observa-se um desafio recorrente: a relação inversamente proporcional entre a precisão dos modelos e o tempo de processamento computacional.

Nesse contexto, surge a metamodelagem adaptativa, metodologia que busca criar modelos substitutos (metamodelos) capazes de reproduzir comportamentos complexos com menor custo computacional. Essa abordagem possibilita otimizar a tomada de decisões e ampliar a capacidade de análise em tempo quase real. A proposta deste trabalho é desenvolver um modelo de metamodelagem adaptativa aplicado ao escoamento de petróleo em dutos, aliando simulação a eventos discretos (SED) a técnicas de aprendizado de máquina, com foco na otimização operacional e no uso eficiente de recursos computacionais.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO E RELEVÂNCIA DO TEMA

A crescente demanda global por energia e a pressão sobre a sustentabilidade das operações tornam o transporte eficiente de petróleo um objetivo estratégico. Os sistemas de dutos precisam operar sob condições dinâmicas e não lineares, exigindo modelos que integrem variáveis físicas, químicas e ambientais. Simulações diretas, baseadas em fluidodinâmica computacional (CFD), têm alto custo e baixo desempenho em aplicações de otimização em tempo real.

A metamodelagem adaptativa representa uma evolução no campo da otimização de processos industriais. Seu uso reduz significativamente o tempo de execução das simulações, mantendo alto nível de precisão. Estudos recentes, como os de Amaral et al. (2023), demonstram seu potencial na alocação de recursos na manufatura, apontando para sua aplicabilidade em outros sistemas complexos. Adaptar esses princípios para o transporte de petróleo é uma oportunidade de avanço científico e tecnológico, com impacto direto sobre a produtividade e a sustentabilidade do setor.

3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E LACUNAS DE PESQUISA

O principal desafio é representar de forma precisa e eficiente o comportamento do escoamento de petróleo em dutos sob condições variáveis e incertas. A falta de modelos adaptativos capazes de atualizar-se continuamente a partir de novos dados limita o uso da simulação em tempo real. Ademais, os modelos tradicionais não exploram o potencial das funções de aquisição, como o Balanced Expected Improvement (BEI), que equilibram exploração e exploração de soluções otimizadas.

Portanto, a lacuna científica a ser enfrentada é o desenvolvimento de um metamodelo adaptativo incremental, integrado a um sistema de simulação e aprendizado de máquina, que reduza custos e mantenha a acurácia em ambientes complexos e não estacionários.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral:

Desenvolver e aplicar um modelo de metamodelagem adaptativa para otimização do escoamento de petróleo em dutos, combinando SED e aprendizado de máquina, com foco em eficiência computacional e precisão preditiva.

4.2 Objetivos Específicos:

- Adaptar técnicas de simulação e metamodelagem para o contexto de transporte de petróleo.
- Comparar o desempenho de diferentes metamodelos (Kriging, Regressão Polinomial e GBT).
- Implementar um algoritmo de otimização incremental baseado na função BEI.
- Validar o modelo em cenários experimentais com variáveis ambientais e operacionais distintas.

5. REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico deste estudo baseia-se em quatro eixos de análise integrados que sustentam a base conceitual e metodológica da pesquisa. O primeiro eixo trata da metamodelagem e otimização em simulação, abordando métodos como Kriging, Regressão Polinomial e Gradient-Boosted Trees (GBT). Esses modelos representam sistemas complexos de forma simplificada e com alta capacidade de generalização, reduzindo consideravelmente o custo computacional. Conforme Wang e Ierapetritou (2017), abordagens baseadas em metamodelos são alternativas eficientes à simulação direta de processos industriais complexos, especialmente em contextos nos quais a relação entre variáveis é não linear e o tempo de execução constitui restrição crítica.

O segundo eixo aborda a aplicação da metamodelagem em processos industriais, com estudos de caso que demonstram sua eficácia em ambientes produtivos e sistemas de manufatura. Amaral et al. (2023) destacam que a metamodelagem adaptativa pode reduzir o tempo de convergência e aumentar a precisão na alocação de recursos. A literatura indica que essa técnica é

especialmente útil quando a coleta de dados experimentais é custosa ou limitada — característica presente também no transporte de petróleo em dutos.

O terceiro eixo analisa as estratégias de otimização incremental, como o Design of Experiments (DoE) e o infill-search, que permitem a seleção criteriosa de novos pontos para aprimorar o modelo e otimizar a exploração do espaço de soluções. Essa abordagem é essencial para modelos adaptativos, equilibrando a busca por novas possibilidades e o refinamento de regiões promissoras. O uso da função Balanced Expected Improvement (BEI) exemplifica essa sinergia entre precisão e eficiência.

Por fim, o quarto eixo discute a aplicabilidade da metamodelagem no setor de petróleo, ressaltando avanços e desafios. Souza e Lima (2023) e Pereira e Santos (2022) destacam as dificuldades de modelagem de fluidos não newtonianos e as variações ambientais que influenciam o desempenho dos dutos. A incorporação de técnicas de metamodelagem adaptativa nesse cenário representa uma oportunidade de aprimorar a previsibilidade e a eficiência dos sistemas, reduzindo custos e riscos operacionais. Assim, o referencial teórico estabelece as bases para a construção de um modelo híbrido que integra simulação, aprendizado de máquina e otimização incremental, consolidando um novo paradigma de gestão e análise de sistemas complexos.

6. METODOLOGIA

A pesquisa adotará o método quantitativo por meio de estudo de caso experimental. O processo metodológico será dividido em seis etapas:

1. Revisão Bibliográfica: Sistematização de conceitos e identificação de lacunas.
2. Coleta e Processamento de Dados: Utilização de dados de pressão, vazão e temperatura para o treinamento inicial dos modelos.
3. Desenvolvimento do Metamodelo: Implementação de DoE e BEI, com atualizações incrementais.
4. Validação: Testes de precisão em cenários diversos (laminar, turbulento e multifásico).

5. Otimização e Análise: Ajuste fino de parâmetros e comparação com benchmarks.
6. Redação e Revisão: Consolidação de resultados e elaboração da dissertação.

7. CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS

As contribuições deste estudo abrangem quatro dimensões: científica, tecnológica, econômica e social. No campo científico, propõe-se um avanço relevante ao desenvolver um framework replicável de metamodelagem adaptativa para sistemas industriais complexos, especialmente no setor de petróleo, onde a modelagem de fluidos não newtonianos ainda apresenta limitações. Espera-se consolidar um novo paradigma de simulação com atualização incremental e aprendizado contínuo.

Sob o ponto de vista tecnológico, o projeto possibilitará um modelo de otimização em tempo quase real, reduzindo significativamente o tempo de processamento e permitindo o uso de técnicas avançadas de aprendizado de máquina em ambientes industriais dinâmicos. Essa inovação impactará diretamente a confiabilidade e a eficiência energética dos sistemas de transporte de petróleo.

Na dimensão econômica, a adoção de metamodelos adaptativos poderá reduzir perdas e custos operacionais, ampliando a capacidade preditiva das empresas diante de variações de mercado e condições operacionais. Essa melhoria na gestão de recursos e desempenho fortalecerá a competitividade e o uso racional das infraestruturas existentes.

Por fim, as contribuições sociais e ambientais decorrem do fortalecimento da sustentabilidade industrial. A maior precisão na previsão de falhas e no controle de variáveis críticas reduzirá riscos de acidentes e impactos ambientais, promovendo práticas mais seguras. O projeto também fomentará a formação de profissionais com competências interdisciplinares, integrando engenharia de produção, ciência de dados e tecnologia, e estimulando a inovação científica nacional.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metamodelagem adaptativa aplicada ao escoamento de petróleo representa uma inovação de alto potencial na engenharia de produção. O desenvolvimento de modelos capazes de aprender continuamente e ajustar-se a condições variáveis possibilita um novo padrão de eficiência e segurança. O presente projeto, portanto, não apenas propõe uma solução técnica robusta, mas também contribui para a transição do setor de petróleo para paradigmas mais sustentáveis, inteligentes e integrados à indústria 4.0.

10. REFERÊNCIAS

- Amaral, J. V. S., et al. (2023). *Metamodelagem adaptativa para otimização via simulação a eventos discretos*. Anais do Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.
- Wang, Z., & Ierapetritou, M. (2017). *Surrogate-Based Optimization Method for Black-Box Simulation*. Industrial and Engineering Chemistry Research.
- Parnianifard, A., et al. (2019). *Metamodeling and Optimization in Complex Industrial Processes*. Decision Science Letters.
- Machado, E. (2023). *Aplicação de Técnicas de Metamodelagem na Engenharia de Petróleo*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Souza, A., e Lima, J. (2023). *Metamodelagem aplicada a escoamento de petróleo em dutos*.
- Instituto de Geociências (2022). *Estudo sobre técnicas de otimização em sistemas de transporte de petróleo*.
- Oliveira, J., e Pereira, C. (2022). *Modelagem de Metamodelos em Processos de Engenharia*. Revista de Produção, 29(4), 789-803.
- Pereira, R., & Santos, M. (2022). *Desafios e avanços na aplicação de metamodelagem para fluidos não-newtonianos*. Engenharia de Processos, 45(3), 345-360.
- Garcia, L., & Rocha, V. (2021). *Métodos avançados de metamodelagem para simulação em sistemas de transporte*. Revista de Modelagem Computacional, 12(2), 98-113.