Pré-textuais

* Capa (instituição, curso, título, autor, local e ano)
* Folha de rosto

Resumo   
A pesquisa aborda a perfuração de poços de petróleo, etapa estratégica da indústria marcada por altos custos e impactos ambientais significativos, sobretudo pela queima de diesel nas sondas e pelo uso intensivo de fluidos de perfuração. O problema central consiste em reduzir simultaneamente custos e emissões de CO₂, sem comprometer a eficiência e a segurança operacional. O estudo tem como objetivo principal desenvolver metodologias que aumentem a eficiência da perfuração, identificando variáveis-chave como taxa de penetração, tempo de operação, custos e emissões, além de propor soluções tecnológicas e operacionais que reduzam o tempo de execução. A relevância acadêmica está na aplicação de modelos estatísticos e benchmarks inovadores; socialmente, a pesquisa contribui para a mitigação das mudanças climáticas; e, industrialmente, promove redução de custos, antecipação da produção e possibilidade de créditos de carbono. Em síntese, busca-se integrar eficiência econômica, sustentabilidade e inovação tecnológica na perfuração de poços de petróleo.

Palavras chaves : Perfuração de poços de petróleo; Eficiência operacional; Impacto ambiental; Emissões de CO₂; Custos de perfuração; Benchmarks estatísticos; Sustentabilidade na indústria do petróleo

Abstract (em inglês, keywords)

The research addresses oil well drilling, a strategic stage of the industry marked by high costs and significant environmental impacts, mainly due to diesel consumption on drilling rigs and the intensive use of drilling fluids. The central challenge is to simultaneously reduce costs and CO₂ emissions without compromising operational efficiency and safety. The main objective of the study is to develop methodologies that enhance drilling efficiency by identifying key variables such as rate of penetration, operating time, costs, and emissions, as well as proposing technological and operational solutions to reduce execution time. The academic relevance lies in the application of innovative statistical models and benchmarks; socially, the research contributes to climate change mitigation; and industrially, it promotes cost reduction, earlier production startup, and the possibility of carbon credits. In summary, the study seeks to integrate economic efficiency, sustainability, and technological innovation in oil well drilling.

* Lista de figuras
* Lista de tabelas (se houver)
* Sumário

**1 Introdução**

A perfuração de poços de petróleo representa uma etapa crítica e estratégica na indústria de óleo e gás, caracterizada por sua alta complexidade e custos operacionais substanciais. Historicamente, essa fase da exploração tem sido intensiva em recursos e em consumo de energia, principalmente pela utilização de geradores a diesel para o funcionamento das sondas. O dilema contemporâneo reside na necessidade de conciliar os imperativos econômicos, que exigem a redução de custos, com a urgência de mitigar os impactos ambientais, em particular a emissão de dióxido de carbono (CO2​) e outros gases de efeito estufa.

No contexto acadêmico, a análise desse desafio permite uma discussão aprofundada sobre como a indústria tem evoluído. O tema central abordado neste trabalho, inspirado por uma apresentação acadêmica recente, explora a interconexão entre eficiência operacional e sustentabilidade. A partir de conceitos como a taxa de penetração (ROP) e a otimização do tempo, este estudo discorre sobre a relevância de se utilizar metodologias estatísticas, como a análise de benchmarks, para compreender os fatores que influenciam o desempenho da perfuração. O objetivo é apresentar uma visão abrangente de como a otimização de processos pode se traduzir em benefícios financeiros e ambientais tangíveis, sem a necessidade de grandes mudanças estruturais na operação.

A relevância deste trabalho, portanto, reside em seu papel como uma reflexão aprofundada sobre um tema vital para o futuro do setor. A partir da nossa experiência como estudantes e da análise de dados e conceitos já existentes, este documento busca explorar como a eficiência operacional pode ser uma ferramenta direta para a mitigação dos impactos ambientais e para a redução de custos, provando que a responsabilidade socioambiental é, também, um vetor de inovação e competitividade. Em síntese, este estudo visa aprofundar a discussão sobre a viabilidade de uma perfuração mais eficiente e sustentável.

**2. Revisão de Literatura**

A discussão sobre a otimização da perfuração de poços de petróleo, como um vetor de sustentabilidade e eficiência, baseia-se em um corpo de conhecimento técnico e econômico já estabelecido na indústria e na academia. A Revisão de Literatura tem como propósito explorar os fundamentos que sustentam a ideia de que a eficiência operacional é uma resposta direta e prática aos desafios ambientais e econômicos do setor.

**2.1 Impactos ambientais e o consumo de energia**

O processo de perfuração de poços, apesar de sua importância estratégica, está intrinsecamente ligado a uma série de impactos ambientais significativos. A principal preocupação reside no alto consumo de energia, uma vez que as sondas de perfuração, especialmente em locações remotas, dependem majoritariamente de geradores a diesel para suprir sua demanda elétrica. A queima desse combustível fóssil é uma das principais fontes de emissões de dióxido de carbono (CO2​) e outros gases de efeito estufa (GEE), contribuindo diretamente para o aquecimento global. De acordo com um estudo do IBAMA (2009), a geração de emissões atmosféricas é um dos aspectos que necessitam de avaliação rigorosa nos empreendimentos de exploração e produção de petróleo e gás. Além das emissões, outro ponto de grande relevância é o uso intensivo de água e fluidos de perfuração. Esses materiais são essenciais para lubrificar as brocas, transportar os cascalhos para a superfície e manter a estabilidade do poço. A gestão inadequada desses fluidos, com a perda para as formações rochosas ou a necessidade de descarte complexo, representa um desafio ambiental, que pode ser minimizado com processos mais eficientes. Segundo a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Dantas, 2014), os resíduos sólidos gerados na perfuração são considerados poluentes devido à presença de aditivos químicos nocivos, e a busca por formas de reutilização, como a incorporação em cimentos, é uma alternativa para mitigar esse impacto.

**2.2 Eficiência energética e operacional**

Nesse contexto, a eficiência operacional emerge não apenas como um objetivo econômico, mas como um imperativo para a sustentabilidade. A otimização do processo de perfuração busca, fundamentalmente, a redução do tempo de operação, que é um fator-chave para a diminuição de custos e impactos ambientais. O principal indicador dessa eficiência é a taxa de penetração (ROP), que mede a velocidade com que a broca perfura a rocha. Uma ROP mais alta significa que o poço pode ser concluído mais rapidamente, o que, por sua vez, resulta em menor consumo de diesel, menor necessidade de horas-máquina e, consequentemente, uma redução significativa das emissões e dos custos. Um estudo da Universidade Federal Fluminense (Rodrigues, 2023) reforça essa ideia, ao mencionar que, para minimizar o tempo de perfuração, é crucial manipular os diversos parâmetros de perfuração para maximizar a ROP. A otimização do tempo, portanto, é um dos caminhos mais diretos e eficazes para que a indústria do petróleo cumpra suas metas de redução de emissões sem comprometer a produção (Tessari, 2022).

**2.3 Experiências e metodologias anteriores**

A busca por eficiência na perfuração não é um tema novo, mas as abordagens têm evoluído. Estudos anteriores frequentemente se baseavam em comparações empíricas ou em médias de desempenho para avaliar a eficiência de uma operação. No entanto, uma abordagem mais moderna, como a discutida na palestra, utiliza estudos estatísticos e econômicos aplicados à perfuração. Essa metodologia se concentra na análise de dados históricos para a criação de benchmarks, que são referências estatísticas do melhor desempenho já alcançado. Essa abordagem é considerada superior, pois se baseia em evidências quantitativas para identificar as práticas mais eficientes, em vez de depender apenas da experiência individual ou de médias que podem mascarar ineficiências (Accioly & Santos, 2018). Um trabalho de conclusão de curso da UFRJ (Candol & Corrêa, 2012) apresenta uma análise estatística do custo métrico de perfuração, utilizando modelos de regressão para entender a relação entre o custo e diversas variáveis operacionais. Essa abordagem demonstra o potencial dos modelos estatísticos para aprimorar o desempenho, permitindo a identificação de variáveis-chave e a previsão de resultados para projetos futuros. O uso de análises de regressão e a criação de curvas de desempenho são exemplos de ferramentas que permitem entender a correlação entre as variáveis e criar uma base de dados sólida para a tomada de decisões, demonstrando o potencial da otimização para todos os poços de um determinado campo.

**3. Aplicações e Ferramentas para a Otimização**

A transição dos conceitos teóricos para a prática da otimização na perfuração é mediada pela aplicação de ferramentas e metodologias que transformam dados brutos em inteligência acionável. A discussão sobre a eficiência, portanto, se aprofunda na compreensão de como a indústria pode não apenas mensurar, mas também aprimorar continuamente o seu desempenho.

**3.1 O Benchmarking Estatístico como Padrão de Eficiência**

O conceito de benchmarking estatístico se distancia das médias simples e se concentra na identificação dos "melhores resultados já alcançados" para uma determinada fase de perfuração. Por exemplo, em um campo maduro com dezenas de poços perfurados, a análise de dados históricos permite que a equipe de engenharia identifique os parâmetros operacionais que levaram ao menor tempo de perfuração. Esse conjunto de melhores práticas, que pode incluir a rotação ideal da broca (RPM) ou o peso sobre a broca (WOB), se torna o benchmark. Estudos como o de Accioly & Santos (2018), publicados na Revista Técnica da Universidade Petrobras, mostram como essa metodologia é aplicada para identificar os operadores e poços mais competitivos, revelando que os melhores resultados podem superar a média da indústria em até 14%.

**3.2 KPIs e a Análise da Otimização**

A partir desse padrão de excelência, a análise se concentra na identificação e mensuração de Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs). O mais relevante deles é a taxa de penetração (ROP), que é o principal motor do tempo de operação. A ROP pode ser calculada por meio de modelos empíricos ou de regressão, sendo uma função de diversos fatores operacionais. A interdependência entre os fatores é crucial: um aumento na ROP resulta em menor tempo de perfuração, o que, por sua vez, reduz o custo com aluguel da sonda e, consequentemente, diminui o consumo de diesel e as emissões de GEE.

Um exemplo prático e didático pode ser a análise do custo por metro perfurado (Cm​), que pode ser expresso pela equação:

Cm​=Cd​+(Cr​×Tf​)/M

Essa simples fórmula ilustra de forma concreta como a redução do tempo de perfuração (Tf​), impulsionada por uma maior ROP, diminui diretamente o custo total, tornando a operação mais competitiva. Além do custo, a redução de tempo em uma única operação de perfuração pode levar a uma mitigação significativa de emissões.

**Referências**

**IBAMA. (2009). Nota Técnica CGPEG/IBAMA nº 05/09. Disponível em:** [**https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/procedimentos-e-servicos/arquivos/petroleo-e-gas/notas-tecnicas/2009-05-NT-cgpeg-ibama-aia-perfuracao-em-aguas-profundas.pdf**](https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/procedimentos-e-servicos/arquivos/petroleo-e-gas/notas-tecnicas/2009-05-NT-cgpeg-ibama-aia-perfuracao-em-aguas-profundas.pdf)

**Dantas, R. P. P. (2014). Estudo da incorporação de resíduos de perfuração para aplicação em cimentação de poços de petróleo. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em:** [**https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/19675**](https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/19675)

**Rodrigues, T. K. A. (2023). Otimização da taxa de penetração na perfuração de poços de petróleo utilizando sistemas inteligentes. Universidade Federal Fluminense. Disponível em:** [**https://app.uff.br/riuff/handle/1/12475**](https://app.uff.br/riuff/handle/1/12475)

**Tessari, R. K. C. (2022). Projeto Ótimo de Poços de Petróleo, Baseado em Confiabilidade. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. Disponível em:** [**https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-08022022-110952/publico/TeseTessariRodolfoKrulCorrig.pdf**](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-08022022-110952/publico/TeseTessariRodolfoKrulCorrig.pdf)

**Accioly, R. M. S., & Santos, R. O. V. (2018). Análise estatística do custo métrico de perfuração de poços de petróleo. Revista Técnica da Universidade Petrobras. Disponível em:** [**https://rtup.petrobras.com.br/rtup/article/download/48/59/105**](https://rtup.petrobras.com.br/rtup/article/download/48/59/105)

**Candol, F. S., & Corrêa, L. L. B. (2012). Análise estatística do custo métrico de perfuração de poços de petróleo. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em:** [**https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/8155/1/monopoli10004036.pdf**](https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/8155/1/monopoli10004036.pdf)

*NOTA EDITORIAL (não imprimir): Seções a seguir foram mescladas/geradas para ABNT. Revise a numeração das seções anteriores se desejar substituir o conteúdo original.*

# 2 Desenvolvimento

## 2.1 Por que otimizar (visão geral)

A perfuração é intensiva em tempo e energia; reduzir tempo de sonda diminui custos e emissões. O pano de fundo permanece didático: decisões orientadas por métrica reduzem horas operacionais e, consequentemente, o consumo de diesel e as emissões de CO₂.

## 2.2 Métrica simples para decidir: custo por metro (CM)

Para comparar alternativas de forma objetiva, usa-se uma métrica única: custo por metro (CM). No nível introdutório, considere que o custo direto e, sobretudo, o tempo de operação compõem o CM. Mesmo que uma tecnologia seja mais cara, se economiza tempo, o CM tende a cair — e o CO₂ também, pois o emissor real é o relógio rodando a bordo.

Intuição-chave: tempo pesa mais do que o preço de ferramenta; decisões devem visar a redução do tempo total do trecho.

## 2.3 Do “olhômetro” ao benchmark: a “curva do Dalmo/Amorim”

Resultados isolados ou médias podem mascarar ineficiências. Em vez disso, adota-se um benchmark dinâmico do próprio campo — a 'curva do Dalmo/Amorim' — que representa a tendência do CM em função da profundidade e se atualiza à medida que novas execuções entram. Com esse benchmark é possível comparar tecnologias, visualizar aprendizado ao longo do tempo, auditar a seleção de brocas e planejar custos prováveis por trecho/poço.

## 2.4 Medir → comparar → agir (regras práticas)

Operacionalmente, monitora-se o CM acumulado do run. Se o desempenho piora de forma consistente em relação ao melhor valor já obtido, e não há causa geológica clara, interrompe-se para evitar que o trecho encareça. A curva/benchmark ajuda a distinguir desvios momentâneos de deterioração real, sustentando decisões diárias de troca e planejamento. O objetivo não é perseguir recordes isolados, mas puxar o conjunto para a 'nuvem' de bons resultados.

## 2.5 KPIs que importam (e a ponte para CO₂)

Entre os indicadores, a taxa de penetração (ROP) influencia diretamente o tempo. Melhor ROP tende a reduzir horas totais, diminuindo o CM e as emissões. No entanto, a comparação deve ser feita 'igual com igual' (mesmo tipo de trecho e condições).

## 2.6 Limites e cuidados

• Dados completos e confiáveis são essenciais; sem registros padronizados, o benchmark perde poder comparativo.

• Integração entre operação, geologia e perfis melhora a leitura de causa e efeito sobre o CM.

• Formas de contratação (compra, aluguel por metro, turn-key) mudam incentivos e devem ser consideradas na análise.

# 3 Considerações finais

Organizar a decisão em torno de uma métrica simples (CM) e de um benchmark dinâmico ('curva do Dalmo/Amorim') transforma dados em ação. Em linguagem acessível, isso se traduz em três verbos: medir, comparar e agir. Os benefícios são duplos: custo menor e menos CO₂ via economia de tempo. Como próximos passos, recomenda-se padronizar registros, atualizar o benchmark a cada campanha e documentar lições aprendidas, consolidando o processo de melhoria contínua.

# Apêndice A — Exemplos de citação e referência ABNT

## A.1 Citações no texto (NBR 10520)

Paráfrase com autor no texto: Amorim Jr., Costa e Santos (2024) argumentam que a redução do tempo de sonda diminui custos e emissões.

Paráfrase com autor entre parênteses: (AMORIM JR.; COSTA; SANTOS, 2024).

Citação direta curta: “Texto citado até três linhas...” (AMORIM JR.; COSTA; SANTOS, 2024, p. xx).

## A.2 Modelo de referência (NBR 6023)

AMORIM JR., Dalmo S.; COSTA, Hirdan K. M.; SANTOS, Edmilson M. Redução de custos e de emissões de CO₂ na perfuração de petróleo: metodologia e estudo de caso. In: PDPETRO, 12., 2024, Balneário Camboriú. Anais do 12º Congresso Brasileiro de Petróleo e Gás. Rio de Janeiro: Brazilian Journal of Petroleum and Gas, 2024. v. 12. p. xx–xx.