# Análise da Energia Mecânica Específica para Otimização da Taxa de Penetração em Perfurações de Poços

# Specific Mechanical Energy Analysis for Rate of Penetration Optimization in Well Drilling

Marcio de Oliveira[1], Andreas Nascimento[2], João Paulo Reus Rodrigues Leite[3], Laura Pellizari Pereira[4], Caio Miguel Schultz Silva[5], Felipe Queiroz Flores Quintão Bachetti[6]

1 - Doutor em Engenharia Mecânica. Professor do Centro Universitário de Itajuba - Fepi. E-mail.: marcio.oliveira@fepi.edu.br
2 – Doutor em Engenharia Mecânica. Professor da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI. E-mail.: andreas.nascimento@unifei.edu.br
3 – Doutor em Engenharia Elétrica. Professor da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI. E-mail.: joaopaulo@unifei.edu.br
4 - Graduado em Engenharia Eletrônica na UNIFEI. E-mail.: laurapereira@unifei.edu.br
5 - Graduando em Engenharia Eletrônica na UNIFEI. E-mail.: caioschultz@unifei.edu.br
6 - Graduando Engenharia da Computação na UNIFEI. E-mail.: d2021005147@unifei.edu.br

Recebido em: 16/09/2024 Revisado em: 10/07/2025 Aprovado em: 14/07/2025

**Resumo:** A exploração do pré-sal em plataformas offshore é uma atividade de grande importância e alta complexidade. As rochas do pré-sal, na maioria carbonáticas, apresentam desafios para a perfuração devido às suas características mecânicas, que resultam em uma redução da taxa de penetração (ROP) e aumento dos custos operacionais. A perfuração de poços de petróleo e gás nestas regiões demandam elevados investimentos, podendo ultrapassar 1,3 milhões de dólares por dia nas operações de perfuração. A otimização e eficiência operacional são fundamentais, considerando que a perfuração em rochas carbonáticas é lenta, com ROP variando entre 0,5 e 7,5 m/hora. A computação aplicada tem se mostrado uma aliada valiosa na otimização dos parâmetros mecânicos de perfuração, como rotação (RPM), peso sobre a broca (WOB) e vazão (FLOW) reduzindo os custos. Neste trabalho, analisa-se os parâmetros mecânicos registrados durante a perfuração de poços offshore da Noruega, da Austrália, e do pré-sal no Oceano Atlântico Sul, tendo como foco o cálculo da Energia Mecânica Específica (MSE). São gerados gráficos de MSE versus ROP. Estes gráficos permitem avaliar a eficiência das operações e determinar se foram utilizados valores ideais dos parâmetros mecânicos de perfuração. Gráficos de ROP versus WOB e MSE versus ROP para as rotações utilizadas também são criados para estudo. Os resultados através das análises permitiram identificar que, em alguns casos, as operações de perfuração poderiam ter sido otimizadas com ajustes nos parâmetros mecânicos, reduzindo o tempo total de perfuração. Além disso, o uso de métodos de otimização, como algoritmos evolutivos e redes neurais, podem efetivamente contribuir para a melhoria dos resultados.
**Palavras-chave**: Pre-sal. Energia Mecânica Específica. Perfuração de Poços offshore.

**Abstract:** Pre-salt exploration on offshore platforms is an activity of great importance and high complexity. Pre-salt rocks, mostly carbonate, present challenges for drilling due to their mechanical characteristics, which result in a reduction in the rate of penetration (ROP) and increased operating costs. Drilling oil and gas wells in these regions requires high investments, which can exceed 1.3 million dollars per day in drilling operations. Operational optimization and efficiency are essential, considering that drilling in carbonate rocks is slow, with ROP ranging from 0.5 to 7.5 m/hour. Applied computing has proven to be a valuable ally in optimizing mechanical drilling parameters, such as rotation (RPM), weight on bit (WOB) and flow rate (FLOW), reducing costs. In this work, the mechanical parameters recorded during the drilling of offshore wells in Norway, Australia, and the pre-salt layer in the South Atlantic Ocean are analyzed, focusing on the calculation of Specific Mechanical Energy (MSE), focusing on the calculation of Specific Mechanical Energy (MSE). MSE versus ROP graphs are generated. These graphs allow the efficiency of operations to be assessed and determine whether optimal values of drilling mechanical parameters were used. ROP versus WOB and MSE versus ROP graphs for the rotations used are also generated for study. The results of the analyses allowed us to identify that, in some cases, drilling operations could have been optimized by adjusting the mechanical parameters, reducing the total drilling time. In addition, the use of optimization methods, such as evolutionary algorithms and neural networks, can effectively contribute to improving the results.
**Keywords:** Pre-salt. Specific Mechanical Energy. Offshore Well Drilling.

**Introdução**

As operações de perfuração em poços de petróleo, especialmente aquelas realizadas em locais offshore, são importantes devido aos altos custos envolvidos, que podem ultrapassar 1 milhão de dólares por dia (Nascimento, 2019). Numerosos estudos têm sido conduzidos para guiar essas operações, oferecendo diretrizes para a configuração ótima dos parâmetros de perfuração que maximizem a eficiência e minimizem o tempo de perfuração. Além disso, esses estudos fornecem informações valiosas para reduzir o desgaste da broca, adaptando-se à litologia do poço.

O objetivo deste estudo é examinar dados históricos de operações de perfuração em campos de petróleo do pré-sal, onde as condições são complexas e os custos associados são elevados. Será analisado se as operações foram executadas com uma alta taxa de penetração (ROP) enquanto utilizavam a menor energia mecânica específica (MSE) possível. É importante notar que uma maior ROP não necessariamente resulta em menor consumo de energia ou menor desgaste da broca, Nascimento et al (2015).

Os principais parâmetros ajustáveis pelo operador são a rotação (RPM), o peso sobre a broca (WOB) e a vazão (FLOW). No entanto, muitos outros fatores influenciam indiretamente a perfuração, como o diâmetro da broca (BS), o tipo de litologia, o tipo de broca, a pressão e a profundidade dos poços. Além disso, outras situações podem ocorrer durante a operação de perfuração que exigem intervenções, como desgaste da broca, variações nas pressões de fundo de poço, embotamento da broca, vibrações, entre outros (Nascimento, 2019).

O uso de Inteligência Artificial (IA) tem o potencial de otimizar significativamente os parâmetros ajustáveis na perfuração, como rotação (RPM), peso sobre a broca (WOB) e vazão (FLOW), levando a um desempenho mais eficiente e consistente. Ao integrar algoritmos avançados, a IA pode analisar uma vasta quantidade de dados em tempo real, identificando padrões e ajustando automaticamente os parâmetros para alcançar os melhores resultados possíveis. No entanto, a implementação eficaz dessa tecnologia exige um estudo aprofundado e uma coleta rigorosa de dados operacionais em tempo real (Barbosa, 2019). A combinação de expertise técnica e análise de dados é fundamental para garantir que a IA possa adaptar-se às condições variáveis do campo, maximizando a eficiência da perfuração sem comprometer a segurança ou a integridade das operações.

Vários estudos têm sido desenvolvidos, abordando diferentes perspectivas sobre a otimização da perfuração de poços de petróleo e gás, com ênfase em técnicas voltadas para o aumento da taxa de penetração (ROP) e a melhoria da eficiência operacional. Cada trabalho oferece uma abordagem distinta.

Nesta seção são apresentados resumos de

alguns estudos que demonstram o uso das técnicas de previsão e otimização da perfuração, abrangendo desde a modelagem física e controle de sistemas até o uso de inteligência artificial, visando aumentar a eficiência e reduzir os custos operacionais.

Em seu artigo, Nascimento et al (2017) aborda os desafios persistentes na exploração de petróleo, destacando pesquisas recentes focadas na taxa de penetração e na energia específica como meios de aumentar a eficiência operacional. A integração dessas técnicas com um teste pré-operacional, é apresentada como uma ferramenta inovadora para otimizar a perfuração. Além disso, a implementação dessas técnicas em tempo real permite ajustar os parâmetros da mecânica de perfuração de maneira mais dinâmica, visualizando o processo de penetração como uma sequência de passos interdependentes. O objetivo principal deste estudo é explorar a combinação da taxa de penetração com a formulação de energia específica, em paralelo com gráficos dinâmicos e em tempo real do teste de taxa de perfuração, visando aprimorar a otimização da perfuração.

A teoria da energia mecânica específica (MSE) tem sido valiosa para avaliar o desempenho de perfuração em tempo real. No estudo de Chen et al (2014) é apresentado um novo modelo de MSE, avaliando as virtudes e defeitos dos modelos existentes, e prevê a taxa de penetração (ROP) a partir dele. Com base nas relações entre MSE, CCS, parâmetros de perfuração e ROP, é proposta uma metodologia de previsão e otimização de desempenho de perfuração em tempo real. Testes com dados de campo mostram que o novo modelo de MSE possui alta precisão e erro mínimo, sendo aplicável tanto em poços verticais quanto horizontais. A metodologia oferece alta precisão de previsão de ROP, satisfazendo as necessidades de engenharia de campo, e demonstra eficácia e simplicidade operacional.

Da Silva (2016) aborda a complexidade da perfuração no pré-sal, influenciada por fatores como águas ultra profundas e geologia complicada. A instabilidade dos poços representa 5 a 10% dos custos de perfuração. O estudo desenvolveu um modelo de estabilidade para otimizar o peso do fluido de perfuração, usando dados de oito poços e análises de sensibilidade para UCS, coeficiente de Biot e SHmax. A janela operacional para carbonatos variou entre 10,5 e 13,8 ppg, dependendo da pressão de poros. O estudo também discute incertezas devido à falta de dados e ao modelo adotado.

De Araujo (2020) estuda uma metodologia para estimar a resistência das rochas no setor de petróleo, onde a estabilidade é crucial e a obtenção de amostras é cara e demorada. O estudo foca em rochas carbonáticas do pré-sal, que são complexas devido à sua heterogeneidade. A proposta utiliza a correlação de Prasad (2018) e estudos granulométricos para estimar os parâmetros de resistência, fornecendo uma abordagem probabilística útil para prever a resistência das rochas, especialmente em

cenários com poucos testes laboratoriais.

Hassam et al. (2020) destacam que otimizar a perfuração de poços de petróleo e gás pode reduzir significativamente os custos. O estudo desenvolveu sete modelos de taxa de penetração (ROP) usando redes neurais artificiais (ANN) com base em 20.000 conjuntos de dados de parâmetros de perfuração. Os modelos preveem com precisão o ROP, com um erro médio de 7,9% e correlação de 0,92. Além disso, um novo índice ROP/MSE é proposto para avaliar as operações em tempo real, proporcionando uma análise rápida e eficaz do desempenho da perfuração.

Barbosa (2019) destacou que a perfuração de poços de petróleo e gás envolve altos custos e que prever a taxa de penetração (ROP) em tempo real é essencial para otimizar essas operações. Devido à complexidade do comportamento não linear do ROP, a modelagem é desafiadora. O estudo revisa a literatura sobre previsão de ROP, classificando os modelos em tradicionais, estatísticos e de aprendizado de máquina, destacando que este último pode oferecer maior precisão. Apesar do potencial, a implementação na indústria ainda é limitada, e melhores práticas de aprendizado de máquina podem ajudar a reduzir custos e aumentar a eficiência.

O trabalho de Nascimento (2019), apresentado no 5th World Congress & Expo on Oil, Gas & Petroleum Engineering, explora as novas tendências na automação e otimização de processos de perfuração com um foco especial no pré-sal brasileiro. O autor destaca os desafios operacionais enfrentados na perfuração em águas profundas, particularmente devido à complexidade geológica das formações do pré-sal, e os altos custos associados a essas operações. A pesquisa sugere soluções para otimizar a eficiência operacional por meio da automação, testes pré-operacionais automatizados e a análise de parâmetros de perfuração em tempo real. Além disso, o estudo discute como ferramentas digitais e softwares podem ajudar na tomada de decisões durante o processo de perfuração, propondo o redesenho de equipamentos de engenharia para melhorar o desempenho em condições específicas.

Caicedo (2005) apresenta um estudo sobre o planejamento de poços e análise do desempenho de brocas, abordando as limitações do uso da resistência à compressão não confinada (UCS) e os desafios da teoria da energia específica. A Chevron Texaco desenvolveu um método inovador para calcular a resistência à compressão confinada da rocha (CCS), melhorando a previsão de desempenho e a seleção de brocas. Esses métodos proporcionaram uma determinação rápida da taxa de penetração e parâmetros operacionais, otimizando a perfuração e reduzindo custos, com modelos que requerem pouca calibração e são fáceis de aplicar.

**Materiais e Métodos**

As análises deste trabalho foram realizadas utilizando dados mecânicos de perfuração de poços de petróleo offshore fornecidos pela empresa norueguesa de energia *Equinor*, dados de poços de petróleo offshore da *National Offshore Petroleum Information Management System (NOPIMS)* ligado ao governo da Austrália e dados públicos de poços do pre-sal de atividades ocorridas no oceano Atlântico Sul.

A *Equinor* disponibilizou uma vasta quantidade de dados históricos de poços de petróleo offshore como parte de suas iniciativas de dados abertos. Essas informações detalhadas incluem dados de perfuração, perfis de poços, dados geológicos e sísmicos, além de informações sobre reservatórios.

Os dados estão majoritariamente relacionados ao campo *Volve* e ao projeto *Northern Lights*. O conjunto de dados do campo *Volve*, conhecido como *Volve Data Village*, contém 11 pastas totalizando 5 TB e quase 40.000 arquivos. Dentre as pastas, destaca-se a pasta "*Well_logs*", que inclui uma variedade de logs, como mud logs, petrofísicos, VSP, core, biostratigrafia, geoquímica e relatórios correspondentes de 3 poços de exploração e 21 poços de produção/injeção. Os dados são organizados por tipo e também existe uma pasta "*Well_logs_pr_WELL*", que contém os mesmos dados, organizados por poço.

O acesso aos dados do NOPIMS destaca-se por suas características principais que facilitam a pesquisa e o uso das informações. Não é necessário registro para acessar o sistema, permitindo a consulta livre. O NOPIMS oferece metadados para mais de 1 milhão de ativos, proporcionando uma vasta quantidade de informações valiosas. Além disso, conjuntos de dados reprocessados são catalogados e listados em uma guia separada, facilitando a localização específica desses dados. O acesso ao Sistema de Gestão de Informações Essenciais (CIMS) é possível através da guia Biblioteca Essencial, onde os usuários podem encontrar informações essenciais de forma organizada e acessível.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) fornece uma ampla gama de dados relacionados à perfuração de poços de petróleo no Brasil. Esses dados incluem informações sobre a localização dos poços, como latitude, longitude, bacia sedimentar, bloco exploratório e campo de petróleo ou gás. Além disso, a ANP disponibiliza detalhes técnicos sobre os poços, incluindo o tipo de poço (se exploratório ou de desenvolvimento), o status do poço (ativo, fechado, em perfuração, etc.), as datas de início e término da perfuração, a profundidade do poço e o objetivo da perfuração (se para exploração de óleo, gás, entre outros). Também estão disponíveis dados operacionais, como informações sobre

o equipamento utilizado, a empresa responsável pela operação e a sonda de perfuração empregada. Resultados da perfuração, como descobertas de hidrocarbonetos, produção inicial e qualidade do óleo ou gás encontrado, são parte importante desses dados, além de relatórios técnicos que incluem logs geofísicos e perfis de poços.

Esses dados são fornecidos em diversos formatos, conforme a natureza da informação. Os formatos mais comuns incluem arquivos CSV (valores separados por vírgula), amplamente usados para tabelas de dados e análise em softwares como Excel, Python ou R; arquivos Excel (XLS/XLSX) que permitem a análise em ambientes de escritório; e documentos PDF para relatórios técnicos. Além disso, arquivos SHAPEFILES (SHP) são usados para mapear a localização dos poços em sistemas de informações geográficas (GIS), e arquivos KML/KMZ são utilizados para visualização geoespacial em ferramentas. Em alguns casos, dados em formato TXT (texto simples) e SQL também estão disponíveis para facilitar a importação em sistemas de análise ou bancos de dados. Esses dados podem ser acessados através do portal de dados abertos da ANP ou em seções específicas do site onde a ANP disponibiliza relatórios e bases de dados para download, e em alguns casos, podem ser acessados via API para integrações automáticas com sistemas de análise. Para dados específicos ou em formatos particulares, eles podem disponíbilizar mediante solicitação direta à agência. Mas para este artigo em especifico buscou-se dados de pocos ja utilizados em artigos e teses anteriores, dados estes de posse de colegas da industria e equipe do projeto.

**Dados disponibilizados dos poços**

Na perfuração de poços de petróleo, diversos dados mecânicos são coletados em tempo real para análise e otimização do processo. Esses parâmetros incluem, entre outros, a pressão de fundo (SPP), a taxa de penetração (ROP), o torque (TQA), a rotação da coluna de perfuração (RPM), o peso sobre a broca (WOB), e a vazão de fluido de perfuração (FLOW). Esses dados são importantes para entender o comportamento da broca e a interação com as formações geológicas, permitindo ajustes precisos durante a operação. A análise desses parâmetros possibilita identificar condições ótimas de perfuração, minimizar o desgaste do equipamento, e maximizar a eficiência na extração de petróleo, além de prever e mitigar possíveis problemas, como o risco de atolar a broca ou a perda de circulação de fluido.

Estes dados são salvos em arquivos de tipos específicos e muitas vezes disponibilizados pelas operadoras, e se tornam públicos para estudo.

**Cálculo da Energia Mecânica Específica (MSE)**

Para o calculo da Energia Mecânica Específica (MSE) diversas equações empiricas são utilizadas na literatura. Conforme Chen(2014), pode-se destacar quatro importantes equações de cálculo apresentadas a seguir:

A equação de Teale de 1965:

$$MSE = \frac{WOB}{A_b} + \frac{120\pi NT}{D_b ROP} \quad (1)$$

onde *MSE* é a energia Mecânica específica (psi), *WOB* é o peso sobre a broca (lbf) , *N* é a rotação da broca (rpm), *T* é o Torque em (ft.lbf), $A_b$ é área da broca ($in^2$) e $D_b$ o diâmetro da broca.

A equação de Pessier and Fear de 1992:

$$MSE = WOB\left(\frac{1}{A_b} + \frac{13.33\pi\mu_b N}{A_b ROP}\right) \quad (2)$$

$$\mu_b = 36\left(\frac{T}{D_b WOB}\right) \quad (3)$$

onde $\mu_b$ é o Coeficiente de atrito de deslizamento específico da broca (adimensional).

A equação de Dupriest and Koederitz de 2005:

$$MSE = 0.35\left(\frac{WOB}{A_b} + \frac{120\pi NT}{A_b ROP}\right) (4)$$

A equação de Chefif and Bits de 2012:

$$MSE = E_m\left(\frac{4WOB}{\pi D_b^2} + \frac{480NT}{\pi D_b^2 ROP}\right) (5)$$

onde $E_m$ é a eficiencia mecânica da broca.

A maioria dos dados dos poços disponibilizados contém os principais parâmetros necessários para o estudo. No entanto, como as operações de perfuração são realizadas por empresas diferentes, esses dados apresentam nomenclaturas variadas e nem sempre são disponibilizados da mesma maneira.

Alguns poços da NOPIMS já apresentaram o cálculo do MSE e os resultados foram disponibilizados junto com os arquivos de dados. No entanto, não foi possível identificar qual equação foi utilizada para calcular o MSE.

O interesse é determinar o valor do MSE nas regiões onde possuem a litologia de rochas carbonáticas onde possuem maiores dificuldades na perfuração, e as taxas de penetração são baixas. Paras os poços do campo Volve, da Noruega, os dados utilizados são para a litologia *limestone*. Já as de poços da NOPIMS foram utilizados dados para a litologia *calcilutite* e *calcarenite*. Para os poços do pré-sal do Brasil, como foram selecionados aqueles que atingiram o pre-sal, estes possuem a litologia para rochas carbonáticas.

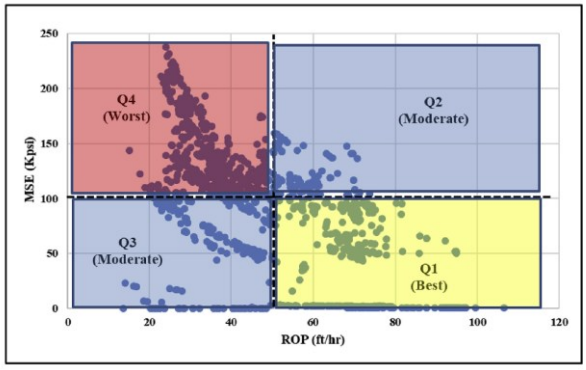
**Análise da eficiência na perfuração**

A Figura 1 ilustra a taxa de penetração plotada em relação à energia mecânica específica, apresentado no trabalho de Hassan (2020). Com base nos valores de ROP e MSE, os dados foram classificados em quatro

quartis (Q1 a Q4). Sendo Q1 como a região de melhor eficiência de perfuração, pois tem-se valores de ROP altos e baixos valores de MSE. A região Q2 e Q3 pode ser considerados como condições moderadas de perfuração com eficiência de perfuração aceitável. Na região Q4, pode ser considerada a pior condição de perfuração, que tem a menor taxa de penetração e a maior energia de perfuração.

No seu trabalho, Hassam(2020) considerou que qualquer ROP acima de 50 pés/h indica um excelente desempenho de perfuração e que todos os valores de MSE menores que 100 kpsi foram considerados como uma indicação de boa eficiência de perfuração, conforme os dados de poços que foram utilizados. Estes valores foram adotados pela classificação feita com base na comunicação com os especialistas que trabalham nas operações de perfuração.

Figura 1 – MSE x ROP




Fonte: Hassan (2020).

Mas, conforme destaca no trabalho estes valores podem mudar, pois são diversos parâmetros mecânicos e outras ocorrencias que podem influenciar a operação.

Para dados de poços de outras localizações, deve-se considerar os diversos parametros que foram utilizados na operação alem das diferenças de litologia. Eles apresentam diferenças consideraveis que precisam ser levadas em conta para uma análise correta. Assim, neste trabalho, não foram considerados valores fixos de ROP e MSE, conforme trabalho de Hassam(2020), mas o grafico de MSE x ROP foi montado através do calculo da média dos pontos dos parâmetros, e dividido em quatro quadrantes, onde o quadrante Q1 é considerado a melhor região, Q2 e Q3 foi considerado como condições moderadas de perfuração com eficiência de perfuração aceitável e Q4 considerada a pior condição de perfuração, que tem a menor taxa de penetração e a maior energia de perfuração.

## Resultados e Discussão

Nesta seção serão apresentados os graficos dos dados dos poços da Equinor, NOPIMS e de poços do pre-sal. Para os poços do pre-sal, serão omitidos os nomes dos poços. Foram utilizadas as equações de Teale e Dupriest para o cálculo do MSE. Como os valores de Dupriest, correspondem a 35% dos valores de Teale, onde as equações possuem os mesmos parametros utilizados, sendo que os resultados gráficos são totalmente iguais em termo de comportamento, serão apresentados os resultados somente dos valores de MSE calculados pela equação de Dupriest. Também são apresentados os resultados em tabelas, para

cada poço, de forma sintetizada os resultados para melhor análise e comparação.

**Poços do campo Volve da Noruega**

Neste tópico são apresentados os gráficos de poços de campos da Noruega.

**Poço 15_9-F-10**

A Figura 2 apresenta o grafico de MSE x ROP do poço 15_9-F-10 para uma profundidade (DEPTH) entre 3300 a 3600 m, com uma rotação de 167 rpm.

Na Figura 3, apresenta o grafico de MSE x ROP para a profundidade de 3600 a 4000 m e uma rotação de 195 rpm, melhorando a eficiencia.

Figura 2 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)

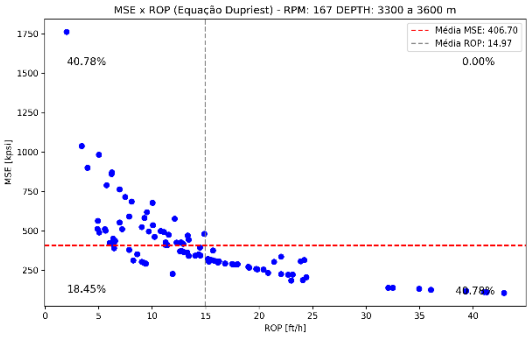
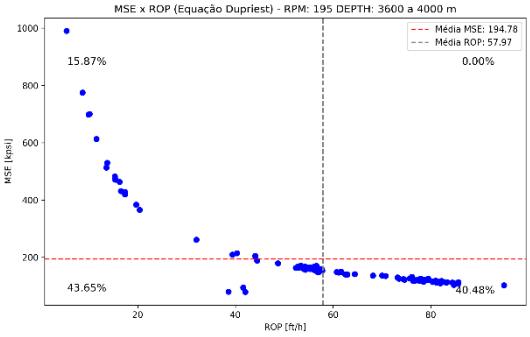
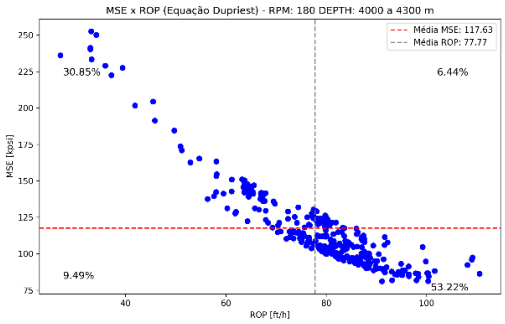



Figura 3 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)



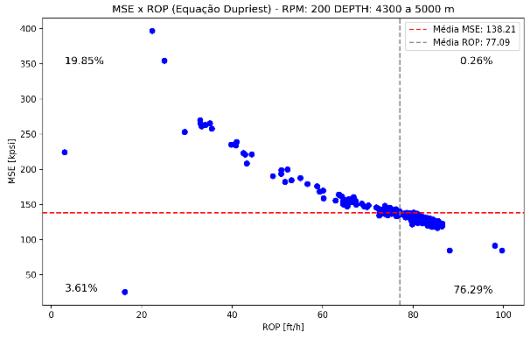

A Figura 4 apresenta o grafico MSE x ROP para a rotação de 180 rpm e profundidade entre 4000 e 4300 m.

Figura 4 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)




A Figura 5 apresenta o grafico MSE x ROP para a rotação de 200 rpm e profundidade entre 4300 e 5000 m.

Figura 5 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)




A Tabela 1 apresenta os resultados do poço 15_9-F-10 do campo Volve da Noruega de forma resumida.

Tabela 1 – Resultados do poço 15_9-F-10

| Depth [m] | RPM [rpm] | Q1 [%] | Q2 [%] | Q3 [%] | Q4 [%] |
|---|---|---|---|---|---|
| 3300-3600 | 167 | 40,7 | 0,0 | 18,5 | 40,8 |
| 3600-4000 | 195 | 40,5 | 0,0 | 43,7 | 15,9 |
| 4000-4300 | 180 | 53,2 | 6,4 | 9,4 | 30,9 |
| 4300-5000 | 200 | 76,3 | 0,3 | 3,6 | 19,9 |

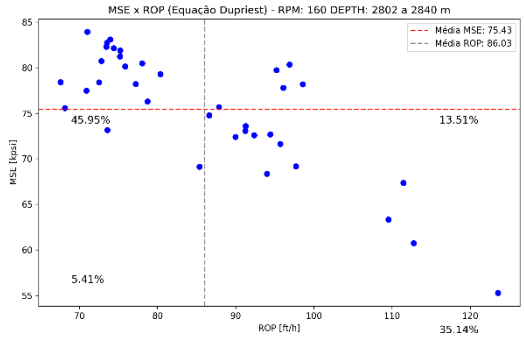
Pode-se observar na Tabela 1 alguns aspectos importantes relacionados à eficiência da perfuração em diferentes profundidades e

rotações por minuto (RPM). O RPM aumenta conforme a profundidade do poço aumenta, indo de 167 rpm até 200 rpm. Em Q1 (primeiro quadrante) apresenta as maiores porcentagens em todas as faixas de profundidade, com destaque para a faixa de 4300-5000 m, onde 76,3% dos pontos estão nesse quadrante, sendo a mais eficiente. Em Q2 (segundo quadrante) é o menos expressivo, com percentuais muito baixos, variando entre 0% e 6,4%, sendo a perfuração neste quadrante insignificante na maioria das profundidades. Em Q3 (terceiro quadrante) apresenta valores mais variados, atingindo seu pico de 43,7% na profundidade de 3600-4000 m. Isso mostra que nessa faixa específica de profundidade, as condições de perfuração que correspondem a esse quadrante foram superiores. Em Q4 (quarto quadrante) mostra variação significativa, sendo particularmente elevado na profundidade mais rasa (40,8%) e caindo conforme a profundidade aumenta, exceto na faixa de 4000-4300 m, onde se estabiliza em torno de 30,9%. Este resultado mostra que há possibilidade de melhoria da eficiência de perfuração. As condições de perfuração mais eficazes parecem estar associadas ao primeiro quadrante, especialmente em profundidades maiores, como demonstrado pelo aumento expressivo de pontos em Q1 à medida que a profundidade e o RPM aumentam. Já os quadrantes Q2 e Q3 têm relevância limitada, exceto em faixas de profundidade intermediárias.

**Poço 15_9-F11-A**

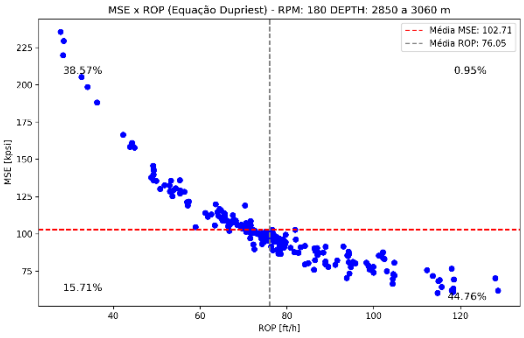
A Figura 6 apresenta o grafico de MSE x ROP do poço 15_9-F-11-A para uma profundidade (DEPTH) entre 2802 a 2840 m, com uma rotação de 168 rpm.

Figura 6 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)




A Figura 7 apresenta o grafico de MSE x ROP para uma profundidade (DEPTH) entre 2850 a 3060 m, com uma rotação de 180 rpm.

Figura 7 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)




A Figura 8 apresenta o grafico de MSE x ROP para uma profundidade (DEPTH) entre 3070 a 3300 m, com uma rotação de 190 rpm.

A Figura 9 apresenta o grafico de MSE x ROP para uma profundidade (DEPTH) entre 3300 a 3500 m, com uma rotação de 180 rpm.

A Tabela 2 apresenta os resultados do poço 15_9-F-11-A do campo Volve da Noruega de forma resumida.

Figura 8 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)

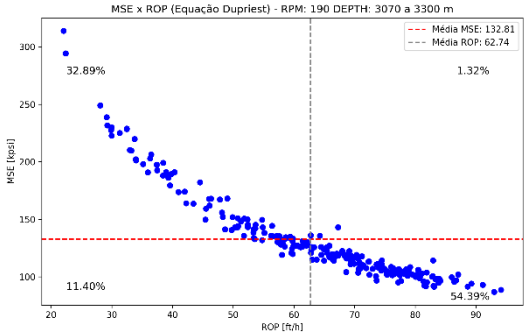



Figura 9 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)

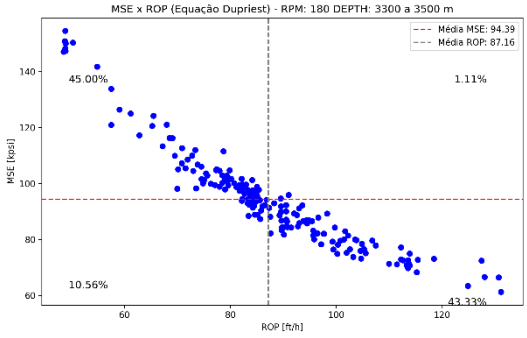



Tabela 2 – Resultados do poço 15_9-F11-A

| Depth [m] | RPM [rpm] | Q1 [%] | Q2 [%] | Q3 [%] | Q4 [%] |
|---|---|---|---|---|---|
| 2802-2840 | 168 | 35,2 | 13,5 | 5,4 | 46,0 |
| 2850-3060 | 180 | 44,7 | 0,9 | 15,7 | 38,6 |
| 3070-3300 | 190 | 54,4 | 1,3 | 11,4 | 32,9 |
| 3300-3500 | 180 | 43,3 | 1,1 | 10,6 | 45,0 |

Na Tabela 2, em Q1 (primeiro quadrante) apresenta as maiores porcentagens em todas as faixas de profundidade, com destaque para a profundidade de 3070-3300 m, onde 54,4% dos pontos estão nesse quadrante. Em Q2 (segundo quadrante) apresenta uma maior relevância na profundidade mais rasa (2802-2840 m), com 13,5% dos pontos nesse quadrante, indicando que, em profundidades menores, as condições de perfuração não são tão otimizadas quanto nas demais. A partir de 2850 m, os valores caem drasticamente para menos de 1,5%. Em Q3 (terceiro quadrante) mostra uma distribuição mais significativa, com valores que chegam a 15,7% na faixa de 2850-3060 m. Em Q4 (quarto quadrante) apresenta percentuais elevados, especialmente nas profundidades de 2802-2840 m (46,0%) e 3300-3500 m (45,0%). O quadrante Q1 tende a predominar nas faixas de profundidade mais intermediárias, com o melhor desempenho de eficiência em 3070-3300 m. Contudo, o quadrante Q4 também apresenta percentuais significativos, especialmente nas extremidades de profundidade analisadas sugerindo que ajustes na operação poderiam ser realizados nessas regiões. Esses resultados podem orientar melhorias na operação de perfuração ao destacar as faixas de profundidade e RPM que precisam de ajustes para melhorar a eficiência, especialmente nas condições que favorecem os quadrantes Q1 e Q4.

**Poços dos campos da Australia**

A seguir serão apresentados os gráficos de poços de campos da Australia.

**Poço D0018925**

A Figura 10 apresenta o grafico MSE x ROP do poço D0018925 para a rotação de 160 rpm e profundidade entre 3040 e 3150 m.

A Figura 11 apresenta o grafico MSE x ROP para a rotação de 160 rpm e profundidade entre 3150 e 3254 m.

Figura 10 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)

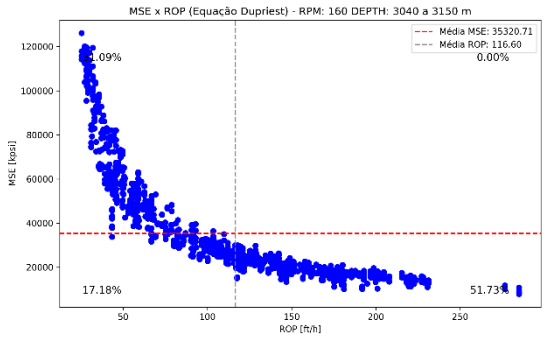
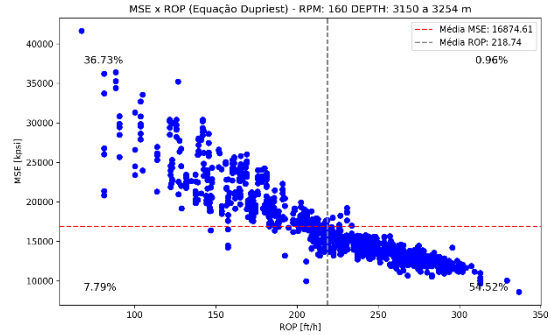



Figura 11 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)




A Tabela 3 apresenta os resultados do poço D0018925 do campo da Austrália de forma resumida.

Tabela 3 – Resultados do poço D0018925

| Depth [m] | RPM [rpm] | Q1 [%] | Q2 [%] | Q3 [%] | Q4 [%] |
|---|---|---|---|---|---|
| 3040-3150 | 160 | 51,7 | 0,0 | 17,2 | 31,1 |
| 3150-3254 | 160 | 54,5 | 1,0 | 7,8 | 36,7 |

Na tabela 3, em Q1 (primeiro quadrante) apresenta percentuais elevados em ambas as profundidades, sendo 51,7% na profundidade de 3040-3150 m e aumentando para 54,5% entre 3150-3254 m. Em Q2 (segundo quadrante) não é significativo na profundidade de 3040-3150 m, com 0%, e aparece apenas com 1,0% na profundidade de 3150-3254 m. Em Q3 (terceiro quadrante) mostra uma diminuição significativa de 17,2% para 7,8% à medida que a profundidade aumenta. Em Q4 (quarto quadrante) tem percentuais significativos em ambas as profundidades, com um leve aumento de 31,1% para 36,7% à medida que a profundidade aumenta. O quadrante Q1 predomina nas duas profundidades analisadas, sugerindo que a operação de perfuração está sendo realizada de maneira eficiente, especialmente na faixa de profundidade de 3150-3254 m, onde o percentual de pontos em Q1 é o mais alto (54,5%). O Q4 também possui percentuais consideráveis, indicando a necessidade de ajustes operacionais para reduzir os fatores que fazem com que os pontos caiam nesse quadrante. Com base nesses dados, pode-se concluir que a operação de perfuração neste poço está relativamente otimizada, especialmente no Q1, mas ainda há espaço para melhorar as condições que geram pontos no Q4 para aumentar a eficiência global da perfuração.

**Poço D0018219**

A Figura 12 apresenta o grafico MSE x ROP do poço D0018219 para a rotação de 37 rpm e profundidade entre 717 e 854 m.

A Figura 13 apresenta o grafico MSE x ROP para a rotação de 42 rpm e profundidade entre 877 e 951 m.

A Tabela 4 apresenta os resultados do poço D0018219 do campo da Austrália de forma resumida.

Figura 12 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)

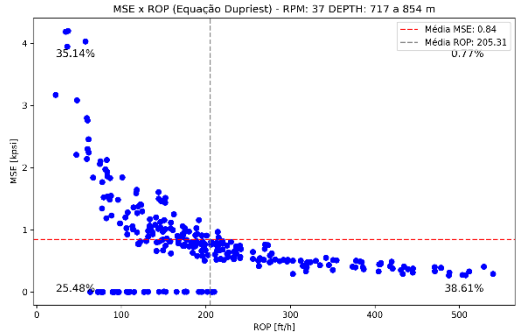



Figura 13 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)

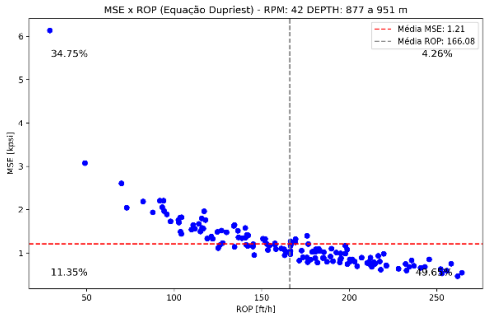



Tabela 4 – Resultados do poço D0018219

| Depth [m] | RPM [rpm] | Q1 [%] | Q2 [%] | Q3 [%] | Q4 [%] |
|---|---|---|---|---|---|
| 717-854 | 37 | 38,6 | 0,8 | 25,5 | 35,1 |
| 877-951 | 42 | 49,6 | 4,3 | 11,4 | 34,8 |

Na tabela 4, pode-se destacar alguns pontos sobre a eficiência da perfuração. A rotação (RPM) aumenta de 37 rpm para 42 rpm à medida que a profundidade aumenta de 717-854 m para 877-951 m. Isso mostra um leve aumento na rotação. Em Q1 (primeiro quadrante) apresenta um aumento significativo de 38,6% para 49,6% conforme a profundidade aumenta. Em Q2 (segundo quadrante) mostra um crescimento considerável entre as profundidades, de 0,8% para 4,3%. Em Q3 (terceiro quadrante) apresenta uma diminuição significativa, passando de 25,5% na profundidade de 717-854 m para 11,4% em 877-951 m. Em Q4 (quarto quadrante) permanece quase estável, com uma leve diminuição de 35,1% para 34,8%. O aumento no percentual de pontos no quadrante Q1, especialmente na profundidade de 877-951 m, indica uma maior eficiência de perfuração nessa faixa. Q2 teve um crescimento notável com o aumento da profundidade. Já Q3 teve um declínio à medida que a profundidade aumenta. A estabilidade relativa do Q4 sugere que, embora o desempenho esteja melhorando no Q1, ainda há fatores operacionais que fazem com que uma parte significativa dos pontos esteja nesse quadrante, o que pode indicar espaço para melhorias na operação de perfuração.

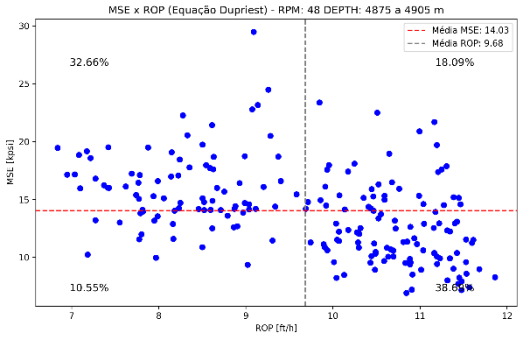
## Poços de Campos do pré-sal do Brasil

A seguir serão apresentados os gráficos de poços de campos do pré-sal do Brasil.

## Poço A

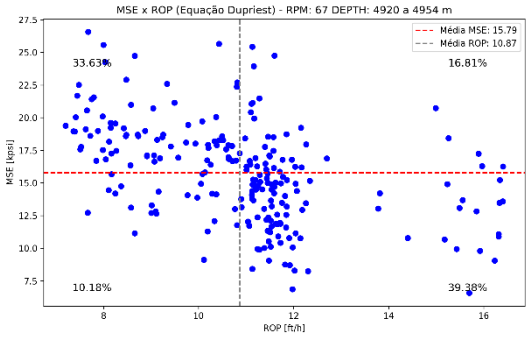
A Figura 14 apresenta o grafico MSE x ROP para a rotação de 48 rpm e profundidade entre 4875 e 4905 m.

Figura 14 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)



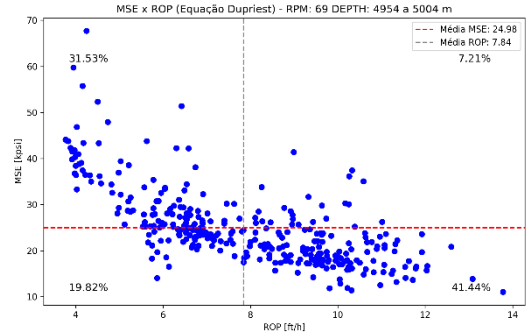
A Figura 15 apresenta o grafico MSE x ROP para a rotação de 67 rpm e profundidade entre 4920 e 4954 m.

Figura 15 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)




A Figura 16 apresenta o grafico MSE x ROP para a rotação de 69 rpm e profundidade entre 4954 e 5004 m.

Figura 16 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)




A Figura 17 apresenta o grafico MSE x ROP para a rotação de 70 rpm e profundidade entre 5004 e 5060 m.

A Figura 18 apresenta o grafico MSE x ROP para a rotação de 72 rpm e profundidade entre 5060 e 5095 m.

A Figura 19 apresenta o grafico MSE x ROP para a rotação de 69 rpm e profundidade entre 5104 e 5141 m.

Figura 17 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)

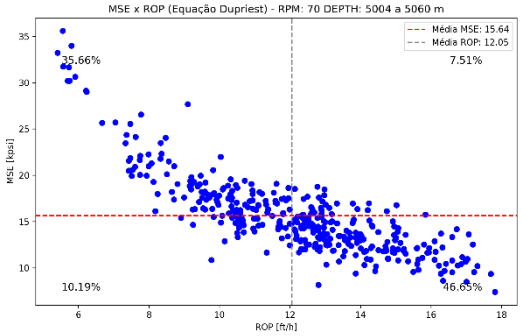



Figura 18 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)

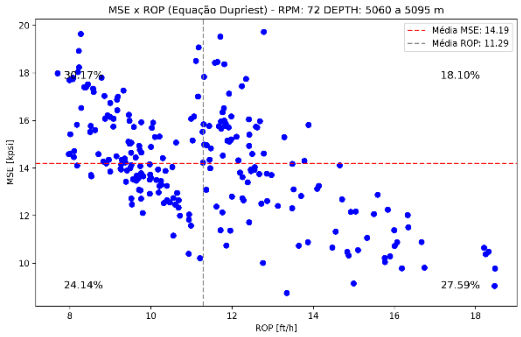
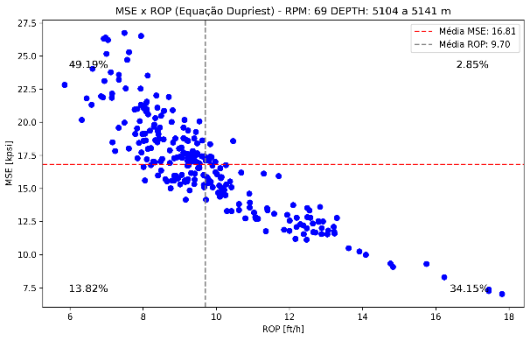



Figura 19 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)




A Tabela 5 apresenta os resultados do poço A do campo do pré-sal.

Tabela 5 – Resultados do Poço A

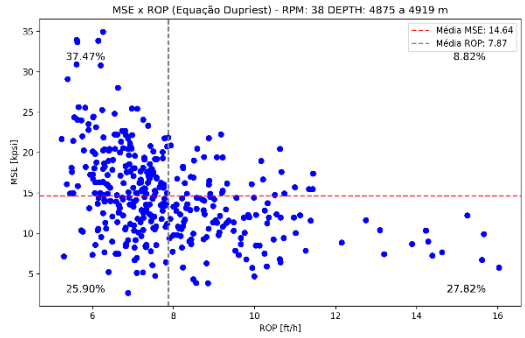
| Depth [m] | RPM [rpm] | Q1 [%] | Q2 [%] | Q3 [%] | Q4 [%] |
|---|---|---|---|---|---|
| 4875-4905 | 48 | 38,7 | 18,1 | 10,6 | 32,7 |
| 4920-4954 | 67 | 39,4 | 16,8 | 10,2 | 33,6 |
| 4954-5004 | 69 | 41,4 | 7,2 | 19,8 | 31,5 |
| 5004-5060 | 70 | 46,7 | 7,5 | 10,2 | 35,7 |
| 5060-5095 | 72 | 27,6 | 18,1 | 24,1 | 30,2 |
| 5104-5141 | 69 | 34,2 | 2,9 | 13,8 | 49,2 |

Nesta Tabela 5, a rotação (RPM) varia consideravelmente entre as diferentes profundidades, aumentando de 48 rpm (na profundidade de 4875-4905 m) até 72 rpm (na profundidade de 5060-5095 m). Em Q1 (primeiro quadrante) apresenta variações significativas, indo de 27,6% a 46,7%. O valor mais alto ocorre na profundidade de 5004-5060 m, sugerindo que essa faixa de profundidade teve condições mais favoráveis à perfuração eficiente. Em Q2 (segundo quadrante) varia de 2,9% a 18,1%, sendo mais expressivo nas profundidades de 4875-4905 m e 5060-5095 m. Em Q3 (terceiro quadrante) tem uma distribuição mais concentrada entre 10,2% e 24,1%, com o maior valor observado na profundidade de 5060-5095 m. Em Q4 (quarto quadrante) apresenta percentuais elevados em quase todas as profundidades, sendo especialmente alto na profundidade de 5104-5141 m (49,2%). O quadrante Q1 domina nas profundidades intermediárias, mas há uma queda de eficiência significativa nas profundidades de 5060-5095 m e 5104-5141 m, onde a presença nos quadrantes Q3 e Q4 aumenta consideravelmente. Para otimizar a operação, seria necessário focar nas condições que estão favorecendo esses quadrantes menos eficientes, especialmente nas profundidades maiores.

**Poço B**

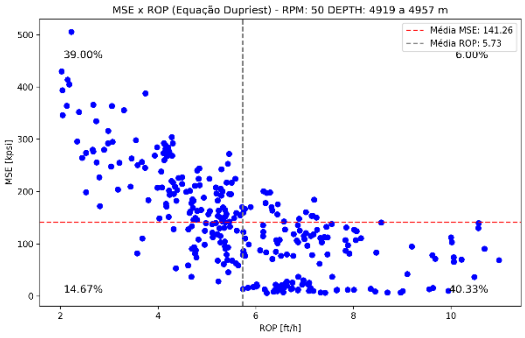
A Figura 20 apresenta o grafico MSE x ROP para a rotação de 38 rpm e profundidade entre 4875 e 4919 m.

Figura 20 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)



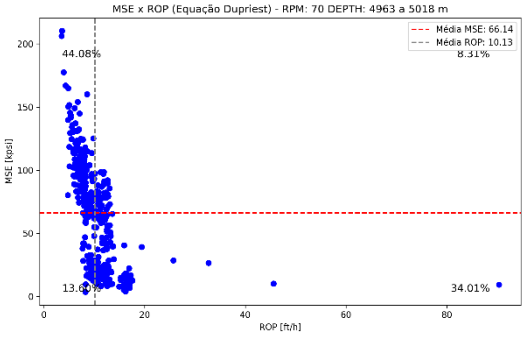

A Figura 21 apresenta o grafico MSE x ROP para a rotação de 50 rpm e profundidade entre 4919 e 4957 m.

Figura 21 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)



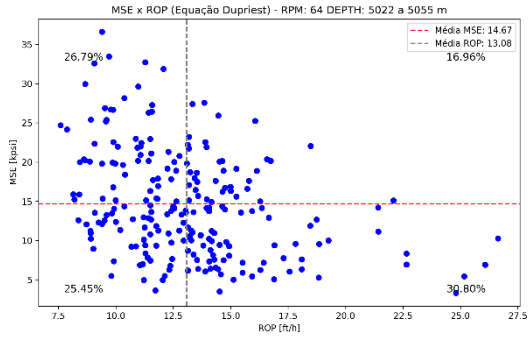

A Figura 22 apresenta o grafico MSE x ROP para a rotação de 70 rpm e profundidade entre 4963 e 5018 m.

Figura 22 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)



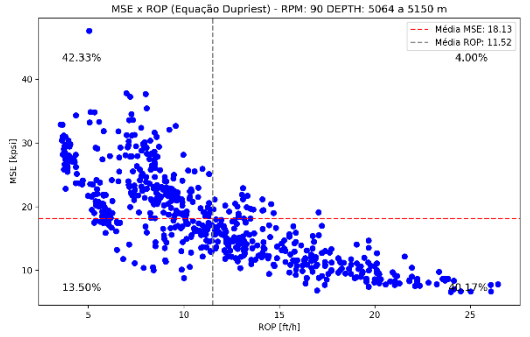
A Figura 23 apresenta o grafico MSE x ROP para a rotação de 64 rpm e profundidade entre 5022 e 5055 m.

Figura 23 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)




A Figura 24 apresenta o grafico MSE x ROP para a rotação de 90 rpm e profundidade entre 5064 e 5150 m.

Figura 24 – MSE x ROP (Eq. Dupriest)




A Tabela 6, apresenta os resultados do Poço B do pré-sal.

Tabela 6 – Resultados do Poço B

| Depth [m] | RPM [rpm] | Q1 [%] | Q2 [%] | Q3 [%] | Q4 [%] |
|---|---|---|---|---|---|
| 4875-4919 | 38 | 27,8 | 8,8 | 25,9 | 37,5 |
| 4919-4957 | 50 | 40,3 | 6,0 | 14,7 | 39,0 |
| 4963-5018 | 70 | 34,0 | 8,3 | 13,6 | 44,1 |
| 5022-5055 | 64 | 30,8 | 17,0 | 25,5 | 26,8 |
| 5064-5150 | 90 | 40,2 | 4,0 | 13,5 | 42,3 |

Nesta Tabela 6, observa-se que em Q1 (primeiro quadrante) apresenta percentuais mais altos em profundidades intermediárias e na profundidade mais profunda, variando de 27,8% a 40,3%. O maior valor de Q1 ocorre na profundidade de 5064-5150 m. Em Q2 (segundo quadrante) varia de 4,0% a 17,0%, sendo mais expressivo na faixa de profundidade de 5022-5055 m, com 17,0%. Em Q3 (terceiro quadrante) apresenta percentuais relativamente estáveis, variando de 13,5% a 25,9%, com o maior valor de Q3 em 5022-5055 m. Em Q4 (quarto quadrante) tem uma variação de 26,8% a 44,1%, sendo mais alto nas profundidades intermediárias, com o pico de 44,1% em 4963-5018 m. Esse valor elevado de Q4 indica que, apesar de melhorias na eficiência em alguns quadrantes, ainda há uma significativa presença de condições desfavoráveis em profundidades intermediá-rias. A eficiência de perfuração do Poço B mostra um padrão de melhoria em profundidades maiores, com o quadrante Q1 assumindo um papel mais dominante, especialmente nas profundidades acima de 4957 m. No entanto, as condições associadas ao quadrante Q4 continuam presentes em valores elevados nas profundidades intermediárias, sugerindo que ajustes operacionais poderiam ter aumentado a sua eficiência.

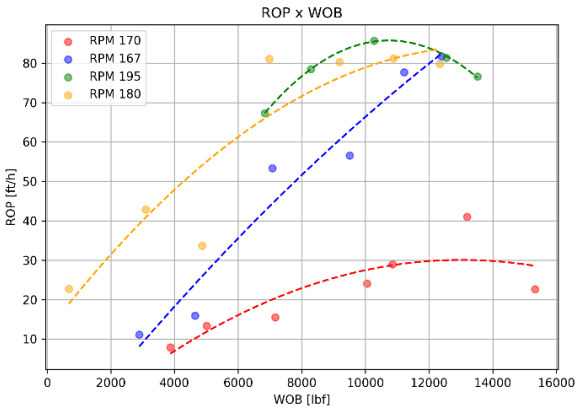
**Graficos ROP x WOB e MSE x ROP para as rotações**

Além dos gráficos de MSE x ROP, que apresentam todos os pontos, outros dois gráficos podem ser úteis para analisar a

eficiência da perfuração: ROP x WOB e MSE x ROP. Esses gráficos são gerados com base nas médias de MSE, ROP e WOB para cada rotação, conforme feito no estudo de Nascimento (2017). Além disso, curvas de tendência são adicionadas para cada rotação, o que permite identificar qual rotação proporciona o melhor desempenho para a operação.

As figuras 25 e 26 apresentam, respectivamente, os gráficos de ROP x WOB e MSE x ROP para diferentes rotações, referentes ao poço 15_9-F-10, na Noruega. Esses gráficos foram elaborados com base nas médias dos valores de ROP e WOB para cada rotação, incluindo as curvas de tendência. Verifica-se que a rotação de 195 rpm proporciona o maior valor de ROP. Contudo, é fundamental ressaltar que essa informação isolada não assegura o menor valor de MSE.

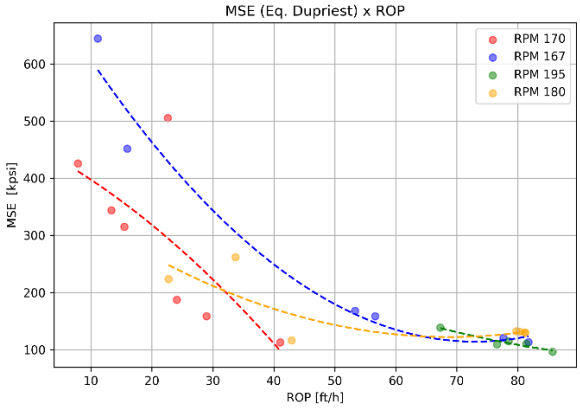
Figura 25 – ROP x WOB




Na figura 26 mostra-se o gráfico MSE x ROP. Verifica-se que para a rotação de 195 rpm tem-se o menor valor de MSE e maior valor de ROP.

Nos gráficos desta duas figuras podem-se levantar várias informações referentes a perfuração. Para cada valor de RPM, o ROP inicialmente aumenta com o aumento do WOB, atingindo um pico antes de começar a diminuir ou estabilizar.

Figura 26 – MSE x ROP




Isso indica que existe um WOB ideal para cada RPM, após o qual o ROP começa a cair ou não aumenta mais significativamente, provavelmente devido à ineficiência do corte. O ROP máximo alcançado varia conforme o RPM. Por exemplo, o RPM 195 alcança o ROP mais alto, enquanto o RPM 180 tem um desempenho relativamente inferior. Isso sugere que ajustar o RPM pode otimizar o ROP para diferentes condições de WOB.

As curvas de melhor ajuste (linhas tracejadas) indicam que a relação entre WOB e ROP não é linear, com diferentes comportamentos para diferentes valores de RPM.

O MSE tende a diminuir à medida que o ROP aumenta para todos os valores de RPM, o que é esperado, pois uma maior eficiência de perfuração (maior ROP) geralmente corresponde a uma menor energia específica

necessária.

Este gráfico confirma que operar na região de maior ROP não só melhora a eficiência de perfuração, mas também minimiza o consumo de energia, desde que as outras condições (como WOB e RPM) estejam otimizadas.

Os valores de RPM mais baixos (como 167 RPM) começam com um MSE mais alto, indicando que para essas condições, a operação é menos eficiente inicialmente. Contudo, à medida que o ROP aumenta, o MSE diminui mais acentuadamente.

Isso indica que, para RPMs mais baixos, otimizar o WOB para atingir um ROP mais alto é crucial para melhorar a eficiência energética da perfuração.

Os melhores resultados (menores MSE com maior ROP) são observados em RPMs mais altos (195 e 180 RPM), sugerindo que, nestes casos, a perfuração é mais eficiente em termos de energia.

**Considerações Finais**

As variações observadas nas intensidades dos valores para os poços das três empresas são atribuídas a diferenças em diversos fatores, como o diâmetro da broca, profundidade, litologia, parâmetros mecânicos ajustados, entre outros. Esses fatores resultam em uma ampla gama de valores. No entanto, observa-se que, em termos percentuais, os resultados são relativamente próximos, seguindo um comportamento que se alinha a um certo padrão verificável.

As análises realizadas demonstraram que há um potencial significativo para melhorar a eficiência da perfuração em poços de petróleo, especialmente em regiões complexas como o pré-sal. Os resultados obtidos mostraram que, ao ajustar adequadamente parâmetros como RPM, WOB e FLOW, é possível aumentar consideravelmente a taxa de penetração (ROP) e reduzir a Energia Mecânica Específica (MSE), melhorando, assim, a eficiência da operação.

Em particular, os poços analisados no campo Volve, na Noruega, evidenciaram que configurações otimizadas de parâmetros mecânicos podem resultar em percentuais elevados no quadrante Q1, representando alta eficiência, como observado em profundidades entre 4300 e 5000 metros com uma rotação de 200 rpm, onde 76,29% dos pontos se concentraram nesse quadrante. Esse dado ressalta a importância de se ajustar corretamente os parâmetros operacionais para maximizar a produtividade e reduzir o desgaste dos equipamentos.

Entretanto, o estudo também identificou variações significativas de eficiência entre diferentes profundidades e rotações. Fatores como o tipo de litologia, diâmetro da broca, pressão e condições geológicas desempenham papéis importantes, o que sugere a necessidade de uma abordagem mais dinâmica e adaptativa no controle desses parâmetros.

O uso de técnicas de otimização avançadas, como algoritmos evolutivos e redes neurais, desponta como uma solução

promissora para superar as limitações atuais dos modelos tradicionais. A implementação dessas ferramentas pode não apenas otimizar em tempo real os parâmetros de perfuração, mas também reduzir custos operacionais e melhorar a segurança das operações.

Futuros estudos devem explorar o uso de inteligência artificial em maior profundidade, especialmente na análise de grandes volumes de dados em tempo real. A incorporação de sistemas de monitoramento automatizados pode fornecer informações mais precisas sobre a eficiência de perfuração, permitindo ajustes rápidos e assertivos durante as operações. Além disso, a coleta de dados mais robusta, incluindo variáveis geológicas e mecânicas adicionais, poderá ampliar a compreensão sobre as variáveis que impactam diretamente a eficiência e o desempenho da perfuração.

## Referências


BARBOSA, Luís Felipe FM et al. Machine learning methods applied to drilling rate of penetration prediction and optimization-A review. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 183, p. 106332, 2019.

CAICEDO, Hector U.; CALHOUN, William M.; EWY, Russ T. Unique ROP predictor using bit-specific coefficient of sliding friction and mechanical efficiency as a function of confined compressive strength impacts drilling performance. In: SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. SPE, 2005. p. SPE-92576-MS.

CHEN, Xuyue et al. Real-time prediction and optimization of drilling performance based on a new mechanical specific energy model. Arabian Journal for Science and Engineering, v. 39, p. 8221-8231, 2014.

DA SILVA, CRISTIANE FERNANDES. Análise geomecânica dos carbonatos do pré-sal da Bacia de Santos. Rio de Janeiro, 2016. 139p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

DE ARAUJO, Renata Mattos Sampaio et al. Metodologia para a Estimativa de Resistência de Rochas Carbonáticas Análogas ao Pré-sal Brasileiro, 2020.

HASSAN, Amjed; ELKATATNY, Salaheldin; AL-MAJED, Abdulaziz. Coupling rate of penetration and mechanical specific energy to Improve the efficiency of drilling gas wells. Journal of Natural Gas Science and Engineering, v. 83, p. 103558, 2020.

NASCIMENTO, Andreas. New tendencies in Drilling Processes Automation and Optimization: a focus on the Brazilian Pre-salt. In: 5th World Congress & Expo on Oil, Gas & Petroleum Engineering, [s.l.], 2019.

NASCIMENTO, Andreas et al. Reverse engineering: a new well monitoring and analysis methodology approaching playing-back drill-rate tests in real-time for drilling optimization. Journal of Energy Resources Technology, v. 139, n. 1, p. 012902, 2017.

NASCIMENTO, Andreas et al. Mathematical modeling applied to drilling engineering: an application of Bourgoyne and Young ROP model to a presalt case study. Mathematical Problems in Engineering, v. 2015, n. 1, p. 631290, 2015.

NASCIMENTO, Andreas. Mathematical Modeling for Drilling Optimization in Pre-salt Sections: a Focus on South Atlantic Ocean Operations. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

PRASAD, Umesh. Mechanical specific energy (MSE) in coring: a tool to understand the drilling mechanism and coring parameters optimization for improved core recovery. In: AAPG International Conference and Exhibition. p. 2018.


## Agradecimentos


Os autores gostariam de expressar seu agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e a Fundação Alexander von Humboldt.