

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta
Dissertação será disponibilizado
somente a partir de 07/0/2027

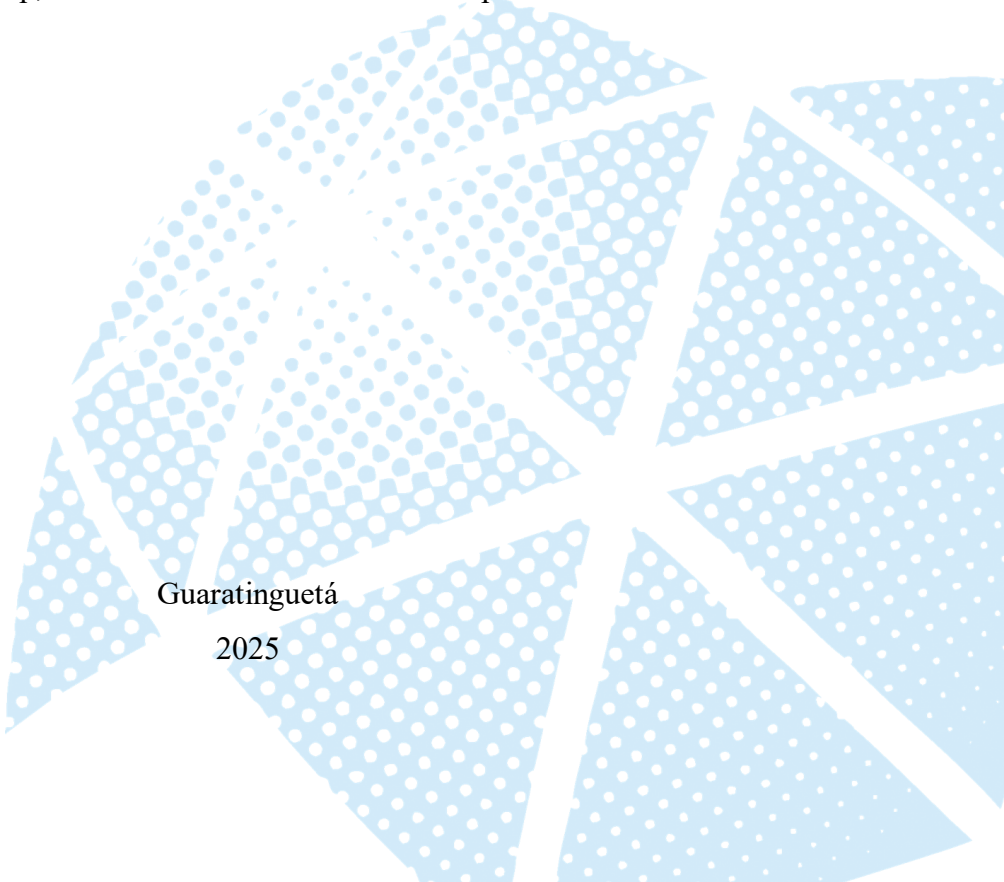
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

THALES RODRIGUES BARBOZA

Dinâmica e controle de vibração e energia mecânica específica em perfuração de poços para acesso a recursos naturais energéticos: uma nova metodologia baseada em mitigação de stick-slip, matrizes de decisão e eficiência operacional

Guaratinguetá

2025



THALES RODRIGUES BARBOZA

Dinâmica e controle de vibração e energia mecânica específica em perfuração de poços para acesso a recursos naturais energéticos: uma nova metodologia baseada em mitigação de *stick-slip*, matrizes de decisão e eficiência operacional

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, para obtenção do Doutorado em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Andreas Nascimento

Coorientador: Dr. Diunay Z. Mantegazini

Guaratinguetá

2025

B239d	Barboza, Thales Rodrigues Dinâmica e controle de vibração e energia mecânica específica em perfuração de poços para acesso a recursos naturais energéticos: uma nova metodologia baseada em mitigação de <i>stick-slip</i>, matrizes de decisão e eficiência operacional / Thales Rodrigues Barboza - Guaratinguetá, 2024. 188 f : il. Bibliografia: f. 130-137 Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025. Orientador: Prof. Dr. Andreas Nascimento Coorientador: Dr. Diunay Z. Mantegazini 1. Poços de petróleo - perfuração. 2. Recursos naturais. 3. Recursos energéticos. I. Título. CDU 622.323(043)
-------	--

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa se destaca pela aplicação inovadora de tecnologias avançadas e análises estatísticas para otimizar a perfuração de reservas energéticas, como geotermia, gás natural e petróleo, hidrogênio natural, dentre outros, baseando-se na minimização das vibrações torcionais e energia mecânica específica (MSE). A pesquisa proporciona uma compreensão e análise relevantes e aprofundadas do parâmetro *stick-slip*, propondo matrizes de decisão eficazes para auxiliar operações de perfuração em tempo real. A metodologia desenvolvida, a qual se ampara, também, em modelagem dinâmica e análise de regressão, oferecem soluções práticas e importantes para a indústria de perfuração de poços, aplicável em âmbito global, oportunizando operações eficientes e seguras. As contribuições fornecem diretrizes claras para otimização de perfuração, englobando de forma adicional o parâmetro mecânico de vazão de fluidos (FLOW), o qual não é utilizado atualmente para minimizar a vibração torcional durante da fase de perfuração de poços.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research stands out for its innovative application of advanced technologies and statistical analyses to optimize the drilling of energy reserves, such as geothermal energy, natural gas, and petroleum, natural hydrogen, among others, based on minimizing torsional vibrations and mechanical specific energy (MSE). The research provides relevant and in-depth understanding and analysis of the stick-slip parameter, proposing effective decision matrices to assist real-time drilling operations. The developed methodology, which also relies on dynamic modeling and regression analysis, offers practical and significant solutions for the well drilling industry, applicable on a global scale, enabling efficient and safe operations. The contributions provide clear guidelines for drilling optimization, additionally encompassing the mechanical parameter of fluid flow (FLOW), which is currently not used to minimize torsional vibration during the well drilling phase.

THALES RODRIGUES BARBOZA

"Dinâmica e Controle de Vibração e Energia Mecânica Específica em perfuração de poços para acesso a recursos naturais energéticos: uma nova metodologia baseada em mitigação de stick-slip, matrizes de decisão e eficiência operacional"

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Data da defesa: 07/01/2025

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ANDREAS NASCIMENTO**
Data: 09/01/2025 16:49:43-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. ANDREAS NASCIMENTO
Orientador - UNIFEI

Documento assinado digitalmente
 **J OAO ANDRADE DE CARVALHO JUNIOR**
Data: 13/01/2025 15:39:24-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JÚNIOR
UNESP

Documento assinado digitalmente
 **MAURO HUGO MATHIAS**
Data: 13/01/2025 15:44:00-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. MAURO HUGO MATHIAS
UNESP

Documento assinado digitalmente
 **FAGNER LUIS GOULART DIAS**
Data: 13/01/2025 14:51:33-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. FAGNER LUIS GOULART DIAS
UNIFEI

Documento assinado digitalmente
 **DIEGO LILARGEM ROCHA**
Data: 10/01/2025 15:47:56-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. DIEGO LILARGEM ROCHA
Instituto Federal do Espírito Santo

DADOS CURRICULARES

THALES RODRIGUES BARBOZA

NASCIMENTO	01.11.1990 – São Mateus/ES
FILIAÇÃO	Jamil Barboza Luzia Rodrigues Barboza
2010/2015	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica IFES – Instituto Federal do Espírito Santo - <i>Campus</i> São Mateus.
2018/2020	Curso de Pós-Graduação em Energia, nível de Mestrado CEUNES/UFES – Universidade Federal do Espírito Santo – ES.
2017/2018	Professos de Ensino Básico, Técnico e Tecnológico – Substituto, 40 horas semanais. Exercício na Coordenadoria do Curso Técnico em Mecânica. IFES – Instituto Federal do Espírito Santo - <i>Campus</i> São Mateus – ES.
2020/2022	Professos de Ensino Básico, Técnico e Tecnológico – Substituto, 40 horas semanais. Exercício na Coordenadoria do Curso Técnico em Mecânica. IFES – Instituto Federal do Espírito Santo - <i>Campus</i> São Mateus – ES.
2016/2023	Professor Educação Superior nos cursos de Engenharia Civil, Engenharia Mecânica e Engenharia Química - MULTIVIX São Mateus - Ensino Pesquisa e Extensão LTDA – ES.
Desde 2023	Professor de Ensino Básico, Técnico e Tecnológico – Efetivo, 40 horas com dedicação exclusiva. Exercício na Coordenadoria do Curso Técnico em Mecânica como Coordenador do Curso Técnico em Mecânica. IFF – Instituto Federal Fluminense - <i>Campus</i> Santo Antônio de Pádua – Centro de Referência de Cordeiro – RJ.

Dedico este trabalho, de modo especial, a
DEUS, à minha família e aos amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, fonte de vida, de graça e de sabedoria.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Andreas Nascimento, professor da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e com atribuições na Universidade Estadual Paulista (UNESP), que a todo momento me incentivava, pois sem a sua orientação, dedicação e auxílio, a pesquisa aqui apresentada, seria impossível.

Aos Professores Dr. João Andrade de Carvalho Jr. e Dr. Diunay Zuliani Mantegazini, ambos em atividade na FEG/UNESP, por todo apoio e direcionamento ao longo do desenvolvimento da tese.

Aos meus pais, Jamil Barboza e Luzia Rodrigues Barboza, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram e contribuíram com os meus estudos.

À minha família, Fabrícia Braz dos Santos Rodrigues, minha esposa, e Thales Rodrigues dos Santos, meu filho, pelo apoio e paciência durante as fases em que estive ausente.

À Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá (FEG/UNESP), pela dedicação, presteza e auxílio em todos os momentos.

Ao PRH-ANP 34.1, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

À Equinor, à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e ao Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP), pela disponibilização de dados específicos sobre operações em regiões de rochas carbonáticas, pertinentes ao desenvolvimento da pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - código de financiamento 001; com apoio do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-ANP), através do PRH-ANP/Fapesp 34.1; e com apoio do Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) da ANP, processo nº 48610.205351/2024-39.

RESUMO

A eficiência energética envolve a otimização do uso de energia para alcançar resultados com menor desperdício promovendo a sustentabilidade. Essa prática, garante um uso racional da energia e uma melhor utilização dos recursos naturais. Por isso, a exploração e exploração de recursos naturais energéticos, como geotermia, gás natural, petróleo, hidrogênio natural, entre outros, envolvem atividades de perfuração. Nesse sentido, pesquisas que visam a otimização de parâmetros de perfuração de poços são relevantes e, hoje, na literatura, têm sido abordadas, frequentemente, como estudo de caso em poços de grande profundidade, exemplificando, os reservatórios do Pré-sal no Brasil. Assim, durante o processo de perfuração, os equipamentos estão suscetíveis a choques e vibrações severas, que podem comprometer a vida útil da coluna de perfuração e dos equipamentos de fundo de poço. Sendo assim, esta pesquisa foca na minimização das vibrações torcionais (na forma de *stick-slip*) e da energia mecânica específica (MSE) durante o processo de perfuração. Como estudo de caso, foram utilizados dados de atividades reais em reservatórios carbonáticos, além de parâmetros mecânicos como vazão (FLOW), rotação da coluna de perfuração (RPM) e peso sobre a broca (WOB), por meio de matrizes de decisão. Nesta pesquisa, dois estudos foram desenvolvidos para obter um melhor entendimento da eficiência energética e do comportamento da vibração torcional (*stick-slip*). Para isso, foi realizada uma análise comparativa sistemática entre a MSE e a eficiência mecânica, criou-se um modelamento representativo de um sistema dinâmico com 4 graus de liberdade. Também foram realizadas análises de 50 poços do Pré-sal brasileiro (obtidos via ANP/BDEP) e de 24 poços localizados no Campo Volve – Mar do Norte (Noruega), dos quais, alguns específicos foram utilizados para substanciar as matrizes de decisão propostas. Modelos para a STICKRATIO e a MSE foram criados e implementados, sendo que a otimização desses modelos se realizou pelo método do gradiente reduzido generalizado (GRG). Como etapa subsequente, aplicou-se a nova metodologia de minimização da STICKRATIO e MSE via matrizes de decisão, a qual, com a adição do parâmetro FLOW, mostrou-se bastante pertinente e coerente. Verificou-se que as regiões que apresentaram desejabilidade excelente foram aquelas com rotação acima de 120 [rev/min], WOB variando entre 5 e 13 [tf] e FLOW acima de 2.300 [l/min]. Logo, foi constatado que as condições operacionais para minimização tendem a combinar altos valores de RPM e FLOW, resultando em vibração torcional abaixo de 20 [%]. Desta forma, a pesquisa fornece contribuições relevantes através da introdução de uma nova metodologia, além de indicar a importância da verificação cuidadosa de um novo parâmetro mecânico no contexto (vazão), que pode ser utilizado em tempo real durante as atividades de

perfuração, garantindo uma operação otimizada e redução de riscos, demonstrando ser uma inovação tecnológica viável nesta área.

PALAVRAS-CHAVE: energia; otimização; modelagem; matriz de decisão; eficiência; perfuração de poço.

ABSTRACT

Energy efficiency involves optimizing the use of energy to achieve results with minimal waste, promoting sustainability. This practice ensures the rational use of energy and better utilization of natural resources. As a result, the exploration and exploitation of natural energy resources, such as geothermal energy, natural gas, oil, natural hydrogen, among others, involve drilling activities. In this context, research aimed at optimizing drilling parameters is relevant and is often discussed in the literature today as case studies in deep wells, exemplified by the Pre-salt reservoirs in Brazil. Thus, during the drilling process, equipment is susceptible to severe shocks and vibrations, which can compromise the lifespan of the drill string and bottom hole equipment. Consequently, this research focuses on minimizing torsional vibrations (in the form of stick-slip) and mechanical specific energy (MSE) during the drilling process. As a case study, real activity data from carbonate reservoirs were used, along with mechanical parameters such as flow rate (FLOW), drill string rotation (RPM), and weight on bit (WOB), through decision matrices. In this research, two studies were developed to better understand energy efficiency and torsional vibration behavior (stick-slip). For this purpose, a systematic comparative analysis between MSE and mechanical efficiency was conducted, and a representative modeling of a dynamic system with 4 degrees of freedom was created. Additionally, analyses of 50 wells from the Brazilian Pre-salt (obtained via ANP/BDEP) and 24 wells located in the Volve Field – North Sea (Norway) were carried out, of which some specific ones were used to substantiate the proposed decision matrices. Models for the STICKRATIO and MSE were created and implemented, with the optimization of these models conducted using the generalized reduced gradient (GRG) method. As a subsequent step, the new methodology for minimizing the STICKRATIO and MSE via decision matrices was applied, which, with the addition of the FLOW parameter, proved to be quite pertinent and coherent. It was found that regions with excellent desirability were those with a rotation above 120 [rev/min], WOB ranging between 5 and 13 [tf], and FLOW above 2.300 [l/min]. It was thus observed that the operational conditions for minimization tend to combine high values of RPM and FLOW, resulting in torsional vibration below 20 [%]. In this way, the research provided relevant contributions by introducing a new methodology, as well as highlighting the importance of careful verification of a new mechanical parameter in the context (flow rate), which can be used in real-time during drilling activities, ensuring optimized operation and risk reduction, demonstrating to be a viable technological innovation in this area.

KEYWORDS: energy; optimization; modeling; decision matrix; efficiency; well drilling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Um típico reservatório anticlinal de petróleo e gás.....	23
Figura 2 – Camada pré-sal brasileira.....	24
Figura 3 – Evolução da produção de petróleo no Brasil (pré-sal x pós-sal).	25
Figura 4 – Energia do top drive transferida para a broca.	27
Figura 5 – Tubo de perfuração (drill pipes).....	28
Figura 6 – Comandos (drill collars).	28
Figura 7 – Tubos pesados (heavy-weight drill pipes – HWDP).	29
Figura 8 – Broca com dentes fresados (a) e broca com dentes de inserto de carboneto de tungstênio (b).....	30
Figura 9 – A ação de esmagamento de rocha de um dente de uma broca de rolo (a) antes da falha da rocha (b) após falha da rocha.	31
Figura 10 – Broca de diamantes naturais.	32
Figura 11 – Broca PDC.	32
Figura 12 – Diagrama esquemático de um diamante policristalino compacto.....	33
Figura 13 – Cisalhamento ocorrendo com um único cortador PDC.....	33
Figura 14 – Linha do tempo de otimização da perfuração.....	34
Figura 15 – Curva de relacionamento de WOB e ROP.....	36
Figura 16 – Curva de relação entre velocidade de rotação e ROP.....	37
Figura 17 – Demonstração do comportamento da ROP X Potência hidráulica da broca.	38
Figura 18 – Velocidade de perfuração x diferença de pressão no fundo do poço	39
Figura 19 – Relação entre viscosidade dinâmica do fluido de perfuração e ROP.....	40
Figura 20 – Efeito do conteúdo de sólidos do fluido de perfuração nos parâmetros.....	41
Figura 21 – Teor de sólidos e efeito da dispersão na ROP.	41
Figura 22 – Fator hidráulico (λ).....	44
Figura 23 – Broca uniformemente desgastada.	46
Figura 24 – Áreas da broca afetada por cada tipo de vibração.....	46
Figura 25 – Vibração axial.	47
Figura 26 – Falha na broca PDC devido a vibração axial (bit-bounce).	48
Figura 27 – Vibração lateral (whirl).....	48
Figura 28 – Broca PDC com desgaste formado pela vibração lateral.	49
Figura 29 – Vibração torcional (slick-slip).	50
Figura 30 – Broca PDC com desgaste formado pela vibração torcional (stick-slip).	50

Figura 31 – Posição do MWD em uma coluna de perfuração.....	52
Figura 32 – Modelo concentrado massa–mola da coluna de perfuração.	60
Figura 33 – Modelo com quatro graus de liberdade.	61
Figura 34 – Modelo apresentado por Patil e Teodoriu.	61
Figura 35 – Modelo apresentado por Tian.	62
Figura 36 – Modelo de 4–DOF de uma coluna de perfuração.	65
Figura 37 – Bloco principal.	71
Figura 38 – Vista interna do bloco principal.	68
Figura 39 – CRPM obtido em campo.	70
Figura 40 – CRPM simulado.....	71
Figura 41 – Relação entre CRPM e tempo com WOB = 10 [tf].....	72
Figura 42 – Valores da CRPM para WOB = 10 e 12,5 [tf] (SRPM = 50 [rev/min])	73
Figura 43 – Valores da CRPM para WOB = 15 e 175 [tf] (SRPM = 50 [rev/min]).	74
Figura 44 – Valores da CRPM para WOB = 17,5 e 20 [tf] (SRPM = 50 [rev/min]).	74
Figura 45 – Valores da CRPM para WOB = 10 e 20 [tf] (SRPM = 50 [rev/min]).	74
Figura 46 – Valores da CRPM para diâmetro da broca = 8 ½” e 12 ¼” (WOB = 10 [tf]).....	75
Figura 47 – Valores da CRPM para diâmetro da broca = 8 ½” e 12 ¼” (WOB = 12,5 [tf])....	75
Figura 48 – Valores da CRPM para diâmetro da broca = 8 ½” e 12 ¼” (WOB = 15 [tf]).....	76
Figura 49 – Valores da CRPM para diâmetro da broca = 8 ½” e 12 ¼” (WOB = 17,5 [tf])....	76
Figura 50 – Valores da CRPM para diâmetro da broca = 8 ½” e 12 ¼” (WOB = 20 [tf]).....	76
Figura 51 – Valores da CRPM para profundidade de 3.500 e 3.000 m.	77
Figura 52 – Valores da CRPM para profundidade de 3.500 e 4.000 m.	78
Figura 53 – Valores da CRPM para profundidade de 4.500 e 5.000 m.	78
Figura 54 – Interface do software Schlumberger Log Data Toolbox 2.3.....	83
Figura 55 – Fluxograma estatístico.....	84
Figura 56 – Histograma dos gráficos de normalidade.	87
Figura 57 – Gráficos de resíduos para STICKRATIO: (a) Probabilidade normal; (b) Resíduos x Valor Ajustados.....	92
Figura 58 – Gráficos de Superfície: (a) STICKRATIO x FLOW x RPM; (b) STICKRATIO x WOB x RPM; (c) STICKRATIO x WOB x FLOW.	93
Figura 59 – STICKRATIO real X STICKRATIO modelado.	94
Figura 60 – Gráficos de resíduos para MSE: (a) Probabilidade normal; (b) Resíduos x Valor Ajustados.....	98
Figura 61 – Gráficos de Superfície: (a) MSE x FLOW x RPM; (b) MSE x WOB x RPM;	98

Figura 62 – MSE real X MSE modelada.....	100
Figura 63 – Visualização do painel de utilização pelo usuário.....	104
Figura 64 – Parte dos dados da otimização.	105
Figura 65 – Parâmetros utilizados pelo autor no Solver.	106
Figura 66 – Fluxograma da Empresa B.....	117
Figura 67 – Fluxograma de mitigação do stick–slip da Empresa C.	119
Figura 68 – Matriz de decisão de parâmetros otimizados para STICKRATIO e MSE com base na desejabilidade global.	122
Figura 69 – Matriz de decisão dos parâmetros otimizados para STICKRATIO e MSE com base no STICKRATIO.	123
Figura 70 – Matriz de decisão dos parâmetros otimizados para STICKRATIO e MSE com base na MSE.....	124
Figura 71 – Matriz de decisão para STICKRATIO.	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Eficiência mecânica de perfuração da Broca (Em).	43
Tabela 2 – Rendimento comparando a MSE.	56
Tabela 3 – Rendimento mecânico comparando a Potência.	57
Tabela 4 – Variação percentual da eficiência da MSE e Potência mecânica.	58
Tabela 5 – Parâmetros da modelagem numérica via MATLAB®/Simulink®.	69
Tabela 6 – Descrição dos poços.	81
Tabela 7 – Dados dos poços utilizados ($\varnothing$ Broca = 8 ½”).	82
Tabela 8 – Correlação de Pearson e Spearman.	85
Tabela 9 – Estatística Descritiva dos dados.	86
Tabela 10 – Correlação de Spearman.	88
Tabela 11 – Padronização dos preditores contínuos com níveis codificados em -1 e +1.	89
Tabela 12 – Dados codificados para a análise de regressão.	90
Tabela 13 – Estatística de regressão.	91
Tabela 14 – Efeito dos fatores no STICKRATIO.	91
Tabela 15 – Efeito dos fatores na MSE.	95
Tabela 16 – Dados codificados para a análise de regressão da MSE.	96
Tabela 17 – Efeito dos fatores na MSE sem o termo de interação de segunda ordem	97
Tabela 18 – Resultados da otimização com RPM a 100 [rev/min].	106
Tabela 19 – Resultados da otimização com RPM a 110 [rev/min].	107
Tabela 20 – Resultados da otimização com RPM a 120 [rev/min].	108
Tabela 21 – Resultados da otimização com RPM a 130 [rev/min].	109
Tabela 22 – Resultados da otimização com RPM a 140 [rev/min].	110
Tabela 23 – Resultados da otimização com RPM a 150 [rev/min].	110
Tabela 24 – Resultados da otimização com RPM a 160 [rev/min].	111
Tabela 25 – Resultados da otimização com RPM a 170 [rev/min].	112
Tabela 26 – Resultados da otimização com RPM a 180 [rev/min].	113
Tabela 27 – Ações para mitigar o stick-slip da empresa A.	116
Tabela 28 – Ajustes operacionais aplicado pelas empresas avaliadas para mitigar a vibração torcional (stick-slip).	120
Tabela 29 – Dados reais dos reservatórios carbonáticos.	140

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	Instituto Americano de Petróleo (do inglês, <i>American Petroleum Institute</i>)
BHA	Conjunto de fundo de poço (do inglês, <i>Bottom–Hole Assembly</i>)
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBL	Carga crítica de flambagem (do inglês, <i>critical buckling load</i>)
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CRPM	Rotação do <i>collar</i> por minuto (do inglês, <i>Collar Revolutions per Minute</i>)
DC	Colar de perfuração (do inglês, <i>Drill Collars</i>)
DOF	Graus de liberdade (do inglês, <i>Degrees of freedom</i>)
DP	Tubo de Perfuração (do inglês, <i>Drill pipes</i>)
DSE	Energia específica de perfuração (do inglês, <i>Drilling Specific Energy</i>)
DTOR	Torque medido no fundo do poço (do inglês, <i>Downhole Torque</i>)
DWOB	Peso sobre a broca medido no fundo do poço (do inglês, <i>Downhole Weight–on–Bit</i>)
ECD	Densidade circulante equivalente (do inglês, <i>Equivalent Circulating Density</i>)
FPSO	Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência (do inglês, <i>Floating, Production, Storage and Offloading</i>)
GLP	Gás liquefeito de petróleo
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado (do inglês, <i>Generalized Reduced Gradient</i>)
HSI	<i>Horsepower per inch</i>
HWDP	Tubo de perfuração pesado (do inglês, <i>Heavy–Weight drill pipes</i>)
LWD	Perfilagem Durante a Perfuração (do inglês, <i>Logging While Drilling</i>)
MSE	Energia Mecânica Específica (do inglês, <i>Mechanical Specific Energy</i>)
MWD	<i>Measurement While Drilling</i>
OOS	<i>Out of Specification</i>
PDC	Diamante Policristalino Compacto (do Inglês, <i>Polycrystalline Diamond Compact</i>)
PDM	Motores de deslocamento positivo (do inglês, <i>Positive Displacement Motors – PDM</i>)
POOH	<i>Pull Out of Hole</i>
ROP	Taxa de Penetração (do inglês, <i>Rate of Penetration</i>)

RPM	Rotações por minuto
RSS	Sistemas rotativos direcionáveis (do inglês, <i>Rotary Steerable Systems</i>)
SRPM	Rotações por minuto medido na Superfície (do inglês, <i>Surface Revolutions per Minute</i>)
SCC	Corrosão sob tensão (do inglês, <i>stress corrosion cracking</i>)
STICKRATIO	Vibração torcional percentual
STOR	Torque na superfície (do inglês, <i>Surface Torque</i>)
SWOB	Peso sobre a broca medido na superfície (do inglês, <i>Surface Weight-on-Bit</i>)
VSS	Sistema de Severidade de Vibração (do inglês, <i>Vibration Severity System</i>)
WOB	Peso sobre a broca (do inglês, <i>Weigh-on-bit</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	OBJETIVOS.....	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	O PETRÓLEO	22
2.2	O PRÉ–SAL	23
2.3	PROCESSOS DE PERFURAÇÃO	25
2.3.1	Sistemas de rotação	26
2.3.2	Colunas de perfuração.....	27
2.3.3	Brocas	29
2.3.3.1	Broca de rolo cônico.....	30
2.3.3.2	Broca de diamantes naturais	31
2.3.3.3	Brocas PDC	32
2.4	TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO NA PERFURAÇÃO DE POÇOS	34
2.5	PARÂMETROS PARA OTIMIZAÇÃO DA ROP	35
2.5.1	Peso sobre a broca (WOB).....	35
2.5.2	Rotação da broca (RPM)	36
2.5.3	Vazão (Flow–rate)	37
2.6	FLUIDOS DE PERFURAÇÃO.....	38
2.6.1	Efeito da densidade.....	39
2.7	ENERGIA MECÂNICA ESPECÍFICA (MSE).....	42
2.8	VIBRAÇÕES DURANTE A PERFURAÇÃO	45
2.8.1	Vibração axial (<i>bit–bounce</i>)	47
2.8.2	Vibração lateral (<i>whirl</i>).....	48
2.8.3	Vibração torcional (<i>stick–slip</i>)	49
2.8.4	Medição durante a perfuração (MWD)	51
3	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MSE E EFICIÊNCIA MECÂNICA ..	54
4	MODELAGEM MATEMÁTICA DE UMA COLUNA DE PERFURAÇÃO	59
4.1	ESTADO DA ARTE SOBRE A MODELAGEM DE SISTEMAS DINÂMICOS	59
4.2	MODELAGEM DE SISTEMAS DINÂMICOS – ESPAÇO DE ESTADOS.....	63
4.3	MODELAGEM MATEMÁTICA E HIPÓTESES	64
4.4	MODELAGEM DA FRICÇÃO BROCA–ROCHA.....	69
4.5	MODELO DESENVOLVIDO NO <i>SOFTWARE</i> MATLAB®/SIMULINK®	70

4.6	PARÂMETROS DE ENTRADA NA MODELAGEM	69
4.7	VERIFICAÇÃO DO MODELO	70
4.8	ANÁLISE E DISCUSSÃO DO MODELO	71
4.8.1	Efeito da SRPM no <i>stick-slip</i>	72
4.8.2	Efeito do WOB no <i>stick-slip</i>	73
4.8.3	Efeito do diâmetro da broca no <i>stick-slip</i>	75
4.8.4	Efeito da profundidade de perfuração no <i>stick-slip</i>	77
5	ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES TORCIONAIS EM RESERVATÓRIOS CARBONÁTICOS.....	80
5.1	ESCOLHA E REFINAMENTO DOS DADOS	80
5.2	METODOLOGIA ESTATÍSTICA.....	84
5.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA.....	86
5.4	ANÁLISE DE REGRESSÃO E DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA	88
5.4.1	Desenvolvimento de modelamento para o STICKRATIO	91
5.4.2	Desenvolvimento da modelagem para MSE	95
5.5	OTIMIZAÇÃO DO MODELO	100
5.5.1	Método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG)	101
5.5.2	Função desejabilidade.....	101
5.5.3	Construção da otimização utilizada no Microsoft Excel	103
5.6	RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO	106
5.7	FLUXOGRAMAS UTILIZADOS PELAS EMPRESAS DURANTE PERFURAÇÃO.....	113
5.7.1	Descrição das empresas	114
5.7.2	Fluxogramas utilizados pelas empresas	116
6	RESULTADO E DISCUSSÃO DA MATRIZ DE DECISÃO PROPOSTA PARA OTIMIZAR A VIBRAÇÃO TORCIONAL (<i>STICK-SLIP</i>) E MSE..	122
7	CONCLUSÕES.....	127
	REFERÊNCIAS.....	130
	APÊNDICE A – MATLAB function: Modelo de interação broca-rocha não linear	138
	APÊNDICE B – Macro em VBA desenvolvida para ser utilizada na otimização.	139
	APÊNDICE C – Dados reais dos reservatórios carbonáticos.....	140
	APÊNDICE D – Esquema da otimização apresentado em planilha.	186

1 INTRODUÇÃO

A perfuração de poços é amplamente utilizada como meio para alcançar reservas energéticas naturais e nesse sentido destacam-se a perfuração de reservatórios de hidrogênio, energia geotérmica, petróleo e gás natural. As reservas de hidrogênio são consideradas uma alternativa promissora para atender à crescente demanda por fontes de energia mais ambientalmente amigáveis (ZENG *et al.*, 2024). O poço pioneiro, em busca por reservas de hidrogênio, foi o Bourakebougou, perfurado em 1987, há uma profundidade de 112 [m] com o intuito de servir como abastecimento de água, porém, devido a uma inesperada explosão de gás, rapidamente precisou ser fechado. Em 2011, foi reaberto o poço (Bougou-1) e o hidrogênio ali encontrado foi produzido como um recurso energético para fornecer eletricidade a uma vila próxima. O projeto provou ser consideravelmente promissor, de forma que vários outros poços foram perfurados, desde então, iniciando uma campanha significativa de exploração de hidrogênio (PRINZHOFER *et al.*, 2018).

Já as reservas de energia geotérmica, a qual provém de rochas e fluidos que circulam no subsolo em lugares específicos (HUANG *et al.*, 2023), garante quantitativos importantes de calor, atualmente já explorados em diferentes e grandes profundidades. Vale ressaltar, que a energia provinda de fontes geotérmicas desempenha um papel importante na realização de metas de segurança energética, desenvolvimento econômico e mitigação das mudanças climáticas, enquanto garante o auxílio à manutenção de níveis baixos em termos de emissões de gases de efeito estufa (MANZELLA, 2015).

Por outro lado, as reservas de petróleo, que são bastante exploradas atualmente, são massas fossilizadas que se acumularam abaixo da superfície da Terra em tempos passados, já o petróleo bruto é uma mistura de várias substâncias orgânicas e é a fonte de hidrocarbonetos, como metano, etano, propano, butano, pentano e vários outros hidrocarbonetos (CHAUDHURI, 2016). Por sua vez, os hidrocarbonetos de petróleo são considerados por alguns como a força motriz da sociedade moderna.

Segundo Khan e Islam, a indústria petrolífera possui grande destaque na sociedade moderna (KHAN; ISLAM, 2007). Dessa forma, vale destacar que a indústria petrolífera ainda terá um papel importante na sociedade nos próximos anos, mesmo perdendo espaço como fonte primária de energia.

Nesse contexto, a perfuração para alcançar as reservas energéticas é considerada como umas das atividades mais caras e arriscadas, por isso, a busca pela otimização de processos de perfuração para aumentar a eficiência e aproveitamento de reservatórios localizados a grandes

profundidades (como no caso do Pré-sal) têm gerado uma corrida tecnológica a fim de obter um aumento de eficiência do processo de perfuração, acompanhado da redução do custo do produto gerado (NOABAHAR SADEGHI *et al.*, 2022).

Parte do alto custo do processo de perfuração está relacionado às vibrações indesejadas que ocorrem na coluna de perfuração (GHASEMLOONIA *et al.*, 2015). As vibrações não apenas aumentam o tempo de perfuração, mas também representam um risco à integridade do equipamento e à segurança da equipe de perfuração (EJIKE *et al.*, 2024). Assim, a vibração da coluna de perfuração ocorre principalmente em três formas: lateral, axial e torcional. i) A vibração lateral é caracterizada por movimentos oscilatórios na direção perpendicular ao eixo da coluna, sendo induzida pela fricção entre a broca e o poço, e podendo causar desgaste da broca e instabilidade do poço; ii) A vibração axial, ou longitudinal, ocorre ao longo do eixo da coluna e é resultado da interação entre a força de contato da broca e a frequência natural do tubo de perfuração, podendo levar à ressonância e fadiga na coluna; iii) Já a vibração torcional é um movimento rotacional ao longo do eixo da coluna, causada por fricções e irregularidades nas formações, podendo resultar em danos à coluna e no desvio da trajetória de perfuração.

Além disso, a vibração torcional é frequentemente responsável pelo surgimento do *stick-slip* (SONG *et al.*, 2024). Desse modo, as vibrações podem comprometer a qualidade do desempenho da perfuração, limitando a vida útil, aumentando a energia mecânica específica (MSE) e consequentemente, diminuindo a produtividade da ferramenta (ZHU *et al.*, 2014).

Além das vibrações, outro parâmetro de grande importância é a MSE, que é definida como a quantidade de energia mecânica necessária para fragmentar um volume unitário de rocha (LIANG *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2023) e serve como um parâmetro valioso na otimização (DENG *et al.*, 2022). Este índice tem sido amplamente utilizado para avaliar a eficácia do rompimento da rocha pela broca para otimizar os parâmetros de perfuração e monitorar o desgaste dos insertos da broca (HU *et al.*, 2023).

Em condições ideais, a MSE deveria ser numericamente equivalente à resistência à compressão confinada máxima (do inglês, *Unconfined Compressive Strength* – UCCS) da formação (ANEMANGELY *et al.*, 2019; MANTEGAZINI *et al.*, 2024). Contudo, a MSE medida no fundo do poço é frequentemente influenciada por fatores que não estão diretamente relacionados ao rompimento da rocha, como a fricção no sistema de perfuração, o desgaste dos cortadores da broca e ocorrências do *stick-slip* (HU *et al.*, 2023).

A compreensão das vibrações e da MSE associadas ao processo de perfuração pode dar respostas excelentes ao operador quando bem descritas e analisadas, evitando condições adversas que podem exceder o custo de US\$1 milhão.dia⁻¹, tornando o tempo de inatividade ou

manutenção necessários durante as atividades grandes vilões (PINHEIRO *et al.*, 2019). Para minimizar o problema das vibrações torcionais (*stick-slip*), durante o processo de perfuração em tempo real, as empresas têm utilizado fluxogramas para direcionamento e mitigação da vibração, no entanto, o fluxograma ainda se encontra bastante limitado, por exemplo, as empresas só utilizam a manipulação dos parâmetros como velocidade de rotação (RPM) e o peso sobre a broca (WOB), deixando de utilizar a vazão (FLOW), considerada um parâmetro indispensável no processo.

Diante do exposto, a pesquisa se justifica com o intuito de otimizar o processo de perfuração por meio das análises das vibrações e da MSE com o auxílio de matrizes de decisão que poderão possibilitar a escolha correta dos parâmetros de perfuração em tempo real, resultando em menor tempo de inatividade e redução dos custos da operação.

1.1 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem por objetivo apresentar formas de minimizar as vibrações torcionais (na forma de *stick-slip*) e a MSE por meio da análise dos parâmetros de superfície (RPM, FLOW e WOB) através da obtenção de dois modelos quadráticos que auxiliarão na criação de matrizes de decisão para serem utilizadas durante o processo de perfuração. Além disso, busca-se avaliar os parâmetros de perfuração fazendo uso da modelagem de sistemas dinâmicos, com o objetivo de caracterizar o comportamento da velocidade de rotação da broca e analisar dados provenientes de poços carbonáticos.

Como objetivos específicos, têm-se:

- Relacionar a eficiência da MSE com a eficiência mecânica, comparando a quantidade de energia disponível na superfície com a energia utilizada na broca;
- Modelar uma coluna de perfuração com 4 graus de liberdade para representar o comportamento dinâmico da broca e da coluna durante a fase perfuração;
- Investigar a relação entre vibrações torcionais (*stick-slip*) e a RPM, observando como variações na rotação influenciam o comportamento dinâmico;
- Analisar a relação entre vibrações torcionais (*stick-slip*) e o WOB, investigando como diferentes valores de WOB afetam a ocorrência dessas vibrações;
- Examinar a influência do diâmetro da broca nas vibrações torcionais e no *stick-slip*;
- Verificar a relação entre vibrações torcionais (*stick-slip*) e a profundidade de perfuração, avaliando o impacto da profundidade no comportamento dinâmico;

- Desenvolver matrizes de decisão para aplicação em tempo real na operação de perfuração em poços carbonáticos minimizando as vibrações torcionais (*stick-slip*) e MSE, permitindo ajustes e otimização dos parâmetros operacionais (FLOW, RPM e WOB).

7 CONCLUSÕES

Em suma, constatou-se por meio do levantamento bibliográfico, que a vibração torcional (*stick-slip*) prejudica o processo de perfuração por submeter as ferramentas de fundo do poço, bem como os tubos de perfuração, a esforços excessivos, podendo levar a falhas. Com base nas análises realizadas, as principais conclusões estão apresentadas a seguir:

- Ao analisar a relação entre a eficiência da MSE e a eficiência mecânica, foi possível concluir que somente com a utilização dos parâmetros de RPM e TOR de superfície e de fundo de poço (eficiência mecânica) é possível simplificar a obtenção de dados da eficiência de perfuração, pois, constatou-se que a eficiência mecânica e a eficiência da MSE são estatisticamente iguais, devido apresentarem uma variação média de 0,20 [%]. Portanto, a eficiência mecânica surge como uma alternativa prática para avaliar perdas de energia durante o processo de perfuração;
- O modelo com 4 graus de liberdade, validado com dados de campo e implementado no SIMULINK®, demonstrou precisão ao representar a dinâmica da coluna de perfuração com um erro relativo de 0,34 [%] em comparação com dados reais. O baixo erro relativo indicou que o modelo é eficaz e representa de forma satisfatória o comportamento dinâmico da broca e coluna de perfuração;
- Ao analisar a relação entre as vibrações torcionais (*stick-slip*) e a RPM, foi possível concluir que a rotação de 50 [rev/min] aumentou a ocorrência de *stick-slip*, ressaltando a necessidade de otimizar as velocidades para reduzir vibrações durante o processo de perfuração. A comparação entre 50 [rev/min] e 150 [rev/min], demonstrou que quando a rotação diminuiu o *stick-slip* aumentou cerca de 92 [%];
- Ao analisar a relação entre as vibrações torcionais (*stick-slip*) e o WOB, foi possível concluir que o aumento do valor do WOB pode aumentar a possibilidade de ocorrência do *stick-slip*, especialmente em torno de 20 [tf], apontando a importância de um gerenciamento cuidadoso. A comparação entre 10 [tf] e 20 [tf], demonstrou que quando o WOB foi alto o *stick-slip* aumentou cerca de 46 [%];
- Ao analisar a relação entre as vibrações torcionais (*stick-slip*) e o diâmetro da broca, foi possível concluir que a utilização da broca com diâmetro de 12 ¼” apresentou uma ocorrência mais alta de *stick-slip*, com cerca de 10,41 [%] a mais, em média, em comparação com a broca de 8 ½”. Diante do fato, é sugerido que a seleção da broca e as condições operacionais sejam ajustadas para minimizar vibrações indesejadas;

- Ao analisar a relação entre as vibrações torcionais (*stick-slip*) e a profundidade de perfuração, possibilitou-se concluir que perfurações mais profundas tendem a aumentar a probabilidade de *stick-slip*. A profundidade de 5.000 [m] apresentou em média 18 [%] a mais de ocorrências do *stick-slip* quando comparada com as profundidades de 3000, 3500, 4000, 4500 [m].

Importante citar, que esta pesquisa também se destaca pela aplicação inovadora de tecnologias avançadas e análises estatísticas para otimizar a perfuração de reservatórios carbonáticos, minimizando vibrações torcionais e a MSE. A pesquisa proporcionou uma compreensão e análise relevante e aprofundada do parâmetro da vibração torcional (*stick-slip*), propondo matrizes de decisão eficazes para auxiliar operações em tempo real.

A metodologia desenvolvida, a qual se ampara em modelagem dinâmica e análise de regressão, oferece soluções práticas e importantes para a indústria de petróleo, promovendo eficiência energética e operação segura. As contribuições fornecem diretrizes claras para otimizar processos de perfuração com o auxílio da planilha programada para análise automatizada dos dados. Diante dos resultados obtidos, as principais conclusões da pesquisa, com base nas análises dos dados reais do processo de perfuração para mitigação das vibrações torcionais (*stick-slip*), são as seguintes:

- A FLOW foi um parâmetro crucial para minimizar a vibração torcional e deve ser considerado em pesquisas relacionadas;
- A otimização produziu valores ideais de WOB para cada valor de RPM (variando de 100 a 180 [rev/min]) e FLOW (variando de 2.200 a 3.900 [l/min]);
- Com os dados de WOB otimizados para cada valor de RPM e FLOW, criou-se uma matriz de decisão para minimizar a vibração torcional e a MSE. Constatou-se que as regiões com excelente desejabilidade são aquelas com maiores velocidades de rotação (acima de 120 [rev/min]), com WOB variando entre 5 e 13 [tf] e FLOW acima de 2.300 [l/min], tendo como resultado mínimo um ganho de desejabilidade global de 40 [%];
- Também foi proposta uma matriz de decisão para minimizar o STICKRATIO. Este modelo utilizou WOB variando de 1 a 21 [tf]. Como resultado, observou-se que as condições ideais de operação tendem a combinar alta RPM e alta FLOW, levando a uma severidade excelente de STICKRATIO (abaixo de 20 [%]), além de valores de WOB abaixo de 13 [tf]. Portanto, com a aplicação da matriz de decisão, é possível alcançar reduções de até 80 [%] na vibração torcional (*stick-slip*);

- De fato, as condições indesejáveis de perfuração são apresentadas, em sua maior parte, quando empregadas baixas RPM (100 a 130 [rev/min]), baixas FLOW (2200 a 3000 [l/min]) e altos valores de WOB (acima de 13 [tf]), sendo essas as condições mais suscetíveis a vibrações torcionais severas, indicando um maior risco de problemas operacionais;
- Os resultados desta pesquisa podem ser utilizados na exploração de recursos naturais adicionais, incluindo hidrogênio natural e fontes de energia geotérmica.

Nesse sentido, seguem as sugestões para trabalhos futuros:

- Continuar o desenvolvimento e a validação de modelos mais sofisticados para prever a ocorrência de vibração torcional (*stick-slip*), integrando técnicas de aprendizado de máquina para melhorar a precisão e adaptar-se a diferentes condições de perfuração;
- Investigar o efeito de diferentes materiais e designs de brocas na ocorrência de vibrações, buscando otimizar a escolha de brocas para diferentes formações geológicas;
- Utilizar ambientes de simulação virtual para testar diferentes cenários de perfuração e validar estratégias de mitigação de vibrações antes da aplicação em campo;
- Investigar outros algoritmos de otimização, além do GRG, para melhorar a eficácia da otimização dos parâmetros de perfuração.

REFERÊNCIAS

ABADIE J.; CARPENTIER J. Generalization of the wolfe reduced gradient method to the case of nonlinear constraints. **Optimization**, London, p. 37–47, 1969.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, G. N. E. B. (Brasil). **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural – 2024**. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletins/boletim-mensal-da-producao-de-petroleo-e-gas-natural>. Acesso em: 24 nov. 2024.

AKGUN, F. Drilling variables at technical limit of drilling Rate. *In*: CANADIAN INTERNATIONAL PETROLEUM CONFERENCE, 2002, Calgary. **Proceedings** [...]. Calgary: Petroleum Society of Canada, 2002. p. 1–14. Disponível em: <http://www.onepetro.org/doi/10.2118/2002-051>. Acesso em: 22 mar. 2021.

AMADI, K.; IYALLA, I. Application of mechanical specific energy techniques in reducing drilling cost in deepwater development. *In*: SPE DEEPWATER DRILLING AND COMPLETIONS CONFERENCE, 2012, p. 20–21, Galveston. **Proceedings** [...]. Galveston: SPE, 2012. Disponível em: <https://onepetro.org/SPEDDC/proceedings/12DDC/All-12DDC/Galveston,%20Texas,%20USA/157390>. Acesso em: 3 may 2023.

ANEMANGELY, M.; RAMEZANZADEH, A.; MOHAMMADI BEHBOUD, M. Geomechanical parameter estimation from mechanical specific energy using artificial intelligence. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Amsterdam, v. 175, p. 407–429, 2019.

ARMENTA, M. Identifying inefficient drilling conditions using drilling-specific energy. *In*: SPE ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION, p. 21–24, 2008, Denver. **Proceedings** [...]. Denver: SPE, 2008. Disponível em: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings/08ATCE/08ATCE/SPE-116667-MS/145109>. Acesso em: 22 mar. 2023.

ATKINS, T.; ESCUDIER, M. **A Dictionary of Mechanical Engineering**. Oxford: Oxford University Press, 2013. Disponível em: <http://www.oxfordreference.com/view/10.1093/acref/9780199587438.001.0001/acref-9780199587438>. Acesso em: 21 mar. 2021.

BABAKI, M.; YOUSEFI, M.; HABIBI, Z.; MOHAMMADI, M. Process optimization for biodiesel production from waste cooking oil using multi-enzyme systems through response surface methodology. **Renewable Energy**, Oxford, v. 105, p. 465–472, 2017.

BAKER HUGHES COMPANY. **About us**. Baker Hughes, Houston, 2024a. Disponível em: <https://www.bakerhughes.com/company/about-us>. Acesso em: 25 nov. 2024.

BAKER HUGHES COMPANY. **Vibration**. Baker Hughes, Houston, 2024b. Disponível em: <https://www.bakerhughes.com/drilling/drilling-optimization-services/multisense-dynamics-mapping-system>. Acesso em: 25 nov. 2024.

BOYLAN, G. L.; CHO, B. R. Comparative studies on the high-variability embedded robust parameter design from the perspective of estimators. **Computers and Industrial Engineering**, New York, v. 64, n. 1, p. 442–452, 2013.

BRENJKAR, E.; BINIAZ DELIJANI, E.; KARROUBI, K. Prediction of penetration rate in drilling operations: a comparative study of three neural network forecast methods. **Journal of Petroleum Exploration and Production**, Berlin, v. 11, n. 2, p. 805–818, 2021.

BRETT, J. F. The genesis of torcional drillstring vibrations. **SPE Drilling Engineering**, Richardson, v. 7, n. 03, p. 168–174, 1992. Disponível em: <https://onepetro.org/DC/article/7/03/168/70661/The-Genesis-of-Torcional-Drillstring-Vibrations>. Acesso em: 10 oct. 2024.

CHAUDHURI, U. R. **Fundamentals of Petroleum and Petrochemical Engineering**. Calcutta: CRC Press, 2016. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781439851616>. Acesso em: 15 mar. 2021.

CHEN, D. C. K. New drilling optimization technologies make drilling more efficient. *In*: CANADIAN INTERNATIONAL PETROLEUM CONFERENCE, p. 1–9, 2004, Calgary. **Proceedings [...]** Calgary: Petroleum Society of Canada, 2004.

CHEN, X.; GAO, D.; GUO, B.; FENG, Y. Real-time optimization of drilling parameters based on mechanical specific energy for rotating drilling with positive displacement motor in the hard formation. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, Netherlands, v. 35, p. 686–694, 2016.

CHEN, X.; YANG, J.; GAO, D. Drilling performance optimization based on mechanical specific energy technologies. **Drilling**, Rijeka, p. 1–30, 2018.

COHEN, J. Statistical power analysis. **Current Directions in Psychological Science**, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 98–101, 1992. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1111/1467-8721.ep10768783>. Acesso em: 05 nov. 2023.

D'ALMEIDA, A. L. **Indústria do petróleo no Brasil e no mundo: formação, desenvolvimento e ambiência atual**. São Paulo: Blucher, 2015.

DAVIS, L. D. **Rotary, Kelly, Swivel, Tongs, and Top Drive**. Texas: University of Texas, 1995.

DENG, S.; YANG, S.; CHI, Y.; LEI, Y.; PENG, H.; ZHANG, Y.; LING, D.; WANG, L. Bit optimization method for rotary impact drilling based on specific energy model. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Amsterdam, v. 218, p. 1–14, 2022.

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous optimization of several response variables. **Journal of Quality Technology**, Milwaukee, v. 12, n. 4, p. 214–219, 1980.

DIUNAY ZULIANI MANTEGAZINI. **Pre-operational drilling test applied to carbonate reservoirs: a multi-objective optimization approach analysis of ROP and MSE**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2023.

DRILLING COURSE. **Broca de diamante natural**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://www.drillingcourse.com/2016/01/naturel-diamonds-drilling-bits.html>. Acesso em: 21 mar. 2023.

DRILLING TOOLS INTERNATIONAL. **Drill collars**. Drilling Tools, Houston, 2023. Disponível em: <https://www.drillingtools.com/drillcollars>. Acesso em: 20 mar. 2023.

DUPRIEST, F.; KOEDERITZ, W. Maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy. *In: SPE/IADC DRILLING CONFERENCE*, p. 185–194, 2005, Amsterdam. **Proceedings** [...]. Amsterdam: Society of Petroleum Engineers, 2005. Disponível em: <http://www.spe.org/elibrary/servlet/spepreview?id=00092194>. Acesso em: 21 may 2020.

EJIKE, C.; OBUOBI, I. F.; AVINU, S.; ABID, K.; TEODORIU, C. Investigation and analysis of influential parameters in bottomhole stick-slip calculation during vertical drilling operations. **Energies**, Basel, v. 17, n. 3, p. 1–18, 2024.

ELBOULQE, Y.; EL MAGHRI, M. An explicit spectral fletcher-reeves conjugate gradient method for bi-criteria optimization. **IMA Journal of Numerical Analysis**, [S. l.], p. 1–20, 2024.

ESMAEILI, A.; ELAHIFAR, B.; FRUHWIRTH, R. K.; THONHAUSER, G. Laboratory scale control of drilling parameters to enhance rate of penetration and reduce drill string vibration. *In: SPE SAUDI ARABIA SECTION TECHNICAL SYMPOSIUM AND EXHIBITION*, Al-Khobar, p. 470–478, 2012. **Proceedings** [...]. Dallas: Society of Petroleum Engineers, 2012. v.1.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P. **Manual de Análise de Dados: Estatística e Modelagem Multivariada com Excel®, SPSS® e Stata®**. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2017.

FU, M.; ZHANG, P.; LI, J.; WU, Y. Observer and reference governor based control strategy to suppress *stick-slip* vibrations in oil well drill-string. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 457, p. 37–50, 2019.

GAROUANI, M.; BOUNEFFA, M. Automated machine learning hyperparameters tuning through meta-guided Bayesian optimization. **Progress in Artificial Intelligence**, Heidelberg, p. 1–12, 2024.

GHASEMLOONIA, A.; GEOFF RIDEOUT, D.; BUTT, S. D. A review of drillstring vibration modeling and suppression methods. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Amsterdam, v. 131, p. 150–164, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2015.04.030>. Acesso em: 10 feb. 2024.

GUAN, Z.; CHEN, T.; LIAO, H. **Theory and Technology of Drilling Engineering**. Singapore: Springer Singapore, 2021. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-981-15-9327-7>. Acesso em: 24 mar. 2021.

HALLIBURTON. **About Halliburton**. Halliburton, Denver, 2024a. Disponível em: <https://www.halliburton.com/en/about-us>. Acesso em: 25 nov. 2024.

HALLIBURTON. **Brochure**. Halliburton, Denver, 2024b. Disponível em: <https://www.halliburton.com/en/resources/vibration-monitoring-mitigation-guidelines>. Acesso em: 25 nov. 2024.

HAMMOUTENE, C.; BITS, S. FEA Modelled MSE/UCS Values Optimise PDC design for entire hole Section. *In: ALL DAYS*, 2012, Cairo. **Proceedings** [...]. Cairo: SPE, 2012. p. 66–76. Disponível em: <https://onepetro.org/SPENATC/proceedings/12NATC/All-12NATC/Cairo,%20Egypt/157540>. Acesso em: 21 may 2020.

HOOD, J.; TAYLOR, R.; MORRIS, P.; RILEY, B.; PLOUZEK, D.; HUGHES, B.; WILSON, J.; METZ, M.; ALAM, R.; BILLITON, B. Expert real-time drilling performance prevents twist-offs and reduces bit damage in the permian basin. *In: 2015, Londres. Proceedings* [...]. Londres: [s. n.], 2015. Disponível em: <https://onepetro.org/SPEDC/proceedings-abstract/15DC/15DC/D031S013R003/183373>. Acesso em: 22 may 2023.

HU, S.; SHENG, M.; SHI, S.; LI, J.; TIAN, S.; LI, G. Optimization of fracturing stages/clusters in horizontal well based on unsupervised clustering of bottomhole mechanical specific energy on the bit. **Natural Gas Industry B**, Beijing, v. 10, n. 6, p. 583–590, 2023.

IADC. **IADC Drilling Manual**. 12. ed. Houston: IADC, 2015.

INDIAMART. **PDC drill bit**. Indiamart, Chicago, 2023. Disponível em: <https://www.indiamart.com/proddetail/pdc-bits-22069833948.html>. Acesso em: 22 mar. 2023.

ISLAM, M. R.; HOSSAIN, M. E. **Drilling Engineering**. Cambridge: Elsevier, 2021.

JOHANN, P. R. S.; MONTEIRO, R. C. Geophysical reservoir characterization and monitoring at brazilian pre-salt oil fields. *In: ANNUAL OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE*, Houston, p. 4070–4096, 2016. **Proceedings of** [...]. Houston: Curran Associates, 2016.

KESSAI, I.; BENAMMAR, S.; DOGHMANE, M. Z.; TEE, K. F. Drill bit deformations in rotary drilling systems under large-amplitude *stick-slip* vibrations. **Applied Sciences**, Basel, v. 10, n. 18, p. 6523, 2020.

KONATÉ, A. A.; MA, H.; PAN, H.; QIN, Z.; AHMED, H. A.; DEMBELE, N. dit J. Lithology and mineralogy recognition from geochemical logging tool data using multivariate statistical analysis. **Applied Radiation and Isotopes**, Oxford, v. 128, p. 55–67, 2017.

LIANG, H.; CHEN, H.; GUO, J.; BAI, J.; JIANG, Y. Research on lithology identification method based on mechanical specific energy principle and machine learning theory. **Expert Systems with Applications**, Oxford, v. 189, p. 1–12, 2022.

LIU, W.; YANG, F.; ZHU, X.; CHEN, X. *Stick-slip* vibration behaviors of BHA and its control method in highly-deviated wells. **Alexandria Engineering Journal**, Alexandria, v. 61, n. 12, p. 9757–9767, 2022.

LUCCHESI, C. F. Petróleo. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 12, n. 33, p. 17–40, 1998.

LYONS, W. C.; STANLEY, J. H. S.; SINISTERRA, F. J.; WELLER, T. **Air and gas drilling manual: applications for oil, gas, geothermal fluid recovery wells, specialized construction boreholes, and the history and advent of the directional dth.** 4. ed. Cambridge: Elsevier, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128157923099839>. Acesso em: 20 mar. 2023.

MAGALHÃES, A. S.; DOMINGUES, E. P. Blessing or curse: Impacts of the brazilian pre-salt oil exploration. **EconomiA**, Bingley, v. 15, n. 3, p. 343–362, 2014.

MANTEGAZINI, D. Z.; NASCIMENTO, A.; DORNELAS, V. F.; MATHIAS, M. H. **Analysis and multi-objective optimization of the rate of penetration and mechanical specific energy: a case study applied to a carbonate hard rock reservoir based on a drill rate test using play-back methodology.** **Applied Sciences (Switzerland)**, Basel, v. 14, n. 6, 2024.

MÁRQUEZ, M. B. S.; BOUSSAADA, I.; MOUNIER, H.; NICULESCU, S.-I. **Analysis and control of oilwell drilling vibrations: a time-delay systems approach.** New York: Springer, 2015.

MID-CONTINENTS. **Tubos pesados (Heavy-weight drill pipes – HWDP)** . [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://www.mid-continents.com/heavy-weight-drill-pipe>. Acesso em: 20 mar. 2023.

MOHAN, K.; ADIL, F.; SAMUEL, R. Comprehensive hydromechanical specific energy calculation for drilling efficiency. **Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME**, New York, v. 137, n. 1, p. 1–9, 2015.

MOHAN, K.; ADIL, F.; SAMUEL, R. Tracking drilling efficiency using hydro-mechanical specific energy. **SPE/IADC Drilling Conference, Proceedings**, Amsterdam, v. 1, p. 493–504, 2009.

NASCIMENTO, A. **Mathematical Modeling for Drilling Optimization in Pre-salt Sections: a focus on South Atlantic Ocean operations.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia e Ciências – Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, São Paulo, 2016. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/136182/nascimento_a_dr_guara_int.pdf?s. Acesso em: 13 apr. 2021.

NASCIMENTO, A.; TAMAS KUTAS, D.; ELMGERBI, A.; THONHAUSER, G.; HUGO MATHIAS, M. Mathematical modeling applied to drilling engineering: an application of Bourgoyne and young ROP model to a presalt case study. **Mathematical Problems in Engineering**, London, v. 2015, n. 1960, 2015.

NAVARRO-LOPEZ, E. M.; CORTES, D. Sliding-mode control of a multi-DOF oilwell drillstring with *stick-slip* oscillations. In: 2007 AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 2007, New York, . **Proceedings [...]**. New York: IEEE, 2007. p. 3837–3842. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4282198/>. Acesso em: 24 may 2024.

NAVARRO-LÓPEZ, E. M.; LICÉAGA-CASTRO, E. Non-desired transitions and sliding-mode control of a multi-DOF mechanical system with *stick-slip* oscillations. **Chaos, Solitons and Fractals**, Oxford, v. 41, n. 4, p. 2035–2044, 2009.

NAVARRO-LÓPEZ, E. M.; SUÁREZ, R. Practical approach to modelling and controlling *stick-slip* oscillations in oilwell drillstrings. **Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications**, Piscataway, v. 2, p. 1454–1460, 2004.

NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020. v. 1.

NOABAHAR SADEGHI, A.; ARIKAN, K. B.; ÖZBEK, M. E. Modelling and controlling of drill string stick slip vibrations in an oil well drilling rig. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Amsterdam, v. 216, p. 1–11, 2022.

NOBLE. **Our company**. Noble, Houston, 2024. Disponível em: <https://noblecorp.com/our-company/>. Acesso em: 25 nov. 2024.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

PATIL, P. A.; TEODORIU, C. Model development of torcional drillstring and investigating parametrically the *stick-slips* influencing factors. **Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME**, New York, v. 135, n. 1, 2013.

PELFRENE, G.; SELLAMI, H.; GERBAUD, L. Mitigating *stick-slip* in deep drilling based on optimization of pdc bit design. In: SPE/IADC DRILLING CONFERENCE AND EXHIBITION, 2011, Amsterdam. **Proceedings** [...]. Amsterdam: SPE, 2011. p. 1–3. Disponível em: <https://onepetro.org/SPEDC/proceedings/11DC/11DC/SPE-139839-MS/149329>. Acesso em: 26 mar. 2023.

PESSIER, R.; DAMSCHEN, M. Hybrid bits offer distinct advantages in selected roller cone and pdc bit applications. In: IADC/SPE DRILLING CONFERENCE AND EXHIBITION, 2010, New Orleans. **Proceedings** [...]. New Orleans: SPE, 2010. p. 1–9. Disponível em: <https://onepetro.org/SPEDC/proceedings/10DC/10DC/SPE-128741-MS/106005>. Acesso em: 26 mar. 2023.

PESSIER, R. C.; FEAR, M. J. Quantifying common drilling problems with mechanical specific energy and a bit-specific coefficient of sliding friction. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, Washington, v. Delta, p. 373–388, 1992.

PINHEIRO, Y. S.; VIEIRA, L. C.; NASCIMENTO, A.; SANTOS, F. A. S.; MATHIAS, M. H.; THONHAUSER, G.; ELMGERBI, A.; HUNT, J. Conception of a web operation system for processing petroleum related drilling data: a focus on pre-salt real-time automation and optimization. **Journal of Software Engineering and Applications**, Irvine, v. 12, n. 04, p. 61–71, 2019.

PRESALPETROLEO. **O pre-sal**. PPSA, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <http://www.presalpetroleo.gov.br/ppsa/o-pre-sal/caracteristicas>. Acesso em: 7 mar. 2021.

RAHMAN, N. A.; MOHAIDEEN, A.; BAKAR, F. H.; TANG, K. H.; MAURY, R.; COX, P.; LE, P.; DONALD, H.; BRAHMANTO, E.; SUBROTO, B. Solving *Stick-slip* Dilemma: dynamic modeling system significantly reduces vibration, increases ROP by 54%. In: ALL DAYS, 2012, Abu Dhabi, . **Proceedings** [...]. Abu Dhabi: SPE, 2012. Disponível em:

<https://onepetro.org/SPEADIP/proceedings/12ADIPEC/All-12ADIPEC/Abu%20Dhabi,%20UAE/155405>. Acesso em: 11 oct. 2024.

ROSA, A. J.; CARVALHO, R. S.; XAVIER, J. A. D. **Engenharia de Reservatórios de Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

SANNI, M. **Petroleum engineering**: Principles, calculations and workflows. Washington: John Wiley & Sons, 2018.

SHEN, Y.; ZHANG, Z.; ZHAO, J.; CHEN, W.; HAMZAH, M.; HARMER, R.; DOWNTON, G. The origin and mechanism of severe *stick-slip*. In: SPE ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION, 2017, San Antonio. **Proceedings** [...]. San Antonio: SPE, 2017. p. 9–11. Disponível em: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings/17ATCE/17ATCE/D021S024R006/193410>. Acesso em: 25 sep. 2024.

SCHULMBERGER. Orion II: telemetry platform running mwd and lwd services to drill faster and further. **Schulmberger**, Amsterdam, 2023. Disponível em: <https://www.slb.com/-/media/files/drilling/product-sheet/orion-ii-mwd-ps.ashx>. Acesso em: 23 mar. 2023.

SLB. **Who we are**. SLB, Amsterdam, 2024a. Disponível em: <https://www.slb.com/about/who-we-are>. Acesso em: 25 nov. 2024.

SLB. **Shock sub impact and vibration reduction tool**. SLB, Amsterdam, 2024b. Disponível em: <https://www.slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/well-construction/drilling/directional-drilling/bha-tools/shock-sub-impact-and-vibration-reduction-tool>. Acesso em: 25 nov. 2024.

SONG, J.; LIU, S.; HE, Y.; JIANG, S.; ZHOU, S.; ZHU, H. The state-of-the-art review on the drill pipe vibration. **Geoenergy Science and Engineering**, Amsterdam, v. 243, p. 1–20, 2024. Disponível em: Acesso em: 24 nov. 2024.

TANG, L.; ZHU, X. Effects of drill string length on stick-slip oscillation of the oilwell drill string. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering**, Shiraz, v. 44, n. 2, p. 497–506, 2020.

TANG, L.; ZHU, X.; QIAN, X.; SHI, C. Effects of weight on bit on torcional *stick-slip* vibration of oilwell drill string. **Journal of Mechanical Science and Technology**, Heidelberg, v. 31, n. 10, p. 4589–4597, 2017.

TEALE, R. The concept of specific energy in rock drilling. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v. 2, n. 1, p. 57–73, 1965.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

TIAN, J.; LI, G.; DAI, L.; YANG, L.; HE, H.; HU, S. Torcional vibrations and nonlinear dynamic characteristics of drill strings and *stick-slip* reduction mechanism. **Journal of Computational and Nonlinear Dynamics**, New York, v. 14, n. 8, 2019.

TRANSOCEAN. **Our history**. Transocean, Steinhausen, 2024. Disponível em: <https://www.deepwater.com/about/our-history>. Acesso em: 25 nov. 2024.

WEATHERFORD. **Who we are**. Weatherford, Houston, 2024. Disponível em: <https://www.weatherford.com/about-us/who-we-are/>. Acesso em: 25 nov. 2024.

YAN, B.; TIAN, J.; MENG, X.; ZHANG, Z. Stick–slip vibration characteristics study of the drill string based on PID Controller. **Energies**, Basel, v. 16, n. 23, p. 1–15, 2023.

YIGIT, A. S.; CHRISTOFOROU, A. P. *Stick–slip* and bit–bounce interaction in oil–well drillstrings. **Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME**, New York, v. 128, n. 4, p. 268–274, 2006.

ZHANG, C.; SONG, X.; LIU, Z.; MA, B.; LV, Z.; SU, Y.; LI, G.; ZHU, Z. Real–time and multi–objective optimization of rate–of–penetration using machine learning methods. **Geoenergy Science and Engineering**, Amsterdam, v. 223, p. 1–11, 2023.

ZHU, X.; TANG, L.; YANG, Q. A literature review of approaches for *stick–slip* vibration suppression in oilwell drillstring. **Advances in Mechanical Engineering**, Newbury Park, v. 2014.