

BRAULIO MANENTE DUTRA

Novas metodologias e métodos de análise de dados de perfuração de poços de petróleo e gás natural, e de implementação de curvas de *drill-rate test* em tempo real visando otimização do processo

Guaratinguetá - SP
2016

Braulio Manente Dutra

Novas metodologias e métodos de análise de dados de perfuração de poços de petróleo e gás natural, e de implementação de curvas de *drill-rate test* em tempo real visando otimização do processo

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Andreas Nascimento
Coorientador: Prof. Dr. Mauro Pedro Peres

Guaratinguetá - SP
2016

D978n

Dutra, Braulio Manente

Novas metodologias e métodos de análise de dados de perfuração de poços de petróleo e gás natural, e de implementação de curvas de drill-rate test em tempo real visando otimização do processo / Braulio Manente Dutra – Guaratinguetá, 2017.

57 f : il.

Bibliografia: f. 45

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Andreas Nascimento

Co-orientador: Prof. Dr. Mauro Pedro Peres

1. Poços de petróleo – perfuração. 2. Perfuração e broqueamento.
3. Engenharia do petróleo. I. Título

CDU 622.323

BRAULIO MANENTE DUTRA

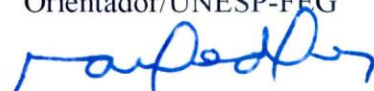
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ANDREAS NASCIMENTO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. MAURO PEDRO PERES
Coorientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. NAZEM NASCIMENTO
UNESP-FEG

Dezembro de 2016

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio e incentivo durante meus anos de graduação e nesse período de pesquisa para a realização do trabalho de conclusão de curso.

Ao meu orientador Prof. Dr. Andreas Nascimento, por me apresentar o tema proposto e auxiliar na minha contextualização aos métodos de perfuração e exploração de petróleo.

À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) pelo apoio financeiro através do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás PRH-ANP/MCTI nº 48.

E às pessoas com quem convivi ao longo da minha vida e que, de alguma forma, colaboraram para o desenvolvimento da pessoa que sou hoje.

DUTRA, B. M. **Novas metodologias e métodos de análise de dados de perfuração de poços de petróleo e gás natural, e de implementação de curvas de *drill-rate test* em tempo real visando otimização do processo.** 2016. 57 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

Com o objetivo de um desenvolvimento de metodologias e métodos de processamento e análise matemática dos dados de perfuração de poços de petróleo e gás natural, foram utilizados dados de um poço perfurado na região de pré-sal, que apresentou inúmeras dificuldades relacionadas à alta dureza e heterogeneidade das rochas carbonáticas, e aplicadas ferramentas estatísticas de filtragem e avaliação das distribuições desses dados, como o diagrama de caixa, de modo a prepara-los para o modelamento da relação entre as variáveis envolvidas de forma análoga ao realizado em testes de perfuração periódicos. Foi confirmada a possibilidade de geração das curvas utilizando dados de perfuração de testes e de operação normal, inclusive de curvas qualitativas para situações com pouca informação disponível, tornando possível uma futura implementação de ferramentas programáticas de geração e atualização de curvas de *drill-rate* em tempo real, auxiliando na escolha dos parâmetros ótimos de perfuração e otimizando o processo.

PALAVRAS-CHAVE: Perfuração. Pré-sal. Drill-rate test. ROP. Otimização. Tempo real.

DUTRA, B. M. **New methodologies and methods of petroleum and natural gas well drilling data analysis, and real time drill-rate test curve implementation aiming process optimization**. 2016. 57 p. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

ABSTRACT

Aiming the development of a methodology and methods of processing and mathematically analyzing oil and natural gas well drilling data, a case study was conducted using the data from a well drilled in the pre-salt region, which presented countless difficulties related to the high hardness and heterogeneity of the carbonate rocks, and statistical tools for the filtration and evaluation of the distribution of these data were employed, such as the boxplot, in order to prepare them for the modelling of the relationship between the variables involved in a similar manner to how it's done with periodic drill tests. The possibility for the generation of curves using drilling data from tests and regular operation was confirmed, including for qualitative curves in situations where very few information is available, making it possible for a future implementation of programmatic tools to generate and update drill-rate curves in real time, assisting in the decision to adjust the drilling parameters optimally and improving the overall development of the operation.

KEYWORDS: Drilling. Pre-salt. Drill-rate test. ROP. Optimization. Real time.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes de uma sonda de perfuração rotativa. (1) Torre de perfuração, (2) Mangueira de perfuração, (3) <i>Standpipe</i> , (4) <i>Swivel</i> , ou cabeça de injeção, (5) <i>Bell nipple</i> , (6) BOP, (7) Dutos do BOP, (8) Coluna de perfuração, (9) Comandos, (10) Broca, (11) <i>Annulus</i> , ou anular de perfuração, (12) Tubo de revestimento, (13) Bomba do sistema de lama	15
Figura 2 - Tipos de sonda de perfuração para uso em alto-mar	16
Figura 3 - Curva de <i>drill-rate</i> típica encontrada ao realizar testes de perfuração	17
Figura 4 - Curvas do primeiro <i>drill-rate test</i> geradas com dados do relatório e calculados	20
Figura 5 - Curvas do segundo <i>drill-rate test</i> geradas com dados do relatório e calculados.....	21
Figura 6 - Curvas de <i>drill-rate</i> aproximadas para dados de rotação entre 100 e 140 rpm, e fluxo entre 750 e 800 gpm, evidenciando diferentes comportamentos	23
Figura 7 - Curvas de <i>drill-rate</i> aproximadas para dados filtrados de rotação 120 rpm e fluxo 800 gpm, destacando mudança no sentido das curvas.....	24
Figura 8 - Curvas aproximadas por regressão linear, utilizando os dados originais e os dados reduzidos à média	26
Figura 9 - Ferramenta de diagrama de caixa, estabelecendo um intervalo de confiança de 99,3%.....	28
Figura 10 - Ferramenta de diagrama de caixa ajustado, estabelecendo um intervalo de confiança para uma distribuição assimétrica	29
Figura 11 - Curvas aproximadas por regressão linear, utilizando os dados originais e os dados filtrados (com valores ponderados)	31
Figura 12 - Distribuição da diferença entre a média de uma população de 32 dados e as médias de amostras de 5 dados coletados aleatoriamente	32
Figura 13 - Gráfico de dispersão das margens de erro máximas esperadas para um intervalo de confiança de 95%, em relação ao tamanho das amostras	33
Figura 14 - Dados de perfuração do poço Ogonga-1. Em destaque (vermelho), os valores detectados como aberrantes pelos métodos de filtragem inicial.....	38
Figura 15 - Curvas calculadas ao longo do progresso dos métodos, para rotação de 110 rpm e fluxo de 600 gpm.....	39
Figura 16 - Curvas calculadas ao longo do progresso dos métodos, para rotação de 140 rpm e fluxo de 650 gpm.....	40
Figura 17 - Curvas calculadas ao longo do progresso dos métodos, para rotação de 160 rpm e fluxo de 700 gpm.....	40

Figura 18 - Curvas calculadas ao longo do progresso dos métodos, para rotação de 120 rpm e
fluxo de 600 gpm.....42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados do <i>drill-rate test</i> realizado no sexto RIH, retirados do relatório de operação	19
Tabela 2 - Dados do <i>drill-rate test</i> no sexto RIH, calculados a partir dos dados originais	19
Tabela 3 - Dados do <i>drill-rate test</i> realizado no sétimo RIH, retirados do relatório de operação	20
Tabela 4 - Dados do <i>drill-rate test</i> no sétimo RIH, calculados a partir dos dados originais	21
Tabela 5 - Tamanhos amostrais calculados para diferentes valores de margem de erro máxima para ROP	33
Tabela 6 - Valores de margem de erro máxima para WOB calculados para tamanhos amostrais determinados na tabela 5	34
Tabela 7 - Distribuição de probabilidades de curvas perfeitas com 6 pontos e valores de <i>range</i> entre 0,5 e 6, ao serem aplicadas variações em y de até 1,2, gerem curvas aproximadas com valores de <i>range</i> entre 0,5 e 8,5	36
Tabela 8 - Probabilidades de curvas aproximadas com 6 pontos e valores de <i>range</i> entre 0,5 e 8,5 apresentarem a coordenada horizontal de seus vértices deslocada do vértice real em até 10 a 30%, em relação ao <i>founder point</i>	36

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de poços	14
Quadro 2 - Detalhes da operação de perfuração do poço Ogonga-1	18
Quadro 3 - Código fonte de rotina no MATLAB para organizar e filtrar dados, e gerar curvas de <i>drill-rate</i>	46
Quadro 4 - Código fonte de rotina no MATLAB para determinar curva de <i>drill-rate</i> ótima utilizando as tabelas de confiança	52
Quadro 5 - Código fonte de rotina auxiliar no MATLAB, desenvolvido como função <i>checkcurve</i> , para determinar a confiabilidade das curvas de <i>drill-rate</i> utilizando as tabelas de confiança.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BDEP	Banco de Dados de Exploração e Produção
BHA	<i>Bottom hole assembly</i> (Conjunto de instrumentos e ferramentas de poço)
BOP	<i>Blowout preventer</i>
FLO	Fluxo do fluido de perfuração
PDC	<i>Polycrystalline Diamond Compact</i> (Broca de diamante policristalino)
RIH	<i>Run-in-hole</i> (Descida das ferramentas no poço)
ROP	<i>Rate of penetration</i> (Taxa de penetração)
RPM	Rotação do eixo de perfuração
WOB	<i>Weight on bit</i> (Peso na broca)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	MOTIVAÇÃO	12
1.2	OBJETIVOS	12
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	OPERAÇÃO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS	14
2.2	TESTE DE PERFURAÇÃO (<i>DRILL-RATE TEST</i>)	16
2.3	DADOS DO POÇO PERFURADO	18
3	DESENVOLVIMENTO	19
3.1	ANÁLISE INICIAL	19
3.2	GERAÇÃO DE CURVAS DE <i>DRILL-RATE</i>	22
3.3	FILTRAGEM E ANÁLISE DOS DADOS	24
3.3.1	Metodologia de filtragem	24
3.3.2	Ferramentas estatísticas de determinação de <i>outliers</i>	26
3.3.2.1	Diagrama de caixa ajustado	29
3.3.3	Confiabilidade em amostras pequenas	30
3.3.4	Aproximação de curvas de <i>drill-rate</i> com tabelas de confiança	37
4	RESULTADOS	38
5	CONCLUSÃO	43
	BIBLIOGRAFIA	45
	APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE DE ROTINAS NO MATLAB	46

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O processo de perfuração de poços de petróleo vem evoluindo constantemente de modo a reduzir os custos envolvidos e o tempo de operação através de medidas de otimização como a melhoria na geometria e composição dos elementos das brocas utilizadas, análises litológicas da região a ser perfurada, e testes de perfuração realizados periodicamente, como o *drill-rate test*, que auxiliam na escolha dos parâmetros de operação adequados. Entretanto, poços perfurados em rochas de composição heterogênea, particularmente as encontradas nas regiões de pré-sal entre as costas africana e sul-americana, além de apresentam uma baixa taxa de penetração por conta da alta dureza dos depósitos carbonáticos que as compõem, sofrem de uma constante variação litológica que torna necessária a realização de testes de perfuração com maior frequência, demandando muito tempo e atrasando o avanço do processo (HBAIEB e AZAR, 2013). Além disso, de modo a atualizar os parâmetros utilizados durante a perfuração, os dados da operação normalmente são analisados de uma forma manual e dependente da experiência e intuição dos engenheiros e operadores envolvidos (MITCHELL e MISKA, 2011), o que pode resultar em um subaproveitamento dos recursos utilizados.

1.2 OBJETIVOS

Desenvolvimento da metodologia e métodos para a implementação de ferramentas de análise dos dados de perfuração em tempo real de modo a gerar curvas análogas as de *drill-rate test*, visando auxílio na tomada de decisão para a escolha de parâmetros de perfuração ótimos, garantindo um aumento da taxa de penetração e eficiência do processo, e uma possível redução da necessidade de realização de testes de perfuração.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo este primeiro capítulo destinado à introdução do projeto, com uma visão geral dos fatos que motivaram o seu desenvolvimento, os objetivos esperados, e a estruturação da tese.

O segundo capítulo se foca na fundamentação teórica do tema, apresentando os conceitos básicos e a terminologia utilizados como base para o desenvolvimento da tese, assim como os dados utilizados para a análise e generalização dos resultados obtidos.

No terceiro capítulo inicia-se o desenvolvimento do projeto, apresentando análises iniciais para justificar os métodos utilizados, a evolução dos critérios utilizados para a filtragem dos dados, e a geração das curvas e cálculo dos parâmetros de interesse para a otimização do processo.

No quarto capítulo, os resultados obtidos são analisados criticamente e comparados com os resultados esperados, ilustrando as vantagens dos métodos e melhorias a serem implementadas no futuro.

Por fim, o quinto capítulo conclui a tese expondo as necessidades atuais da indústria e como a geração das curvas de forma automatizada oferece uma solução simples e de baixo investimento, finalizando com as perspectivas para a continuidade do desenvolvimento da pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 OPERAÇÃO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS

Iniciada após estudos sísmicos e geológicos da região, a perfuração de poços moderna é uma atividade complexa que depende de fatores como o tipo de poço a ser perfurado, o seu propósito, localização e profundidade. Algumas classificações de poços foram especificadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação de poços

Objetivo	Trajectoria	Localização
Exploração (pioneiro, estratigráfico, extensão)	Direcional (inclinado, horizontal)	Terra firme (<i>Onshore</i>)
Produção ou Desenvolvimento	Vertical	Mar (<i>Offshore</i>)
Injeção		
Especial		

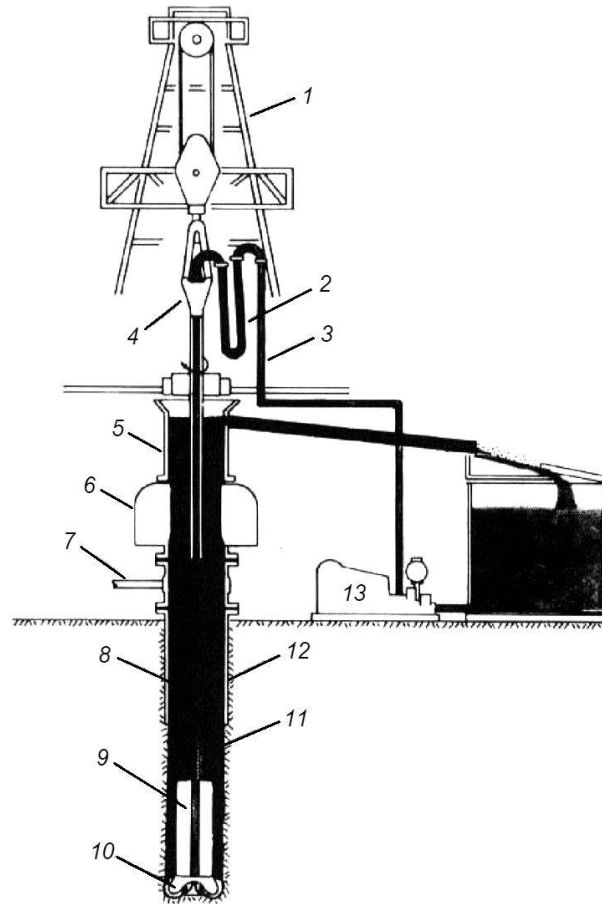
Fonte: Adaptado (MITCHELL e MISKA, 2011)

Entretanto, apesar de diferenças em tamanho, função ou capacidade de perfuração, quase todas as operações atualmente são realizadas utilizando sondas de perfuração rotativa, em que uma força e rotação são aplicados na broca causando a remoção de material da rocha (Figura 1). A força aplicada é resultado do peso da própria coluna de perfuração, abreviado por WOB, que é controlado através de um sistema de polias, enquanto a rotação (RPM) é gerada na superfície por motores que aplicam um torque na coluna de perfuração, que transmite a energia para a broca. Com o progresso da operação, novos tubos são adicionados à coluna.

O material removido pela broca é lavado por um fluxo de fluido de perfuração (FLO), também conhecido como lama, que circula através da coluna e é ejetado por orifícios na broca, retornando à superfície através do poço perfurado e do tubo anular que envolve a coluna, sendo filtrado para reutilização da lama e descarte dos detritos.

Para perfurações no mar o processo é similar ao realizado em terra firme, mas é resultado de uma logística mais complexa, com a necessidade de estabilização da sonda por conta de correntes marítimas e movimentação das ondas, e de um preparo do leito do mar para a cementação do revestimento anular que contém os fluidos de perfuração e o eventual fluxo de hidrocarbonetos para a superfície.

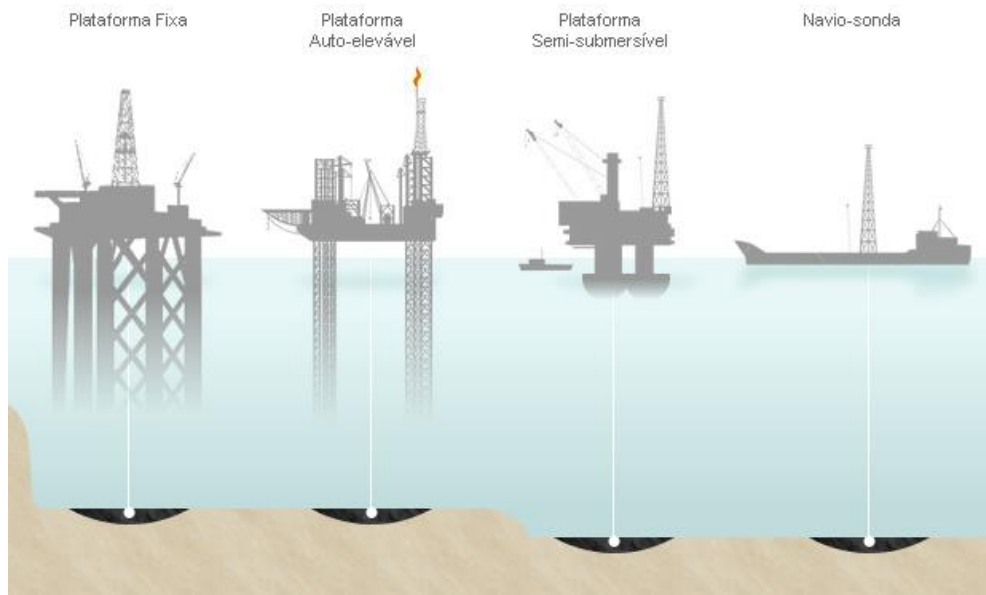
Figura 1 - Componentes de uma sonda de perfuração rotativa. (1) Torre de perfuração, (2) Mangueira de perfuração, (3) *Standpipe*, (4) *Swivel*, ou cabeça de injeção, (5) *Bell nipple*, (6) BOP, (7) Dutos do BOP, (8) Coluna de perfuração, (9) Comandos, (10) Broca, (11) *Annulus*, ou anular de perfuração, (12) Tubo de revestimento, (13) Bomba do sistema de lama



Fonte: Adaptado (BOURGOYNE, MILLHEIM et al., 1991)

Algumas das formas de perfuração de poços em alto-mar incluem o uso de plataformas fixas ou auto eleváveis, que são fixadas ao leito do mar e viáveis para até uma profundidade 300 metros, plataformas semissubmersíveis, que possuem flutuadores submersos e âncoras que garantem estabilidade e manutenção do posicionamento, utilizados para profundidades de até 2500 metros, ou navios-sonda, que são embarcações adaptadas ou construídas para esse fim, e possuem sistemas de localização dinâmicos que permitem a correção do posicionamento em relação ao poço sendo perfurado (Figura 2).

Figura 2 - Tipos de sonda de perfuração para uso em alto-mar



Fonte: (Galp Energia, 2014)

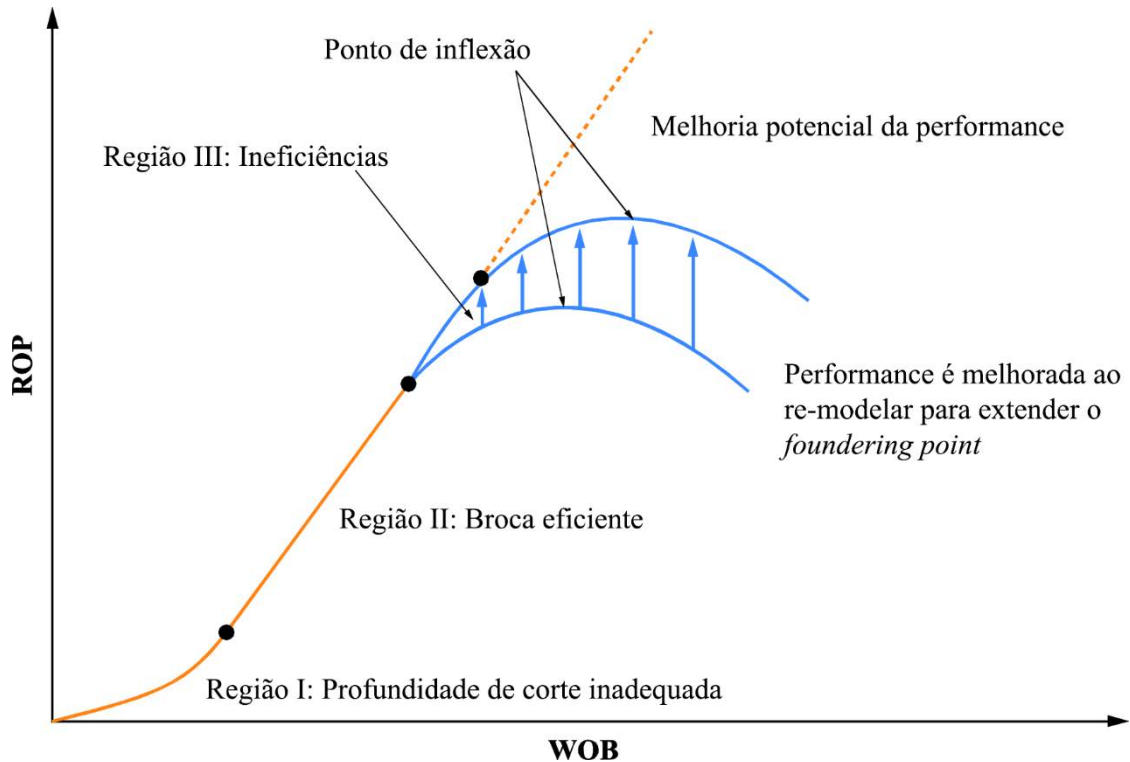
2.2 TESTE DE PERFURAÇÃO (*DRILL-RATE TEST*)

Uma das formas de avaliação das rochas a serem perfuradas é através da realização de testes de perfuração, onde os parâmetros que influenciam a taxa de penetração são variados e aplicados, e seus efeitos são registrados em gráficos ou tabelas, que posteriormente são analisados para determinar a configuração ideal de perfuração almejando uma melhor performance, considerando os limites operacionais da sonda de perfuração e o *trade-off* econômico dessa escolha.

Antes do início do processo de perfuração, e a cada novo *bit run* (descida de coluna), sobretudo quando a broca é substituída por um outro modelo, testes de perfuração devem ser realizados, e o mais comum na indústria petrolífera é o *drill-rate test*, ou teste de taxa de penetração (BERG e TVEIT, 2016). Esse teste consiste de uma escolha dos parâmetros FLO e RPM, baseando-se em uma faixa de valores ideal determinada ao longo da perfuração ou através de dados de poços similares perfurados anteriormente, e mantendo-os constantes são aplicadas medidas incrementais de WOB, resultando em uma distribuição de ROP crescente até atingido um peso que resulta na taxa de penetração máxima possível para essa configuração, com uma conseguinte distribuição decrescente para valores acima desse peso. O teste é repetido quantas vezes necessário para diferentes valores de rotação do eixo e fluxo do fluido de perfuração. Ao final, os dados coletados são analisados e os parâmetros ideais são determinados.

Como um dos fatores que influencia a remoção de material pela broca é a dureza das rochas, novos testes podem ser realizados quando há uma diminuição no desempenho da operação antes do final de vida projetado para a broca, o que sinaliza uma variação litológica.

Figura 3 - Curva de *drill-rate* típica encontrada ao realizar testes de perfuração



Fonte: Adaptado (DUPRIEST e KOEDERITZ, 2005)

As curvas determinadas pela função entre o peso na broca aplicado e a taxa de penetração obtida exibem um comportamento padrão, com três regiões bem definidas. Na região I, um aumento em ROP é resultado de um aumento desproporcional de WOB pois, para qualquer tipo de broca utilizada, a remoção de material é determinada pela profundidade de indentação do elemento cortante, atingindo seu valor máximo no início da região II. Essa faixa é definida por uma reta crescente, de maior eficiência possível, onde um aumento na energia mecânica aplicada – na forma de WOB ou RPM – resulta em um aumento proporcional na taxa de penetração, até o chamado *founder point*, onde iniciam-se processos que restringem a transferência de energia e reduzem a eficiência do processo. Essa é a região III, que é caracterizada por fatores como aumento na vibração, fenômenos de *stick-slip*, que podem danificar o BHA, e o enceramento de broca (*bit balling*), um acúmulo do material removido nas faces da broca que reduz a profundidade de corte. Algumas medidas podem ser tomadas

para mitigar o efeito dessas ineficiências, deslocando o *founder point* e aumentando a faixa eficiente do processo (IADC Drilling Manual, 2014).

Apesar dos problemas encontrados na terceira região da curva de *drill-rate*, é importante a determinação do seu ponto de inflexão de forma a estabelecer um limite operacional e projetar a faixa ideal de WOB para ser aplicada, maximizando a taxa de penetração e evitando um uso excessivo de energia mecânica.

2.3 DADOS DO POÇO PERFURADO

De modo a auxiliar no desenvolvimento dos métodos propostos, um estudo de caso foi conduzido com o poço de exploração Ogonga-1, perfurado pela Petrobras na Bacia de Kwanza, em Angola. O poço, o primeiro realizado pela empresa, foi completo em agosto de 2012 após oito meses de operação, devido à formação geológica extremamente dura e heterogênea abaixo da camada de sal, o que resultou em uma baixa taxa de penetração e paradas frequentes para a troca de brocas danificadas, além de problemas de perda de lama (ou fluido de perfuração) para fraturas nas rochas.

Os dados de perfuração foram adquiridos através do Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Quadro 2 - Detalhes da operação de perfuração do poço Ogonga-1

País	Angola
Operação	Offshore
Bacia	Kwanza
Bloco	26
Empresa	Petrobras
Nome do poço	Ogonga-1
Coordenadas	12° 46' 38.7156" S, 12° 27' 52.1604" L
Empresa operadora	Schlumberger
Data de início da perfuração	Jan/2012
Data de fim da perfuração	Ago/2012
Profundidade de lamina de água	5050 m
Profundidade final	5840 m

Fonte: Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP, 2016)

Também foram adquiridos os relatórios de operação para dois testes de perfuração realizados durante as descidas de coluna 6 e 7, utilizando brocas de PDC e tricônica, respectivamente.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 ANÁLISE INICIAL

Antes de realizar a análise de todos os dados de perfuração, uma comparação qualitativa entre as curvas de *drill-rate test* descritas nos relatórios de operação e as geradas a partir da planilha de dados foi realizada, de modo a confirmar a possibilidade do uso desses dados para desenvolver os métodos propostos.

O primeiro teste a ser analisado ocorreu no sexto RIH, utilizando uma broca de PDC e perfurando de uma profundidade de 5294 a 5301 metros com peso na broca entre 15 e 30 klbf (quilolibra-força), rotação entre 80 e 140 rpm (rotação por minuto) e fluxo de fluido de perfuração constante de 600 gpm (galão por minuto).

Tabela 1 - Dados do *drill-rate test* realizado no sexto RIH, retirados do relatório de operação

WOB (klbf)	RPM (rpm)	FLO (gpm)	Resultados
15	80-120	600	Sem problemas, ROP = 1,13 m/h
20	80-110	600	<i>Stick-slip</i> , ROP = 2,26 m/h
20	120-140	600	Sem problemas, ROP = 2,50 m/h
25	80-120	600	<i>Stick-slip</i> , ROP = 2,57 m/h
25	130-140	600	Sem problemas, ROP = 3,45 m/h
30	80-100	600	<i>Stick-slip</i> , ROP = 3,98 m/h
30	100-140	600	<i>Drill-rate test</i> cancelado por perda de lama

Fonte: Adaptado de relatório de operação (2016)

Apesar de o objetivo do teste ser perfurar até o fim da vida da broca, por conta de perdas de circulação do fluido de perfuração e de fenômenos de *stick-slip* e *shock and vibration* (S&V) ele foi finalizado antes do previsto e, portanto, uma curva típica não pôde ser gerada. Entretanto, os dados apresentados na Tabela 1 ainda podem ser utilizados para realizar a comparação.

Utilizando os dados para a faixa de rotação entre 80 e 120 rpm, pois garantem o maior número de pontos, foram calculados os valores médios de ROP para um passo de 5 klbf, dispostos na Tabela 2.

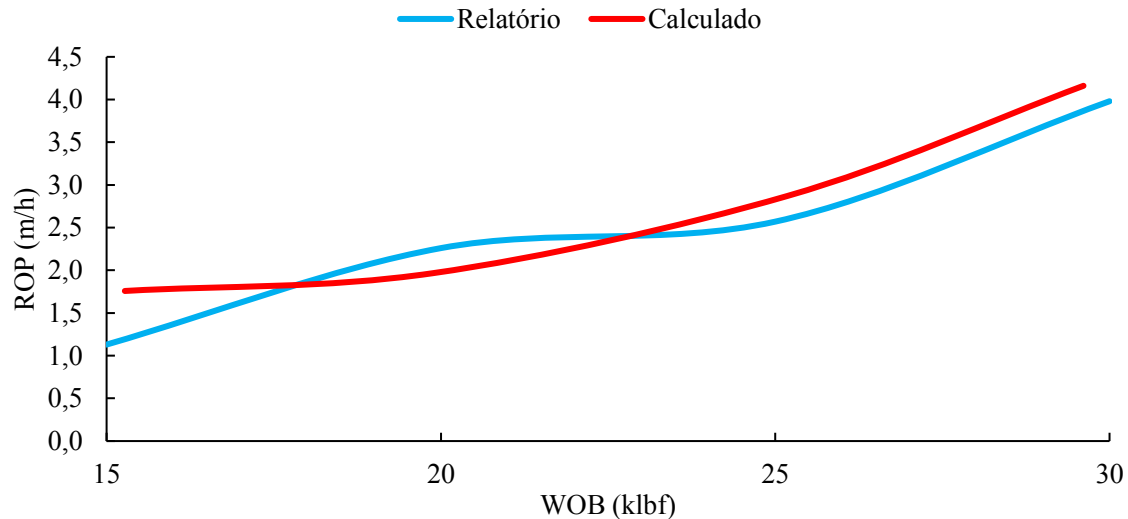
Tabela 2 - Dados do *drill-rate test* no sexto RIH, calculados a partir dos dados originais

WOB (klbf)	RPM (rpm)	FLO (gpm)	ROP (m/h)	Diferença (%)
15	100	600	1,76	56
20	95	600	1,97	13
25	85	600	2,87	12
30	95	600	4,16	5

Fonte: Produção do próprio autor

Traçadas as curvas com os dados calculados e relatados, percebe-se uma razoável similaridade entre as duas, comportando-se aproximadamente da mesma forma. Apesar disso, os valores de ROP calculados diferiram consideravelmente do esperado, o que pode ser explicado por diferenças no método de cálculo da média.

Figura 4 - Curvas do primeiro *drill-rate test* geradas com dados do relatório e calculados



Fonte: Produção do próprio autor

O segundo teste a ser analisado ocorreu no sétimo RIH, utilizando uma broca tricônica e perfurando de uma profundidade de 5326 a 5440 metros, com peso na broca entre 25 e 70 klbf, rotação entre 80 e 100 rpm e fluxo de fluido de perfuração constante de 600 gpm.

Tabela 3 - Dados do *drill-rate test* realizado no sétimo RIH, retirados do relatório de operação

WOB (klbf)	RPM (rpm)	FLO (gpm)	Resultados
25	90-100	600	Sem problemas, ROP = 1,8 m/h
30-35	80-90	600	Sem problemas, ROP = 1,8 m/h
35	100	600	S&V, ROP = 1,5 m/h
40	90-100	600	Sem problemas, ROP = ?
45	90	600	Stick-slip e S&V, ROP = ?
50	90	600	Sem problemas, ROP = 3,78 m/h
60	100	600	Stick-slip e S&V, ROP = 3,1 m/h
65	90-100	600	Sem problemas, ROP = 5,5 m/h
70	80-90	600	Stick-slip, ROP = 4,6 m/h
70	100	600	Sem problemas, ROP = 5,0 m/h

Fonte: Adaptado de relatório de perfuração (2016)

Durante o teste ocorreram intermitentemente fenômenos de *stick-slip* e S&V, mas com menos severidade que no anterior, o que possibilitou a sua continuação. Houveram perdas de circulação

constantes e por duas vezes o teste teve de ser parado pois ocorreu perda total de circulação. Apesar do teste ter sido concluído, não foram declaradas no relatório as taxas de penetração médias para WOB de 40 e 45 klbf, o que impede a geração de uma curva de *drill-rate* completa.

Analisando os dados para essa faixa de profundidade, percebe-se na representação gráfica das variáveis envolvidas (em relação à profundidade perfurada) que há picos ao longo da distribuição, que representam erros de leitura (registrados como -999,25) ou valores aberrantes. Removendo-os, e atendo-se às mesmas faixas de RPM declaradas no relatório, foram calculados os valores médios de ROP para um passo de 5 klbf, dispostos na Tabela 4.

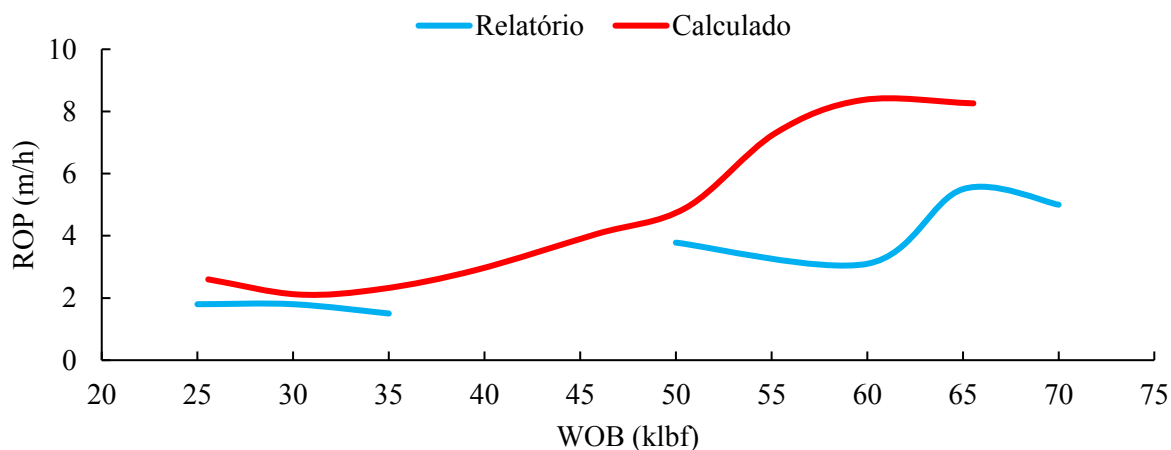
Tabela 4 - Dados do *drill-rate test* no sétimo RIH, calculados a partir dos dados originais

WOB (klbf)	RPM (rpm)	FLO (gpm)	ROP (m/h)	Diferença (%)
25	90	600	2,60	44
30	90	600	2,11	17
35	90	600	2,29	53
40	90	600	2,90	-
45	95	600	4,05	-
50	85	600	4,90	30
55	95	600	7,30	135
60	90	600	8,37	52
65	90	600	8,26	65

Fonte: Produção do próprio autor

Traçadas as curvas com os dados calculados e relatados, percebe-se imediatamente que escassez de dados do relatório impede uma comparação definitiva entre as curvas, o que ilustra a importância de um sistema automatizado que as construa a partir dos dados originais. Mas ainda que essa comparação não seja possível, destaca-se como a curva gerada a partir dos dados calculados comporta-se exatamente como o esperado para um *drill-rate test*, com o *founder point* e a região de máximo ROP facilmente deduzíveis.

Figura 5 - Curvas do segundo *drill-rate test* geradas com dados do relatório e calculados



Fonte: Produção do próprio autor

Novamente, houveram diferenças consideráveis entre os valores de ROP, mas que provavelmente provém de disparidades nos métodos de filtragem e de cálculo da média dos dados de perfuração. Entretanto, os valores de WOB que garantem um ROP máximo em ambas as curvas coincidem, considerando uma margem de erro para a taxa de penetração de, pelo menos, 0,1 m/h, o que é perfeitamente razoável.

Conclui-se, ao fim dessa análise, que é possível gerar curvas qualitativamente semelhantes às descritas nos relatórios a partir dos dados originais de forma automatizada, com a vantagem de demandarem menos tempo para serem construídas e estarem menos sujeitas a erros de leitura.

3.2 GERAÇÃO DE CURVAS DE *DRILL-RATE*

Uma vez estabelecida a possibilidade de geração de curvas de *drill-rate test* em intervalos de profundidade onde foram realizados testes de perfuração, foi testada a viabilidade de geração de curvas análogas para intervalos de operação normal.

Utilizando como base para essa análise os dados de perfuração de 5198 a 5241 metros, por apresentarem uma variação controlada e regular da rotação do eixo e do fluxo do fluido de perfuração, o que facilita a separação dos demais parâmetros.

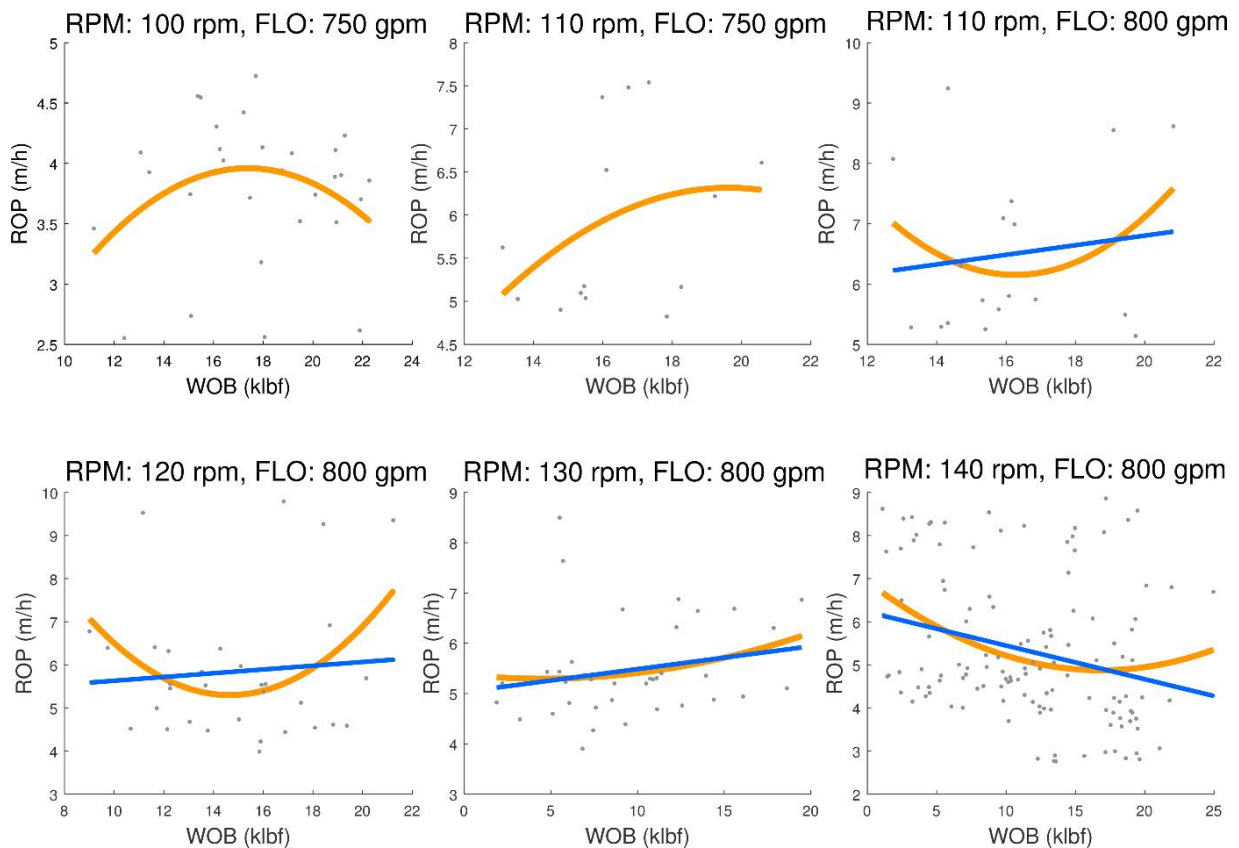
Excluindo manualmente os pontos onde há uma variação brusca na rotação, foi criada uma rotina no *software* MATLAB para separar os valores de WOB e ROP automaticamente por valores de FLO múltiplos de cinquenta (750 e 800 gpm) e valores de RPM múltiplos de dez (100, 110, 120, 130 e 140 rpm). Assumindo inicialmente que todos os dados foram coletados na região III da curva de *drill-rate*, e que o comportamento das curvas nessa região pode ser aproximado pela equação (1), que representa um polinômio de segundo grau, com concavidade voltada para baixo ($a < 0$) (NASCIMENTO, ELMGERBI et al., 2015), as curvas foram geradas através de uma ferramenta do programa que aproxima os dados por um cálculo de regressão linear.

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (1)$$

As duas curvas iniciais comportarem-se como o esperado, com a concavidade voltada para baixo, mas as outras quatro curvas apresentam uma concavidade voltada para cima, o que não condiz com o comportamento padrão das curvas dos testes (Figura 6). Nesses casos, os dados utilizados possivelmente não foram coletados na região III, como o assumido inicialmente, mas sim na região II, que se comporta como uma reta crescente. Uma nova

regressão linear dos dados foi calculada, adicionando à rotina do MATLAB uma cláusula que analisa o primeiro coeficiente polinomial da equação aproximada e, caso seja um número positivo, recalcula a equação como linear.

Figura 6 - Curvas de *drill-rate* aproximadas para dados de rotação entre 100 e 140 rpm, e fluxo entre 750 e 800 gpm, evidenciando diferentes comportamentos



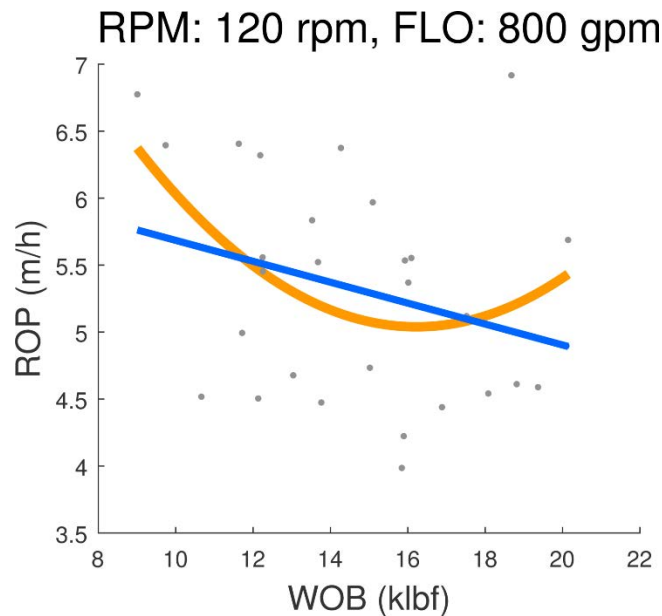
Fonte: Produção do próprio autor

Os dados com rotação do eixo de 140 rpm e fluxo de 800 gpm, após uma nova regressão linear assumindo um polinômio de primeiro grau, apresentou uma reta decrescente que, ao contrário das outras curvas, aparenta ter dados o suficiente para garantir com uma boa confiança de que essa curva os representa bem, assumindo que possíveis erros de leitura ou valores aberrantes não sejam os causadores desse comportamento inesperado. Portanto, a explicação mais plausível é a de que esses dados foram coletados na segunda metade da região III, após o vértice da parábola, que apresentam um comportamento decrescente, aproximadamente como o ilustrado nesse gráfico.

Nota-se, também, que a quarta curva apresenta alguns pontos que parecem fugir da tendência geral da dispersão ($ROP > 8$ m/h), e que se removidos mudam completamente o sentido da reta aproximada, de crescente para decrescente, o que é uma mudança significativa

e que não pode ser ignorada. Portanto, na análise geral dos dados de perfuração, esses valores aberrantes devem ser apropriadamente localizados e tratados.

Figura 7 - Curvas de *drill-rate* aproximadas para dados filtrados de rotação 120 rpm e fluxo 800 gpm, destacando mudança no sentido das curvas



Fonte: Produção do próprio autor

3.3 FILTRAGEM E ANÁLISE DOS DADOS

3.3.1 Metodologia de filtragem

Estabelecida a possibilidade de geração de curvas análogas às de *drill-rate test* com dados de operação normal, e determinada a necessidade de uma filtragem desses dados de modo a excluir valores com erros de leitura e que fujam da tendência geral da amostra (*outliers*), iniciou-se a análise dos dados de perfuração do poço Ogonga-1 de todo o seu intervalo de profundidade.

Inicialmente, utilizando as ferramentas de filtragem do programa Microsoft Excel, foram removidos os pontos que contenham valores nulos, que totalizaram 219 ocorrências. Esses valores ocorrem quando há uma vibração excessiva no fundo do poço, havendo uma perda de sinal com o BHA, o conjunto de instrumentos e ferramentas responsáveis pela perfuração e limpeza do poço (AL DUSHAISHI, 2012).

De modo a excluir os *outliers* mais evidentes das distribuições ao longo da profundidade perfurada, alguns critérios foram estabelecidos. Para a distribuição de ROP, qualquer sequência

de até dois dados – pois uma parábola é definida por, pelo menos, três pontos – que difiram em mais de 10 m/h dos dados anteriores e posteriores foi marcada. Esse valor foi estabelecido como o dobro da média geral de ROP, aproximado para o múltiplo de cinco mais próximo. Similarmente, para as distribuições de RPM e FLO, qualquer sequência de até dois dados de valores iguais foi marcada. Nessa inspeção, todos os valores são arredondados para o múltiplo de dez mais próximo – no caso da rotação – ou para o múltiplo de cinquenta mais próximo – no caso do fluxo – pois os incrementos durante o processo de perfuração ocorreram em passos de 10 rpm e 50 gpm.

Uma rotina foi desenvolvida no Excel para implementar esses critérios de filtragem, e todos os dados identificados como aberrantes foram destacados na cor vermelha nos gráficos de distribuição de seus respectivos parâmetros. Em seguida, todas as linhas na planilha de dados que continham um desses valores destacados foram excluídas.

Adaptando a rotina de MATLAB criada anteriormente, todos os valores de ROP e WOB foram separados por rotações e fluxos arredondados, de forma que se comportem aproximadamente como o esperado para curvas de *drill-rate*.

Durante a análise inicial, realizada anteriormente, as curvas foram examinadas de forma visual para determinar a correlação com os dados que aproximam. Entretanto, de forma a facilitar essa determinação nesse novo estudo, uma ferramenta estatística para esse fim teve de ser escolhida.

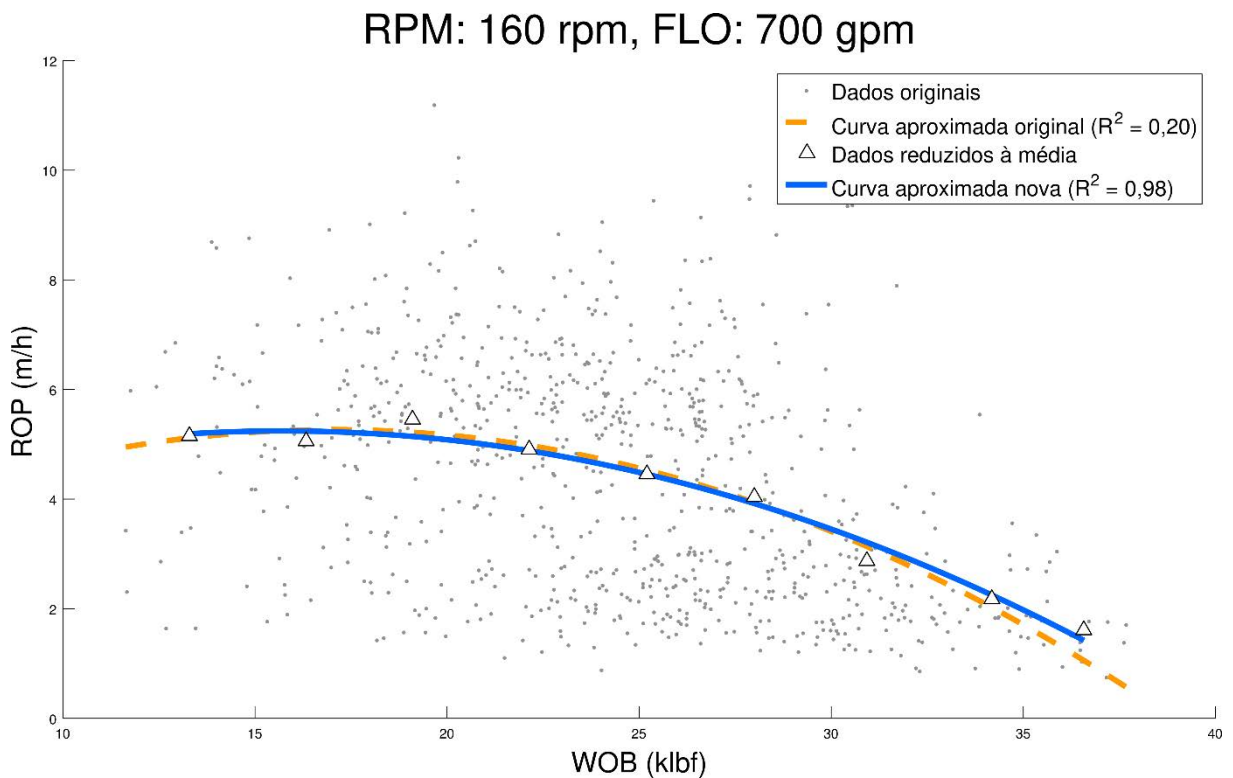
Uma medida de averiguação da qualidade de ajuste bastante utilizada é o coeficiente de determinação, ou R^2 , que indica a proporção percentual da variabilidade da variável dependente y que é explicada pela variável independente x , determinado pela equação (2), onde y_i é o valor observado, $\hat{y}_i$ é o valor estimado e $\bar{y}$ é a média das observações.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

Como todo processo mecânico está sujeito a variações de causas aleatória e especial, que ocorrem de acordo com uma função densidade de probabilidade, dispersando os dados em torno de um valor médio (COSTA NETO, 2002), é natural que a medida R^2 de uma regressão linear desses dados apresente um valor baixo, como é o caso da curva aproximada com os dados para uma rotação de 160 rpm e fluxo de 700 gpm, ilustrado na Figura 8 ($R^2 = 20\%$). Logo, esses dados devem ser reduzidos aos seus valores médios para passos pré-determinados de WOB, pois assim eles se encontram mais próximos à curva aproximada, e o coeficiente de

determinação cresce e pode ser utilizado como uma medida rápida de avaliação da regressão. Para as mesmas condições mencionadas anteriormente, os dados foram separados em passos de 3 klbf, e o R^2 passou a ser 98%. Uma comparação visual entre as duas curvas mostra que não há uma diferença qualitativa significativa, e estabelece uma base intuitiva para o relacionamento entre a qualidade de ajuste visual e a implícita pela medida estatística.

Figura 8 - Curvas aproximadas por regressão linear, utilizando os dados originais e os dados reduzidos à média



Fonte: Produção do próprio autor

Entretanto, apesar do bom ajuste da curva ilustrada, percebe-se que alguns dos dados originais diferem muito dos valores médios calculados e, como demonstrado anteriormente, há situações em que esses valores aberrantes podem causar uma variação significativa na curva aproximada. Portanto, um método de determinação matemática para esses dados deve ser utilizado.

3.3.2 Ferramentas estatísticas de determinação de *outliers*

As formas mais comuns de detecção de valores aberrantes incluem os métodos de desvio padrão, de desvio médio (ou mediano) absoluto (MAD) e de diagrama de caixa (*boxplot*), sendo

que nos três casos são estabelecidos limites inferior e superior de um intervalo de confiança, e os valores que se encontram além dos limites são evidenciados (LEYS, KLEIN et al., 2013).

No método de desvio padrão, é calculado o desvio padrão da amostra de acordo com a equação (3), onde x_i é um valor da amostra, $\bar{x}$ é a média e N é o tamanho amostral, e um limite de 2 a 3 desvios padrões em torno da média dos dados é estabelecido, dependendo da robustez estatística desejada.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

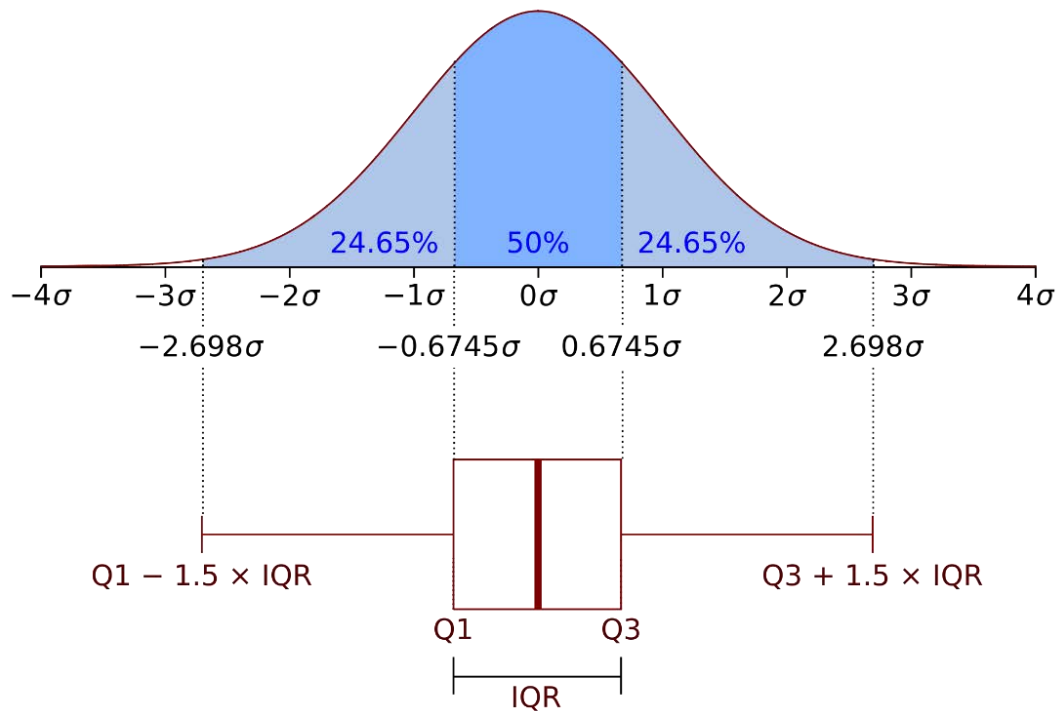
O método de desvio médio (ou mediano) absoluto determina um limite de 2 a 3 vezes o valor MAD em torno da média, determinado pela equação (4), ou em torno da mediana, determinado pela equação (5), onde “med” é o operador para o cálculo da mediana.

$$MAD = \frac{1}{N} \sum_i^N |x_i - \bar{x}| \quad (4)$$

$$MAD = \text{med}(\sum_i^N |x_i - \text{med}(x)|) \quad (5)$$

Já no método de diagrama de caixa, os limites são determinados em função da distância interquartil IQR, entre os finais do primeiro quartil (Q1) e do terceiro quartil (Q3), e estabelece um intervalo de confiança entre $Q1 - 1,5IQR$ e $Q3 + 1,5IQR$. O diferencial dessa ferramenta é sua forma conveniente de representar graficamente esse intervalo e os valores aberrantes, como na Figura 9.

Figura 9 - Ferramenta de diagrama de caixa, estabelecendo um intervalo de confiança de 99,3%



Fonte: Produção do próprio autor

Um problema comum entre ferramentas desse tipo é a dependência do valor médio para determinar os limites, que é fortemente influenciado pela presença de *outliers* e, portanto, pode distorcer o intervalo de confiança para marcar valores normais como aberrantes, ou ainda aceitar valores aberrantes. Como os métodos de desvio padrão e MAD (média) sofrem desse problema, e alguns dos valores aberrantes localizados visualmente apresentaram um desvio demasiadamente grande em relação à média, eles não serão adequados para o uso nesse projeto. Já os métodos de diagrama de caixa e MAD (mediana), por utilizarem percentis como base para o cálculo desses valores, não sofrem desse problema e são muito mais indicados para esse fim (LEYS, KLEIN et al., 2013).

Ambos os métodos se baseiam na premissa de que a função distribuição de probabilidade que descreve o processo se comporta como uma gaussiana (distribuição normal), o que ocorre quando o processo está sob controle estatístico, e não há influência de variações de causa especial. Apesar de essa ser a situação ideal para qualquer operação, nem sempre é possível manter esse controle, especialmente durante a perfuração de poços na região III das curvas de *drill-rate*, onde há uma maior influência das ineficiências do processo. Sendo assim, é necessário o uso de uma ferramenta estatística que leve em consideração uma possível assimetria da distribuição.

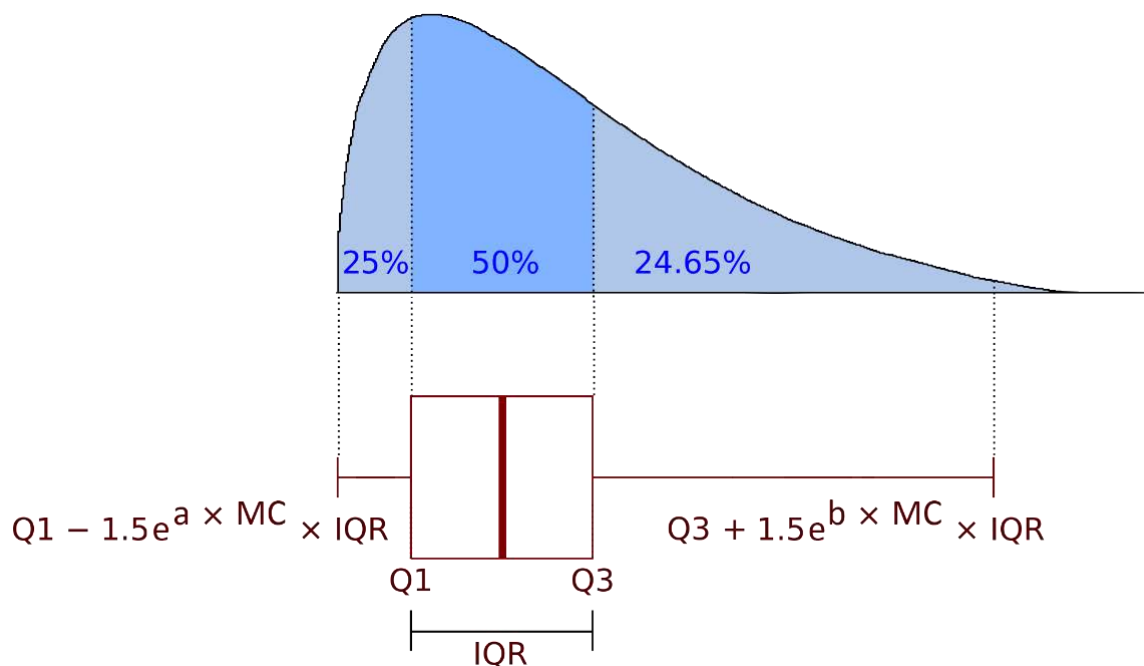
3.3.2.1 Diagrama de caixa ajustado

Um ajuste matemático do diagrama de caixa foi proposto por Hubert e Vanderviere (2004) para adequar o método a assimetrias, utilizando uma medida estatística robusta para a determinação da obliquidade da distribuição, chamada *medcouple* (MC). Os limites superior e inferior desse ajuste são mostrados na Figura 10, e os valores “a” e “b” são definidos de acordo com a expressão (6).

$$\begin{cases} a = -4 \text{ e } b = 3, & MC \geq 0 \\ a = -3 \text{ e } b = 4, & MC < 0 \end{cases} \quad (6)$$

A medida *medcouple* é calculada através de um algoritmo computacional complexo, que foi implementado em conjunto da ferramenta de diagrama de caixa ajustado no *software* MATLAB (HUBERT e VERBOVEN, 2005). Um valor positivo indica uma distribuição com uma “cauda” direita longa, e um valor negativo indica uma distribuição com uma “cauda” esquerda longa. Quando o valor é zero, a distribuição é simétrica, e os limites do diagrama de caixa ajustado tornam-se os limites do diagrama de caixa original.

Figura 10 - Ferramenta de diagrama de caixa ajustado, estabelecendo um intervalo de confiança para uma distribuição assimétrica



Fonte: Produção do próprio autor

Com essa ferramenta, é possível determinar os valores aberrantes das distribuições de ROP. Utilizando os dados aproximados por uma curva anteriormente, e empregando diagramas de caixa ajustados para cada passo de 3 klbf, foram detectados 30 *outliers*, evidenciados na cor laranja na Figura 11.

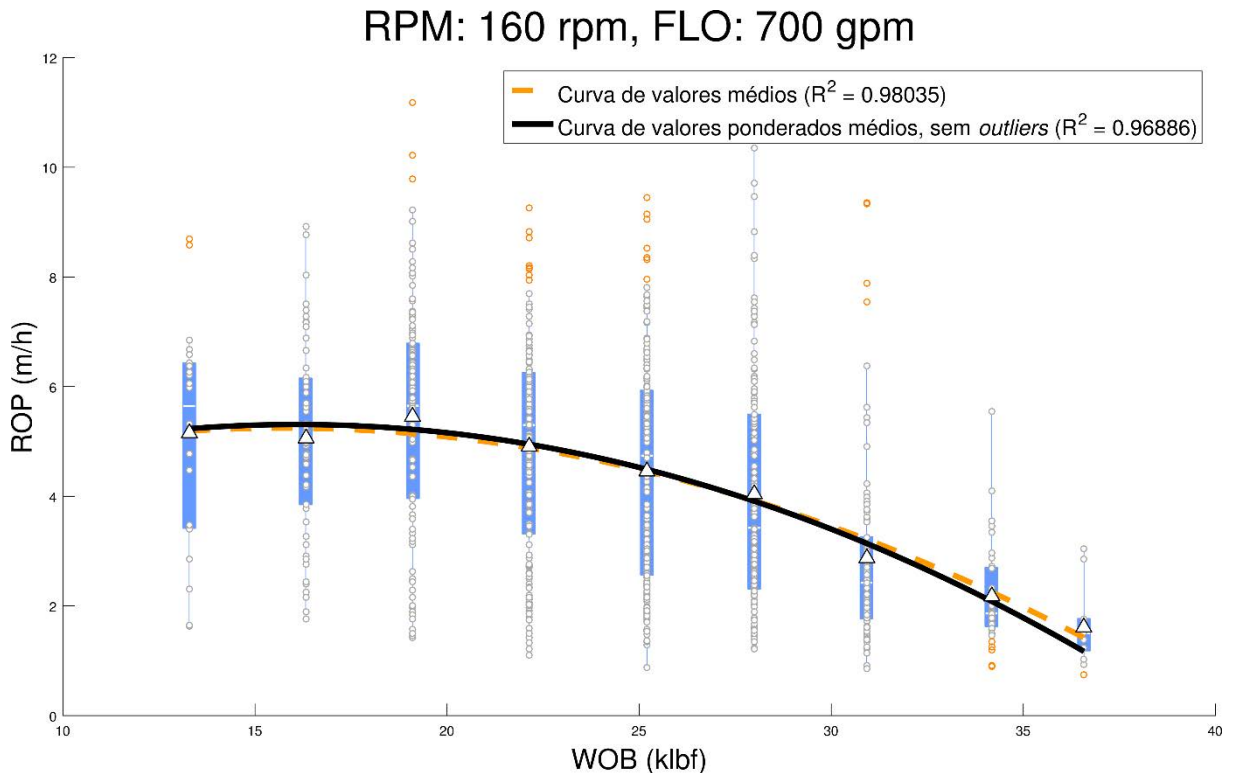
3.3.3 Confiabilidade em amostras pequenas

Como cada ponto de uma curva de *drill-rate* é definido pelo valor médio $\bar{x}$ da dispersão de dados, e o espalhamento desses dados é descrito por uma função densidade de probabilidade, quanto menor o tamanho de uma amostra, maior é a incerteza em relação a esse valor médio calculado. Para uma distribuição normal, o cálculo da margem de erro ME é descrito pela equação (7), onde $Z_{\alpha/2}$ é o escore definido por tabelas estatísticas para um determinado intervalo de confiança $(1 - \alpha)$. Ao reduzir o tamanho amostral N, aumenta-se a margem de erro da média, ou diminui-se o intervalo de confiança.

$$\bar{x} \pm ME, ME = \frac{Z_{\alpha/2} \cdot \sigma}{\sqrt{N}} \quad (7)$$

Apesar da equação não poder ser empregada para os intervalos de ROP, pois apresentam uma distribuição oblíqua, o mesmo princípio se aplica, o que torna os pontos resultados de uma média de poucos números pouco confiáveis, e uma medida de confiabilidade nova deve ser definida.

Figura 11 - Curvas aproximadas por regressão linear, utilizando os dados originais e os dados filtrados (com valores ponderados)



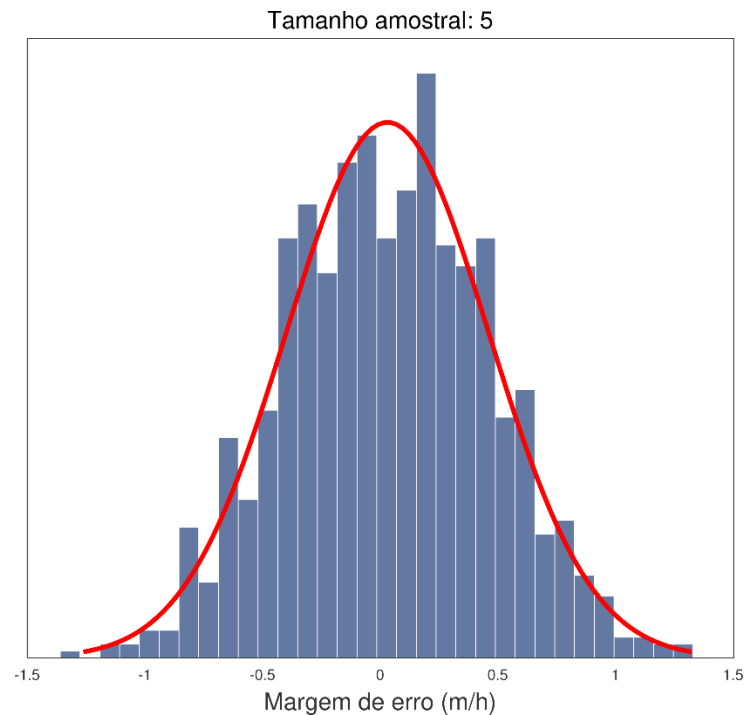
Fonte: Produção do próprio autor

Para situações onde há muitos pontos com o valor de N associado relativamente alto, em relação aos poucos pontos originários de tamanhos de amostra baixos, a curva aproximada por regressão linear pode ser distorcida e ter seu vértice deslocado. Uma forma simples de evitar isso é realizar uma regressão linear com dados ponderados com os valores de seus tamanhos amostrais, como exemplificado na Figura 11. O último ponto, com WOB em torno de 37 klbf, é resultado da média de apenas 12 dados, ante os quatro pontos mais confiáveis que representam separadamente mais de 100 dados, e aparenta estar deslocado em 0.5 m/h para cima, o que diminui o coeficiente de determinação em pouco mais de 1 ponto percentual, mas garante uma curva mais confiável.

Entretanto, em algumas situações a maioria dos pontos são pouco confiáveis, e o método de valores ponderados não assegura uma melhoria na aproximação das curvas. De forma a determinar uma relação entre o tamanho amostral e a confiabilidade nas aproximações, uma rotina foi criada para simular situações, para cada passo de WOB, em que amostras aleatórias de ROP, de tamanhos incrementais, sejam selecionadas e tenham suas médias comparadas com a média total da população daquele passo.

De acordo com o teorema central do limite (TCL), a média aritmética de valores aleatórios de qualquer tipo de distribuição, após um número suficientemente grande de iterações, se comporta aproximadamente como uma função de distribuição normal (RICE, 2007). Portanto, de modo a facilitar a análise posterior, o erro em relação à média foi calculado em um laço repetido mil vezes, e os valores foram distribuídos em uma gaussiana.

Figura 12 - Distribuição da diferença entre a média de uma população de 32 dados e as médias de amostras de 5 dados coletados aleatoriamente

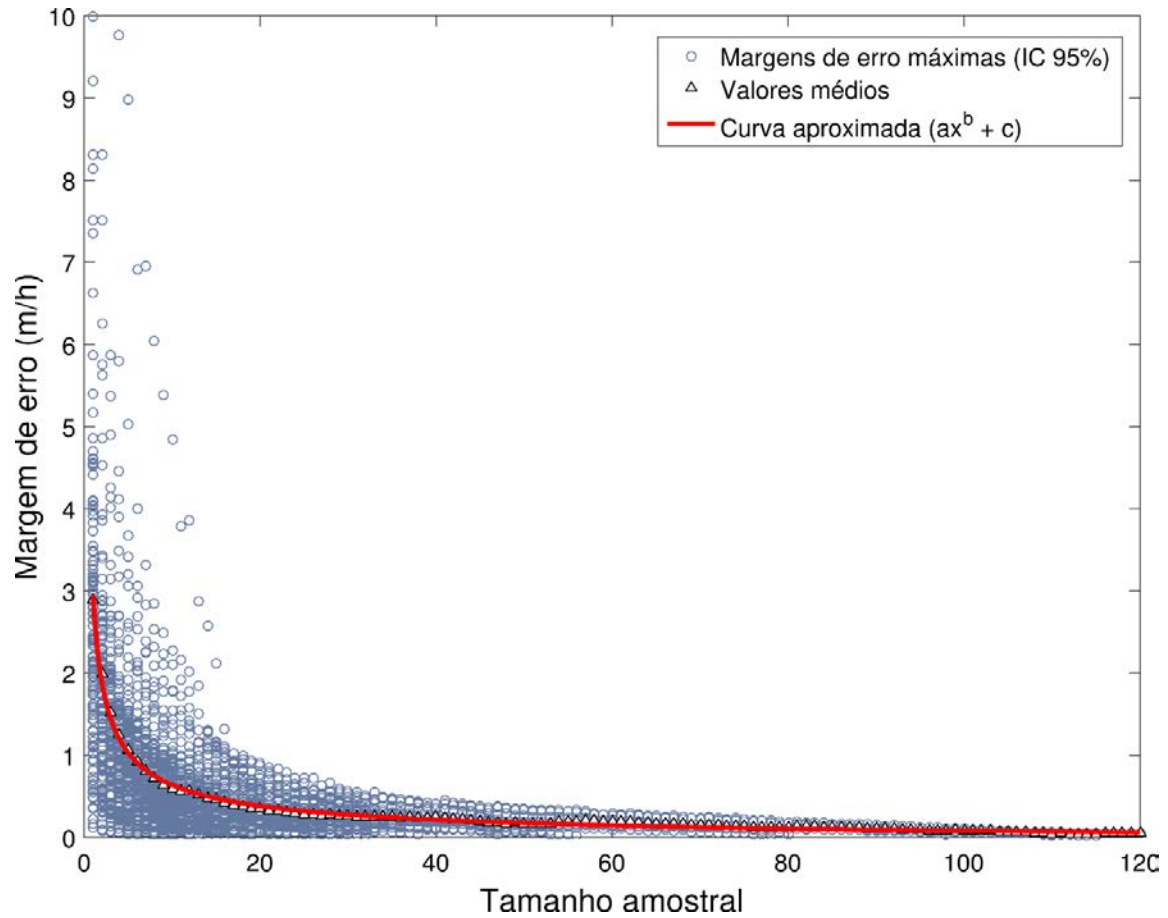


Fonte: Produção do próprio autor

Após cada iteração, para todos os passos de todas as curvas de *drill-rate*, os valores absolutos máximos de cada distribuição, assumindo uma região de confiança de 95%, são extraídos e dispostos em um gráfico de dispersão em função do tamanho das amostras (Figura 13). Com esses dados, uma função de distribuição de lei de potência foi aproximada por regressão linear, descrita pela equação (8), onde $f(x)$ é a margem de erro máxima e x é o tamanho da amostra.

$$f(x) = 2,555x^{-0,5893} - 0,07585 \quad (8)$$

Figura 13 - Gráfico de dispersão das margens de erro máximas esperadas para um intervalo de confiança de 95%, em relação ao tamanho das amostras



Fonte: Produção do próprio autor

Para valores de margem de erro de 0,2 a 2,0 m/h, a passos de 0,2 m/h, foram calculados os tamanhos amostrais, que foram aproximados para cima de forma a aumentar a robustez dos cálculos, e dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 - Tamanhos amostrais calculados para diferentes valores de margem de erro máxima para ROP

Tamanho amostral	Margem de erro máxima (m/h)
44	0,2
18	0,4
10	0,6
7	0,8
5	1,0
4	1,2
3	1,4
2	1,6
2	1,8
2	2,0

Fonte: Produção do próprio autor

O mesmo processo iterativo foi realizado para as variações de WOB para cada passo, e uma função similar foi aproximada, descrita pela equação (9). Utilizando os valores de tamanho amostral encontrados, as margens de erro máximas foram calculadas e dispostas na Tabela 6.

$$f(x) = 1,626x^{-0,545} - 0,06671 \quad (8)$$

Tabela 6 - Valores de margem de erro máxima para WOB calculados para tamanhos amostrais determinados na tabela 5

Tamanho amostral	Margem de erro máxima (klbf)
44	0,15
18	0,25
10	0,4
7	0,5
5	0,6
4	0,7
3	0,85
2	1,0

Fonte: Produção do próprio autor

Como os valores de margem de erro encontrados são baixos em relação à faixa de WOB utilizada para a construção de curvas de *drill-rate* na região III, seus efeitos serão negligenciados.

Apesar de agora se ter uma ideia dos valores de erro esperáveis para pontos pouco confiáveis, ainda é preciso determinar a confiabilidade estatística nas curvas que os aproxima. Para isso, uma nova rotina foi desenvolvida para testar todas as situações possíveis de margens de erro em parábolas com 3 a 12 pontos, analisar os efeitos causados e estabelecer uma porcentagem de confiança no valor de WOB calculado nessas curvas para um ROP máximo.

Uma medida análoga ao conjunto imagem de uma função quadrática com concavidade voltada para baixo – descrito pela expressão (9) – foi especificada para facilitar a separação das curvas geradas pela rotina, diferindo da imagem ao especificar um limite inferior $y_{\min}$, que é o menor valor no eixo y para o intervalo conhecido no eixo x. A distância entre esses pontos foi definida pela variável *range* pela equação (10).

$$Im = \{y \in \mathbb{R} | y \leq y_v = -\Delta/4a\} \quad (9)$$

$$rng = y_v - y_{\min} \quad (10)$$

Para simplificar o cálculo das curvas pela rotina, foi escolhida uma parábola com o coeficiente $c = 0$, para que o menor valor da curva no eixo y seja a origem, e coeficiente $a = -1$ para que tenha uma concavidade para baixo e raízes $\{0; b\}$. Como o valor de *range* será a coordenada vertical do vértice (pois $y_{\min} = 0$) deduz-se, enfim, que o coeficiente $b = 2\sqrt{\text{rng}}$.

Foram criadas curvas com valores de *range* entre 0,5 e 6, determinado pelos valores encontrados nas curvas de *drill-rate* calculadas anteriormente, definindo a posição de seus pontos aleatoriamente (com exceção do primeiro e último pontos, que são as raízes), e aplicando mil diferentes medidas de margem de erro escolhidas aleatoriamente de distribuições normais com média zero e desvio padrão determinado pela equação (11), onde x é o valor encontrado na posição definida pelo escore Z , e μ é a média da distribuição. Para um intervalo de confiança de 95%, $Z = 1,96$ e a diferença entre o valor x e a média é a margem de erro máxima calculada anteriormente. Portanto, o desvio padrão utilizado foi $\sigma = \text{ME}/1,96$, variando os valores de ME de acordo com os definidos na Tabela 5.

$$Z = (x - \mu) / \sigma \quad (11)$$

Para cada erro aplicado aos pontos das curvas, uma nova curva é aproximada por regressão linear, e o seu novo valor de *range* é calculado e armazenado. Ao final de todas as iterações, foram criadas tabelas com a distribuição de proporções dos novos valores de *range* por curva original (e.g. 28% das curvas com 6 pontos de *range* 1,5 foram aproximadas por curvas de *range* 2,0 para uma margem de erro máxima de 1,2, como demonstrado na Tabela 7), assim como tabelas de probabilidade de uma curva aproximada ter sua coordenada horizontal do vértice (WOB para ROP máximo) deslocada da coordenada real em até 10 a 30%, em relação à origem (*founder point*), como demonstrado na Tabela 8 (e.g. 56% das curvas aproximadas com 6 pontos e *range* 2,0 apresentam a coordenada horizontal de seus vértices deslocada em até 10%).

Tabela 7 - Distribuição de probabilidades de curvas perfeitas com 6 pontos e valores de *range* entre 0,5 e 6, ao serem aplicadas variações em y de até 1,2, gerem curvas aproximadas com valores de *range* entre 0,5 e 8,5

	Range (curva perfeita)											
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
Range (curva aproximada)	0.5	13%	5%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	1	32%	22%	7%	2%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	1.5	30%	32%	23%	8%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	2	16%	24%	28%	21%	10%	2%	0%	0%	0%	0%	0%
	2.5	7%	14%	26%	30%	22%	7%	2%	1%	0%	0%	0%
	3	1%	5%	13%	25%	28%	22%	9%	2%	1%	0%	0%
	3.5	1%	1%	3%	11%	25%	30%	21%	9%	2%	0%	0%
	4	0%	0%	1%	3%	9%	24%	30%	21%	9%	2%	0%
	4.5	0%	0%	0%	1%	4%	11%	23%	31%	22%	9%	2%
	5	0%	0%	0%	0%	1%	3%	12%	24%	31%	22%	8%
	5.5	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	10%	23%	32%	21%
	6	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	11%	23%	30%
	6.5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	10%	25%
	7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	4%	11%
	7.5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%
	8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
	8.5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%

Fonte: Produção do próprio autor

		Máxima variação de x_v		
		<10%	<20%	<30%
Range (curva aproximada)	0.5	29%	52%	62%
	1	36%	58%	70%
	1.5	48%	70%	82%
	2	56%	80%	88%
	2.5	63%	87%	94%
	3	77%	95%	99%
	3.5	84%	98%	100%
	4	92%	100%	100%
	4.5	93%	100%	100%
	5	95%	100%	100%
	5.5	98%	100%	100%
	6	99%	100%	100%
	6.5	99%	100%	100%
	7	98%	100%	100%
	7.5	100%	100%	100%
	8	100%	100%	100%
	8.5	100%	100%	100%

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 8 - Probabilidades de curvas aproximadas com 6 pontos e valores de *range* entre 0,5 e 8,5 apresentarem a coordenada horizontal de seus vértices deslocada do vértice real em até 10 a 30%, em relação ao *founder point*

3.3.4 Aproximação de curvas de *drill-rate* com tabelas de confiança

Determinadas as medidas de avaliação da confiabilidade em curvas aproximadas com pontos de baixo tamanho amostral, foi possível desenvolver um novo método de geração de curvas de *drill-rate*, que leva em consideração o número de dados originais e o valor de *range* calculado.

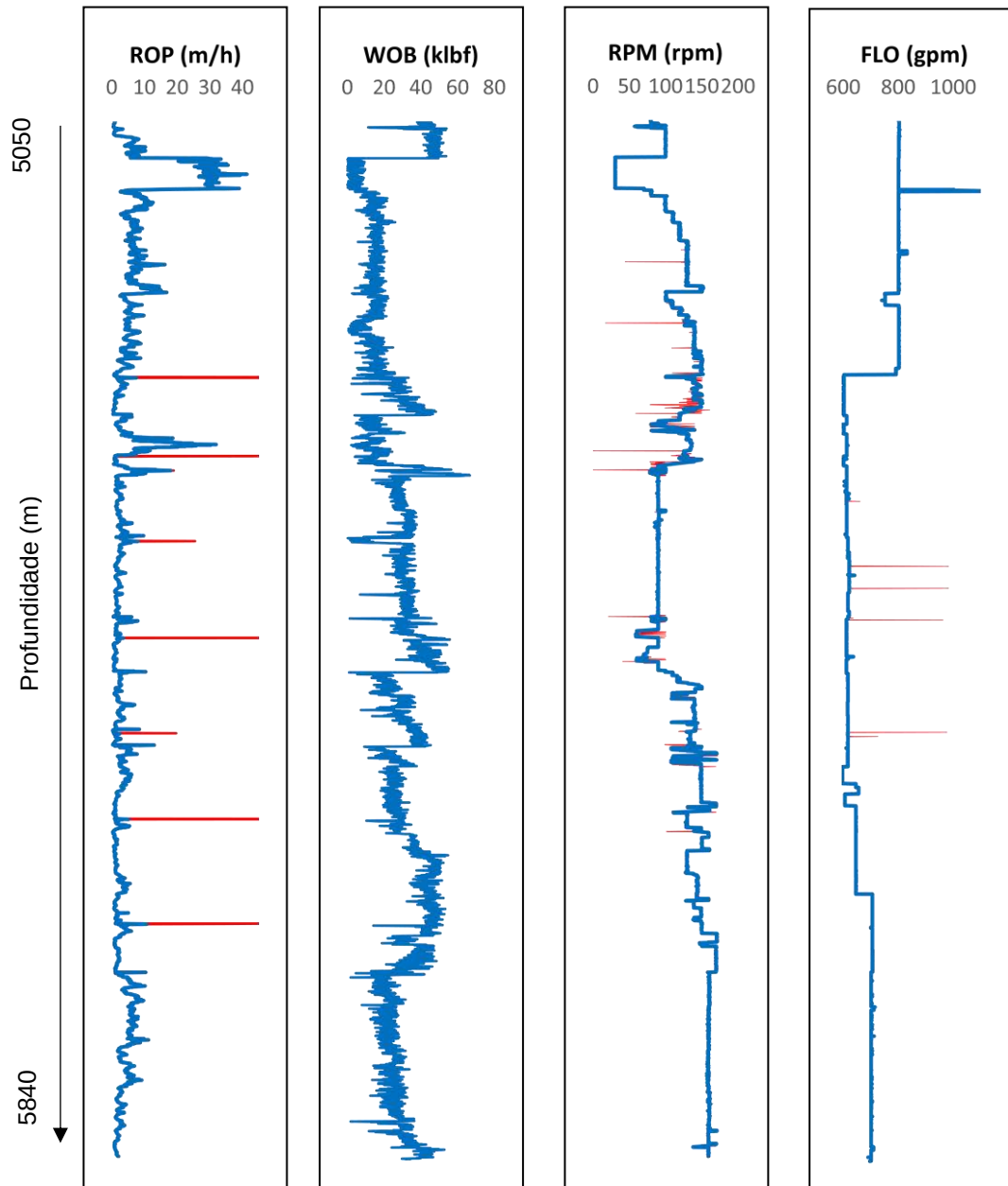
Utilizando os dados já filtrados por erros de leitura e valores aberrantes, determinados pela ferramenta de diagrama de caixa, uma rotina de MATLAB foi desenvolvida para testar todas as possibilidades de combinação dos pontos para um valor de RPM e FLO qualquer, de acordo com a equação (12) de combinação simples, para curvas com 3 pontos até o número total de pontos disponível, excluindo da análise pontos que representem um tamanho amostral de apenas 1 dado. Todas as possíveis combinações são utilizadas para aproximar curvas polinomiais de segundo grau, e as curvas com concavidade para baixo tem seus valores de *range* calculados e utilizados, juntos das margens de erro máximas esperadas para os pontos de menor confiança, para averiguar as probabilidades do vértice estar deslocado em proporções relativas ao *founder point*.

Em seguida, as curvas com probabilidade de deslocamento menor que 10% acima de 90% são separadas e passam por uma nova análise. São selecionadas as curvas com a menor margem de erro possível e, entre elas, é selecionada a que tiver mais pontos e que tenha a coordenada horizontal do vértice dentro de um intervalo determinado por um diagrama de caixa aplicado à todos os valores das curvas (de modo a excluir curvas com coordenadas suspeitamente distantes da mediana da população).

Caso não existam curvas com essas características, são separadas aquelas com probabilidade de deslocamento menor que 20% acima de 90%, e os mesmos critérios acima são utilizados para a escolha da curva ideal. No caso extremo em que nenhuma curva seja selecionada, são separadas as curvas com maior probabilidade de deslocamento menor que 30%, e caso haja mais de uma com a probabilidade máxima, os mesmos critérios de escolha anteriores são utilizados.

4 RESULTADOS

Figura 14 - Dados de perfuração do poço Ogonga-1. Em destaque (vermelho), os valores detectados como aberrantes pelos métodos de filtragem inicial



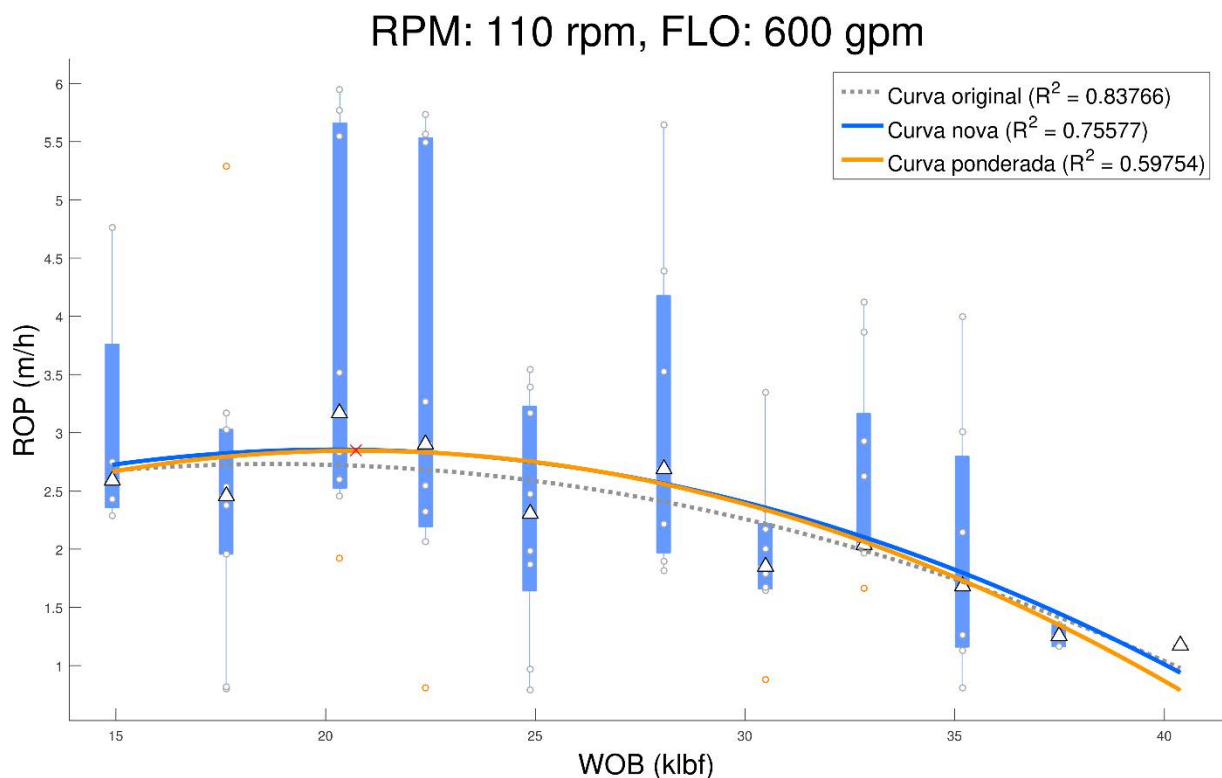
Fonte: Produção do próprio autor

Na Figura 14, foram representados os dados de perfuração Ogonga-1 em função da profundidade em relação ao nível do mar. Com o método de filtragem inicial, foram destacados os valores aberrantes mais evidentes da distribuição, que poderiam a distorcer as curvas geradas em seguida.

A separação dos dados em categorias distintas utilizando os valores da rotação RPM e do fluxo de fluido de perfuração FLO, e a utilização da ferramenta de diagrama de caixa ajustado para passos de WOB, em conjunto com o método de regressão linear com valores ponderados em relação aos tamanhos amostrais de origem, resultou em curvas bem definidas e de fácil análise pelos operadores da sonda de perfuração. As rotinas utilizadas para a realização desses passos foram detalhadas no Apêndice A.

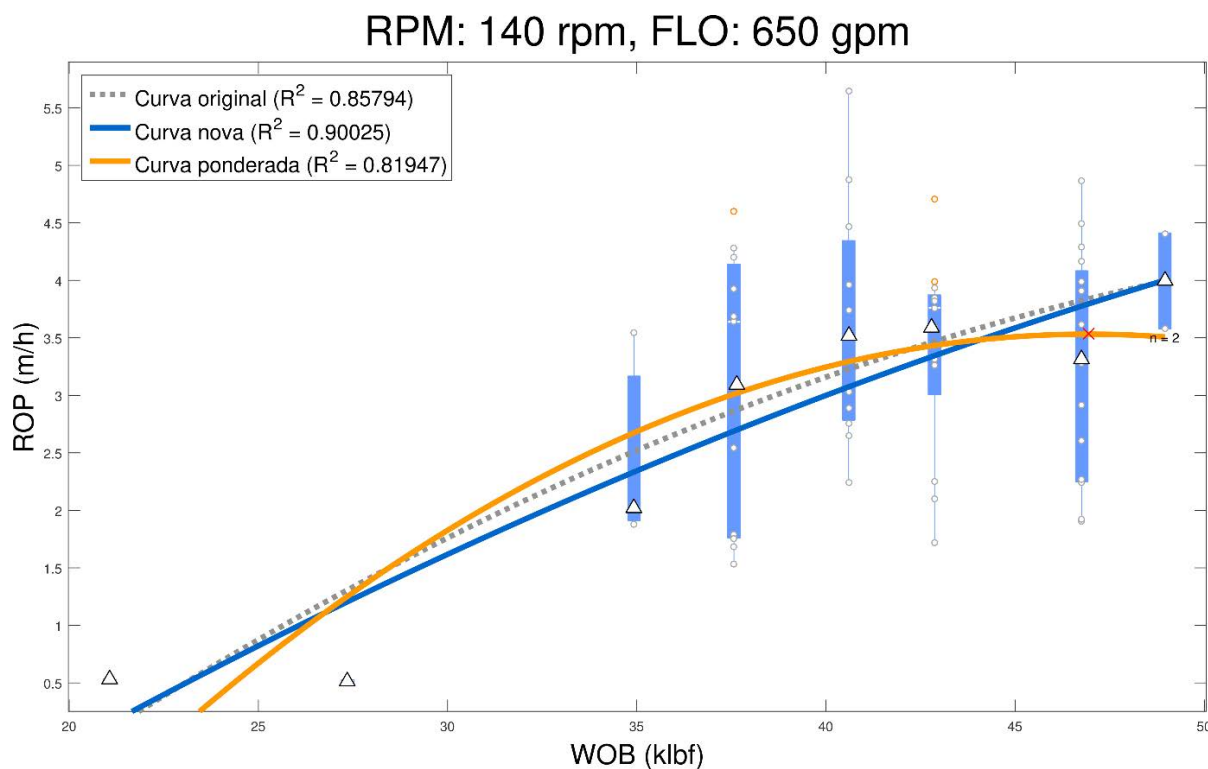
Algumas das curvas geradas em momentos distintos do desenvolvimento do projeto, com seus respectivos parâmetros de operação e WOB do ponto de inflexão da parábola, foram representadas na Figura 15. As curvas pontilhadas foram aproximadas antes da utilização do diagrama de caixa ajustado, seguida das curvas azuis, após a retirada dos *outliers* e, por fim, as curvas em laranja, traçadas ao aplicar pesos para os dados reduzidos às suas médias. Apesar do menor valor de R^2 para alguns casos, elas representam as melhores aproximações possíveis com a quantidade de dados disponíveis.

Figura 15 - Curvas calculadas ao longo do progresso dos métodos, para rotação de 110 rpm e fluxo de 600 gpm



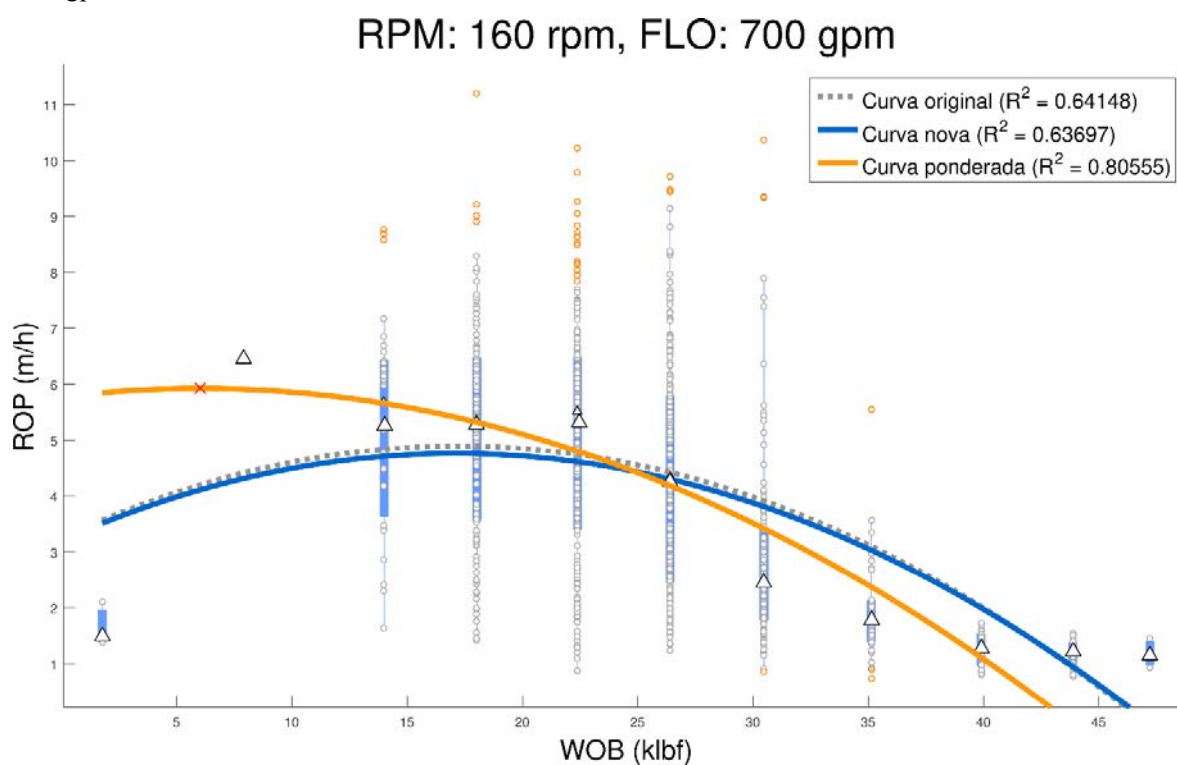
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 16 - Curvas calculadas ao longo do progresso dos métodos, para rotação de 140 rpm e fluxo de 650 gpm



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 17 - Curvas calculadas ao longo do progresso dos métodos, para rotação de 160 rpm e fluxo de 700 gpm



Fonte: Produção do próprio autor

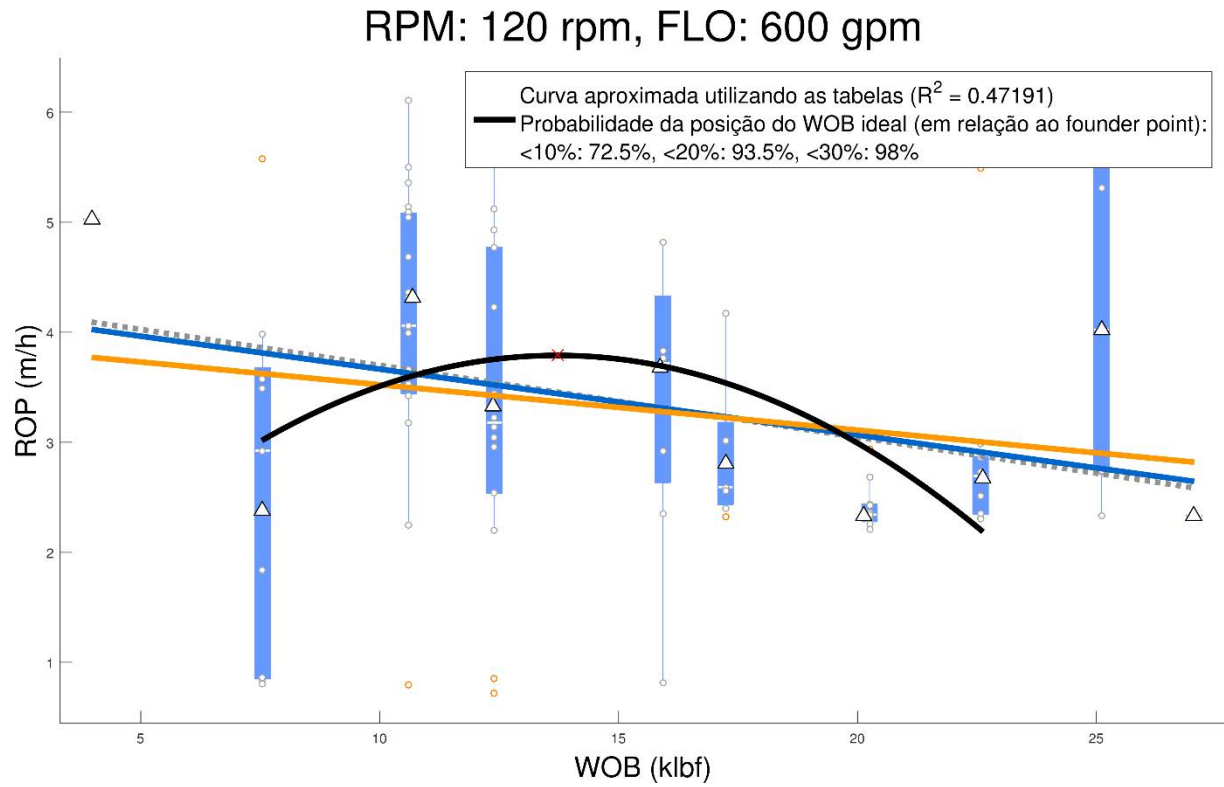
Pela Figura 15, percebe-se que algumas curvas não necessitam de todo o processamento que passaram, pois já tem pontos bem definidos ainda antes da aplicação do diagrama de caixa. Entretanto, as Figura 16 e Figura 17 apresentam curvas que se comportaram muito diferentes da tendência dos pontos, quando analisados visualmente.

Na primeira, o último ponto, apesar de ser o resultado da média de apenas dois dados, induz a aproximação da curva passando por ele, apesar de não ser muito confiável. Quando utilizado o método de valores ponderados, os outros pontos que têm tamanhos amostrais maiores induzem a aproximação da curva na direção mais precisa, modificando o WOB do vértice de 63 klbf para a primeira regressão linear, para 46 klbf, um valor mais condizente com os valores de WOB utilizados ao longo da perfuração do poço.

Entretanto, apesar dos valores ponderados, o método de regressão linear não descarta nenhum ponto e tenta aproximá-los todos da melhor forma possível, o que acaba gerando curvas incorretas. Os dois primeiros pontos da segunda Figura 16 aparentam pertencerem à região II da curva de *drill-rate*, e conseqüentemente não deveriam ser utilizados para traçar uma parábola aproximada. Isso acabou por modificando o valor calculado para WOB do vértice de 17 klbf para 6 klbf, o que é demasiadamente baixo e foge da tendência geral dos dados disponíveis.

As curvas calculadas com os métodos anteriores nem sempre representaram bem os pontos, especialmente quando há uma escassez de dados. Nesses casos, foi utilizado o método com as tabelas de probabilidade por valor de *range*, como na Figura 18. As três primeiras curvas, calculadas da mesma forma que a das figuras anteriores, foram aproximadas como retas decrescentes, o que explica o comportamento geral dos dados, mas deixa por desejar o valor do WOB do vértice. A curva aproximada com as tabelas utilizou os quatro pontos mais confiáveis disponíveis, evitando assim uma distorção muito grande de seu comportamento, e calculou a posição do vértice com a probabilidade de 72% de estar deslocada do valor real em apenas 10%, em relação ao *founder point*. Para intervalos de deslocamento maiores, a probabilidade ultrapassa 90%, que por ser uma medida calculada utilizando valores de margem de erro máximos para uma distribuição normal (com intervalo de confiança de 95%), é um valor bastante confiável.

Figura 18 - Curvas calculadas ao longo do progresso dos métodos, para rotação de 120 rpm e fluxo de 600 gpm



Fonte: Produção do próprio autor

5 CONCLUSÃO

Poços perfurados em água ultraprofundas, sobretudo na região de pré-sal no Atlântico Sul, apresentam maiores dificuldades que resultam em uma taxa de penetração média consideravelmente baixa. Por conta da imprevisibilidade das formações rochosas, as brocas utilizadas apresentam em média vidas úteis de 20 a 250 metros por descida para brocas PDC, 100 a 250 metros por descida para brocas tricônicas, e 400 a 500 metros por descida para brocas de coroa impregnada, resultando em custos entre US\$30.000 e US\$50.000 por metro, o que é um custo consideravelmente alto, sobretudo quando o valor do barril de petróleo mundial está em baixa (HBAIEB e AZAR, 2013). Entretanto, a tecnologia de exploração desses poços ainda está em desenvolvimento, e há espaço para melhorias e interesse em técnicas de otimização de perfuração em tempo real (WOOD, 2015).

Com os métodos propostos para a filtragem e organização dos dados de perfuração, foi possível a aproximação de curvas análogas às obtidas durante a realização de *drill-rate tests*, comportando-se como o esperado, explicitando o valor de WOB para o ponto de inflexão e o ROP máximo possível para a configuração utilizada, garantindo a estipulação de um limite operacional para auxiliar na escolha dos novos parâmetros de perfuração pelo operador. Destaca-se que as curvas geradas a partir desses métodos mostraram-se mais precisas e confiáveis que as construídas manualmente durante os testes de perfuração periódicos, utilizando os mesmos dados dos registros ASCII coletados pelos sensores da sonda. Além disso, conferem uma diminuição no tempo de análise dos dados de testes, acelerando o progresso da operação.

Entretanto, uma quantidade alta de curvas geradas com dados de operação corrente se comportaram como retas crescentes ou decrescentes, diferentemente do comportamento esperado. Realizando uma análise visual dessas curvas, percebe-se que muitas estão “contaminadas” com dados das outras duas regiões das curvas de *drill-rate* e, inclusive, com dados de trechos de profundidade distantes um do outro, pois a única forma utilizada para separar esses dados foi com os valores de RPM e FLO, que acabam sendo utilizados diversas vezes ao longo do processo.

Portanto, para futuras análises, uma forma de separação desses dados por trechos de litologia similar e de utilização do mesmo modelo de broca deve ser desenvolvido, aprimorando o método aqui proposto. Há também espaço para a inclusão de um método de previsão das curvas, utilizando dados de energia específica hidromecânica, possibilitando uma comparação

gráfica entre o comportamento previsto e o observado, explicitando ineficiências na configuração utilizada e garantindo mais um nível de auxílio na tomada de decisões.

A partir dos métodos desenvolvidos nesse trabalho, torna-se possível o desenvolvimento de um sistema computacional em conjunto com a indústria petrolífera, de modo a atualizar as curvas geradas em tempo real com os dados correntes de operação, representando uma inovação para a área.

BIBLIOGRAFIA

- AL DUSHAISHI, M. F. **Investigation of Drillstring Vibration Reduction Tools**. Missouri University of Science and Technology. [S.l.]. 2012.
- BERG, P. V.; TVEIT, Ø. S. **Model for evaluating drilling efficiency based on the concept of Mechanical Specific Energy**. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim. 2016.
- BOURGOYNE, A. T. et al. **Applied Drilling Engineering**. [S.l.]: Society of Petroleum Engineers, v. SPE Textbook Series Vol. 2, 1991.
- COSTA NETO, P. L. D. O. **Estatística**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.
- DUPRIEST, F. E.; KOEDERITZ, W. L. **Maximizing Drill Rates with Real-Time Surveillance of Mechanical Specific Energy**. SPE/IADC Drilling Conference. [S.l.]: Society of Petroleum Engineers. 2005.
- GALP Energia. **Galp Energia**, 2014. Disponível em: <http://www.galpennergia.com/PT/agalpennergia/os-nossos-negocios/Exploracao-Producao/fundamentos-engenharia-petroleo/Paginas/Perfuracao.aspx>. Acesso em: Dezembro 2016.
- HBAIEB, S.; AZAR, M. Hybrid Bit Improves Drilling Efficiency in Brazil's Pre-salt Formations. **World Oil**, p. B154-B157, Setembro 2013.
- HUBERT, M.; VANDERVIERE, E. An Adjusted Boxplot for Skewed Distributions. **Proceedings in Computational Statistics**, p. 1933-1940, Janeiro 2004.
- HUBERT, M.; VERBOVEN, S. LIBRA: a MATLAB Library for Robust Analysis. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 75, n. 2, p. 127-136, Fevereiro 2005.
- IADC Drilling Manual. 12. ed. [S.l.]: International Association of Drilling Contractors, 2014.
- LEYS, C. et al. Detecting Outliers: Do Not Use Standard Deviation Around The Mean, Use Absolute Deviation Around The Median. **Journal of Experimental Social Psychology**, v. 49, n. 4, p. 764–766, Julho 2013.
- MITCHELL, R. F.; MISKA, S. Z. **Fundamentals of Drilling Engineering**. [S.l.]: Society of Petroleum Engineers, 2011.
- NASCIMENTO, A. et al. **Dynamic Drill-rate Test Approach Applied to a Pre-salt Case Study**. SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Quito: [s.n.]. 2015.
- RICE, J. A. Convergence in Distribution and the Central Limit Theorem. **Mathematical Statistics and Data Analysis**. 3. ed. [S.l.]: Duxbury Press, 2007. Cap. 5.3.

APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE DE ROTINAS NO MATLAB

Os quadros apresentados nesse apêndice contêm os códigos fonte das rotinas desenvolvidas no *software* MATLAB, com descrições detalhadas das linhas de código mais importantes na cor verde, de modo a facilitar o entendimento da lógica programática das rotinas.

Quadro 3 - Código fonte de rotina no MATLAB para organizar e filtrar dados, e gerar curvas de *drill-rate*

(continua)

```
%% Organiza os dados originais em campos de gpm/rpm específicos

load drillingdata %carrega os dados filtrados no Excel

RPMmin = 0; GPMmin = 0; RPMmax = 0; GPMmax = 0;
H = height(drillingdata2); %número de linhas na tabela
datadr = []; %cria uma matriz vazia
for i = 1:H
    rpm = round(drillingdata2{i,1}/10,0)*10; %aproxima para o múltiplo
    de 10 mais próximo
    gpm = round(drillingdata2{i,5}/50,0)*50; %aproxima para o múltiplo
    de 50 mais próximo
    f = sprintf('gpm%drpm%d',gpm,rpm); %nome do campo gpm/rpm
    if isfield(datadr, f) == 0 %checa se o campo gpm/rpm não existe
        datadr.(f) = []; %cria campo gpm/rpm
    end
    datadr.(f) = [datadr.(f); drillingdata2{i,2:4}]; %adiciona linhas na
    matriz existente
    % Designa valores mínimo e máximo para rpm e gpm
    if i == 1; RPMmin = rpm; GPMmin = gpm; end
    if rpm < RPMmin; RPMmin = rpm; end
    if rpm > RPMmax; RPMmax = rpm; end
    if gpm < GPMmin; GPMmin = gpm; end
    if gpm > GPMmax; GPMmax = gpm; end
end

%% Filtra e separa dados organizados em passos de WOB

datadr_p = [];
for gpm = GPMmin:50:GPMmax
    for rpm = RPMmin:10:RPMmax
        f = sprintf('gpm%drpm%d',gpm,rpm); %nome do campo gpm/rpm
        if isfield(datadr, f) == 0 %checa se o campo gpm/rpm não existe
            continue
        end
        datadr.(f) = sortrows(datadr.(f)); %organiza linhas em ordem
        ascendente
        H = size(datadr.(f),1); %número de linhas no campo
        p = 10; %número de pontos no gráfico
        ss = round(range(datadr.(f)(:,1))/(p*0.5))*0.5; %tamanho do
        passo de WOB a partir do primeiro valor [klbf]
        if ss < 1
            ss = 1;
        elseif ss > 5
            ss = 5;
        end
    end
end
```


Quadro 3 - Código fonte de rotina no MATLAB para organizar e filtrar dados, e gerar curvas de *drill-rate*

(continuação)

```

j = ss;
i = 1; wob_p = []; rop_p = []; depth_p = [];
while i <= H
    while (i <= H) && (datadr.(f)(i,1) <= datadr.(f)(1,1)+j)
        wob_p = [wob_p; datadr.(f)(i,1)];
        rop_p = [rop_p; datadr.(f)(i,2)];
        depth_p = [depth_p; datadr.(f)(i,3)];
        i = i + 1;
    end
    n = size(wob_p,1);
    if n ~= 0 %checa se há valores que correspondem com o atual
passo de WOB
        if isfield(datadr_p, f) == 0 %checa se o campo gpm/rpm
não existe
            datadr_p.(f) = [];
        end
        datadr_p.(f) = [datadr_p.(f);[mean(wob_p) mean(rop_p) n
mean(depth_p)]]; %adiciona linhas na matriz existente
        datadr.(f)((i-n):(i-1),4) = mean(wob_p);
        datadr.(f)(1,5) = ss;
        wob_p = []; rop_p = []; depth_p = [];
    end
    j = j + ss; %aumenta o tamanho do passo a partir do primeiro
valor em um passo
end
end
end

%% Identifica valores aberrantes e traça curvas de drill-rate

for gpm = GPMmin:50:GPMmax
    for rpm = RPMmin:10:RPMmax
        f = sprintf('gpm%drpm%d',gpm,rpm); %nome do campo gpm/rpm
        if isfield(datadr_p, f) == 0 %checa se o campo gpm/rpm não
existe
            continue
        end
        if size(datadr_p.(f),1) < 3 %ignora campos com menos de três
dados
            continue
        end
        figure;
        set(gcf,'units','normalized','outerposition',[0 0 0.5 1])
        %estabelece posição na imagem no lado esquerdo da tela
        clear title
        wob = datadr_p.(f)(:,1); %[klbf]
        rop = datadr_p.(f)(:,2); %[m/h]
        n = datadr_p.(f)(:,3); %número de dados reduzidos à média
        [eq,gof,output] = fit(wob,rop,'poly2'); %aproximação para uma
função quadrática
        % Gera os diagramas de caixa e dispersão de dados
        adjustedboxplot(datadr.(f)(:,2),'groupvalid',
datadr.(f)(:,4),'positions',unique(datadr.(f)(:,4)),'colors',[0.4 0.6
1],'widths',0.3,'symbol','.w');

```

Quadro 3 - Código fonte de rotina no MATLAB para organizar e filtrar dados, e gerar curvas de *drill-rate*

(continuação)

```

% Estabelece estilo dos diagramas de caixa
bp_obj = findobj(gca, 'Tag', 'Box');
set(bp_obj, 'LineWidth', 1.5)
whisk = findobj(gca, '-regexp', 'Tag', '\w*Whisker');
set(whisk, 'LineStyle', '-')
for j = 1:length(bp_obj)
    patch(get(bp_obj(j), 'XData'), get(bp_obj(j), 'YData'), [0.4
0.6 1], 'FaceAlpha', 0.5, 'LineWidth', 1.5, 'EdgeColor', [0.4 0.6 1]);
end
bp_median = findobj(gca, 'Tag', 'Median');
for j = 1:length(bp_median)
    line(get(bp_median(j), 'XData'),
get(bp_median(j), 'YData'), 'Color', 'w', 'LineWidth', 1.5);
end
bp_out = findobj(gca, 'Tag', 'Outliers');
set(gca, 'xtickmode', 'auto', 'xticklabelmode', 'auto')
hold on
scatter(datadr.(f)(:,4), datadr.(f)(:,2), 20, 'o',
'MarkerEdgeColor', [0.6 0.6 0.6], 'MarkerFaceColor', 'w'); %dispersa dados
no centro de cada passo, para facilitar a visualização gráfica
for j = 1:length(bp_out)
    scatter(get(bp_out(j), 'XData'), get(bp_out(j), 'YData'),
20, 'o', 'MarkerEdgeColor', [1 0.5 0])
end
% Procura por valores aberrantes no diagrama de caixa
H = size(datadr_p.(f), 1);
if isempty(bp_out) == 0
    out = get(bp_out(:), 'YData'); %grava valores aberrantes
do diagrama de caixa
    if iscell(out) == 0
        out = num2cell(out);
    end
    out_log = ismember(datadr.(f)(:,2), cat(2, out{:})),
'rows'); %cria matriz lógica para indicar valores aberrantes
else
    out_log = 0;
end
if sum(out_log) >= 1 %checa se há valores aberrantes
    wob_out = ~out_log.*datadr.(f)(:,1);
    rop_out = ~out_log.*datadr.(f)(:,2);
    n_new = zeros(H,1); wob_new = zeros(H,1); rop_new =
zeros(H,1); k = 1;
    for j = 1:H %remove valores aberrantes dos dados
        n_new(j,1) = datadr_p.(f)(j,3)-
sum(out_log(k:k+n(j,1)-1,1));
        wob_new_temp = wob_out(k:k+n(j,1)-1,1);
        wob_new(j,1) = mean(wob_new_temp(wob_new_temp~=0));
        rop_new_temp = rop_out(k:k+n(j,1)-1,1);
        rop_new(j,1) = mean(rop_new_temp(rop_new_temp~=0));
        k = k+n(j,1);
    end
end
end

```

Quadro 3 - Código fonte de rotina no MATLAB para organizar e filtrar dados, e gerar curvas de *drill-rate*

(continuação)

```

        if sum(out_log) < 1
            n_new = n;
            wob_new = wob;
            rop_new = rop;
            output_new = output;
        end
        % Gera dados ponderados
        wob_w = []; rop_w = [];
        for j = 1:H
            wob_w = [wob_w; repmat(wob_new(j,1),n_new(j,1),1)];
            rop_w = [rop_w; repmat(rop_new(j,1),n_new(j,1),1)];
        end
        % Aproxima e gera curvas de drill-rate
        if eq.p1 > 0 %se a parábola tiver concavidade para cima
            % Aproxima curva com dados originais
            [eq,gof,output] = fit(wob,rop,'poly1'); %aproximação
para uma equação linear
            pl = plot(eq,':k',wob,rop,'^');
            set(pl,'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','w',
'DisplayName',[ 'Curva original (R^2 = ' num2str(gof.rsquare) ')'])
            leg = legend(pl(2),'Location','Northwest');
            set(leg,'FontSize',16);
            % Aproxima curva com dados sem valores aberrantes
            if sum(out_log) >= 1 %checa se há valores aberrantes
                % Aproxima curva com novos dados
                [eq_new,gof_new,output_new] =
fit(wob_new,rop_new,'poly2'); %aproximação para uma equação quadrática
                if eq_new.p1 > 0 %se a parábola tiver concavidade
para cima
                    [eq_new,gof_new,output_new] =
fit(wob_new,rop_new,'poly1'); %aproximação para uma equação linear
                end
                pl_new = plot(eq_new,'-k',wob_new,rop_new,'^');
                set(pl_new,'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor',
'g','DisplayName',[ 'Curva nova (R^2 = ' num2str(gof_new.rsquare) ')'])
                leg = legend([pl(2),pl_new(2)],'Location',
'Northwest');
                set(leg,'FontSize',16);
            end
            % Aproxima curva com dados ponderados
            [eq_w,gof_w,output_w] = fit(wob_w,rop_w,'poly2');
%aproximação para uma equação quadrática
            if eq_w.p1 > 0 %se a parábola tiver concavidade para
cima
                [eq_w,gof_w,output_w] = fit(wob_w,rop_w,'poly1');
%aproximação para uma equação linear
            end
            pl_w = plot(eq_w,'-r',wob_w,rop_w,'^');
            set(pl_w,'MarkerEdgeColor','none','MarkerFaceColor',
'none','DisplayName',[ 'Curva ponderada (R^2 = ' num2str(gof_w.rsquare)
')'])
            if sum(out_log) <= 1
                leg = legend([pl(2),pl_w(2)],'Location',
'Northwest');
                set(leg,'FontSize',16);
            end
        end
    end
end

```

Quadro 3 - Código fonte de rotina no MATLAB para organizar e filtrar dados, e gerar curvas de *drill-rate*

(continuação)

```

else
    leg = legend([pl(2),pl_new(2),pl_w(2)], 'Location',
'Northwest');
    set(leg, 'FontSize',16);
end
% Mostrar tamanho amostral no gráfico
for j = 1:H
    text(min(get(whisk(2*H+1-
2*j), 'XData')),min(get(whisk(2*H+1-2*j), 'YData')),{'n = '
num2str(n_new(j))}], 'FontSize',10, 'HorizontalAlignment', 'Center', 'Vertic
alAlignment', 'Top');
end
else %se a parábola tiver concavidade para baixo
    % Aproxima curva com dados originais
    wob_max = -eq.p2/(2*eq.p1); %coordenada horizontal do
ponto de inflexão
    rop_max = feval(eq,wob_max); %coordenada vertical do
ponto de inflexão
    pl = plot(eq, ':k', wob, rop, '^k');
    set(pl, 'MarkerEdgeColor', 'k', 'MarkerFaceColor', 'w',
'DisplayName', ['Curva original ( $R^2$  = ' num2str(gof.rsquare) ')]
    leg = legend(pl(2), 'Location', 'Northwest');
    set(leg, 'FontSize',16);
    % Aproxima curva com dados sem valores aberrantes
    if sum(out_log) >= 1 %checa se há valores aberrantes
        [eq_new, gof_new, output_new] =
fit(wob_new, rop_new, 'poly2'); %aproximação para uma equação quadrática
        if eq_new.p1 > 0 %se a parábola tiver concavidade
para cima
            [eq_new, gof_new, output_new] =
fit(wob_new, rop_new, 'poly1'); %aproximação para uma equação linear
        end
        pl_new = plot(eq_new, '-k', wob_new, rop_new, '^');
        set(pl_new, 'MarkerEdgeColor', 'k', 'MarkerFaceColor',
'g', 'DisplayName', ['Curva nova ( $R^2$  = ' num2str(gof_new.rsquare) ')]
        leg =
legend([pl(2),pl_new(2)], 'Location', 'Northwest');
        set(leg, 'FontSize',16);
    end
    % Aproxima curva com dados ponderados
    [eq_w, gof_w, output_w] = fit(wob_w, rop_w, 'poly2');
    %aproximação para uma equação quadrática
    if eq_w.p1 > 0 %se a parábola tiver concavidade para
cima
        [eq_w, gof_w, output_w] = fit(wob_w, rop_w, 'poly1');
        %aproximação para uma equação linear
    end
    pl_w = plot(eq_w, '-r', wob_w, rop_w, '^');
    set(pl_w, 'MarkerEdgeColor', 'none', 'MarkerFaceColor',
'none', 'DisplayName', ['Curva ponderada ( $R^2$  = ' num2str(gof_w.rsquare)
'])
    if sum(out_log) <= 1
        leg = legend([pl(2),pl_w(2)], 'Location',
'Northwest');
        set(leg, 'FontSize',16);
    end
end

```

Quadro 3 - Código fonte de rotina no MATLAB para organizar e filtrar dados, e gerar curvas de *drill-rate*

(conclusão)

```

else
    leg = legend([pl(2),pl_new(2),pl_w(2)], 'Location',
'Northwest');
    set(leg, 'FontSize', 16);
end
% Mostrar tamanho amostral no gráfico
for j = 1:H
    text(min(get(whisk(2*H+1-
2*j), 'XData')), min(get(whisk(2*H+1-2*j), 'YData')), {'n = '
num2str(n_new(j))}], 'FontSize', 10, 'HorizontalAlignment', 'Center', 'Vertic
alAlignment', 'Top');
end
end
% Identifica curva traçada
title(['RPM: ' num2str(rpm) ' rpm, FLO: ' num2str(gpm) ' gpm'],
'FontSize', 30, 'FontWeight', 'normal')
xlabel('WOB (klbf)', 'FontSize', 20)
ylabel('ROP (m/h)', 'FontSize', 20)
% Espera ação para continuar laço
w = waitforbuttonpress;
if w == 0 %encerra laço ao clicar em qualquer lugar
    return
else %continua laço ao pressionar qualquer tecla
    close all
    continue
end
end
end
end

```

Fonte: Produção do próprio autor

Quadro 4 - Código fonte de rotina no MATLAB para determinar curva de *drill-rate* ótima utilizando as tabelas de confiança

(continua)

```

%% Analisa todas as possibilidades de curvas possíveis e traça as mais
confiáveis

ax = gca; %grava os eixos do gráfico original (gerado a partir da função
anterior)
ntemp = n_new(n_new~=1); %remove valores onde n = 1
wobtemp = wob_new(n_new~=1);
roptemp = rop_new(n_new~=1);
if size(ntemp,1) < 3 %ignora campos com menos de três dados
    return
end
% Gera e analisa todas as curvas possíveis
points = 3; %número de pontos na curva
savedfunc = [];
while points < size(ntemp,1)
    combinations = combnk(1:size(ntemp,1),points); %calcula todas as
possíveis combinações dos dados agrupados em três ao valor máximo de
pontos
    maxlog = zeros(size(ntemp,1),size(combinations,1)); %cria uma matriz
nula para posteriormente identificar quais dados serão utilizados
    for comb = 1:size(combinations,1)
        savedfunc = cat(2,savedfunc,checkcurve(combinations(comb,:),
maxlog(:,comb),ntemp,wobtemp,roptemp)); %chama a função checkcurve para
determinar a confiança nas curvas utilizando as tabelas
    end
    points = points + 1;
end
% select best curve
if isempty(savedfunc) == 0
    if max(savedfunc(1,:)) > 0.9
        savedfunc = savedfunc(:,savedfunc(1,:)>0.9); %seleciona
curvas com confiança acima de 90%
        [~,ii] = min(savedfunc(4,:)); %seleciona curvas com a menor
margem de erro
        repeatedlog = ismember(savedfunc(4,:),savedfunc(4,ii));
%checa por duplicatas
        % Calcula e seleciona curvas similares
        if sum(repeatedlog) > 1
            mlogtemp = savedfunc(7:end,:).*repmat(repeatedlog,
size(savedfunc(7:end,:),1),1); %matriz maxlog para todas as curvas
selecionadas
            mlogtemp = evalmaxfunc(mlogtemp,ntemp,wobtemp,roptemp);
%grava a coordenada horizontal do vértice
            figure; bp = boxplot(mlogtemp);
            out = get(findobj(bp,'Tag','Outliers'),'YData'); %grava
valores muito distantes da mediana
            close %fecha diagrama de caixa
            out = +~(ismember(mlogtemp,out));
            out(out==0) = nan();
            repeatedlog = mlogtemp.*out;
        end
        [~,i] = max(sum(savedfunc(7:end,:).*repmat(ntemp,1,
size(savedfunc,2)).*repmat(repeatedlog,size(savedfunc(7:end,:),1
),1))); %escolhe curva com mais pontos

```

Quadro 4 - Código fonte de rotina no MATLAB para determinar curva de *drill-rate* ótima utilizando as tabelas de confiança

(continuação)

```

        savedmlogtemp = mlogtemp;
        % Seleciona uma curva com a segunda menor margem de erro (caso a
        % curva anteriormente selecionada tenha apenas três pontos)
        if savedfunctemp(6,i) == 3 && size(ntemp,1) > 3
            smallest = savedfunctemp(4,ii);
            [~,ii] = min(savedfunctemp(4,:)-smallest);
        %seleciona curvas com menor margem de erro
        repeatedlog = ismember(savedfunctemp(4,:), savedfunctemp(4,
        ii)); %checa por duplicatas
        % Calcula e seleciona curvas similares
        if sum(repeatedlog) > 1
            mlogtemp = savedfunctemp(7:end,:).*repmat(repeatedlog,
            size(savedfunctemp(7:end,:),1),1); %matriz maxlog para todas as curvas
            selecionadas
            mlogtemp = evalmaxfunc(mlogtemp,ntemp,wobtemp,roptemp);
        %grava a coordenada horizontal do vértice
        figure; bp = boxplot(mlogtemp);
        out = get(findobj(bp,'Tag','Outliers'),'YData'); %grava
        valores muito distantes da mediana
        close %fecha diagrama de caixa
        out = +~(ismember(mlogtemp,out));
        out(out==0) = nan();
        repeatedlog = mlogtemp.*out;
    end
    [~,i] = max(sum(savedfunctemp(7:end,:).*repmat(ntemp,1,
    size(savedfunctemp,2)).*repmat(repeatedlog,size(savedfunctemp(7:end,:),1
    ),1))); %escolhe curva com mais pontos
    end
    maxlog = savedfunctemp(7:end,i);
    curveprob = savedfunctemp(1:3,i);
    elseif max(savedfunc(2,:)) > 0.9
        savedfunctemp = savedfunc(:,savedfunc(2,:)>0.9); %seleciona
        curvas com confiança acima de 90%
        [~,ii] = min(savedfunctemp(4,:)); %seleciona curvas com menor
        margem de erro
        repeatedlog = ismember(savedfunctemp(4,:), savedfunctemp(4,ii));
        %checa por duplicatas
        % Calcula e seleciona curvas similares
        if sum(repeatedlog) > 1
            mlogtemp = savedfunctemp(7:end,:).*repmat(repeatedlog,
            size(savedfunctemp(7:end,:),1),1); %matriz maxlog para todas as curvas
            selecionadas
            mlogtemp = evalmaxfunc(mlogtemp,ntemp,wobtemp,roptemp);
        %grava a coordenada horizontal do vértice
        figure; bp = boxplot(mlogtemp);
        out = get(findobj(bp,'Tag','Outliers'),'YData'); %grava
        valores muito distantes da mediana
        close %fecha diagrama de caixa
        out = +~(ismember(mlogtemp,out));
        out(out==0) = nan();
        repeatedlog = mlogtemp.*out;
    end
    [~,i] = max(sum(savedfunctemp(7:end,:).*repmat(ntemp,1,
    size(savedfunctemp,2)).*repmat(repeatedlog,size(savedfunctemp(7:end,:),1
    ),1))); %escolhe curva com mais pontos

```

Quadro 4 - Código fonte de rotina no MATLAB para determinar curva de *drill-rate* ótima utilizando as tabelas de confiança

(continuação)

```
% Seleciona uma curva com a segunda menor margem de erro (caso a
curva anteriormente selecionada tenha apenas três pontos)
if savedfunctemp(6,i) == 3 && size(ntemp,1) > 3
    smallest = savedfunctemp(4,ii);
    [~,ii] = min(savedfunctemp(4,savedfunctemp(4,:))~=smallest));
%seleciona curvas com menor margem de erro
    repeatedlog = ismember(savedfunctemp(4,:),
savedfunctemp(4,ii)); %checa por duplicatas
    % Calcula e seleciona curvas similares
    if sum(repeatedlog) > 1
        mlogtemp = savedfunctemp(7:end,:).*repmat(repeatedlog,
size(savedfunctemp(7:end,:),1),1); %matriz maxlog para todas as curvas
selecionadas
        mlogtemp = evalmaxfunc(mlogtemp,ntemp,wobtemp,roptemp);
%grava a coordenada horizontal do vértice
        figure; bp = boxplot(mlogtemp);
        out = get(findobj(bp,'Tag','Outliers'),'YData'); %grava
valores muito distantes da mediana
        close %fecha diagrama de caixa
        out = +~(ismember(mlogtemp,out));
        out(out==0) = nan();
        repeatedlog = mlogtemp.*out;
    end
    [~,i] = max(sum(savedfunctemp(7:end,:).*repmat(ntemp,1,
size(savedfunctemp,2)).*repmat(repeatedlog,size(savedfunctemp(7:end,:),1),1))); %escolhe curva com mais pontos
end
    maxlog = savedfunctemp(7:end,i);
    curveprob = savedfunctemp(1:3,i);
else
    [~,ii] = max(savedfunc(3,:)); %seleciona curvas com a maior
confiança
    repeatedlog = ismember(savedfunc(3,:),savedfunc(3,ii)); %checa
por duplicatas (mais de uma curva com a mesma confiança)
    % Calcula e seleciona curvas similares
    if sum(repeatedlog) > 1
        mlogtemp = savedfunc(7:end,:).*repmat(repeatedlog,
size(savedfunc(7:end,:),1),1); %matriz maxlog para todas as curvas
selecionadas
        mlogtemp = evalmaxfunc(mlogtemp,ntemp,wobtemp,roptemp);
%grava a coordenada horizontal do vértice
        figure; bp = boxplot(mlogtemp);
        out = get(findobj(bp,'Tag','Outliers'),'YData'); %grava
valores muito distantes da mediana
        close %fecha diagrama de caixa
        out = +~(ismember(mlogtemp,out));
        out(out==0) = nan();
        repeatedlog = mlogtemp.*out;
    end
    [~,i] = max(sum(savedfunc(7:end,:).*repmat(ntemp,1,
size(savedfunc,2)).*repmat(repeatedlog,size(savedfunc(7:end,:),1),1))); %escolhe curva com mais pontos
```


Quadro 4 - Código fonte de rotina no MATLAB para determinar curva de *drill-rate* ótima utilizando as tabelas de confiança

(continuação)

```

    % Seleciona uma curva com a segunda menor margem de erro (caso a
    % curva anteriormente selecionada tenha apenas três pontos)
    if savedfunc(6,i) == 3 && size(ntemp,1) > 3
        highest = savedfunc(3,ii);
        [~,ii] = max(savedfunc(3,savedfunc(3,:)~=highest));
    %seleciona curvas com a maior confiança
        repeatedlog = ismember(savedfunc(3,:),savedfunc(3,ii));
    %checa por duplicatas (mais de uma curva com a mesma confiança)
        % Calcula e seleciona curvas similares
        if sum(repeatedlog) > 1
            mlogtemp =
savedfunc(7:end,:).*repmat(repeatedlog,size(savedfunc(7:end,:),1),1);
    %matriz maxlog para todas as curvas selecionadas
            mlogtemp = evalmaxfunc(mlogtemp,ntemp,wobtemp,roptemp);
    %grava a coordenada horizontal do vértice
            figure; bp = boxplot(mlogtemp);
            out = get(findobj(bp,'Tag','Outliers'),'YData'); %grava
valores muito distantes da mediana
            close %fecha o diagrama de caixa
            out = +~(ismember(mlogtemp,out));
            out(out==0) = nan();
            repeatedlog = mlogtemp.*out;
        end
        [~,i] = max(sum(savedfunc(7:end,:).*repmat(ntemp,1,
size(savedfunc,2)).*repmat(repeatedlog,size(savedfunc(7:end,:),1),1)));
    %escolhe curva com mais pontos
        end
        maxlog = savedfunc(7:end,i);
        curveprob = savedfunc(1:3,i);
    end
else
    return
end
% Traça curva selecionada
maxlog = logical(maxlog);
wob_weighted = [];
rop_weighted = [];
ntemp = ntemp(maxlog);
wobtemp = wobtemp(maxlog);
roptemp = roptemp(maxlog);
for j = 1:sum(maxlog) %gera dados ponderados
    wob_weighted = [wob_weighted; repmat(wobtemp(j),ntemp(j),1)];
    rop_weighted = [rop_weighted; repmat(roptemp(j),ntemp(j),1)];
end
[f1,gof1] = fit(wob_weighted,rop_weighted,'poly2'); %aproximação para
uma equação quadrática
figure;
set(gcf,'units','normalized','outerposition',[0.5 0 0.5 1]) %estabelece
posição na imagem no lado esquerdo da tela
scatter(datadr.(f)(:,1),datadr.(f)(:,2),'.b')
hold on

```

Quadro 4 - Código fonte de rotina no MATLAB para determinar curva de *drill-rate* ótima utilizando as tabelas de confiança

(conclusão)

```
scatter(wob_new, rop_new, '^b')
fplot(f1, [wobtemp(1)-range(wobtemp)/2 wobtemp(end)+range(wobtemp)/2], '--
k')
pl1 = plot(f1, '-k', wobtemp, roptemp, 'ok');
scatter(-f1.p2/(2*f1.p1), feval(f1, -f1.p2/(2*f1.p1)), 100, 'xk')
set(pl1, 'Markersize', 10, 'DisplayName', ['Curva original ( $R^2$  = '
num2str(gof1.rsquare) ') ' 10 ...
'Probabilidade da posição do WOB ideal (em relação ao founder
point):' 10 ...
'<10%: ' num2str(curveprob(1)*100) '%, <20%: '
num2str(curveprob(2)*100) '%, <30%: ' num2str(curveprob(3)*100) '%'])
legend(pl1(2), 'Location', 'Northeast')
axis([ax.XLim ax.YLim]) %define os mesmos eixos que a curva original
```

Fonte: Produção do próprio autor

Quadro 5 - Código fonte de rotina auxiliar no MATLAB, desenvolvido como função *checkcurve*, para determinar a confiabilidade das curvas de *drill-rate* utilizando as tabelas de confiança

(continua)

```
%% Função checkcurve utilizada na rotina descrita no quadro 4

function sf = checkcurve(comb, mlog, n, wob, rop)

load tableme %carrega as tabelas de confiança
wob_weighted = [];
rop_weighted = [];
for j=1:length(comb)
    mlog(comb(j)) = 1; %identifica quais dados serão utilizados
end
if sum(mlog) > 12 %limita curvas com mais de 12 pontos às tabelas de 12
pontos
    sheet = 10;
else
    sheet = sum(mlog)-2;
end
smallpoint = n.*mlog; %tamanho amostral de cada ponto
smallpoint = min(smallpoint(smallpoint~=0)); %menor tamanho amostral
% Define a margem de erro de acordo com o menor tamanho amostral
if smallpoint < 44
    if smallpoint < 18
        if smallpoint < 10
            if smallpoint < 7
                if smallpoint < 5
                    if smallpoint < 4
                        if smallpoint < 3
                            marginerror = 2;
                        else
                            marginerror = 1.4;
                        end
                    else
                        marginerror = 1.2;
                    end
                end
            else
                marginerror = 1.2;
            end
        else
            marginerror = 1.2;
        end
    end
end
```

Quadro 5 - Código fonte de rotina auxiliar no MATLAB, desenvolvido como função *checkcurve*, para determinar a confiabilidade das curvas de *drill-rate* utilizando as tabelas de probabilidade

(conclusão)

```

        marginerror = 1;
    end
    else
        marginerror = 0.8;
    end
    else
        marginerror = 0.6;
    end
    else
        marginerror = 0.4;
    end
    else
        marginerror = 0.2;
    end
    n = n.*mlog;
    n = n(n~=0);
    wob = wob.*mlog;
    wob = wob(wob~=0);
    rop = rop.*mlog;
    rop = rop(rop~=0);
    for j=1:length(n) %gera dados ponderados
        wob_weighted = [wob_weighted; repmat(wob(j),n(j),1)];
        rop_weighted = [rop_weighted; repmat(rop(j),n(j),1)];
    end
    f1 = fit(wob_weighted,rop_weighted,'poly2'); %aproximação para uma
    função quadrática
    x_v = -f1.p2/(2*f1.p1); %componente horizontal do vértice da parábola
    if f1.p1 > 0 || x_v < min(wob) || x_v > max(wob)
        sf = [];
        return
    end
    y_max = feval(f1,x_v); %maior valor de y descrito pela curva
    y_min = min([feval(f1,min(wob_weighted)) feval(f1,max(wob_weighted))]);
    %menor valor de y descrito pela curva, dentro do intervalo de WOB
    rngc = ceil((y_max - y_min)/0.5)*0.5; %range arredondado para cima,
    múltiplo de 0.5
    if rngc > 0 %se a parábola tiver concavidade para baixo
        mytable = ['tableme' sprintf('%0.1f',marginerror),'.','_'];
        mytable = eval(mytable);
        prob = [mytable(mytable(:,1, sheet)==rngc,2, sheet);
        mytable(mytable(:,1, sheet)==rngc,3, sheet);
        mytable(mytable(:,1, sheet)==rngc,4, sheet)];
        if isempty(prob) == 1 %se range for maior que o valor máximo
        descrito pela tabela
            prob = [mytable(end,2, sheet); mytable(end,3, sheet);
            mytable(end,4, sheet)];
        end
        sf = [prob; marginerror; rngc; sum(mlog); mlog]; %grava os valores
        de confiabilidade, variação percentual de WOB, ponto de menor tamanho
        amostral e matriz maxlog
    else
        sf = [];
    end
end

```

Fonte: Produção do próprio autor