

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PETRÓLEO

JOÃO VYCTHOR MORAIS ALBUQUERQUE CRISÓSTOMO

OPERAÇÕES E INCIDENTES DE POÇOS UTILIZANDO UM SIMULADOR DE
PERFURAÇÃO

MACEIÓ

2024

JOÃO VYCTHOR MORAIS ALBUQUERQUE CRISÓSTOMO

OPERAÇÕES E INCIDENTES DE PERFURAÇÃO UTILIZANDO UM SIMULADOR DE
PERFURAÇÃO

TCC apresentado ao curso de Engenharia de
Petróleo, da Universidade Federal de Alagoas,
como requisito para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Petróleo.

Orientador: Lucas Pereira de Gouveia

Coorientador: Francisco de Assis Viana Binas
Júnior

MACEIÓ

2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Helena Cristina Pimentel do Vale CRB4 - 661

- C932o Crisóstomo, João Vyctor Moraes Albuquerque.
Operações e incidentes de perfuração utilizando um simulador de perfuração / João Vyctor Moraes Albuquerque Crisóstomo. – 2024.
40 f. : il.
- Orientador: Lucas Pereira de Gouveia.
Coorientador: Francisco de Assis Viana Binas Júnior.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Petróleo) – Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia. Curso de Engenharia de Petróleo. Maceió, 2024.
- Bibliografia: f. 38-40.
1. Engenharia de petróleo. 2. Simulador de perfuração. 3. OpenLab Drilling (Software). 4. Campo de volve. 5. Segurança operacional. I. Título.

CDU: 621.7:528.5

RESUMO

O presente estudo utiliza um simulador de perfuração para analisar a segurança das operações e a eficiência na construção de poços de petróleo. Utilizando dados de perfuração de um poço publicados pela Equinor, referentes ao campo de Volve, o trabalho inicia com a comparação entre as taxas de penetração (ROP) simuladas e observadas em campo, com o objetivo de validar o software apresentado. Em seguida, são realizados estudos de casos para avaliar os efeitos do *kick* de gás durante o processo de perfuração. Na análise de eficiência, são realizadas variações nos dados operacionais para melhorar a ROP. Para construir o modelo, são considerados parâmetros como trajetória direcional, dados do fluido de perfuração, geopressão, reologia, dados da broca, entre outros, extraídos dos dados publicados. Os resultados revelam uma precisão significativa na simulação da taxa de penetração (ROP) durante a perfuração, com um erro médio de apenas 0,31% no intervalo de 3001m a 3011m. Esta análise abrangeu a comparação entre as taxas de penetração simuladas e observadas em campo, utilizando dados reais do campo de Volve fornecidos pela Equinor. Esses resultados validam a eficácia do software utilizado na simulação das operações de perfuração.

Palavras-chave: Simulador de perfuração, *OpenLab Drilling Simulator*, campo de Volve, ROP, segurança operacional, *kick* de gás.

ABSTRACT

The present study employs a drilling simulator to analyze the safety and efficiency of oil well operations. Utilizing drilling data from a well published by Equinor, pertaining to the Volve field, the research commences with a comparison between simulated and field-observed rates of penetration (ROP) to validate the presented software. Subsequently, case studies are conducted to assess the effects of gas kicks during the drilling process. Efficiency analysis involves variations in operational data to enhance ROP. Parameters considered for model construction include directional trajectory, drilling fluid data, geopressure, rheology, drill bit data, among others, extracted from published sources. Results reveal a significant precision in simulating ROP, with a mean error of merely 0.31% within the 3001m to 3011m interval. This analysis encompasses the comparison between simulated and field-observed ROP, utilizing real data from the Volve field provided by Equinor. These outcomes validate the effectiveness of the software employed in drilling operations simulation.

Keywords: Drilling Simulator, OpenLab Drilling Simulator, Volve field, ROP, Operational Safety, gas kick.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Esquema básico de trajetória de poço direcional.	10
Figura 2: Configurações de BHA.	11
Figura 3: Estabilizadores.	12
Figura 4: Circuito Hidráulico durante controle de poço	14
Figura 5: Treinamento realizado utilizando simulador.....	7
Figura 6: Primeiro fluxograma de processos metodológicos do trabalho..	19
Figura 7: Segundo fluxograma de processos metodológicos do trabalho..	20
Figura 8: Litologias presentes no poço..	22
Figura 9: Gráficos referentes ao intervalo de perfuração de 3001m até 3011m.....	23
Figura 10: Janela operacional do poço estudado.	25
Figura 11: Resultado das simulações alterando-se a vazão de fluxo da bomba.	26
Figura 12: Gráfico de comportamentos da vazão do fluxo da bomba.	26
Figura 13: Resultado das simulações alterando-se a rotação da broca.....	27
Figura 14: Gráfico de comportamentos da rotação da broca.....	28
Figura 15: Resultado das simulações alterando-se o peso sobre a broca.	29
Figura 16: Gráfico de comportamentos do peso sobre a broca	29
Figura 17: Curvas de volume de gás antes e depois da ocorrência de um <i>kick</i>	32
Figura 18: Comportamento do ROP na simulação de um <i>kick</i>	33
Figura 19: Comportamento da vazão de fluxo na simulação de um <i>kick</i>	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1 OBJETIVOS	7
2. REVISÃO DA LITERATURA	9
2.1. PERFURAÇÃO DE POÇOS	9
2.2. COLUNA DE PERFURAÇÃO E COMPONENTES.....	13
2.3. TAXA DE PERFURAÇÃO	15
2.4. INCIDENTES DE PERFURAÇÃO	16
2.4.1 <i>Kick</i>	16
2.4.2 Perda de circulação	18
2.5. SENSORES E COLETAS DE DADOS.....	18
2.5.1. Mud logging.....	18
2.5.2. Pressão de poros.....	19
2.6 SIMULADORES DE PERFURAÇÃO	20
3. METODOLOGIA.....	22
3.1 CÁLCULOS E CORRELAÇÕES.....	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
4.1 ANÁLISE COMPARATIVA DE SIMULAÇÕES E DADOS REAIS DE PERFORMANCE DE ROP	25
4.2 EFEITOS DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS OPERACIONAIS.....	28
4.3 DETECÇÃO DE KICK.....	34
5. CONCLUSÃO	37
6. REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

Ao longo de sua história, a indústria de óleo e gás (O&G) tem sido caracterizada pela inovação contínua como seu principal pilar. Desde 1860, quando foi perfurado o primeiro poço em busca de petróleo (SILVA, 2012), a engenharia evoluiu constantemente em busca de maior segurança e efetividade em suas operações. No entanto, apesar dos avanços na compreensão dos processos físicos envolvidos na perfuração, ainda enfrentamos desafios persistentes, especialmente relacionados às profundidades e pressões extremas encontradas nos reservatórios de óleo, bem como à complexidade desses reservatórios.

Estes desafios são exacerbados pelos custos associados ao desenvolvimento e teste de novas tecnologias. Embora os testes em escala real sejam considerados o ambiente mais próximo da realidade, sua viabilidade nem sempre é garantida, especialmente durante as fases iniciais do desenvolvimento. Muitas vezes, a informação potencialmente valiosa contida nesses dados é subutilizada, tornando desafiador o uso desses dados para análise e controle de processos, mesmo para engenheiros experientes. Neste contexto, este trabalho busca contribuir para a otimização do processo de perfuração de novos poços, destacando a importância da análise de dados históricos e relatórios de perfuração. O objetivo é, por meio da análise desses dados, melhorar não apenas a eficiência operacional, mas também a segurança das operações de perfuração de poços de petróleo.

Para alcançar esse objetivo, exploraremos como a análise de dados pode desempenhar um papel crucial na identificação de oportunidades de melhoria na perfuração de poços. Além disso, discutiremos como o desenvolvimento de sensores e sistemas de processamento de dados pode aprimorar a medição e o registro de informações operacionais e geológicas durante o processo de perfuração. Integrar efetivamente as áreas de obtenção e interpretação dos dados de exploração pode não apenas aumentar a segurança e a viabilidade econômica das operações, mas também levar a avanços significativos na eficiência da perfuração de poços de petróleo.

1.1 OBJETIVOS

Estudar a relação de dados reais de perfuração a partir de sua utilização em um simulador de perfuração de poços de forma a verificar a capacidade do modelo proposto reproduzir o que foi monitorado. Com isso, estudos específicos da operação serão feitos e o desempenho será avaliado. Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a. Tratar os dados disponibilizados publicamente pela empresa Equinor referentes às operações no campo de Volve, no mar do Norte.
- b. Simular, por meio do software *OpenLab Drilling*, uma operação de perfuração de um poço a partir de dados de campo e comparar os resultados com os dados monitorados quantificando os erros associados.
- c. Compreender mecanismos que interferem a eficiência do processo de perfuração, por meio da avaliação do comportamento da taxa de perfuração (ROP), WOB, rotação da broca e vazão do fluido de perfuração nas simulações utilizando os dados de campo.
- d. Identificar ocorrência de *kicks* na operação a fim de estudar seus efeitos no processo de perfuração.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será realizada uma revisão que abrangerá os principais aspectos relacionados à perfuração de poços, abordando desde os componentes essenciais até os desafios operacionais enfrentados nesse processo. Será dividido em diversas seções, cada uma focada em um aspecto específico da perfuração de poços.

2.1. PERFURAÇÃO DE POÇOS

Segundo Thomas (2001), uma sonda de perfuração é o conjunto de equipamentos e acessórios que possibilitam a perfuração de um poço. A sonda é composta por vários sistemas, cada um com funções específicas. Destacam-se:

- Sistema de sustentação de cargas.

É constituído de um mastro ou torre, de subestrutura e de uma base ou fundação. A carga corresponde ao peso da coluna de perfuração ou revestimento que está no poço e é transferida para o mastro ou torre que descarregam para subestrutura e está para a base ou fundação. Em perfurações offshore pode não existir fundações.

A subestrutura é constituída de vigas de aço especial montadas sobre a fundação ou base da sonda. A subestrutura cria um espaço de trabalho sob a plataforma, onde são instalados os equipamentos de segurança de poço. As fundações ou bases são estruturas rígidas construídas em concreto, aço ou madeira que ficam apoiadas sobre o solo e suportam com segurança as deflexões, vibrações e deslocamentos provocados pela sonda.

O estaleiro é uma estrutura metálica constituída de diversas vigas apoiadas acima do solo por pilares e fica posicionado na frente da sonda de forma a permitir manter todas as tubulações dispostas paralelamente a passarela para facilitar o manuseio e transporte. Tem a função de gerar e transmitir a energia necessária para o acionamento dos equipamentos da sonda de perfuração (FERREIRA, 2012).

- Sistema de movimentação de cargas;

Dentre os principais componentes do sistema de sonda, destaca-se funções e características dos principais componentes.

O guincho é responsável por receber a energia mecânica necessária para a movimentação de cargas. Ele pode receber essa energia através da transmissão principal, em sondas de diesel, ou diretamente de um motor elétrico acoplado a ele, em sondas elétricas. Os principais componentes do guincho incluem tambor principal, que tem por função acionar o cabo de perfuração, movimentando as cargas dentro do poço e tambor auxiliar ou de limpeza, instalado no eixo secundário do guincho, move equipamentos leves no poço, como registradores de inclinação e direção, amostradores de fundo.

Já os freios irão parar o movimento de descida de carga no poço, permitindo o controle de peso sobre a broca. Geralmente, são empregados dois tipos de freios: o freio principal, mecânico por fricção, e o freio secundário, hidráulico ou eletromagnético.

Molinete: semelhante a embreagem, que traciona cabos ou cordas. Existem dois tipos de molinetes em uma sonda: o molinete das chaves flutuantes, para apertar e desapertar as conexões da coluna de perfuração e revestimento, e o molinete giratório (*cathead*), que permite o içamento de pequenas cargas.

Bloco de Coroamento (*Crown Block*): É um conjunto estacionário de 4 a 7 polias montadas em linha num eixo suportado por dois mancais de deslizamento, localizados na parte superior da torre ou do mastro. O bloco de coroamento suporta todas as cargas transmitidas a ele.

A Catarina é um conjunto de 3 a 6 polias móveis montadas em um eixo que se apoia nas paredes externas da própria estrutura da Catarina. Ela fica suspensa pelo cabo de perfuração e forma um sistema com 8 a 12 linhas passadas.

Gancho localizado na parte inferior da Catarina: consiste em um corpo cilíndrico com um sistema de amortecimento interno para evitar golpes causados pela movimentação das cargas. O cabo de perfuração é um cabo de aço trançado em torno de um núcleo ou alma, composto por diversos fios de aço especial. O cabo é passado no sistema bloco-catarina e enrolado no tambor do guincho. O Elevador é um equipamento com forma de anel bipartido utilizado para movimentar elementos tubulares, como os tubos de perfuração. (FERREIRA, 2012).

- Sistema de rotação.

Nas sondas convencionais, a rotação da coluna de perfuração é realizada pela mesa rotativa, localizada na plataforma da sonda. A rotação é transmitida ao topo da coluna de perfuração através do tubo de parede externa poligonal, conhecido como *kelly*. Nas sondas equipadas com top drive, a rotação é transmitida diretamente ao topo da coluna de perfuração por um motor

acoplado à catarina. Existem também sistemas de perfuração com motor de fundo, onde um motor hidráulico é colocado logo acima da broca.

A mesa rotativa transmite rotação à coluna de perfuração. Permite livre deslizamento do *kelly* em seu interior. Em certas operações, suporta o peso da coluna de perfuração. O *kelly* tem a importante função de transmitir a rotação da mesa rotativa à coluna de perfuração. É mais comum em sondas terrestres.

A Cabeça de Injeção irá separar os elementos rotativos daqueles estacionários na sonda. O fluido de perfuração é injetado no interior da coluna através dela. Já o *Top Drive* deve substituir o uso da mesa rotativa ou do *kelly*, de forma a permitir perfurar o poço de três em três tubos, ao invés de um a um. Facilita a retirada ou descida da coluna com rotação ou circulação de fluido.

O motor de fundo colocado acima da broca tem seu giro ocorrendo apenas na parte inferior do motor e é empregado em perfuração de poços direcionais. O fluido de perfuração é bombeado através da coluna de perfuração até a broca, retornando pelo espaço anular até a superfície, trazendo os cascalhos cortados pela broca. Esse fluido é tratado e recirculado para garantir sua eficácia. Fase de Injeção O fluido é injetado na coluna de perfuração até passar para o anular entre o poço e a coluna. As vazões e pressões de bombeio variam com a profundidade e geometria do poço. O fluido retorna pelo espaço anular entre a coluna de perfuração e a parede do poço ou revestimento. A fase de tratamento consiste na eliminação de sólidos ou gás incorporados ao fluido de perfuração. Inclui etapas como peneira vibratória, desareiaadores, dessiltador, *mud cleaner* e desgaseificador. O objetivo principal é garantir sua eficiência e segurança ao longo do processo. (FERREIRA, 2012).

- Sistema de segurança de poço.

É constituído pelos Equipamentos de Segurança de Cabeça de Poço (ESCP) e por equipamentos complementares que possibilitam o fechamento e controle do poço. O equipamento mais crucial nesse sistema é o *Blowout Preventer* (BOP), que consiste em um conjunto de válvulas capazes de fechar o poço. Os preventores são acionados sempre que houver ocorrência de um *kick*, ou seja, um fluxo indesejável de fluido contido numa formação para dentro do poço. Se esse fluxo não for controlado eficientemente, pode resultar em um *blowout*, onde o poço flui totalmente sem controle, acarretando sérias consequências, fatais e/ou ambientais. A cabeça de poço é composta por diversos equipamentos que permitem a

ancoragem e vedação das colunas de revestimento na superfície. Os preventores permitem o fechamento do espaço anular e podem ser de dois tipos: preventor anular e de gaveta.

- Sistema de monitoração.

Na perfuração de poços, é necessário contar com equipamentos de controle e registros para melhor observar e ajustar os parâmetros do processo. Alguns equipamentos são os manômetros, que medem a pressão de bombeio. O Indicador de peso no gancho e sobre a broca, deve indicar a carga aplicada durante a perfuração e o torquímetro deverá medir o torque aplicado nas conexões da coluna de perfuração ou de revestimento. Os tacômetros medem a velocidade da mesa rotativa da bomba de lama.

Já o registrador de taxa de penetração da broca deve registrar a velocidade de penetração, auxiliando na avaliação das mudanças nas formações perfuradas e no desgaste da broca. Esses equipamentos são fundamentais para garantir o controle preciso dos parâmetros de perfuração, permitindo ajustes adequados ao longo do processo.

A coluna de perfuração é responsável por transmitir energia até a broca e é composta por diversos componentes principais:

Comandos (*Drill Collars*): Fornecem peso sobre a broca e rigidez à coluna.

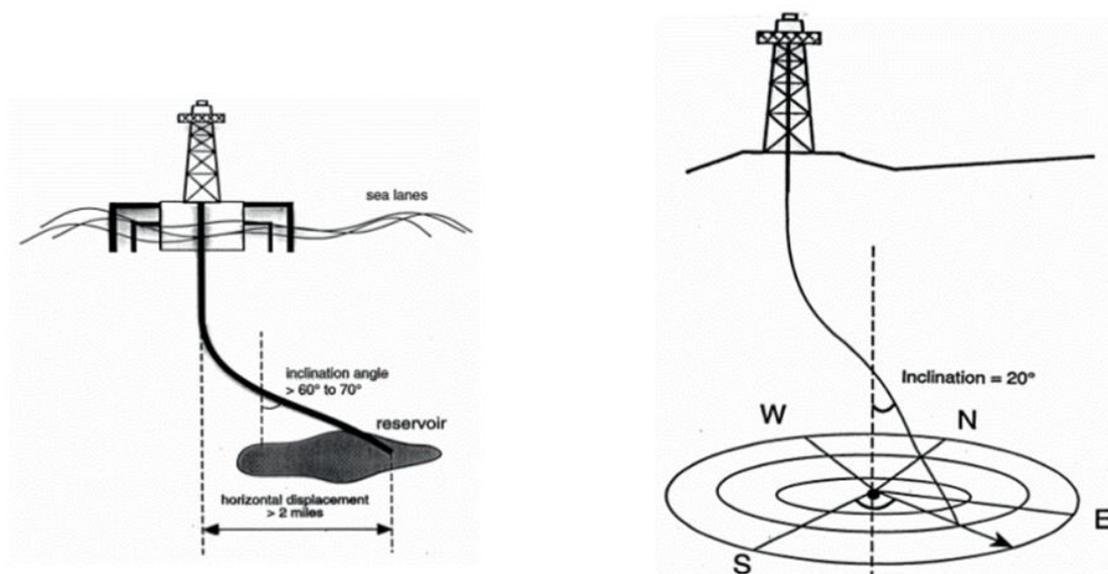
Tubos pesados e tubos de perfuração: Permitem sua adequada ancoragem e transmissão de energia. Também garantem a eficiência e a estabilidade necessárias para a perfuração adequada do poço.

Cimentação e Completação: À medida que cada seção do poço é perfurada, é necessário cimentar o revestimento de perfuração para evitar desmoronamentos das paredes. A completação necessita da realização de leituras e amostragens nas seções inferiores do poço, incluindo rochas-reservatório, para análise de suas características e potenciais hidrocarbonetos. Dessa forma, garante-se a estabilidade das paredes e a coleta de dados importantes para as futuras etapas do projeto.

São utilizados equipamentos direcionais em poços que necessitam desviar sua trajetória a partir de uma posição vertical, possibilitando o alcance de alvos situados em coordenadas diferentes da cabeça do poço, como é visto na Figura 1. Isso possibilita alcançar diversos objetivos, tais como: controle de *blowouts*, desvio por falhas na formação, construir vários poços na mesma

cabeça de poço, desvio por problemas operacionais etc. No Brasil, essa técnica começou na Bahia e foi largamente utilizada em campos de terra, onde áreas com muitas falhas geológicas provocavam afastamentos consideráveis dos poços com relação à vertical (ROCHA, 2009).

Figura 1. Esquema básico de trajetória de poço direcional



Fonte: MACHADO (2010)

2.2. COLUNA DE PERFURAÇÃO E COMPONENTES

A coluna de perfuração junto aos componentes de fundo (*Bottom Hole Assembly*, BHA) possuem a função de transmitir rotação e peso sobre a broca. Há também a viabilização por meio de tubos vazados, no seu interior, do fluxo do fluido de perfuração que parte desde a cabeça de injeção (*swivel*) até a broca retornando pelo anular. A coluna de perfuração está sujeita a muitos esforços dinâmicos, como torção, flexão, esforço normal e cortante.

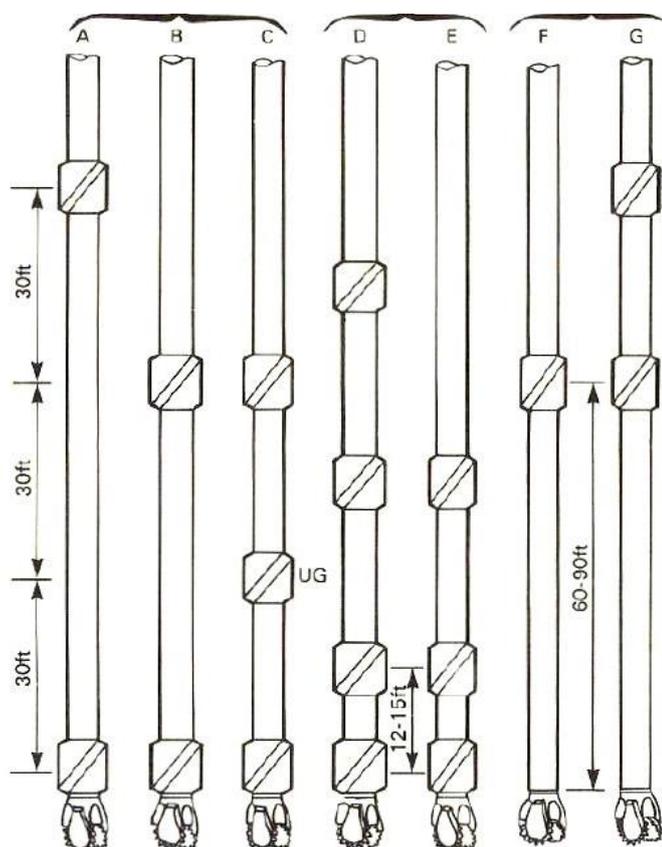
Ao chegar na zona de interesse, a coluna de perfuração é retirada do poço e uma coluna de revestimento de aço, de diâmetro inferior ao da broca, é inserida no poço. Então, o anular entre os tubos de revestimento e as paredes do poço é cimentado com a finalidade de isolar as rochas atravessadas, permitindo o avanço da perfuração com segurança. Durante a perfuração alguns parâmetros são aferidos por meio de sensores localizados na superfície ou na subsuperfície. Outros, são calculados a partir das informações coletadas como, por exemplo, a taxa de penetração.

Os componentes essenciais do BHA em perfuração direcional incluem tubos de perfuração de peso pesado (HWDP), comandos e estabilizadores (ROCHA, 2011). A configuração pode variar de acordo com a posição desses componentes básicos, e permitem ganhar, manter ou

perder ângulo. Existem ainda ferramentas como motor de fundo, substitutos de deflexão, equipamentos de acompanhamento direcional e perfilagem, entre outros que podem compor o BHA. A configuração de estabilizadores no BHA deve estar de uma das seguintes formas em função do trecho perfurado:

- BHA com princípio da alavanca ou efeito *Fulcrum*: útil para aumentar a inclinação do poço, como observa-se na seção de *Building* no esquema da Figura 2;
- BHA utilizando coluna empacada: útil quando se deseja manter a inclinação e direção do poço, destacado na seção de *Holding* do esquema da Figura 2;
- BHA (princípio do pêndulo): útil para reduzir a inclinação do poço, como é visto na seção de *Dropping* da Figura 2;

Figura 2: Configurações de BHA.



Fonte: Inglis (1987).

Os comandos de perfuração ou *Drill Collars* (DC) são tubos de aço de elevada espessura e estão localizados logo acima da broca para fornecer grande peso sobre ela de forma a assegurar melhor controle da trajetória do poço.

Tubos Pesados são tubos que tem geralmente o mesmo diâmetro externo dos tubos de perfuração normais, porém com maior espessura de parede. Além de poderem ser utilizados para dar peso sobre a broca, os tubos pesados entre os comandos e os tubos de perfuração permitem uma mudança gradual da rigidez da coluna, o que é importante pois uma mudança brusca de rigidez na coluna se torna um ponto de concentração de tensões e, portanto, um ponto que pode sofrer fraturas com mais facilidade (ROCHA et al, 2011).

O estabilizador é um acessório quase indispensável em uma coluna de perfuração, principalmente quando a perfuração é direcional. Essa ferramenta é responsável por centralizar a coluna, afastando os comandos das paredes do poço, provendo estabilidade para o BHA e reduzindo a vibração na coluna, como também diminui o risco de prisão da mesma por diferencial de pressão (ROCHA et al, 2011; SAVEGNAGO, 2012). A Figura 3 detalha a estrutura de estabilizadores amplamente utilizados na indústria.

Figura 3: Estabilizadores.



Fonte: Adaptado de DRILLING (2012)

2.3. TAXA DE PERFURAÇÃO

A taxa de penetração (ROP) é a velocidade com que a broca perfura as rochas, um parâmetro crucial que deve ser maximizado sempre que possível. Em um contexto em que o custo médio de uma sonda de perfuração offshore é cerca de U\$ 1.600.000,00 por dia (GANDELMAN, 2012), é essencial otimizar todas as etapas do processo. Dentre essas etapas, destacamos a otimização do ROP, juntamente com atividades como a descida de revestimento, troca de

equipamentos e o tempo de cura do cimento. Cada uma dessas etapas contribui para a eficiência global da operação de perfuração.

Alguns parâmetros interferem diretamente no ROP, como por exemplo a vazão de fluido de perfuração, a rotação da broca, o peso sobre a broca (WOB), o diâmetro da broca e outros. Porém, a manipulação desses e outros parâmetros visando aumento no ROP deve ser realizada com cautela, pois as condições de segurança do poço também serão afetadas. Os parâmetros com maior facilidade de mudança para um controle efetivo do ROP são a rotação da broca e o WOB. A escolha de um par de parâmetros operacionais dito ideal é uma tarefa complicada e a decisão inadequada leva a um gasto excessivo de energia no sistema, podendo gerar aumento excessivo de vibração na coluna e conseqüente redução de vida útil da broca e demais equipamentos de fundo de poço.

2.4. INCIDENTES DE PERFURAÇÃO

2.4.1 Kick

Segundo Thomas (2004), uma das principais funções do fluido de perfuração é exercer pressão hidrostática sobre as formações a serem perfuradas pela broca. Quando o fluido de perfuração é contaminado por um fluido da formação ocorre corte da lama, causando a diminuição de sua massa específica. Essa redução pode provocar um *kick*. A contaminação pode ser de óleo, gás ou água provenientes da formação perfurada. A situação mais crítica ocorre quando o corte é feito por gás, o que pode ser explicado devido a sua maior expansão quando o gás está se deslocando em direção a superfície, causando uma maior redução da densidade da mistura. Nesse caso, a expansão do gás ocorre à medida que ele sobe devido à diferença de densidade entre o gás e o fluido no poço, causada pela diminuição da pressão hidrostática. (AZEVEDO, 2017).

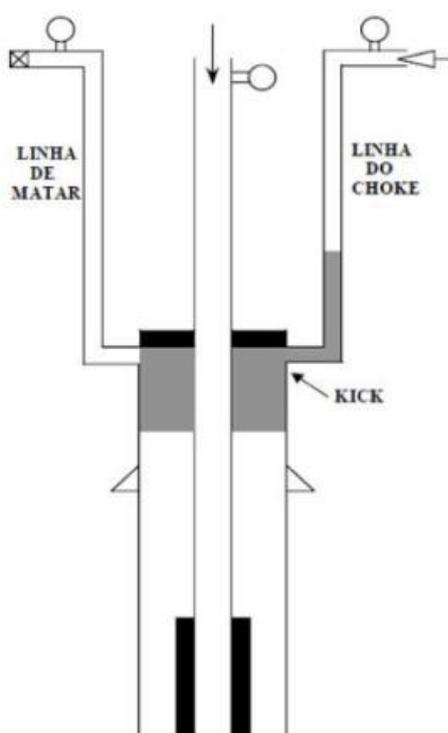
Dentre as causas comuns de ocorrência do *kick* são citados o peso de lama insuficiente e o abastecimento incorreto do poço durante a manobra. O *kick* deve ser detectado o mais rapidamente possível, e assim feito, deve-se paralisar a perfuração e fechar o anular utilizando-se o BOP, de modo que o fluido invasor seja removido do poço de forma segura a fim de não comprometer a estrutura como um todo, pois pode ocasionar danos ao equipamento, riscos ambientais e de explosões, ao ocorrer a mistura de fluidos dentro do poço.

Existem alguns métodos de controlar o poço em um eventual *kick*, tais como:

- Método do sondador

Na primeira etapa do método do sondador, o *kick* é deslocado para fora do poço por meio do próprio fluido de perfuração. Em poços submarinos, a circulação é realizada com uma vazão normal ou aumentada através da coluna de perfuração, passando pelo BOP e retornando pela linha de *choke*, para promover a rápida remoção do *kick* do poço. O esquema é exposto na Figura 4. Já nos poços terrestres, o fluido invasor passa pela coluna, no espaço anular, até atingir o BOP em superfície. A segunda etapa consiste em circular um fluido de perfuração de densidade maior que o gradiente de poros da formação, uma vez que o poço já estará em equilíbrio dinâmico (CHAGAS, 2014).

Figura 4. Circuito Hidráulico durante controle de poço.



Fonte: SANTOS (2013)

- Método do engenheiro

Neste método, o controle do poço é retomado por meio de uma circulação já com o novo fluido de perfuração. Dentre todos os métodos de controle, esse é o que mantém a parede do poço e os equipamentos de superfície sujeito a menores pressões. Porém, há maior dificuldade operacional (NETO, 2011). Outra característica a ser destacada no método é a dificuldade de se saber a profundidade da interface entre o fluido de perfuração injetado e o antigo, estando o operador do *choke* sujeito a erros.

A injeção do fluido pesado ocorre enquanto o influxo está sendo retirado do poço. Sendo assim, as pressões monitoradas não são constantes. Sua vantagem em relação ao método do sondador é a de requerer menores pressões no *choke* depois que o fluido de perfuração pesado passar

pela broca, além de ser mais eficiente e rápido. Por outro lado, menores pressões na sapata de revestimento poderiam fazer com que o gás chegasse à broca antes do novo fluido. Justamente devido às suas vantagens e simplicidade, o método do sondador é mais recomendável (CHAGAS,2014).

2.4.2 Perda de circulação

A perda de circulação ou perda de fluido para a formação é um dos problemas mais críticos que podem ser encontrados durante a perfuração de petróleo e/ou gás convencional. (DATALOG, 2011). Ocorre quando o fluido de perfuração bombeado para um poço retorna parcialmente à superfície ou se perde completamente na formação. Embora tecnicamente não seja desejado, é aceito que alguma quantidade de fluido seja perdida na formação de forma regulada, seu controle é feito com redutores de filtrado. No entanto, a perda parcial, total ou grave de fluidos não é econômica ou ambientalmente agradável (Wagle et al., 2019). Durante a manobra, ao ocorrer a perda de circulação a recuperação do nível de lama no poço após sua queda pode ser um indício de ocorrência de um *kick* (OHARA, 2008).

2.5. SENSORES E COLETAS DE DADOS

Após abordarmos detalhadamente o sistema de monitoração e segurança do poço na seção 2.2, é fundamental explorarmos agora um componente crucial para garantir o controle e eficiência das operações de perfuração: os sensores e sistemas de coleta de dados.

2.5.1. *Mud logging*

Visando minimizar eventuais erros cometidos durante o processo de prospecção, são necessárias algumas técnicas que irão auxiliar durante a perfuração de um poço. O *Mud logging* é um sistema de monitoramento constituído por sensores de superfície que registram os parâmetros mecânicos, hidráulicos e as litologias atravessadas durante as operações de perfuração. Estes parâmetros podem ser diretamente medidos pelos sensores instalados na sonda como, por exemplo, a temperatura do fluido de perfuração na entrada e na saída do poço, ou calculados através da relação entre os valores dos parâmetros previamente medidos. Como exemplo, tem-se que a taxa de penetração é calculada dividindo a profundidade perfurada, em metros, pelo tempo (em horas) que demorou o avanço da perfuração do trecho considerado. A taxa de perfuração vem expressa em metros por hora (m/h). A seguir, são listados uma série de parâmetros monitorados pelo sistema *mud logging* que são de suma importância para o andamento do trabalho:

- Profundidade medida do poço (*Measured Depth*, MD);
- Profundidade vertical do poço (*Total vertical depth*, TVD);
- Profundidade da broca (*Bit Depth*);
- Taxa de penetração (*Rate of Penetration*, ROP);
- Altura no gancho (*Hook Height*);
- Carga no gancho (*Hook load*);
- Rotação da coluna (*Rotation per minute*, RPM);
- Torque;
- Peso sobre a broca (*Weight on Bit*, WOB);
- Pressão de bombeio do fluido de perfuração (*Pump pressure*);
- Pressão no *choke* (*Choke line pressure*);
- Comprimento da secção de drill pipe (*Stand length*);
- Resistividade do fluido de perfuração na entrada e na saída do poço;
- Temperatura do fluido de perfuração na entrada e na saída do poço, entre outros.

2.5.2. Pressão de poros

Informações úteis relacionadas a outros parâmetros são encontradas de forma distinta, tal qual a pressão de poros, que pode ser definida como a pressão exercida pelos fluidos que estão dentro dos espaços vazios (poros) das rochas. Sua quantificação é necessária para a construção da janela operacional, pois delimita as pressões aplicadas na formação. De posse da mesma é que se escolhe o peso do fluido mais adequado para uma manutenção segura do campo de pressões de um poço (SANTOS et al., 2015).

Em cenários de janela operacional estreita (quando a pressão de fratura está muito próxima da pressão de poros), a grande quantidade de sólidos presentes no anular deve ser controlada para evitar um aumento excessivo da pressão no poço, o que poderia levar a problemas como perda de circulação ou até mesmo um *blowout*. O gradiente de fratura, que é a pressão necessária para criar ou expandir uma fratura na formação rochosa, é uma consideração importante nesse contexto (ARAGAO et al, 2005; GANDELMAN, 2012).

Métodos indiretos foram desenvolvidos para prever o Gradiente de Pressão de Poros (Gp) em formações como folhelhos, que são tipicamente impermeáveis devido à sua natureza argilosa e baixa permeabilidade, sendo influenciadas pela subcompactação. Esses métodos se baseiam em

dados de perfis elétricos, velocidades sísmicas e outros indicadores de porosidade. O processo começa com a identificação de uma tendência normal de compactação, ou seja, uma região onde a porosidade diminui com o aumento da profundidade. (SILVA et al, 2018). Sabendo disso, alguns métodos podem ser aplicados em conjunto para a predição dos valores de pressão de poros (G_P) e dentre eles, o mais utilizado na indústria petrolífera é o método de Eaton. O cálculo do G_P pelo método de Eaton depende da pressão de sobrecarga, da pressão de poros normal, da razão entre o valor do parâmetro observado e o valor na linha de tendência de compactação normal e do expoente escolhido, conforme Equação 1 (Eaton, 1975).

$$G_P = G_0 v - \left[(G_0 v - G_N) \cdot \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t_0} \right)^x \right] \quad (1)$$

Em que:

G_P = Gradiente de poros (lb/gal)

$G_0 v$ = Gradiente de sobrecarga (lb/gal)

G_N = Gradiente de pressão de poros normal (lb/gal)

Δt_0 = tempo de trânsito observado (μ s/pé)

Δt_n = tempo de trânsito normal (μ s/pé).

2.6 SIMULADORES DE PERFURAÇÃO

O uso dos simuladores de perfuração vem ganhando cada vez mais relevância e apresentando bastante abrangência em relação aos diversos empecilhos e cenários que são corriqueiros no processo de exploração de poços. Alguns simuladores são focados nos fenômenos físicos e as influências que estes causam nos equipamentos associados ao processo. Outros podem ser utilizados para treinamento de sondadores, simulando ambientes de plataformas e práticas realizadas no processo de perfuração, como ilustra a Figura 5.

Figura 5. Treinamento realizado utilizando simulador.



Fonte: Revista *In the mine* (2020).

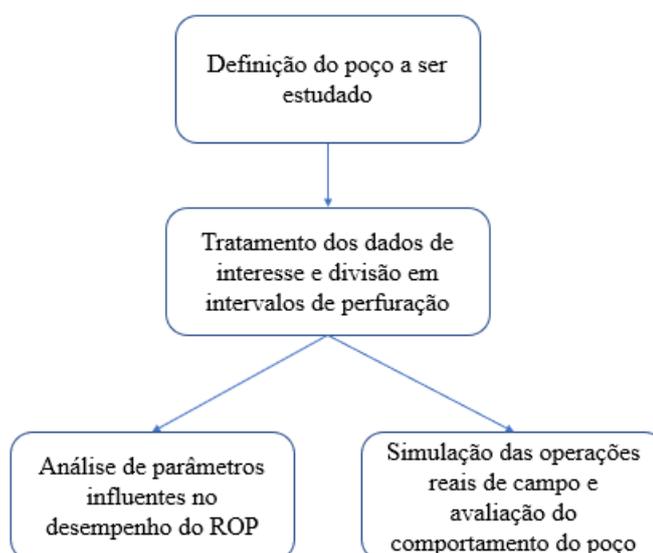
Em sua maioria, os simuladores lidam com parâmetros diretos e indiretos da formação rochosa e como cada um destes pode influenciar nas decisões tomadas pelo engenheiro de poço de modo a afetar a perfuração. Assim, ele torna possível uma análise mais cautelosa e assertiva a respeito dos incidentes de perfuração ali presentes. Como exemplo, cita-se o simulador industrial DrillSIM, desenvolvido pela empresa 3t global e o *software* de monitoramento de perfuração PWDa, desenvolvido pela ESSS em parceria com UCL, UFRRJ e UTFPR para a Petrobras, utilizado para manipulação, simulação e análise de dados, principalmente da pressão, oriundos do processo de perfuração de poços em reservatórios de petróleo. (ESSS, 2016).

No presente trabalho, foi utilizado o simulador de perfuração de poços *OpenLab Drilling*, desenvolvido pelo grupo de pesquisa NORCE *Energy* em parceria com a Universidade de Stavanger. Destaque deve ser dado para publicações disponíveis para leitura de referência que utilizam o simulador e fazem menção ao mesmo como ferramenta de estudos de operações de exploração.

3. METODOLOGIA

Primeiramente, seleciona-se o poço cujos dados de perfuração serão utilizados e processados para a simulação de perfuração. O simulador *OpenLab Drilling* foi selecionado para este estudo por dispor de um bom controle de parâmetros de simulação pertinentes ao estudo do comportamento de poço além de permitir a simulação de incidentes de perfuração e apresentar sistema intuitivo e de simples aprendizado, que é possível graças às consultas aos guias de uso, vídeos tutoriais e documentos de estudos de caso, facilmente encontrados no endereço do site do simulador. Almejando os objetivos propostos, o trabalho seguiu os fluxogramas expostos nas Figura 6 e 7.

Figura 6. Primeiro fluxograma de processos metodológicos do trabalho.

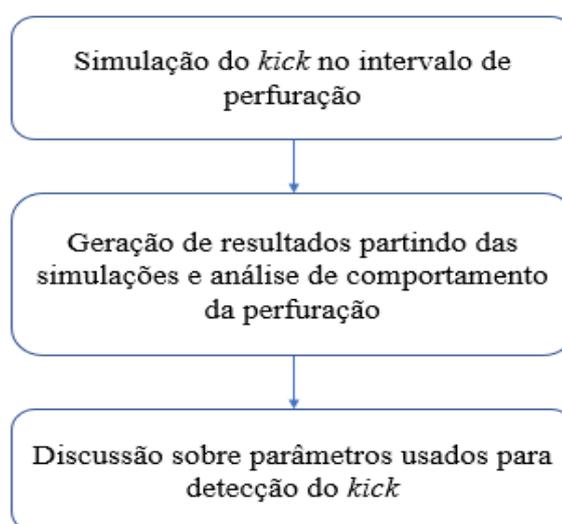


Fonte: Autor

O primeiro desafio foi tornar comum a discretização dos intervalos de perfuração do poço, visto que ela era descontínua e muitas vezes apresentava intervalos muito pequenos de profundidade. O próximo passo foi mover tais dados junto aos dados operacionais pertinentes ao poço. Em seguida, o processo de aprendizagem e treinamento no simulador é iniciado com o objetivo de determinar quais parâmetros de projeto serão considerados neste estudo. Para isso, uma análise dos gráficos disponibilizados pelo simulador as simulações foi necessária buscando minimizar os ruídos presentes nos dados do poço, causados principalmente pela instabilidade nas curvas do ROP. Sendo assim, generalizações com respeito à altura da coluna de perfuração e estrutura de revestimento do poço necessitaram ser impostas junto a simulações de todos os intervalos de perfuração visando obter estabilidade e resultados condizentes com as operações tomadas como base. Partindo dessas informações, são conduzidas simulações

variando os intervalos de perfuração em zonas específicas estipuladas com o objetivo de estudá-las levando em conta os fatores geológicos e operacionais. Posteriormente, os resultados dessas simulações são comparados com os dados reais de operações de perfuração para avaliação. Com isso, foram identificadas quais variáveis e incidentes são influentes no estudo de estratégias visando a obtenção de um ROP ótimo de operação. Por fim, simulações foram realizadas com o objetivo de potenciais melhorias no processo de perfuração do poço estudado.

Figura 7. Segundo fluxograma de processo



Fonte: Autor

Os próximos passos foram observar e estudar a ocorrência de incidentes de perfuração presentes na operação de forma a identificar suas causas e efeitos e como isso é traduzido nos dados de operação em poços disponíveis. Para isso, utilizou-se o guia de simulação disponível na página web do simulador. Além disso, a disponibilidade dos gráficos foi essencial para a realização da detecção do *kick*.

3.1 CÁLCULOS E CORRELAÇÕES

Quando estamos lidando com modelos de dados, é crucial contar com informações que descrevam nosso processo de maneira eficaz. No entanto, é comum encontrar dificuldades em obter bases de dados abertas, especialmente na área de exploração e produção. Essa escassez limita o progresso e os estudos em ciência de dados dentro da indústria. Em 2018, a Equinor, em colaboração com os responsáveis pela licença do campo, disponibilizou uma grande quantidade de dados de subsuperfície e produção do campo, localizado na Plataforma

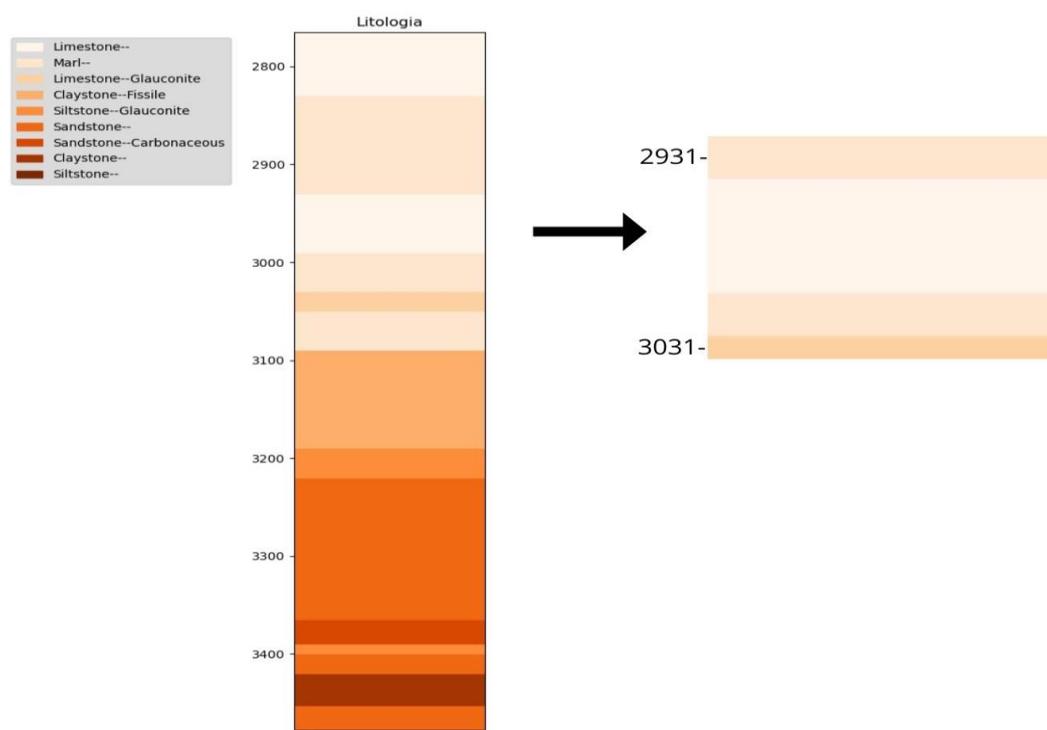
Continental Norueguesa. É importante ressaltar que o repositório de Volve tem uma relevância significativa para a pesquisa nesse campo. No entanto, explorar essas informações inicialmente pode ser um desafio considerável. Os dados abrangem diversas áreas de interesse e estão em vários formatos, tornando a sua análise complexa. Além disso, o acesso aos dados em si pode ser uma tarefa difícil devido a várias questões logísticas.

O campo de Volve teve sua produção de óleo iniciada em 2008 e finalizada em 2016. Os dados referentes a este período foram disponibilizados em 2018 pela Equinor. São cerca de 40000 arquivos, o que corresponde a cerca de 5 TB de dados e por isso é recomendado junto ao link de exploração destes dados, o uso do explorador de dados em nuvem *Azure Storage* (Equinor, 2018). Os dados relevantes estão distribuídos em 11 pastas, sendo selecionadas aqueles referentes aos dados de produção, relatórios de operações e registros de perfuração em tempo real do poço. Nesse contexto, o foco foi direcionado para a configuração do poço e os registros do mud logging.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o tratamento dos dados, deu-se início ao processo de simulação utilizando o simulador *OpenLab Drilling*. O poço selecionado foi o 15/9-F-5 devido à disponibilidade acessível dos dados de exploração, operacionais e de formação, os quais são de fundamental importância para o processo de simulação de perfuração. As simulações foram realizadas abrangendo o intervalo de 2931m a 3031m, seccionando-as em intervalos de 10m para uma análise mais detalhada e maior controle dos parâmetros de perfuração. Dessa maneira o efeito de ruídos foi minimizado, uma vez que os dados brutos fornecidos variavam cerca de 0,1m. Para o cálculo de predição das pressões de poros das distintas litologias encontradas na formação Tor (2929m – 3084m), utilizou-se o método de Eaton, conforme explicado na seção 2.5.2 e realizado seguindo o arquivo *python* utilizado por SILVA *et al.* (2023). A Figura 8 explicita a divisão das litologias no poço estudado e o intervalo estudado.

Figura 8. Litologias presentes no poço.



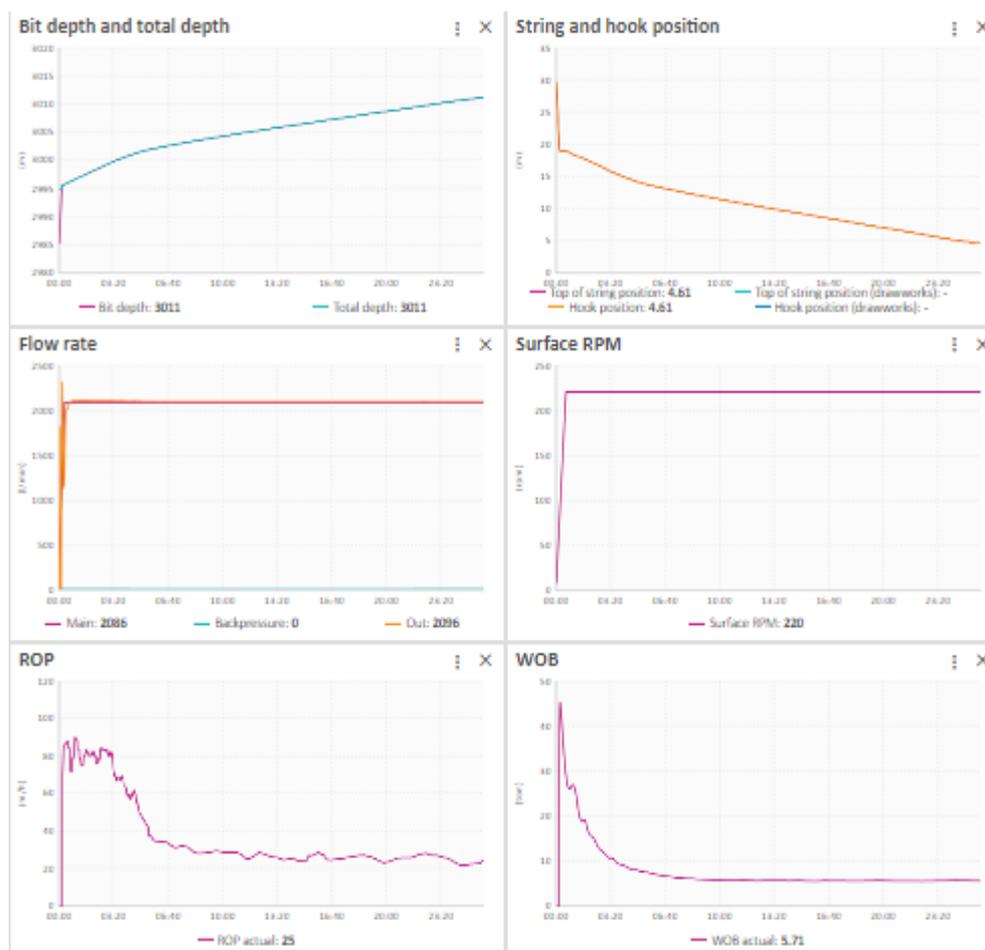
Fonte: Autor.

4.1 ANÁLISE COMPARATIVA DE SIMULAÇÕES E DADOS REAIS DE PERFORMANCE DE ROP

A fim de eliminar eventuais incongruências nos dados de perfuração simulados, uma altura padrão de 30m para elevação de gancho foi adotada para todos os trechos, descartando assim os períodos de conexão nas tubulações, de forma a manter a estabilização das taxas na

simulação. No início da perfuração de cada trecho a broca estava 10m acima do fundo do poço, possibilitando a perfuração de aproximadamente 20m sem conexões. Além disso, descartou-se das simulações o tempo para que a broca de perfuração atinja o fundo do poço e estabilize os parâmetros operacionais, como mostrado na Figura 9, de tal forma que os ruídos atrelados a este período foram eliminados.

Figura 9. Gráficos referentes ao intervalo de perfuração de 3001m até 3011m.



Fonte: Autor.

A seguir, foram comparados os resultados obtidos das simulações iniciais frente a resultados provenientes de dados de operações reais de perfuração. Após isso, foram calculadas as médias aritméticas de alguns parâmetros influentes na perfuração, tais como WOB, ROP e vazão de fluxo da bomba para todos os intervalos de perfuração simulados, como mostram as Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Dados referentes aos intervalos de perfuração de 2931m até 2981m

Trecho Médias	2931m- 2941m	2941m- 2951m	2951m- 2961m	2961m- 2971m	2971m- 2981m
WOB (ton)	8,03	6,27	5,00	5,09	4,96
Fluxo (l/min)	2104,32	2111,34	2111,38	2111,30	2111,43
Rotação (RPM)	260,19	262,54	262,55	262,57	262,52
ROP (m/h)	13,15	18,57	18,00	19,56	19,70
ROP do simulador (m/h)	63	38	19	19	25
Erro associado ao ROP	379,10%	104,59%	5,54%	2,88%	26,93%

Fonte: Autor

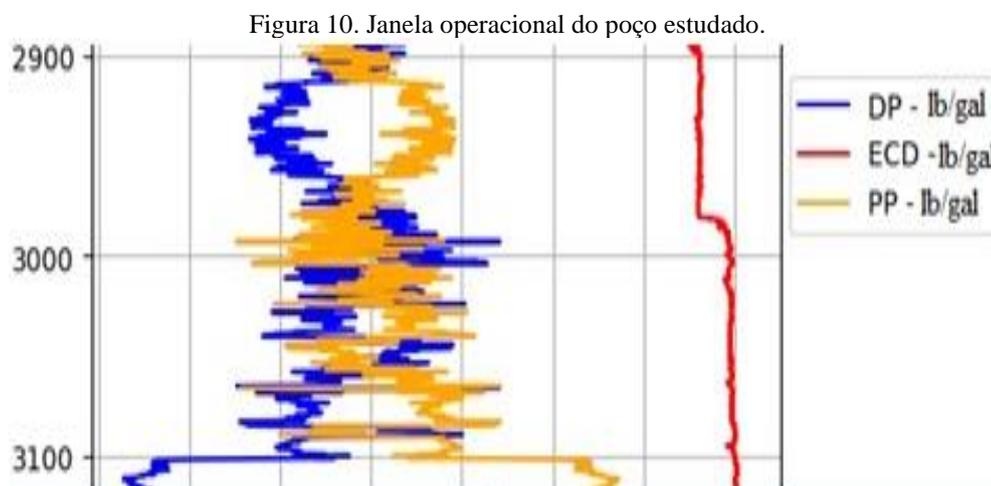
Na Tabela 1, deve-se atentar para os primeiros trechos de perfuração (2931m a 2941m e 2941m a 2951m), que se encontram no início da formação geológica. Tal fato pode ser um dos motivos que levam aos altos erros associados quando comparamos o ROP médio resultante do simulador frente aos valores reais do ROP médio de perfuração. Os valores dos erros continuam a seguir uma tendência à medida que se adentra a formação Tor, quando se encontra valores mais condizentes com dados reais de perfuração. Há de se destacar também a mudança atípica no intervalo de 2971m – 2981m, quando ocorre o aumento do ROP do simulador mesmo com a redução do WOB. Isso deve-se ao fato de haver mudança na litologia pouco antes de se chegar aos 3000m, conforme ilustra a Figura 8.

Tabela 2. Dados referentes aos intervalos de perfuração de 2981m até 3031m.

Trecho Médias	2981m- 2991m	2991m- 3001m	3001m- 3011m	3011m- 3021m	3021m- 3031m
WOB (ton)	5,44	3,97	5,75	6,67	6,45
FLUXO	2111,32	2065,45	2086,05	2111,35	2111,39
ROTAÇÃO	280,41	272,62	280,56	287,21	292,36
ROP (m/h)	29,78	7,89	23,93	32,05	31,79
ROP do simulador (m/h)	22	10	24	54	51
Erro associado ao ROP	26,12%	26,77%	0,31%	68,50%	60,40%

Fonte: Autor.

Ao considerar a transição de litologia, é observada uma mudança na composição de todo o trecho exposto na Tabela 2, caracterizado pela presença maior de argila no calcário daquele intervalo de perfuração. A Figura 10 mostra a janela operacional do intervalo estudado.



Fonte: Autor.

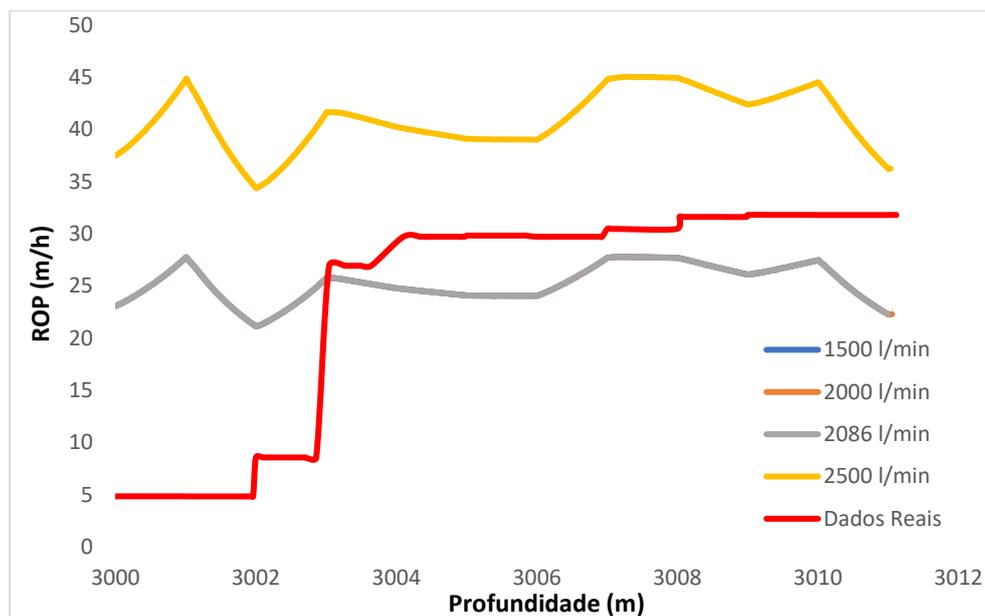
Com acesso a pressão de poros (PP), densidade equivalente dinâmica (ECD) e diferencial de pressão (DP), e de posse dos valores das Tabelas 1 e 2, deve-se destacar uma alteração significativamente menor no intervalo de pequeno erro associado ao ROP (3001m até 3011m). Por tal motivo, esse foi o intervalo escolhido para dar sequência a próxima fase deste trabalho.

4.2 EFEITOS DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS OPERACIONAIS

Na Figura 9, destaca-se o comportamento dos parâmetros de interesse para o intervalo de perfuração que será trabalhado nas próximas simulações. A seguir, identificou-se como essas variáveis foram influentes visando a obtenção de um ROP ótimo de operação. Finalmente, realizou-se a comparação desses dados com os dados reais de perfuração com o objetivo de verificar potenciais melhorias no processo de perfuração do poço estudado.

Dispondo dos valores das médias aritméticas do WOB, ROP, rotação da broca e vazão de fluxo do intervalo 3001m-3011m, expostos na Tabela 2 da seção 4.1 foram realizadas variações na vazão mantendo-se o WOB e a rotação da broca fixos iguais às médias dos dados reais, almejando observar o comportamento do ROP em todas as situações. Um adendo deve ser feito para a rotação da broca no simulador, onde a variação máxima permitida no simulador é de 220 rpm. O gráfico da Figura 11 ilustra o comportamento do ROP simulado para cada variação realizada na vazão juntamente com o comportamento do ROP relativo aos dados reais de perfuração.

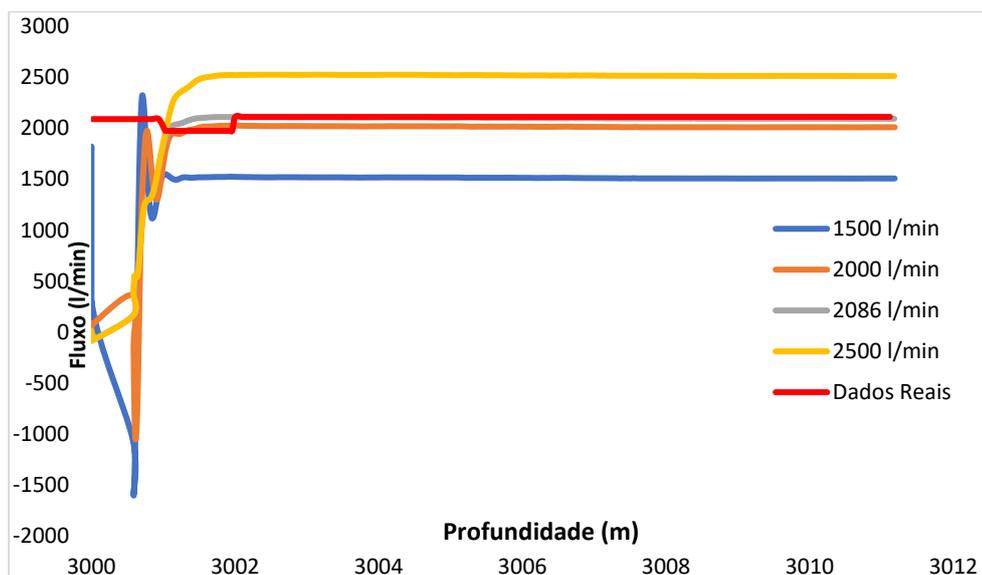
Figura 11. Resultado das simulações alterando-se a vazão de fluxo da bomba.



Fonte: Autor.

Percebe-se que o ROP apresenta variação de 54,87% em seu comportamento quando teve a vazão de fluxo alterada de 2086 l/min para 2500 l/min. Já em relação aos demais valores de vazão, não houve mudança notável no ROP, o que pode ser observado quando as curvas de simulação se encontram sobrepostas ao valor de 2086 l/min. Percebe-se, portanto, que há uma barreira de vazão, onde o fluxo pode ser alterado e o mesmo só influencia no gráfico de ROP a partir deste valor, representado pela curva em amarelo na Figura 11. A Figura 12 mostra as curvas das vazões de fluxo para o intervalo simulado.

Figura 12. Gráfico de comportamentos da vazão do fluxo da bomba.

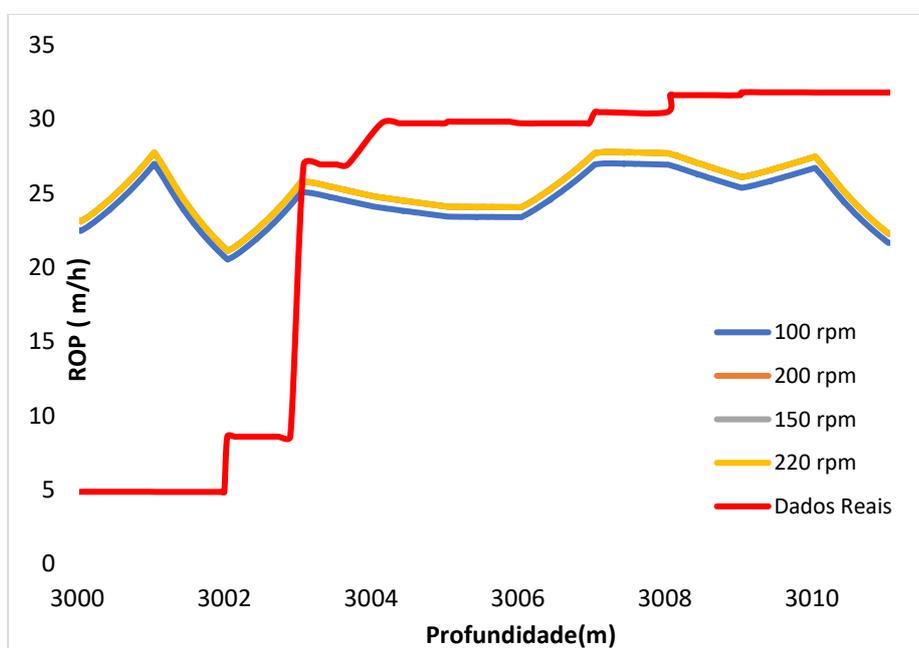


Fonte: Autor.

Percebe-se que há uma instabilidade presente nas curvas antes do início do intervalo de simulação, a qual é logo superada ao iniciar o trecho de interesse. Tomando como base a Figura 11, um fator que deve ser levado em conta é a eficiência da remoção de cascalhos, uma vez que um fluxo de vazão adequado é essencial para garantir a eficiência na remoção de cascalhos. Se a vazão da bomba for insuficiente, os cascalhos podem se acumular no fundo do poço, causando obstruções e aumentando o risco de problemas operacionais, como travamentos da broca e redução de ROP.

A seguir, o processo de variação foi realizado com o parâmetro de rotação da broca, deixando agora os parâmetros de vazão de fluxo e WOB fixos, o resultado é mostrado na Figura 13.

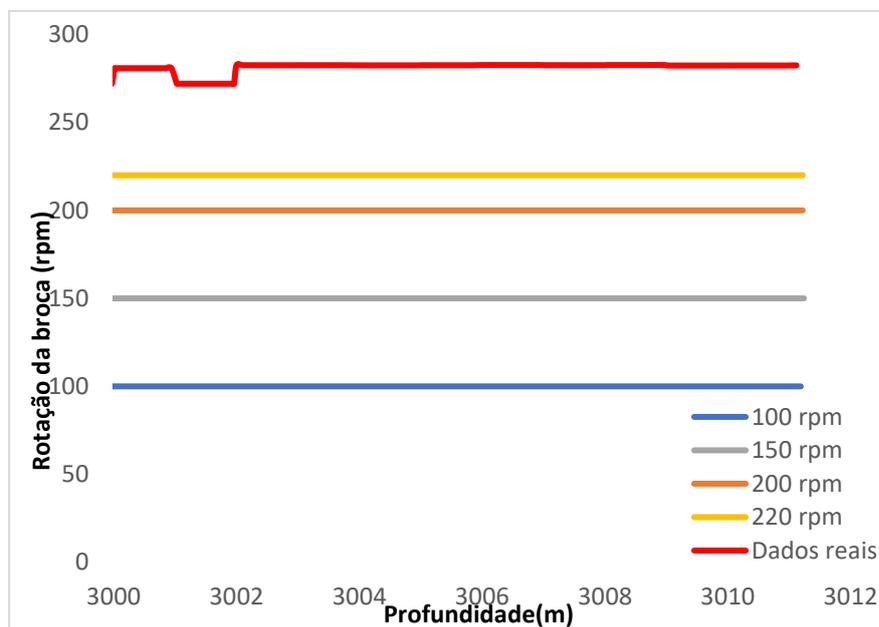
Figura 13. Resultado das simulações alterando-se a rotação da broca.



Fonte: Autor.

Desta vez, houve pequena variação no ROP apresentado, quando a maioria das rotações se sobrepuseram à curva de rotação igual a 100 rpm enquanto a de rotação de broca igual a 220 rpm registrou uma diferença de 2,77% frente as demais, o que pode ser considerado pequeno ao se variar 120% na rotação da broca. Portanto, neste trecho, seria possível reduzir a rotação sem perda significativa de performance de ROP. Contudo, é importante verificar se outras variáveis operacionais poderiam estar associadas a essa alta rotação, como uma limpeza de poço mais eficiente. A Figura 14 mostra as curvas das rotações da broca para o intervalo simulado.

Figura 14. Gráfico de comportamentos da rotação da broca.

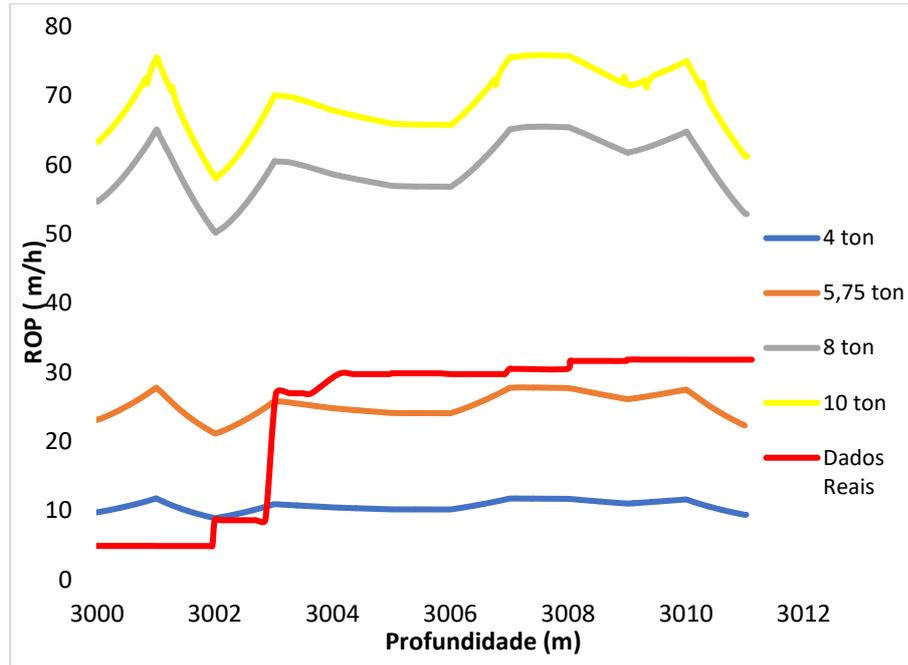


Fonte: Autor.

Como explicado no início da seção, há a limitação do simulador com relação ao limite da rotação da broca e por isso há uma discrepância dos parâmetros simulados frente aos dados reais de perfuração. Mais uma vez, deve-se atentar para a estabilização deles ao se iniciar o intervalo de 3001m- 3011m.

Por fim, analisou-se o desempenho de ROP variando-se o WOB. Para isso, fixaram-se os valores de vazão de fluxo e rotação da broca iguais aos valores médios dos dados reais de perfuração. A Figura 15 ilustra o comportamento das curvas de ROP para tais situações.

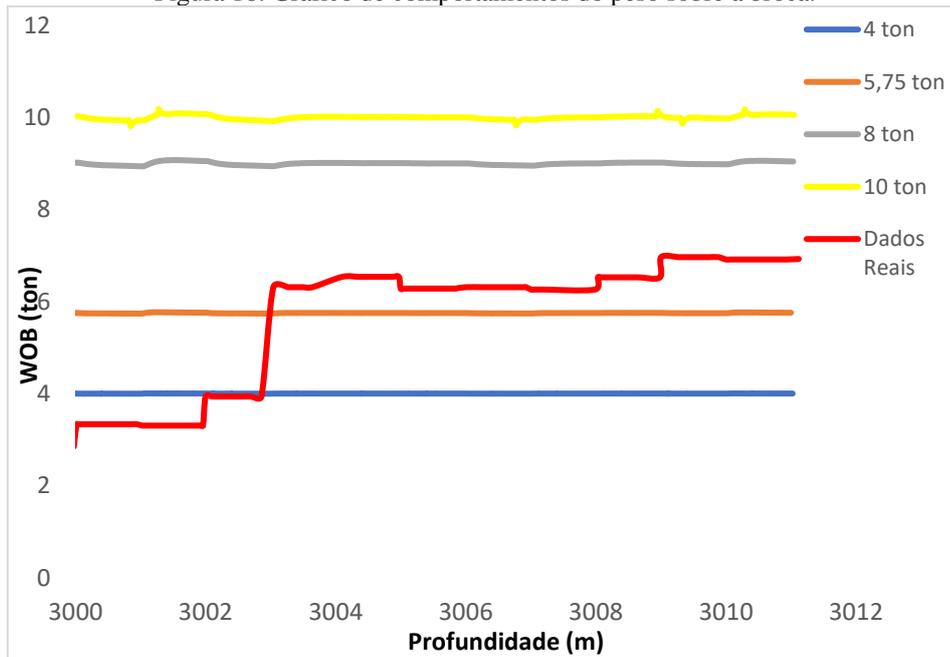
Figura 15. Resultado das simulações alterando-se o peso sobre a broca.



Fonte: Autor.

O resultado mostrou uma variação significativa frente aos demais parâmetros, registrando uma diferença de cerca de 2,18% a cada unidade alterada neste parâmetro. As diferenças seguiram o padrão esperado pois quanto maior o peso sobre a broca, maior a taxa de perfuração registrada. A Figura 16 mostra as curvas de peso sobre a broca para o intervalo simulado.

Figura 16. Gráfico de comportamentos do peso sobre a broca.



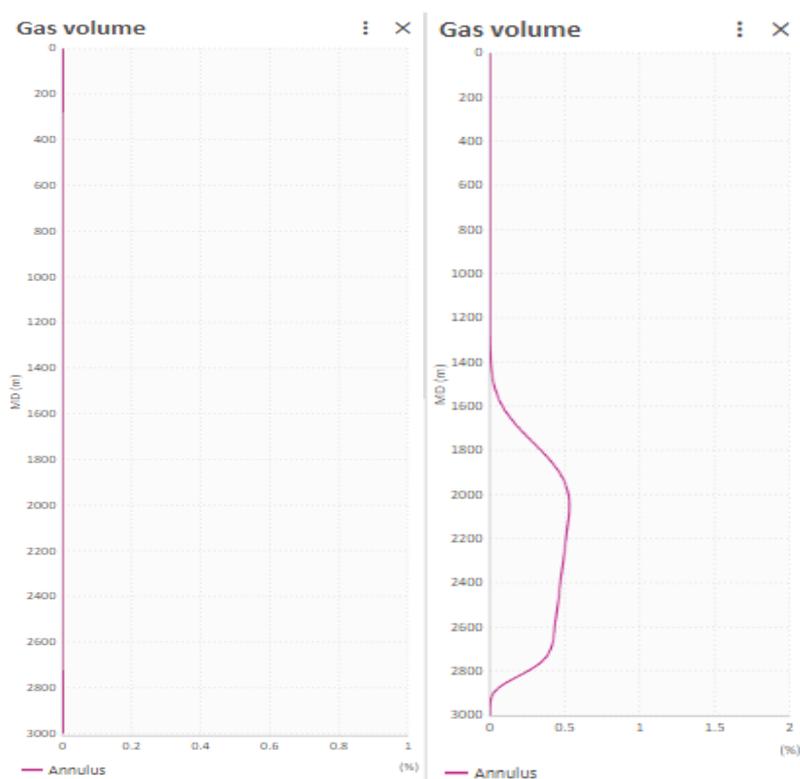
Fonte: Autor.

Mais uma vez, há o início da estabilização na simulação ao aproximar-se de 3001m. Destaque dado também para a variação da curva do WOB proveniente dos dados reais frente ao WOB simulado de 10 ton, que registrou uma variação de 160,91%, mostrando que o WOB é o parâmetro que mais influencia o ROP durante o processo de perfuração do trecho analisado.

4.3 DETECÇÃO DE KICK

A detecção de um *kick* está relacionada à identificação precoce da entrada não planejada de fluido no poço durante o período da perfuração. No presente trabalho, tomou-se o *kick* de gás como principal incidente de perfuração a ser analisado. É importante que os operadores estejam sempre vigilantes e façam uso de técnicas para garantir segurança através de uma resposta rápida e eficaz. A simulação usada como base foi feita do intervalo de 2990m até 3004m. Considerando sempre os 10m de intervalo para a estabilização dos parâmetros, configurou-se no simulador o *kick* ocorrendo em 3000m. A Figura 17 mostra o comportamento do gráfico do volume de gás em um poço antes e depois da ação do *kick*. Essa informação pode ser verificada no simulador, porém, em uma operação real, somente outros parâmetros operacionais devem estar disponíveis, como volume do tanque, ROP, pressões e vazões.

Figura 17. Curvas de volume de gás antes e depois da ocorrência de um *kick*.

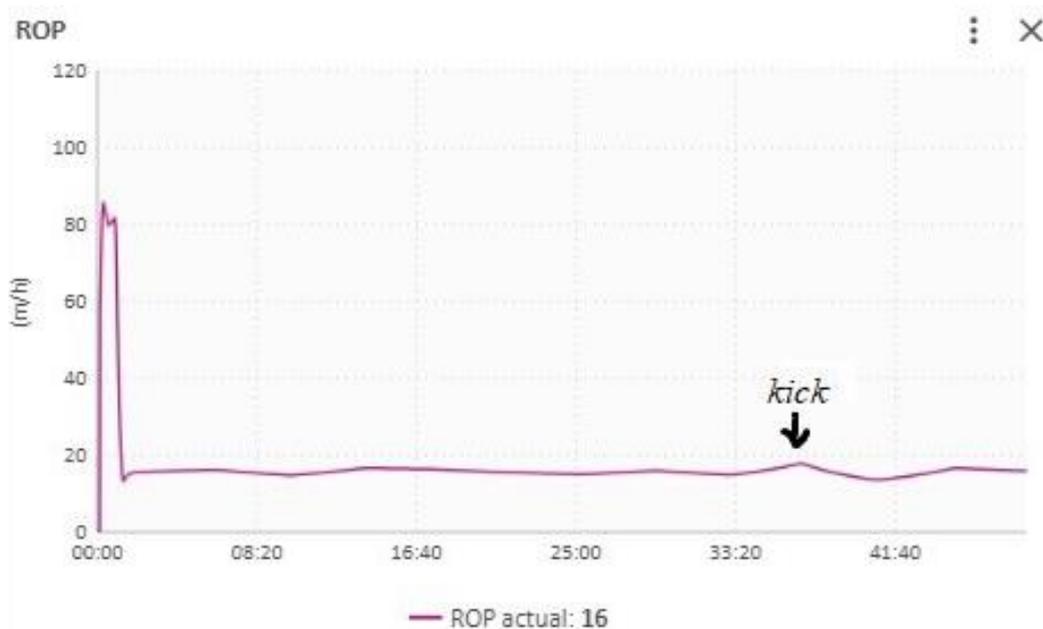


Fonte: Autor.

Antes do *kick* de gás, a curva de volume de gás mostra uma estabilidade, sem qualquer variação ao longo da perfuração. Isso sugere que o poço está sob controle e que não há entrada significativa de gás. Quando ocorre o *kick*, observa-se um aumento repentino e significativo no volume de gás registrado pelo gráfico. Isso indica a entrada não planejada de gás no poço, o que pode ser um sinal de alerta para os operadores, mostrando que a pressão no poço está aumentando e conseqüentemente medidas de controle devem ser tomadas de forma imediata.

Após a detecção e controle do *kick* de gás, as curvas de volume de gás podem mostrar uma redução gradual nos níveis de gás, conforme o poço volta ao estado controlado. O monitoramento dessas curvas é essencial para garantir que a perfuração permaneça estável e segura. Além disso, deve-se analisar a magnitude do aumento no volume de gás durante o *kick* e a rapidez com que ocorreu. Isso pode fornecer informações adicionais sobre a gravidade do incidente, levando a uma melhor tomada de decisão. A Figura 18 ilustra o comportamento do ROP frente ao *kick*.

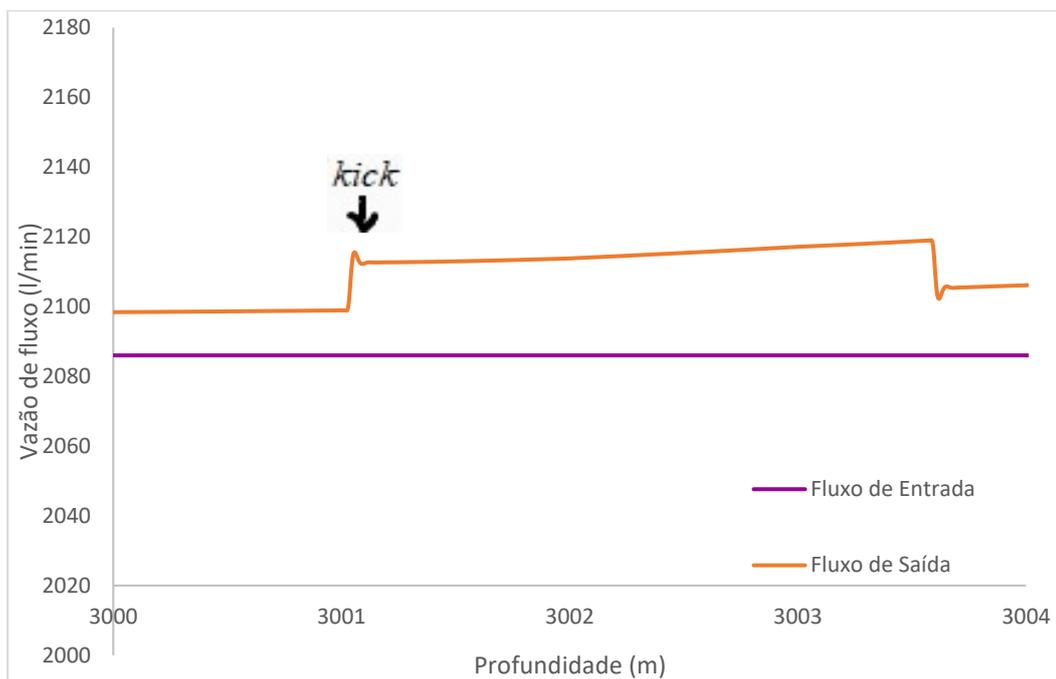
Figura 18. Comportamento do ROP na simulação de um *kick*.



Fonte: Autor.

Observando a Figura 18, podemos destacar a continuidade da curva mostrada após passado o intervalo de estabilidade nos primeiros minutos de simulação. Essa continuidade se perpetua até o momento em que ocorre o *kick* e isso fica evidente quando há um pico presente na Figura, evidenciando o que já fora evidenciado por Neto (2011). O ROP da perfuração, que antes registrava uma média de 15 m/h, teve no momento do incidente uma medida de 18m/h, o que representa um aumento de 20%. Após a ocorrência, o comportamento do ROP tende a regredir à média. A Figura 19 mostra como se comporta a vazão de fluxo do poço ao simularmos um *kick*.

Figura 19. Comportamento da vazão de fluxo na simulação de um kick.



Fonte: Autor.

Um *kick* de gás pode resultar em um aumento na vazão de fluxo do poço devido à entrada não planejada de gás. Isso pode ser observado na Figura 19, quando ocorre um aumento súbito na quantidade de fluido de perfuração e/ou gás sendo descarregado na superfície. Durante um *kick* de gás, é crucial controlar adequadamente a vazão de fluxo para evitar que a pressão no poço aumente ainda mais. Isso geralmente é feito ajustando as válvulas de controle no sistema de fluxo para regular a quantidade de fluido e gás que está sendo descarregado. Na simulação exposta acima, obteve-se um aumento de 1% na vazão de fluxo quando ocorreu o *kick*.

5. CONCLUSÕES

A utilização de simuladores como o *OpenLab Drilling* é crucial para realizar análises detalhadas dos parâmetros de perfuração, permitindo a otimização das operações em campos de petróleo e gás. É importante reconhecer sua significativa contribuição na identificação e análise de variações nos parâmetros de interesse, fornecendo soluções valiosas com o objetivo de aprimorar as práticas de perfuração. É importante ressaltar também que o simulador se mostrou bastante útil no processo de análise comparativa e identificação de tendências nos parâmetros de perfuração, como ROP, WOB, rotação da broca e vazão de fluxo. Essa capacidade de identificar variações nos parâmetros de interesse é crucial para o planejamento e otimização de operações de perfuração.

Por outro lado, a análise paramétrica revelou que o parâmetro que mais influenciou o ROP observado foi o peso sobre a broca, enquanto a vazão de fluxo na perfuração teve uma influência menor. Surpreendentemente, a rotação da broca mostrou-se pouco relacionada ao ROP, já que não apresentou variações significativas durante as simulações. Esta análise dos parâmetros de perfuração fornece informações essenciais para o planejamento e otimização das operações.

Os resultados das simulações indicaram uma maior aderência aos dados de campo no intervalo de 3001m-3011m, com um erro de 0,31% associado ao ROP neste intervalo de perfuração. Em seguida, o intervalo de 2961m – 2971m retornou um erro de 2,88% enquanto obteve-se um erro de 5,54% para o intervalo de 2951m – 2961m. No pior recorte, obteve-se um erro de 379,1% para o intervalo de 2931m-2941m. Neste último, esse elevado erro pode ser justificado devido ao início da formação Tor, sendo, portanto, o início da perfuração nesta litologia. Por outro lado, o parâmetro que mais influenciou no ROP observado foi o peso sobre a broca e o que menos influenciou foi a vazão de fluxo na perfuração. A rotação da broca mostrou-se pouco relacionada ao ROP, uma vez que não obteve variação significativa quando foi alterado nas simulações.

O gráfico das curvas de volume de gás é uma ferramenta valiosa proporcionada pelo simulador, permitindo uma compreensão detalhada das mudanças no comportamento do poço tanto antes quanto depois da ocorrência de um *kick* de gás. Além disso, é importante destacar que o comportamento da vazão de fluxo e o ROP também são cruciais na detecção de um *kick*. O simulador oferece sinais alternativos para identificar esse evento crítico, fornecendo uma visão abrangente e detalhada do cenário. Durante um *kick* de gás, a necessidade de controlar

adequadamente a vazão de fluxo para evitar um aumento adicional da pressão no poço torna-se ainda mais evidente e é um aspecto fundamental que o simulador aborda de maneira precisa e eficaz.

Alguns empecilhos foram encontrados no trabalho, como os erros associados em certos intervalos de perfuração, justificados pelas limitações do simulador adotado. Além disso, não foi possível encontrar dados de incidentes de perfuração nos relatórios de perfuração para efeitos de análise e comparação. Portanto, sugere-se que análises qualitativas adicionais sejam realizadas em trabalhos futuros, utilizando simuladores de perfuração mais avançados ou combinando múltiplos simuladores para minimizar as limitações observadas.

6. REFERÊNCIAS

- 3T Global. iSimulators. Disponível em: <<https://www.3tglobal.com/pt/digital/3t-drilling-systems/isimulators/>>. Acesso em: 23 de outubro de 2023.
- ARAGAO, A.F.L., TEIXEIRA, G.T., MARTINS, A.L., GANDELMAN, R.A., SILVA, R.A., PWD Analysis in Deepwater Environments: Campos Basin Case Study, Deep Offshore Technology, Vitória – Brasil, 8 a 10 de novembro, 2005.
- AZEVEDO, Fabrício Gonçalves. Estudo sobre Poços de Alívio para Controle de Blowout em Poço Marítimo de Gás. 2017. 249 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Puc-rio, Rio de Janeiro, 2017.
- CHAGAS, Luís Eduardo Cordeiro Martins das. Análise do controle de poços com lâmina d'água profunda a partir da implementação de um simulador de kicks. 2014. 145 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Petróleo, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- DATALOG (2011) Manual de hidráulica de fluidos de perforación. Calgary, SE.
- DRILLING Stabilizer. 2012. Disponível em: <<https://trsolidscontrol.en.made-in-china.com/product/XZAMdgtHYTWp/China-API-Spec-7-1-Drilling-Stabilizer-Drill-Stabilizer-O-D-17-1-2-.html>><<http://www.seekpart.com/general-mechanical-components/other-mechanical-parts/spiral+blade.html>>. Acesso em: 03 24 de abril janeiro de 20243.
- DUQUE, M. C. 2021. Entendendo a base de Dados do Campo de Volve (Parte 1). Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/entendendo-base-de-dados-do-campo-volve-parte-1-maria-clara-duque/?originalSubdomain=pt>>. Acesso em: 11 de maio de 2023.
- EATON, B. A. (1975). The equation for geopressure prediction from well logs. Society of Petroleum Engineers. 11 p.
- EQUINOR. *Volve Data Village*. Disponível em: <<https://data.equinor.com/dataset/Volve>>. Acesso em: 11 de maio de 2023.
- ESSS. Projeto inovador ajuda Petrobras a economizar 80 milhões de dólares. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/projeto-inovador-ajuda-petrobras-a-economizar-80-milhoes-de-dolares/>>. Acesso em: 23 de outubro de 2023.

- FERREIRA, Igor S. de Aquino. Perfuração—Curso de Engenharia do Petróleo (U-NESA). 2012 Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAVA8AF/perfuracao>>. Acesso em 26/02/2024.
- FERRO, A. P. A.; BARBOSA, A.S.R. ; GOUVEIA, L. P. . *Performance Analysis of Random Forest and Bourgoyne & Young Models in Rate of Penetration Prediction*. In: IX Encontro Nacional de Construção de Poços de Petróleo e Gás, 2023, Matinhos, PR. <https://enahpe2023.com.br/>, 2023.
- Free3D: Broca De Perfuração E Conjunto De Orifício Inferior Modelo 3D 2023. Disponível em: <<https://free3d.com/pt/3d-model/drill-bit-and-bottom-hole-assembly-7582.html>>. Acesso em: 11 de abril de 2023.
- GANDELMAN, R. et al. Real-Time Drilling Data Analysis: Building Blocks for the Definition of a Problem Anticipation Methodology. 2009.
- GANDELMAN, R. PREDIÇÃO DA ROP E OTIMIZAÇÃO EM TEMPO REAL DE PARÂMETROS OPERACIONAIS NA PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO OFFSHORE. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
- HOLSÆTER, A. Create a Simulation and Drill, 2008. Disponível em: <<https://openlab.app/tutorial/drill/>> Acesso em: 09 de maio de 2023.
- IN THE MINE. Simulador de treinamento para perfuração subterrânea. Disponível em: <<https://www.inthemine.com.br/site/simulador-de-treinamento-para-perfuracao-subterranea/>>. Acesso em: 25 jan. 2024.
- INGLIS, T. A.: *Petroleum Engineering and development studies*. Volume 2 – *Directional drilling*. Graham&Trotman, 1987, Norwell/USA.
- JA Oilfield: *Manufacturing products catalog*, Oklahoma/USA. 2006. Disponível em: <<https://www.jaoilfield.com/products/>> Acesso em: 03 de abril de 2023.
- MACHADO, Jorge Barreto. Curso básico de perfuração direcional. Halliburton. Versão 2, 2010.
- MELO, J. M. F.; Tenório, J. K. F.; Oliveira, A. G. C.; Santos, J. P. L. Integrated evaluation of cement and kick scenarios in oil well design. *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, v. 13, n. 3, p. 231-240, 2019.
- MONTEIRO, Hugo Leonardo Salomão. Análise de desempenho de diferentes leis de controle de vibrações torcionais em colunas de perfuração de poços de petróleo. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- NETO, A.G. Estudo dos métodos de controle de poço. 2011. 95 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Petróleo) - Departamento de Engenharia Química e de Petróleo, Universidade Federal Fluminense – UFF, Niterói, 2011.
- OHARA, S. Perfuração de Poços: Parte 3 - Controle de poço. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- OpenLab. Disponível em: <<https://openlab.app/product/>>. Acesso em: 30 de outubro de 2023.
- ROCHA, L. A. S.; AZEVEDO, C. T. *Projetos de Poços de Petróleo*. 2ª Ed. Rio de Janeiro, 2009.
- ROCHA, Luiz Alberto Santos et al. *Perfuração direcional*. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2011.

- SANTOS, J. P. L., Andrade, J. F., Oliveira, R. C., Almeida Neto, J. B., Santos, A. P. P. (2015). Projetos de poços: um estudo de caso na bacia Sergipe-Alagoas. *Revista Eletrônica de Petróleo e Gás*, 3, 31-40.
- SANTOS, O.L.A., *Segurança de Poço na Perfuração*. 1 ed. Editora Blucher, 2013.
- SAVEGNAGO, Sandy Freire. *Perfuração Direcional-Projeto e Equipamentos*. 2012. 63 f. Curso de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012.
- SILVA, E. A. B. ; FERRO, A. P. A. ; BINAS JUNIOR, F. A. V. ; GOUVEIA, L. P. ; BARBOSA, A.S.R. . Estudo de caso da estimativa da resistência à compressão confinada de rochas com base em dados geofísicos e parâmetros operacionais. IX Encontro Nacional de Construção de Poços de Petróleo e Gás, 2023, Matinhos, PR.
- SILVA, N. Mariana et al. Avaliação da aplicação dos métodos indiretos de predição do gradiente de pressão de poros em projetos de poços da Bacia Sergipe-Alagoas, 2018.
- SILVA, Victor Costa da. Simulador computacional de planejamento e perfuração em tempo real de poços verticais. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Petróleo) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- TAVARES, Rogério Martins. *Interpretação e Análise de Dados de Perfuração em Poços de Petróleo*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006. 129p. Dissertação (Mestrado).
- THOMAS, J.E. et al. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*; Rio de Janeiro; 2º Edição; Editora Interciência. 2001.
- TUNKIEL, A. T., et al. Reference dataset for rate of penetration benchmarking, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 196, 2021.
- WAGLE, V, Kalgaonkar, R, AlYami, A, Alanqari, K (2019) '*Novel loss circulation composition to treat moderate to severe losses*'. <SPE – 194653-MS>.
- ZULIANI MANTEGAZINI, D.; RODRIGUES BARBOZA, T.; COSTA CABRAL SALAZAR RAMOS MOREIRA, K.; NASCIMENTO, A.; ANDRADE DE CARVALHO JÚNIOR, J. OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS OPERACIONAIS NA PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO. Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação (EIGEDIN), v. 5, n. 1, 28 set. 2021.