

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

GABRIELA LADEIRA NADAES

MODELAGEM DINÂMICA E CONTROLE DE PRESSÃO DE FUNDO EM POÇOS
DE PETRÓLEO PERFURADOS COM *MANAGED PRESSURE DRILLING* (MPD)

Projeto Final em Engenharia Química

RIO DE JANEIRO

2023

GABRIELA LADEIRA NADAES

MODELAGEM DINÂMICA E CONTROLE DE PRESSÃO DE FUNDO EM POÇOS
DE PETRÓLEO PERFURADOS COM *MANAGED PRESSURE DRILLING* (MPD)

Projeto Final em Engenharia Química

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado ao Corpo Docente da Escola de
Química da Universidade Federal do Rio de
Janeiro como parte dos requisitos para ob-
tenção do grau de engenheiro químico.

Orientadora: Prof^ª. Andrea Valdman, D. Sc.

RIO DE JANEIRO

2023

GABRIELA LADEIRA NADAES

MODELAGEM DINÂMICA E CONTROLE DE PRESSÃO DE FUNDO EM POÇOS
DE PETRÓLEO PERFURADOS COM *MANAGED PRESSURE DRILLING* (MPD)
Projeto Final em Engenharia Química

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado ao Corpo Docente da Escola de
Química da Universidade Federal do Rio de
Janeiro como parte dos requisitos para ob-
tenção do grau de engenheiro químico.

Aprovado em 26 de Junho de 2023

BANCA EXAMINADORA:

Prof^ª. Andrea Valdman, D. Sc.
DEQ/EQ/UFRJ

Prof^ª. Rossana Odette Mattos Folly, D. Sc.
DEQ/EQ/UFRJ

Vitor Santos de Araujo, M. Sc.
Shell Brasil Petróleo Ltda.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora e professora, Andrea Valdman, que me ensinou e inspirou do primeiro ao último período.

À minha mãe, Rosa, que esteve ao meu lado todas as vezes em que a graduação se demonstrou especialmente desafiadora, me ajudando a me reerguer e persistir.

Às minhas amigas feitas ao longo do curso, grandes fontes de apoio, companheirismo e motivação ao longo desta jornada acadêmica.

Aos meus colegas de trabalho ao longo do meu estágio supervisionado, que paciente-mente sanaram inúmeras dúvidas sobre engenharia de poços e foram verdadeiros companheiros nesta etapa tão importante do meu desenvolvimento profissional.

RESUMO

Este trabalho desenvolveu diferentes sistemas de controle da pressão de fundo de poço para a técnica de Managed Pressure Drilling (MPD) com o objetivo de avaliar o desempenho destes sistemas na estabilização da pressão de fundo de poço. Para tal, foram utilizados dados experimentais disponíveis na literatura para realizar a modelagem do comportamento dinâmico entre pressão de fundo de poço e a frequência de bombeamento no escoamento anular e do comportamento dinâmico entre pressão de fundo de poço e índice de abertura da válvula de estrangulamento. Adicionalmente, foi realizado o escalonamento dos dados experimentais para dimensões reais, considerando profundidades típicas da camada de pré-sal brasileira. Em seguida, sistemas de controle P, PI e PID foram elaborados e simulados em MATLAB utilizando os métodos de sintonia de Ziegler-Nichols (1942) e Cohen-Coon (1953). A análise e comparação das respostas dos diferentes sistemas de controle propostos permitiu concluir que a melhor performance para o problema em questão é dada pelo sistema de controle PID ajustado conforme o método de Cohen-Coon.

Palavras-chave: MPD. Pressão de fundo de poço. Ziegler-Nichols. Cohen-Coon.

ABSTRACT

This work developed different downhole pressure control systems for the Managed Pressure Drilling (MPD) technique to evaluate the performance of these systems in stabilizing the bottom hole pressure. For this purpose, models of the dynamic behavior between bottom hole pressure and pump frequency and the dynamic behavior between bottom hole pressure and choke valve opening index were developed based on experimental data available in the literature, scaled to realistic dimensions considering the typical depths of the Brazilian pre-salt layer. Then, P, PI, and PID control systems were elaborated and simulated in MATLAB using the tuning methods of Ziegler-Nichols (1942) and Cohen-Coon (1953). The analysis and comparison of the responses of the different proposed control systems led to the conclusion that the PID control system tuned with the Cohen-Coon method presented the best performance for the problem in question.

Keywords: MPD. Bottom Hole Pressure. Ziegler-Nichols. Cohen-Coon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Exemplo de janela operacional de pressões conforme a profundidade perfurada. Adaptado de: MPD 101 - The Drilling Window. (Beyond Energy, 2022). | 16 |
| Figura 2 – Esquemático de perfuração de um poço por MPD utilizando a técnica CBHP. Adaptado de FANG et al., 2019. | 19 |
| Figura 3 – Unidade experimental utilizada por Vega et al., contendo um transdutor de pressão (1), sensor de vazão e densidade (2), bomba helicoidal (3), tanques de alimentação (4 e 5), válvula de estrangulamento (6), válvula borboleta (7), válvulas de reciclo (8) e misturadores (9). (VEGA et al., 2016) | 25 |
| Figura 4 – Aumento da não linearidade com a diminuição do índice de abertura da válvula de estrangulamento. | 27 |
| Figura 5 – Aumento da não linearidade com o aumento da taxa de bombeamento. | 29 |
| Figura 6 – Sistema de controle de pressão de fundo de poço em perfurações utilizando a técnica de MPD. | 31 |
| Figura 7 – Rota realizada pelo simulador nos casos com e sem controle. | 37 |
| Figura 8 – Comportamento dinâmico da pressão de fundo de poço nos casos A e B. | 40 |
| Figura 9 – Desvio de pressão de fundo de poço com controle proporcional no cenário A. | 41 |
| Figura 10 – Desvio de pressão de fundo de poço com controle proporcional no cenário B. | 41 |
| Figura 11 – Desvio de pressão de fundo de poço nos casos A e B com controle PI ajustado por Ziegler-Nichols e por Cohen-Coon. | 42 |
| Figura 12 – Desvio de pressão de fundo de poço nos casos A e B com controle PID ajustado por Ziegler-Nichols e por Cohen-Coon. | 44 |
| Figura 13 – Inflexão do desvio da pressão de fundo de poço com o início da ação de controle no caso A. | 44 |
| Figura 14 – Comparação da pressão de fundo de poço no caso A para todas as combinações entre técnicas de controle e métodos de sintonia abordados. | 46 |

Figura 15 – Comparação de desvio da pressão de fundo de poço no caso A para sistemas de controle P, PI e PID conforme o método de sintonia de Cohen-Coon. 47

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Tabela de busca empregada para simulação da função de transferência G_L | 26 |
| Tabela 2 – Tabela de busca empregada para simulação da função de transferência G_P | 28 |
| Tabela 3 – Análise qualitativa da resposta em malha aberta do processo | 32 |
| Tabela 4 – Parâmetros para sintonia de controladores segundo Ziegler e Nichols (1942) | 36 |
| Tabela 5 – Parâmetros para sintonia de controladores segundo Cohen e Coon (1953) | 36 |
| Tabela 6 – Cenários trabalhados nas simulações. | 39 |
| Tabela 7 – Parâmetros obtidos em cada caso na simulação em malha aberta. | 39 |
| Tabela 8 – Parâmetros obtidos em cada caso na simulação sem controle. | 41 |
| Tabela 9 – Parâmetros obtidos em cada caso na simulação com controle PI. | 42 |
| Tabela 10 – Parâmetros obtidos em cada caso na simulação com controle PID. | 43 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|---|
| BHP | <i>Bottom Hole Pressure</i> (Pressão de Fundo de Poço) |
| CBHP | <i>Constant Bottom Hole Pressure</i> (Pressão de Fundo de Poço Constante) |
| MPD | <i>Managed Pressure Drilling</i> (Perfuração de Pressão Controlada) |
| RCD | <i>Rotary Control Device</i> (Dispositivo Rotativo de Controle) |
| PWD | <i>Pressure While Drilling</i> (Pressão durante a perfuração) |
| P | Proporcional |
| PI | Proporcional-Integral |
| PID | Proporcional-Integral-Derivativo |
| CC | Cohen & Coon |
| ZN | Ziegler & Nichols |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------|--|
| θ | Tempo morto |
| τ | Constante de tempo |
| K | Ganho estático |
| K_p | Ganho proporcional |
| τ_i | Tempo integral |
| τ_D | Tempo derivativo |
| P_{FP} | Pressão de Fundo de Poço |
| P_{est} | Pressão fluidostática |
| P_{din} | Pressão fluidodinâmica |
| SC | Sinal de Controle |
| E | Erro |
| SP | <i>Set point</i> |
| L | Carga |
| V_{med} | Variável medida |
| V_C | Variável controlada |
| V_m | Variável manipulada |
| x_C | Índice de abertura da válvula de estrangulamento |
| P_{medida} | Sinal correspondente à pressão de fundo de poço medida |
| Q_{bomba} | Frequência de bombeamento de fluido de perfuração |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA DE PESQUISA | 12 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 13 |
| 1.2.1 | Objetivo geral | 13 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos | 14 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 2.1 | JANELA OPERACIONAL DE PRESSÕES NA PERFURAÇÃO DE POÇOS | 15 |
| 2.2 | PERTURBAÇÕES TÍPICAS | 17 |
| 2.3 | DINÂMICA DE PRESSÕES NO FUNDO DO POÇO | 18 |
| 2.4 | MÉTODO DE PRESSÃO DE FUNDO DE POÇO CONSTANTE . . | 19 |
| 2.5 | TÉCNICAS DE CONTROLE CLÁSSICAS UTILIZADAS | 20 |
| 2.5.1 | Controle Proporcional | 20 |
| 2.5.2 | Controle Proporcional-Integral | 21 |
| 2.5.3 | Controle Proporcional-Integral-Derivativo | 21 |
| 3 | METODOLOGIA E ANÁLISE | 23 |
| 3.1 | MODELAGEM EXPERIMENTAL A PARTIR DE DADOS DA LITE- RATURA | 23 |
| 3.1.1 | Abordagem de ganho escalonado para sistema não linear . . . | 23 |
| 3.1.2 | Modelagem a partir de identificação experimental | 24 |
| 3.1.2.1 | Método da curva de reação | 24 |
| 3.1.2.2 | Procedimento experimental | 24 |
| 3.1.2.3 | Geração de tabela de busca para definição da função de transferên- cia que relaciona a pressão de fundo de poço (variável controlada) e a frequência de bombeamento (variável perturbação) | 25 |
| 3.1.2.4 | Geração de tabela de busca para definição da função de transferên- cia que relaciona a pressão de fundo de poço (variável controlada) e a abertura da válvula de estrangulamento (variável manipulada) | 27 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.2 | <i>SCALE-UP</i> DE PARÂMETROS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE NA PLANTA MODELO | 29 |
| 3.3 | DEFINIÇÃO DA MALHA DE CONTROLE | 30 |
| 3.4 | FORMULAÇÃO DE FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA EM MALHA FECHADA | 32 |
| 3.5 | TÉCNICAS DE SINTONIA DE CONTROLADORES PARA SISTE- MAS DE PRIMEIRA ORDEM COM TEMPO MORTO | 35 |
| 3.5.1 | Ziegler-Nichols | 35 |
| 3.5.2 | Cohen-Coon | 36 |
| 4 | RESULTADOS | 37 |
| 4.1 | SIMULADOR DE PERFURAÇÃO DE POÇOS | 37 |
| 4.2 | ESTUDO DE CASO EM MALHA ABERTA | 39 |
| 4.3 | ESTUDO DE CASO EM MALHA FECHADA | 40 |
| 4.3.1 | Controle Proporcional | 40 |
| 4.3.2 | Controle Proporcional-Integral | 42 |
| 4.3.3 | Controle Proporcional-Integral-Derivativo | 43 |
| 4.4 | ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS DE SINTONIA E ES- TRATÉGIAS DE CONTROLE UTILIZADAS | 45 |
| 4.4.1 | Atraso no início da ação de controle | 45 |
| 4.4.2 | Métodos de Sintonia | 45 |
| 4.4.3 | Técnicas de Controle | 46 |
| 5 | CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS | 48 |
| 5.1 | CONCLUSÃO | 48 |
| 5.2 | PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS | 48 |
| | REFERÊNCIAS | 50 |
| | APÊNDICE A – CÓDIGOS | 53 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA DE PESQUISA

A perfuração de poços voltada para a exploração de petróleo teve início em 1859, nos Estados Unidos, sendo um dos principais impulsionadores da Segunda Revolução Industrial. O surgimento do novo combustível permitiu o aumento da potência e da eficiência de máquinas até então alimentadas a carvão, potencializando o crescimento de diversas indústrias. (OWEN, 1975)

Presumivelmente, a consequência da alta demanda por este recurso energético finito foi a diminuição de sua disponibilidade em condições de fácil acesso. Com o esgotamento de poços de exploração menos complexa, o setor de óleo e gás tem se concentrado na perfuração de poços em formações rochosas e condições ambientais mais desafiadoras. Consequentemente, diante dos maiores riscos associados a tais poços, o desenvolvimento e aplicação de tecnologias para o aumento da segurança de operações de perfuração ganham cada vez mais impulso.

Dentre tantos riscos, os *blowouts* são a causa mais comum de derramamentos de petróleo e explosões em plataformas de perfuração *offshore*, consistindo em uma liberação descontrolada de óleo ou gás do poço devido a falhas de controle do equilíbrio de pressão. (GHORBANI et al., 2021) O maior desastre causado por um *blowout* na história recente é a explosão da sonda de perfuração *Deepwater Horizon* no Golfo do México, provocando ferimentos, mortes e o derramamento de mais de quatro milhões de barris de petróleo. (SAFINA, 2011)

É evidente, portanto, que o controle dinâmico das pressões envolvidas durante a perfuração de poços deve ser uma prioridade sob a perspectiva da segurança. Em destaque, alguns sinais comuns de falha neste controle são os influxos e perdas de circulação, causados pelo desequilíbrio entre a pressão fluidodinâmica exercida pelo fluido de perfuração e a pressão de poros da própria formação rochosa. (REHM et al., 2009)

Em operações de perfuração convencionais, são utilizados fluidos de perfuração com densidades pré-determinadas com o intuito de manter a pressão aplicada sobre a formação dentro de uma janela operacional adequada. As características destes fluidos são definidas, principalmente, com base na profundidade da coluna de fluido e nos aspectos geofísicos

da formação rochosa perfurada. Assim, com o aumento da profundidade e mudanças das condições geológicas, o fluido utilizado é substituído por um que atenda a esta nova conjuntura.

Relativamente simples, esta técnica é tradicionalmente aplicada a poços com uma ampla janela operacional de pressão. Todavia, com o estreitamento destas janelas em formações rochosas mais complexas, é cada vez mais desafiador e oneroso manter-se dentro do intervalo operacional seguro pelos métodos convencionais. (HUQUE et al., 2020)

Esta limitação impulsionou o desenvolvimento de um conjunto de técnicas conhecidas como *Managed Pressure Drilling* (MPD), as quais proporcionam um processo de perfuração adaptável, usado para controlar com mais precisão o perfil de pressão anular ao longo do poço (HOQUE, 2013). Assim, é possível alterar a pressão do fluido sobre a formação de maneira rápida, sem a necessidade de troca do fluido, ao regular a perda de carga do escoamento por meio de um sistema de válvulas de estrangulamento.

Dada a crescente necessidade de operação em estreitas janelas operacionais, o controle automatizado, robusto e seguro do balanço de pressões pela técnica de MPD é fundamental para viabilizar diagnósticos rápidos e atuação eficaz em situações de risco. Assim, dados os desastrosos efeitos ambientais, econômicos e ocupacionais de um controle de pressão ineficiente durante a perfuração de poços, é crucial desenvolver sistemas rápidos, simples e acurados para o controle de MPD, motivando este trabalho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral a modelagem dinâmica e simulação do comportamento da pressão de fundo de poço em relação à frequência de bombeamento de fluidos de perfuração em um escoamento anular, a partir de dados disponíveis na literatura. Em seguida, propõe-se a elaboração e simulação de um sistema de controle que, utilizando o método de pressão de fundo constante, represente uma solução simples e efetiva de *Managed Pressure Drilling*.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral proposto, podem se definir dois objetivos específicos. O primeiro, associado à etapa de modelagem do problema, envolve a investigação na literatura com o intuito de obter a fundamentação teórica e um conjunto de dados experimentais que permitam desenvolver um modelo matemático simplificado capaz de descrever a relação dinâmica entre a pressão – como variável controlada – e a vazão de escoamento do fluido de perfuração – como variável manipulada – no interior de um ânulo.

Uma vez formulado o modelo, o segundo objetivo específico do projeto é a elaboração, simulação e comparação de sistemas de controle P, PI e PID ajustados pelos métodos de sintonia de Ziegler-Nichols (1942) e Cohen-Coon (1953), técnicas que se destacam por sua ampla aplicação e relativa simplicidade. Como critério principal para avaliação de performance, será verificado se tais sistemas permitem a manutenção de uma pressão constante no fundo do poço por meio de respostas rápidas de um sistema de válvulas de estrangulamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 JANELA OPERACIONAL DE PRESSÕES NA PERFURAÇÃO DE POÇOS

Os limites de pressão fluidodinâmica durante a perfuração de poços são definidos pela pressão de poros em seu mínimo e a pressão de fratura em seu máximo. Portanto, a pressão de fundo de poço deve se encontrar entre esses dois limites para evitar influxos indesejados no poço.

Estes limites de pressão, por sua vez, são influenciadas por diferentes aspectos da formação geológica, como composição, temperatura e permeabilidade, variando também com a profundidade do poço. (REHM et al., 2009)

A pressão de poros é aquela exercida pelo fluido contido no meio poroso, sendo nula no topo da formação e crescente com a profundidade. Deste modo, se a pressão dos poros for menor ou maior que a pressão hidrostática correspondente àquela altura, esta é dita uma pressão dos poros anormal. (ZHANG, 2011)

Já a pressão de fratura é caracterizada como a máxima pressão suportada pela formação geológica antes da falha, isto é, a pressão na qual são formadas fraturas na matriz rochosa. Com o aumento da profundidade e a crescente compactação das rochas, a matriz rochosa tende a apresentar maior resistência a fraturas e, portanto, maior pressão de fratura. (REHM et al., 2009)

A associação entre pressão de fratura e pressão de poros define uma “pressão de sobrecarga” de modo que, quanto maior a contribuição do fluido nos poros para a pressão de sobrecarga, mais estreitas são as margens nas janelas operacionais de perfuração. (CRUMPTON, 2018)

Assim, a ampla quantidade de fatores que afetam tais pressões limite geram perfis de Profundidade *versus* Pressão bastante irregulares, destacando a importância de um controle dinâmico ágil e acurado.

A Figura 1 ilustra a irregularidade dos limites de pressão ao longo do comprimento de um poço de petróleo, tal que a linha vermelha representa a pressão de poros, a linha azul representa a pressão de fratura e a área cinza entre as duas linhas representa a janela na qual a pressão de fundo de poço deve se encontrar de acordo com a profundidade.

Esta variação de perfil gera a necessidade de que os poços sejam perfurados telescópica-

mente em diferentes fases – ou seções – tal que, para cada fase, uma pressão intermediária é mantida constante até que, com a variação das pressões de fratura e de poros, a pressão no fundo do poço se encontra muito próxima dos limites operacionais. (REHM et al., 2009)

Neste ponto, a fase perfurada é revestida e cimentada, iniciando-se a perfuração da fase seguinte com uma nova pressão intermediária adotada como *set point*. Esta pressão almejada é ilustrada na Figura 1 pela linha tracejada, que se mantém constante ao longo de uma fase e é ajustada com o início da fase seguinte. Para facilitar a identificação das diferentes seções do poço, a figura 1 ainda mostra, à direita, a arquitetura do poço de acordo com os perfis de pressão na profundidade correspondente.

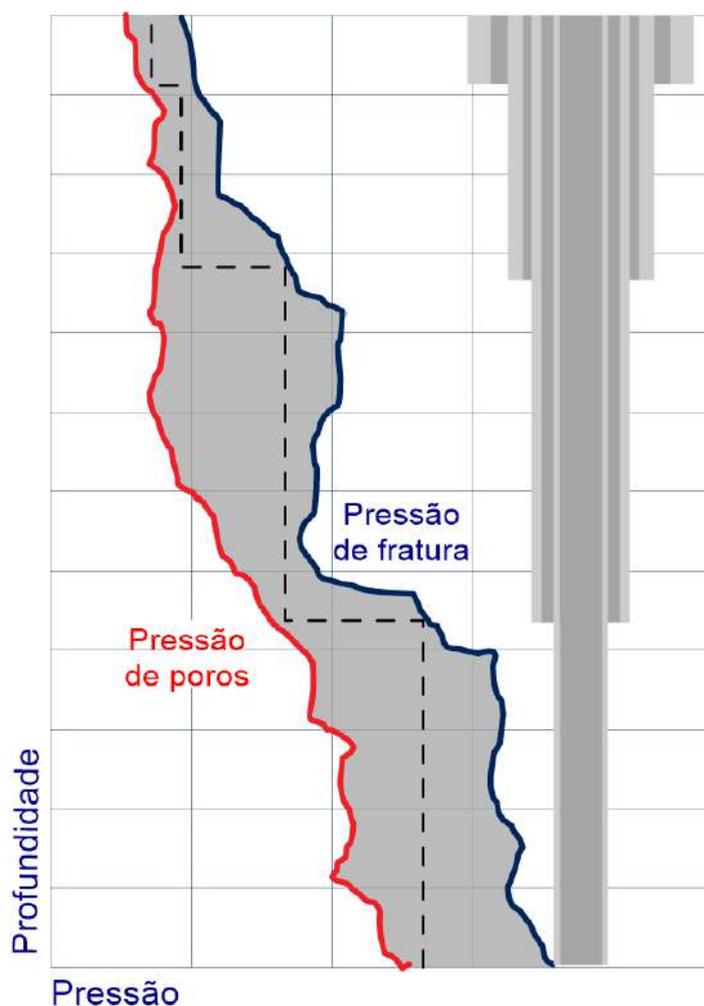


Figura 1 – Exemplo de janela operacional de pressões conforme a profundidade perfurada. Adaptado de: MPD 101 - The Drilling Window. (Beyond Energy, 2022).

Quando o fluido exerce uma pressão superior à pressão de poros, tem-se a perfuração sobre-balanceada (*overbalanced*). Nos casos de perfuração *overbalanced* em que a pressão de fluido é também superior à pressão de fratura, é favorecida a penetração do fluido

circulante na formação rochosa e, portanto, a sua perda. Em contrapartida, na perfuração sub-balanceada (*underbalanced*), a pressão do fluido no poço é inferior à pressão de poros, podendo gerar influxos descontrolados oriundos do reservatório, denominados *kicks*. (GOMES et al., 2018)

O método de MPD explorado neste trabalho tem como objetivo manter a pressão de fundo de poço aproximadamente constante, tendo como *set point* a pressão intermediária definida para a seção de acordo com a arquitetura do poço. Nesse contexto, a tolerância na qual a pressão do fundo do poço pode se encontrar é definida pelos limites inferior e superior da janela operacional. Este controle é dado através da manipulação de uma válvula de estrangulamento. (REHM et al., 2009)

2.2 PERTURBAÇÕES TÍPICAS

Na perfuração de poços de petróleo, diversas perturbações – tanto da própria operação quanto decorrentes de variações da formação rochosa com o andamento da perfuração – afetam a pressão de fundo do poço. Todavia, dentre tantos casos, os cenários mais comuns de perturbações nas operações de perfuração estão relacionados ao aumento do comprimento do poço e o procedimento de conexão da tubulação. (VEGA et al., 2016)

Dois efeitos de destaque são observados sobre a dinâmica de pressões no poço com o aumento da profundidade. O primeiro é referente o aumento da pressão de poros, a qual cresce de forma semelhante à pressão estática de uma coluna de água. Assim, com o aumento da profundidade, há também um aumento da pressão de poros e, consequentemente, do limite inferior da margem de pressões, demandando fluidos que exerçam pressões maiores sobre a matriz rochosa com o intuito de evitar influxos. (REHM et al., 2009) O segundo, relacionado à crescente compactação rochosa, é dado pelo aumento da pressão de fratura de modo que, tal como a pressão de poros, este limite superior da margem de pressões também aumenta com a profundidade. (CRUMPTON, 2018)

Assim, de modo geral, observa-se um deslocamento da janela operacional de perfuração com o aumento da profundidade do poço, aumentando também os limites superior e inferior de pressão do fluido. Com isso, para cada nova fase perfurada, observa-se uma mudança de *set point*.

Outra situação típica é o procedimento de conexão de dutos, o qual ocorre periodicamente com o avanço da perfuração. Para realizar essas conexões, é necessário interromper

a rotação da broca e o bombeamento de fluido. Então, depois que o segmento de tubo é conectado, o bombeamento de fluido e rotação da broca são reiniciados. Essa variação abrupta causa flutuações significativas da pressão exercida pelo fluido de perfuração. (REHM et al., 2009)

2.3 DINÂMICA DE PRESSÕES NO FUNDO DO POÇO

A pressão de fundo de poço (P_{FP}) pode ser descrita em três termos:

$$P_{FP} = P_{est} + P_{din} + \Delta P \quad (2.1)$$

Equivalendo, portanto, à soma das pressões estática (P_{est}) e dinâmica (P_{din}) do fluido de perfuração acrescida da perda de carga do escoamento (ΔP). Deste modo, ao circular um fluido de perfuração, a pressão dinâmica exercida pelo fluxo ascendente somada à perda de carga devido ao seu atrito contra a formação rochosa faz com que a pressão no fundo do poço seja necessariamente superior à pressão estática, quando o fluido não está em circulação. (ZHOU et al., 2016)

Assim, um critério de segurança utilizado na seleção de fluidos de perfuração é que este, a uma dada profundidade, exerça, estaticamente, pressão superior à pressão de poros, evitando os riscos de uma perfuração sub-balanceada. (REHM et al., 2009)

Com o progresso da perfuração, a pressão estática do fluido aumenta junto com a profundidade do poço, embora variações bruscas de pressão ou densidade sejam possíveis indicativos de problemas operacionais. (VEGA et al., 2016)

Não obstante, ao considerar as variações de viscosidade com temperatura e pressão, a determinação exata da densidade e, conseqüentemente, da pressão exercida pelo fluido circulante se torna mais complexa, especialmente em poços de alta pressão e alta temperatura. (REHM et al., 2009) Tal fator torna fundamental o monitoramento constante da pressão exercida pelo fluido no fundo do poço, principalmente em poços com estreitas margens de tolerância de pressão.

Deste modo, utiliza-se uma ferramenta de telemetria da pressão durante a perfuração (*Pressure While Drilling*, ou PWD) para monitorar a pressão exercida pelo fluido circulante ou estático. (VEGA et al., 2016)

2.4 MÉTODO DE PRESSÃO DE FUNDO DE POÇO CONSTANTE

Dentre as diversas técnicas de *Managed Pressure Drilling*, o método de *Constant Bottom Hole Pressure* (CBHP) – ou método de Pressão de Fundo de Poço Constante – se destaca por sua relativa simplicidade e ampla aplicação (REHM et al., 2009). Esta técnica consiste no controle da pressão exercida pelo fluido no fundo do poço através da manipulação de válvulas de estrangulamento (*choke valves*).

A figura 2 representa um típico sistema de *Managed Pressure Drilling*. Primeiramente, tal como na perfuração convencional, o fluido de perfuração é bombeado da superfície até o fundo do poço no interior da coluna de perfuração. Ao chegar ao fundo do poço, este fluido passa a apresentar escoamento ascendente, retornando à superfície através do ânulo entre a parede do poço e a coluna de perfuração. O sistema de MPD se diferencia da perfuração convencional com a chegada do fluido à superfície, ao direcionar o fluido a uma válvula de estrangulamento que manipula a vazão de saída do sistema. (GOMES et al., 2018) Assim, quanto menor é a abertura da válvula, maior é a perda de carga do escoamento e, portanto, maior é a pressão que a coluna de fluido exerce no fundo do poço.

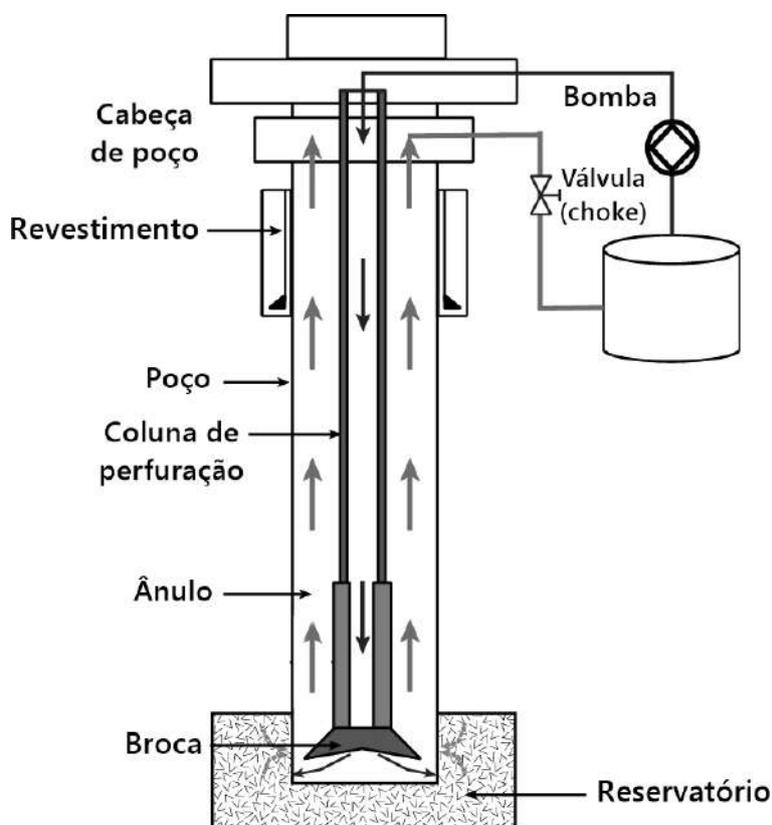


Figura 2 – Esquemático de perfuração de um poço por MPD utilizando a técnica CBHP. Adaptado de FANG et al., 2019.

Adicionalmente, em alguns sistemas de MPD, opta-se por acrescentar uma bomba de sobrepressão na superfície para obter ainda maior controle sobre o termo de perda de carga. (REHM et al., 2009)

2.5 TÉCNICAS DE CONTROLE CLÁSSICAS UTILIZADAS

Essenciais para muitas indústrias e múltiplas aplicações, as técnicas de controle são empregadas com o objetivo de regular o comportamento de um sistema e mantê-lo em um determinado nível desejado. Em particular, as técnicas de controle Proporcional (P), Proporcional-Integral (PI) e Proporcional-Integral-Derivativo (PID) são as mais comumente usadas em diversas operações. Tais técnicas são baseadas em um sistema de realimentação e permitem, ao produzir um sinal de controle para um erro medido, monitorar e ajustar a variável de saída do sistema para que ela atinja seu valor de *setpoint*. (NISE, 2019) Deste modo, define-se a função de transferência de um controlador qualquer em um sistema de controle *feedback* como a variação do sinal de controle (\widehat{SC}) em razão de uma variação no erro medido (\widehat{E}), isto é:

$$G_c(s) = \frac{\widehat{SC}(s)}{\widehat{E}(s)} \quad (2.2)$$

Cada técnica de controle apresenta um conjunto de parâmetros próprios, bem como suas vantagens e desvantagens. Portanto, é de interesse tecnológico e financeiro avaliar caso a caso qual técnica pode, dadas suas particularidades, apresentar a melhor performance.

2.5.1 Controle Proporcional

O controle proporcional é a técnica de controle mais simples, na qual o sinal de controle é ajustado proporcionalmente ao sinal de erro de acordo com o parâmetro de ganho proporcional (K_P).

$$G_c(s) = \frac{\widehat{SC}(s)}{\widehat{E}(s)} = K_P \quad (2.3)$$

Embora um ganho proporcional maior leve a uma resposta mais imediata, aumentar o parâmetro K_p também diminui a estabilidade do sistema, podendo haver oscilações indesejáveis na variável controlada e na variável manipulada caso o ganho esteja acima de um limite crítico. (PARASKEVOPOULOS, 2002)

2.5.2 Controle Proporcional-Integral

O controle proporcional-integral é uma técnica de controle na qual a variável de saída do controlador é calculada a partir da soma da ação proporcional com a integral do erro. (SMITH; CORRIPIO, 2006) O desempenho de um controlador PI é determinado por dois parâmetros, o tempo integral (T_i) e o ganho proporcional (K_p) mencionado anteriormente. (SMITH; CORRIPIO, 2006)

$$G_c(s) = \frac{\widehat{SC}(s)}{\widehat{E}(s)} = K_P \frac{(\tau_i s + 1)}{\tau_i s} \quad (2.4)$$

O tempo integral, T_i , determina a taxa na qual o controlador ajusta sua variável de saída para reduzir o erro. Portanto, aumentar o tempo integral significa que a variável de saída é ajustada em uma taxa menor, o que resultará em uma resposta mais lenta, mas também em melhor estabilidade e menos ruído. Por outro lado, diminuir o tempo integral resultará em uma resposta mais rápida, menor estabilidade e mais oscilações. (SMITH; CORRIPIO, 2006)

2.5.3 Controle Proporcional-Integral-Derivativo

Um controlador PID é composto por três parâmetros: o ganho proporcional (K_p), o tempo integral (T_i) e o tempo derivativo (T_d).

$$G_c(s) = \frac{\widehat{SC}(s)}{\widehat{E}(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_D s \right) \quad (2.5)$$

Da mesma forma que os controladores P e PI, o ganho proporcional em um controlador PID determina a quantidade de correção aplicada ao sistema, enquanto o tempo integral determina quanto tempo o controlador aguardará antes de tomar uma ação corretiva. (SMITH; CORRIPIO, 2006)

Por meio do cálculo da derivada do erro, a ação derivativa permite antecipar desvios na variável medida, permitindo a correção mais rápida do erro. Assim, o tempo derivativo (T_d) determina o tempo de reação do sistema quando a variável do processo começa a se desviar do *set point*. (SMITH; CORRIPIO, 2006) Portanto, um tempo derivativo maior fará com que o sistema reaja mais lentamente às mudanças na entrada, enquanto um tempo derivativo menor fará com que o sistema reaja mais rapidamente às mudanças na entrada.

Em suma, o parâmetro de ganho proporcional determina o tamanho da ação corretiva, o tempo integral determina quanto tempo levará para que o controlador realize a ação corretiva e o tempo derivativo determina a rapidez com que o controlador responderá quando a variável do processo começar a se desviar do *set point*.

3 METODOLOGIA E ANÁLISE

3.1 MODELAGEM EXPERIMENTAL A PARTIR DE DADOS DA LITERATURA

No artigo "*Oil Well Drilling Inside Operational Window: Simulation and Experimental Control Studies*" (VEGA et al., 2016), o grupo de pesquisadores implementou um sistema de perfuração de poços de petróleo em uma unidade experimental, simulando as condições de perfuração na região anular de um poço real. Assim, diferentes fenômenos de perfuração foram capturados, permitindo a simulação do crescimento do poço, as modificações na densidade e viscosidade, o procedimento de conexão de dutos e os cenários de *kick* ou perda de circulação.

Devido à complexidade da aplicação experimental do processo com um nível satisfatório de acurácia, este projeto utiliza os dados de VEGA et al. (2019) disponíveis na literatura com o intuito para identificar e modelar o comportamento dinâmico da pressão de fundo de poço para variações na frequência de bombeamento de fluido de perfuração e para mudanças no índice de abertura da válvula de estrangulamento em um sistema de MPD.

3.1.1 Abordagem de ganho escalonado para sistema não linear

Como o problema de pesquisa envolve processos complexos com não linearidades, parâmetros físico-químicos desconhecidos e um grande número de equações diferenciais, o desenvolvimento de um modelo matemático rigoroso pode ser considerado imprático. Como alternativa, a identificação por meio de uma função de transferência de baixa ordem provou ser uma ferramenta útil e é a estrutura mais popular para o desenvolvimento de modelos empíricos para fins de síntese de controladores clássicos. Na pesquisa referenciada (VEGA et al., 2016), o método de curva de reação de Ziegler-Nichols (1942) foi empregado a fim de obter um modelo de primeira ordem com tempo morto para representar o comportamento da pressão de fundo de poço na unidade experimental para perturbações na frequência de bombeamento de fluido de perfuração e no índice de abertura da válvula de estrangulamento.

A abordagem de escalonamento de ganho é um método de controle robusto de sistemas transientes não lineares dado pela alteração dos parâmetros de controle de acordo com

as condições operacionais vigentes do sistema. Portanto, o controle de escalonamento de ganho estabelece uma relação entre um sistema não linear e um conjunto de sistemas lineares. Assim, conforme o sistema muda de estado, o escalonamento apropriado é selecionado e o controle correspondente a tal estado é aplicado. (SHAMMA; ATHANS, 1990)

Portanto, foram realizados experimentos ao longo de toda a faixa operacional tanto para perturbações na frequência de bombeamento de fluido quanto para alterações no índice de abertura da válvula de estrangulamento, permitindo o uso da abordagem de escalonamento de ganho e proporcionando um controle satisfatório para cada intervalo definido de operação do sistema. (VEGA et al., 2016)

3.1.2 Modelagem a partir de identificação experimental

3.1.2.1 Método da curva de reação

O Método da Curva de Reação (MCR) é uma técnica de análise do comportamento de um sistema, sendo usada em uma variedade de aplicações, como ajuste de controladores e identificação e otimização de sistemas. Neste método, inicialmente, permite-se que o processo atinja o estado estacionário ou o mais próximo possível do estado estacionário. Em seguida, uma pequena perturbação degrau é introduzida no sistema e a reação da variável de processo é registrada, gerando a curva de reação do processo. Esses dados podem então ser usados para calcular os parâmetros do controlador. (JOHNSON; MORADI, 2005)

O MCR é executado em condições de malha aberta para que a resposta do processo possa ser completamente isolada de qualquer ação de controle. Portanto, a curva de reação do processo descreve a resposta transiente de um processo em malha aberta submetido a uma perturbação degrau, excluindo o controlador em uma malha de controle. (FRANKLIN et al., 2015)

3.1.2.2 Procedimento experimental

A unidade de perfuração experimental desenvolvida por Vega et al. (2019), ilustrada na Figura 3, apresenta uma coluna de perfuração de 6 m, contendo sensores de vazão e densidade em linha e um transdutor de pressão, bem como uma bomba de fluido de perfuração, um dispositivo de estrangulamento e válvulas borboleta conectadas a tanques de alimentação.

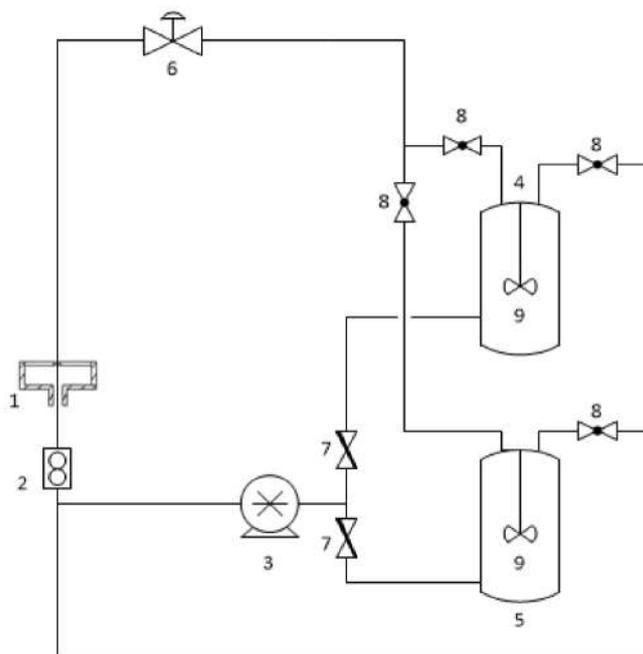


Figura 3 – Unidade experimental utilizada por Vega et al., contendo um transdutor de pressão (1), sensor de vazão e densidade (2), bomba helicoidal (3), tanques de alimentação (4 e 5), válvula de estrangulamento (6), válvula borboleta (7), válvulas de reciclo (8) e misturadores (9). (VEGA et al., 2016)

Com o objetivo de representar a não linearidade do sistema, o experimento foi realizado para diferentes condições operacionais a fim de aplicar o método de escalonamento de ganho. Para identificar o comportamento do processo e selecionar os parâmetros de sintonia, foram empregados diferentes níveis de frequência de bomba e índices de abertura da válvula de estrangulamento.

3.1.2.3 Geração de tabela de busca para definição da função de transferência que relaciona a pressão de fundo de poço (variável controlada) e a frequência de bombeamento (variável perturbação)

Com o intuito de verificar o comportamento da pressão de fundo de poço para uma dada perturbação no bombeamento, foram aplicadas perturbações degrau sobre a frequência da bomba (15-30 Hz, 15-40 Hz, 15-50 Hz, 15-60 Hz) para sete valores diferentes de índice de abertura da válvula de estrangulamento (25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75% e 95%), somando 28 experimentos. Com isso, foram obtidas funções de transferência de primeira ordem com tempo morto para toda a gama de condições do processo, superando

a limitação de não linearidade do sistema ao utilizar a abordagem de escalonamento de ganho. (VEGA et al., 2016)

A Tabela 1 apresenta os dados de tempo morto (θ), constante de tempo (τ) e ganho (K) em função da abertura da válvula de estrangulamento para uma dada manipulação sobre a frequência da bomba. (VEGA et al., 2016)

Tabela 1 – Tabela de busca empregada para simulação da função de transferência G_L .

| Abertura da válvula | Degrau na frequência da bomba (Hz) | Tempo morto (s) | Constante de tempo (s) | Ganho (psi/Hz) |
|---------------------|------------------------------------|-----------------|------------------------|----------------|
| 25% | 15-30 | 0,027 | 0,023 | 2,299 |
| | 15-40 | 0,037 | 0,012 | 2,872 |
| | 15-50 | 0,043 | 0,008 | 3,063 |
| | 15-60 | 0,044 | 0,010 | 3,187 |
| 35% | 15-30 | 0,023 | 0,024 | 1,281 |
| | 15-40 | 0,036 | 0,017 | 1,782 |
| | 15-50 | 0,041 | 0,011 | 2,141 |
| | 15-60 | 0,047 | 0,012 | 2,362 |
| 45% | 15-30 | 0,024 | 0,021 | 0,926 |
| | 15-40 | 0,034 | 0,017 | 1,259 |
| | 15-50 | 0,039 | 0,015 | 1,524 |
| | 15-60 | 0,046 | 0,012 | 1,726 |
| 55% | 15-30 | 0,019 | 0,025 | 0,723 |
| | 15-40 | 0,030 | 0,018 | 0,908 |
| | 15-50 | 0,038 | 0,015 | 1,087 |
| | 15-60 | 0,047 | 0,013 | 1,248 |
| 65% | 15-30 | 0,018 | 0,021 | 0,519 |
| | 15-40 | 0,026 | 0,019 | 0,678 |
| | 15-50 | 0,038 | 0,015 | 0,815 |
| | 15-60 | 0,046 | 0,014 | 0,927 |
| 75% | 15-30 | 0,017 | 0,023 | 0,443 |
| | 15-40 | 0,028 | 0,017 | 0,544 |
| | 15-50 | 0,039 | 0,015 | 0,657 |
| | 15-60 | 0,046 | 0,014 | 0,749 |
| 95% | 15-30 | 0,019 | 0,019 | 0,389 |
| | 15-40 | 0,029 | 0,015 | 0,458 |
| | 15-50 | 0,038 | 0,014 | 0,542 |
| | 15-60 | 0,045 | 0,015 | 0,628 |

Portanto, a Tabela 1 indica os valores a serem substituídos na função de transferência G_L , que relaciona a pressão de fundo de poço (variável controlada ou V_C) e a frequência de bombeamento (variável perturbação ou L):

$$G_L(s) = \frac{\widehat{V}_C(s)}{\widehat{L}(s)} = \frac{K_L e^{-\theta_L s}}{\tau_L s + 1} \quad (3.1)$$

Observa-se que a planta experimental apresenta a resposta não linear mais pronunciada quanto menor o índice de abertura da válvula de estrangulamento no momento da incidência da perturbação (Figura 4).

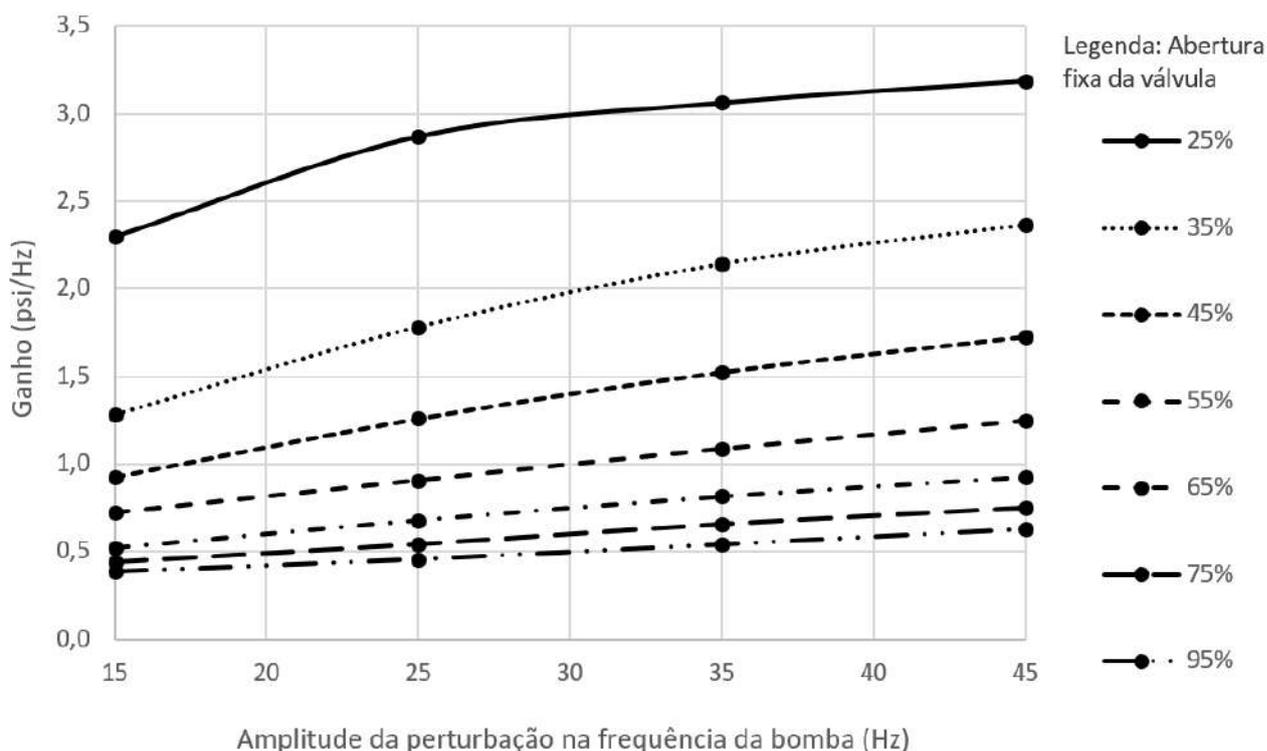


Figura 4 – Aumento da não linearidade com a diminuição do índice de abertura da válvula de estrangulamento.

De fato, uma menor abertura da válvula de estrangulamento pode aumentar a não linearidade do sistema ao alterar a dinâmica de seus fluxos, tornando-o mais instável e caótico. (STROGATZ, 2019)

3.1.2.4 Geração de tabela de busca para definição da função de transferência que relaciona a pressão de fundo de poço (variável controlada) e a abertura da válvula de estrangulamento (variável manipulada)

Para modelar o comportamento da pressão de fundo de poço com uma variação no índice de abertura da válvula de estrangulamento, as perturbações degrau aplicadas à

abertura da válvula de estrangulamento tiveram amplitude de 95-25%, 95-35%, 95-55% para quatro valores diferentes de frequência da bomba (30 Hz, 40Hz, 50 Hz e 60 Hz), resultando em doze experimentos. (VEGA et al., 2016)

A Tabela 2 apresenta os dados de tempo morto (θ), constante de tempo (τ) e ganho (K) em função da frequência de bombeamento para uma dada manipulação sobre o índice de abertura da válvula de estrangulamento. (VEGA et al., 2016)

Tabela 2 – Tabela de busca empregada para simulação da função de transferência G_P .

| Bomba | Degrau na abertura da válvula | Tempo morto (s) | Constante de tempo (s) | Ganho (psi) |
|-------|-------------------------------|-----------------|------------------------|-------------|
| 30 Hz | 95% - 25% | 0,027 | 0,010 | 0,336 |
| | 95% - 35% | 0,022 | 0,009 | 0,167 |
| | 95% - 55% | 0,018 | 0,009 | 0,143 |
| 40 Hz | 95% - 25% | 0,028 | 0,004 | 0,600 |
| | 95% - 35% | 0,020 | 0,007 | 0,344 |
| | 95% - 55% | 0,018 | 0,005 | 0,264 |
| 50 Hz | 95% - 25% | 0,020 | 0,005 | 0,861 |
| | 95% - 35% | 0,022 | 0,005 | 0,539 |
| | 95% - 55% | 0,016 | 0,006 | 0,412 |
| 60 Hz | 95% - 25% | 0,021 | 0,001 | 1,104 |
| | 95% - 35% | 0,019 | 0,002 | 0,745 |
| | 95% - 55% | 0,018 | 0,005 | 0,575 |

Portanto, a Tabela 2 indica os valores a serem substituídos na função de transferência que relaciona a pressão de fundo de poço (variável controlada) e a abertura da válvula de estrangulamento (variável manipulada):

$$G_P(s) = \frac{\widehat{V}_C(s)}{\widehat{V}_m(s)} = \frac{K_P e^{-\theta_P s}}{\tau_P s + 1} \quad (3.2)$$

Adicionalmente, observa-se que, de forma análoga ao procedimento anterior, a planta experimental apresenta a resposta não linear mais pronunciada quanto maior a frequência de bombeamento (Figura 5). Tal como a diminuição do índice de abertura da válvula, aumentar a taxa de bombeamento pode aumentar a não linearidade do sistema pois, ao promover um aumento de fluxo, pode ser causado um *loop* de interações *feedback* entre seus componentes. Este ciclo de realimentação, por sua vez, pode levar à instabilidade

de seus parâmetros e ao aumento da desordem do sistema, contribuindo para sua não linearidade. (STROGATZ, 2019)

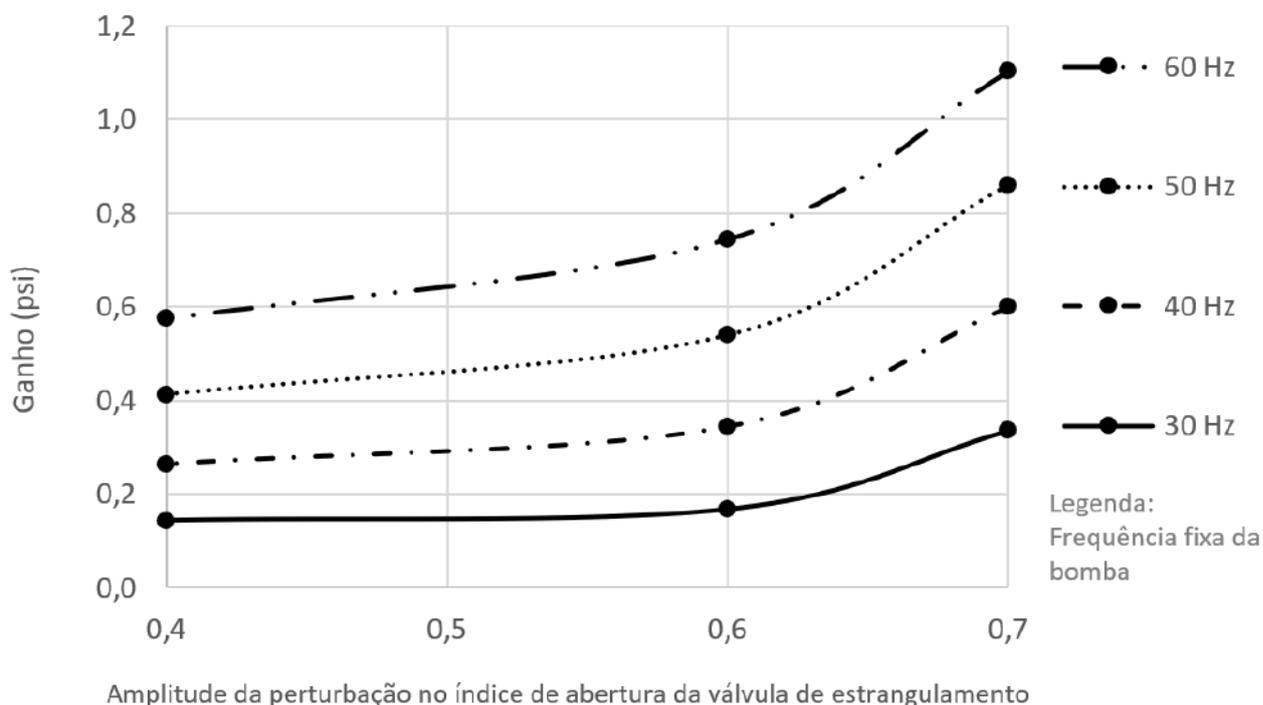


Figura 5 – Aumento da não linearidade com o aumento da taxa de bombeamento.

3.2 SCALE-UP DE PARÂMETROS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE NA PLANTA MODELO

Enquanto o procedimento experimental foi realizado em uma unidade de 6 m de profundidade, o pré-sal brasileiro encontra-se, segundo a Agência Nacional de Petróleo (ANP), em profundidades que variam de 5000 a 7000 metros abaixo do nível do mar. Portanto, para obter resultados mais acurados e próximos de condições reais de operação, é necessário considerar os efeitos do aumento de escala sobre os parâmetros obtidos na planta modelo de Vega et al.

Para o tempo morto, propõe-se a seguinte relação ao assumir uma proporcionalidade direta entre profundidade e tempo morto:

$$\text{Tempo Morto Ajustado} = \text{Tempo Morto Tabelado} \times \frac{\text{Profundidade em metros}}{6 \text{ m}} \quad (3.3)$$

Com o aumento das dimensões do sistema, também se observa um aumento do tempo necessário para que um novo estado estacionário seja atingido, aumentando também sua constante de tempo, que representa 1/5 do tempo de resposta em funções de primeira ordem.

Para a função de transferência que relaciona a pressão de fundo de poço (variável controlada) e a frequência de bombeamento (variável perturbação), são tipicamente observadas constantes de tempo entre 120 a 180 segundos em operações reais (CARLSEN et al., 2008). Assim, para obter constantes de tempo mais próximas da realidade, propõe-se o seguinte ajuste sobre as constantes de tempo para $G_{Lajustado}$ obtidas por Vega et al.:

$$\tau_{Lajustado} = \tau_L \times \text{Profundidade em metros} \quad (3.4)$$

Por fim, para a função de transferência que relaciona a pressão de fundo de poço (variável controlada) e a abertura da válvula de estrangulamento (variável manipulada) a seguinte relação é proposta na literatura para o ajuste da constante de tempo de G_P em função da profundidade. (NANDAN; PATIENCE; BUTT, 2014)

$$\tau_{Pajustado} = 37 + 0,00473625 (\text{Profundidade em metros} - 4000) \quad (3.5)$$

Embora não reproduza as não linearidades do sistema, a equação 3.4 gera valores mais próximos do que é observado em operações reais de perfuração de poços (NANDAN; PATIENCE; BUTT, 2014) em comparação aos valores obtidos por Vega et al., optando-se pelo uso da equação 3.4 na simulação ao definir a constante de tempo de $G_{Pajustado}$.

3.3 DEFINIÇÃO DA MALHA DE CONTROLE

Uma vez conhecidos os principais fenômenos envolvidos na perfuração de poços de petróleo pela técnica de MPD e após a análise da unidade experimental proposta por VEGA et al. (2016), pode-se construir um diagrama de blocos que ilustre todos os processos, perturbações e respostas de interesse envolvidos neste sistema. Para tal, definem-se as variáveis:

- *SP* - *set point*, dado por uma determinada pressão dentro de uma janela operacional de pressão a uma dada altura

- E - erro entre a pressão de fundo de poço medida e a pressão de referência dada pelo *set point*
- SC - sinal de controle
- x_C - índice de abertura da válvula de estrangulamento (*choke*)
- P_{FP} - pressão de fundo de poço
- P_{medida} - sinal correspondente à pressão de fundo de poço medida
- Q_{bomba} - frequência de bombeamento de fluido de perfuração

Assim, o seguinte diagrama pode ser construído em termos de variáveis desvio:

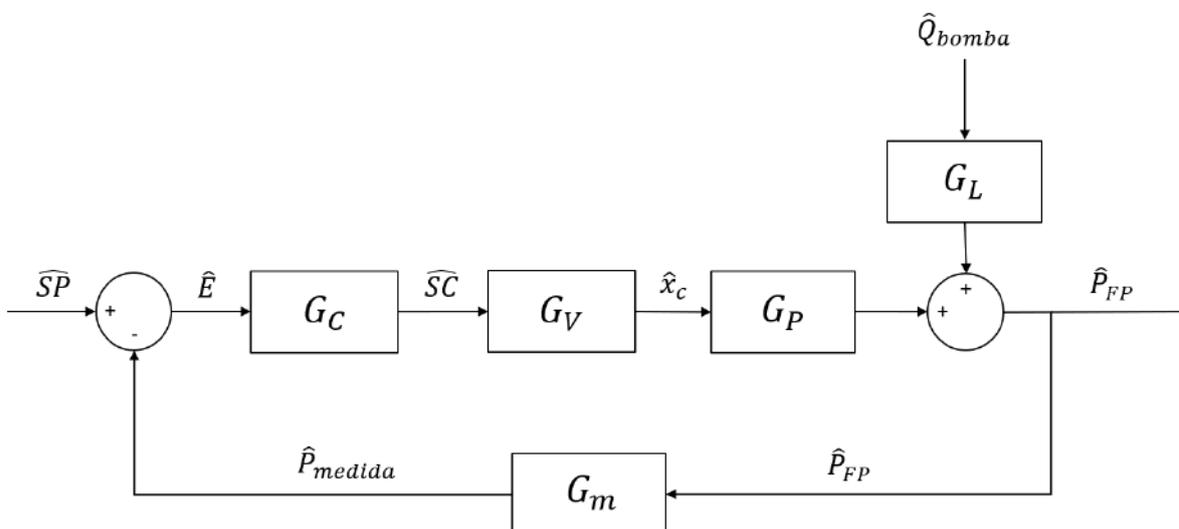


Figura 6 – Sistema de controle de pressão de fundo de poço em perfurações utilizando a técnica de MPD.

Conforme representado na Figura 6, as perturbações sobre o sistema podem ocorrer tanto por alterações na vazão da bomba quanto por ajustes no *set point*. Tal arranjo permite avaliar, respectivamente, os dois principais cenários de instabilidade de pressão de fundo de poço durante uma perfuração: mudança de *set point* e alteração da frequência de bombeamento.

O *set point* para a pressão de fundo de poço é ajustado com o início de cada nova seção perfurada para que seja mantido dentro dos limites da janela operacional de pressões (Figura 1). Portanto, o *set point* para a pressão exercida pelo fluido de perfuração no

fundo do poço é mantido constante até que o limite de pressão inferior encontre-se acima da pressão referente ao *set point*. Nestas profundidades, ajusta-se o *set point* de pressão de fundo de poço para evitar a perfuração sub-balanceada, mantendo-o dentro da janela operacional e o mais próximo possível da pressão de fratura.

Já no cenário de alterações de frequência de bombeamento do fluido de perfuração, considera-se a variação do efeito de fricção, que é nulo quando a bomba está desligada e aumenta com a vazão da bomba. Deste modo, quando a bomba está desligada, a pressão de fundo de poço é mínima e equivalente à pressão fluidoestática da coluna.

O atuador do sistema, por sua vez, é dado por uma válvula de estrangulamento, que exerce uma contrapressão sobre a coluna de fluido. Assim, quanto menor é a abertura da válvula de estrangulamento, maior é a contrapressão exercida por ela e, portanto, maior é a pressão que o fluido exerce no fundo do poço.

A Tabela 3 descreve qualitativamente o comportamento da pressão de fundo para perturbação na vazão da bomba de fluido de perfuração ou para a manipulação do índice de abertura da válvula de estrangulamento como ação de controle.

Tabela 3 – Análise qualitativa da resposta em malha aberta do processo

| Vazão da bomba de fluido de perfuração (perturbação) | Índice de abertura da válvula de estrangulamento (variável manipulada) | Pressão de fundo de poço (variável controlada) |
|--|--|--|
| aumenta ↑ | constante | aumenta ↑ |
| diminui ↓ | constante | diminui ↓ |
| constante | aumenta ↑ | diminui ↓ |
| constante | diminui ↓ | aumenta ↑ |

Por fim, para medir e acompanhar a pressão de fundo de poço, o presente trabalho utiliza a tecnologia de PWD como forma simplificada e rápida de medição de pressão. (VEGA et al., 2016)

3.4 FORMULAÇÃO DE FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA EM MALHA FECHADA

As funções de transferência em malha fechada (FTMF) representam uma ferramenta poderosa para a análise e compreensão do comportamento de um sistema de controle, fornecendo uma visão holística da dinâmica do sistema ao levar em consideração todas as

interações entre seus componentes. Relacionando a variável de saída a ser controlada e a variável de entrada a ser perturbada, as FTMFs podem ser empregadas para estimar o desempenho do sistema sob diferentes condições operacionais e, assim, fornecer informações valiosas sobre o seu projeto e ajustes. (FRANKLIN et al., 2015)

Portanto, dada uma malha fechada na qual um processo (P) é submetido a uma perturbação (L), tal que a malha contenha um controlador (C), um atuador (V), um medidor (M), definem-se as seguintes funções de transferência para cada elemento:

$$G_C(s) = \frac{\widehat{SC}(s)}{\widehat{E}(s)} \quad (3.6)$$

$$G_V(s) = \frac{\widehat{V}_m(s)}{\widehat{SC}(s)} \quad (3.7)$$

$$G_P(s) = \frac{\widehat{V}_C(s)}{\widehat{V}_m(s)} \quad (3.8)$$

$$G_L(s) = \frac{\widehat{V}_C(s)}{\widehat{L}(s)} \quad (3.9)$$

$$G_m(s) = \frac{\widehat{V}_{med}(s)}{\widehat{V}_C(s)} \quad (3.10)$$

Tal que a função de transferência em malha fechada é dada por:

$$G_{MF} = \frac{G_L}{1 + G_C G_V G_P G_m} \quad (3.11)$$

Assumindo que o medidor possa ser representado por uma função de primeira ordem e de resposta instantânea:

$$G_m = \frac{Km}{\tau_m s + 1} = Km \quad \text{dado que } \tau_m \rightarrow 0 \quad (3.12)$$

$$Km = \frac{\Delta V_{med}}{\Delta V_c} = \frac{(4 - 20) \text{ mA}}{(3 - 15) \text{ psi}} = 1,33 \text{ mA/psi} \quad (3.13)$$

Já para o elemento de atuação do sistema de controle, também representado por uma função de primeira ordem com constante de tempo tendendo a zero e supondo comportamento linear:

$$K_V = K_{conv} K_{atuador} K_{corpo} \quad (3.14)$$

Como informações acerca do corpo da válvula do sistema a ser avaliado neste projeto são específicas de cada planta, será considerado, para efeitos de simulação, que K_{corpo} equivale a 1. Deste modo:

$$K_{conv} K_{atuador} K_{corpo} = \frac{(3 - 15) \text{ psi}}{(4 - 20) \text{ mA}} \frac{(0 - 1)}{(3 - 15) \text{ psi}} 1 = \frac{(0 - 1)}{(4 - 20) \text{ mA}} 1 = 0,0625 \quad (3.15)$$

Permitindo, finalmente, definir a função de transferência do elemento de atuação como:

$$G_V = \frac{K_V}{\tau_V s + 1} = K_V = 0,0625 \quad \text{dado que } \tau_V \rightarrow 0 \quad (3.16)$$

A função de transferência em malha fechada é então simplificada para:

$$G_{MF} = \frac{G_L}{1 + 0,083125 G_C G_P} \quad (3.17)$$

Como tanto a incidência da perturbação sobre a variável controlada como o efeito da variável manipulada sobre a variável controlada dependem da transmissão de pressão ao longo do comprimento do poço, as funções de transferência G_P e G_L foram descritas como funções de primeira ordem com tempo morto, conforme as equações 3.1 e 3.2.

Assim, é deduzida a função de transferência de malha fechada a ser aplicada nas simulações apresentadas no capítulo 4:

$$G_{MF} = \frac{\frac{K_L e^{-\theta_L s}}{\tau_L s + 1}}{1 + 0,083125 G_C \frac{K_P e^{-\theta_P s}}{\tau_P s + 1}} \quad (3.18)$$

3.5 TÉCNICAS DE SINTONIA DE CONTROLADORES PARA SISTEMAS DE PRIMEIRA ORDEM COM TEMPO MORTO

As técnicas de sintonia de controladores são amplamente utilizadas com o intuito de otimizar o desempenho de um controlador por meio do ajuste de seus parâmetros, como ganho, tempo integral e tempo derivativo. Aplicando tais métodos, o desempenho de um sistema de controle pode ser aprimorado ao proporcionar maiores velocidade, precisão e robustez de resposta. Ademais, os métodos de sintonia de controladores podem reduzir a quantidade de energia consumida por um sistema, melhorando assim sua eficiência. (ST.CLAIR, 1993)

Assim, com o intuito de aprimoramento do controle e comparação de desempenho, duas técnicas de sintonia de controladores serão empregadas neste trabalho. Tais técnicas serão aplicadas em um processo descrito por uma função de transferência de primeira ordem com tempo morto G_P , que, no domínio laplaciano, é dada por:

$$G_P(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (3.19)$$

Em que K é o ganho estático, θ é o tempo morto e τ , a constante de tempo do processo. O conhecimento destes parâmetros é de uma importância, uma vez que estes determinarão também os parâmetros de controle.

3.5.1 Ziegler-Nichols

Em "*Optimum Settings for Automatic Controllers*" (ZIEGLER; NICHOLS, 1942) – um dos trabalhos mais citados na área de controladores automáticos – princípios teóricos de estabilidade e resposta dinâmica são combinados com dados empíricos no desenvolvimento de um método capaz determinar as configurações apropriadas para que um controlador tenha desempenho aproximadamente ótimo de forma simples e direta. Embora outros métodos de sintonia de controladores igualmente ou até mais eficientes tenham sido desenvolvidos desde então, a ampla aplicação do método de Ziegler e Nichols até hoje é justificada por sua simplicidade. (TAN et al., 2006)

Assim, Ziegler e Nichols propõem o seguinte ajuste de parâmetros de controle:

Tabela 4 – Parâmetros para sintonia de controladores segundo Ziegler e Nichols (1942)

| Controlador | Kp | Ti | Td |
|-------------|----------------------|--------------|-------------|
| P | $\tau/(K\theta)$ | - | - |
| PI | $0,9 \tau/(K\theta)$ | $3,33\theta$ | - |
| PID | $1,2 \tau/(K\theta)$ | 2θ | $0,5\theta$ |

3.5.2 Cohen-Coon

O método de sintonia Cohen-Coon é o segundo mais popular depois da técnica de Ziegler-Nichols. No artigo "*Theoretical Consideration of Retarded Control*" (COHEN; COON, 1953), Cohen e Coon utilizaram as equações características correspondentes à aplicação das respostas P, PI e PID para representar graficamente os parâmetros do controlador necessários para obter um grau de estabilidade desejado.

Com isso, foram mostrados os efeitos dos vários parâmetros do controlador e desenvolveu-se um método para o ajuste dos parâmetros dado um grau de estabilidade desejado.

Assim, Cohen e Coon propõem o seguinte ajuste de parâmetros de controle:

Tabela 5 – Parâmetros para sintonia de controladores segundo Cohen e Coon (1953)

| Controlador | Kp | Ti | Td |
|-------------|---|---|---|
| P | $\frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta} \left(1 + \frac{\theta}{3\tau}\right)$ | - | - |
| PI | $\frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta} \left(0,9 + \frac{\theta}{12\tau}\right)$ | $\theta \left[\frac{30 + 3(\theta/\tau)}{9 + 20(\theta/\tau)} \right]$ | - |
| PID | $\frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta} \left(\frac{4}{3} + \frac{\theta}{4\tau}\right)$ | $\theta \left[\frac{36 + 6(\theta/\tau)}{13 + 8(\theta/\tau)} \right]$ | $\theta \left[\frac{4}{11 + 2(\theta/\tau)} \right]$ |

4 RESULTADOS

O simulador baseado em tabela de busca desenvolvido no presente trabalho permite ao usuário simular todos os cenários apresentados anteriormente, em malha aberta ou em malha fechada.

Para todas as simulações, foi empregado o *software* matemático MATLAB na versão R2020a, permitindo a construção de um simulador baseado em tabelas de busca. O código desenvolvido encontra-se disponível no Apêndice A e permite ao usuário simular uma ampla gama de cenários em malha aberta ou em malha fechada.

4.1 SIMULADOR DE PERFURAÇÃO DE POÇOS

A lógica do algoritmo desenvolvido no presente trabalho é ilustrada pela Figura 7, na qual há duas rotas de funcionamento: uma para o sistema em malha aberta (sem controle) e outra para o sistema em malha fechada (com controle).

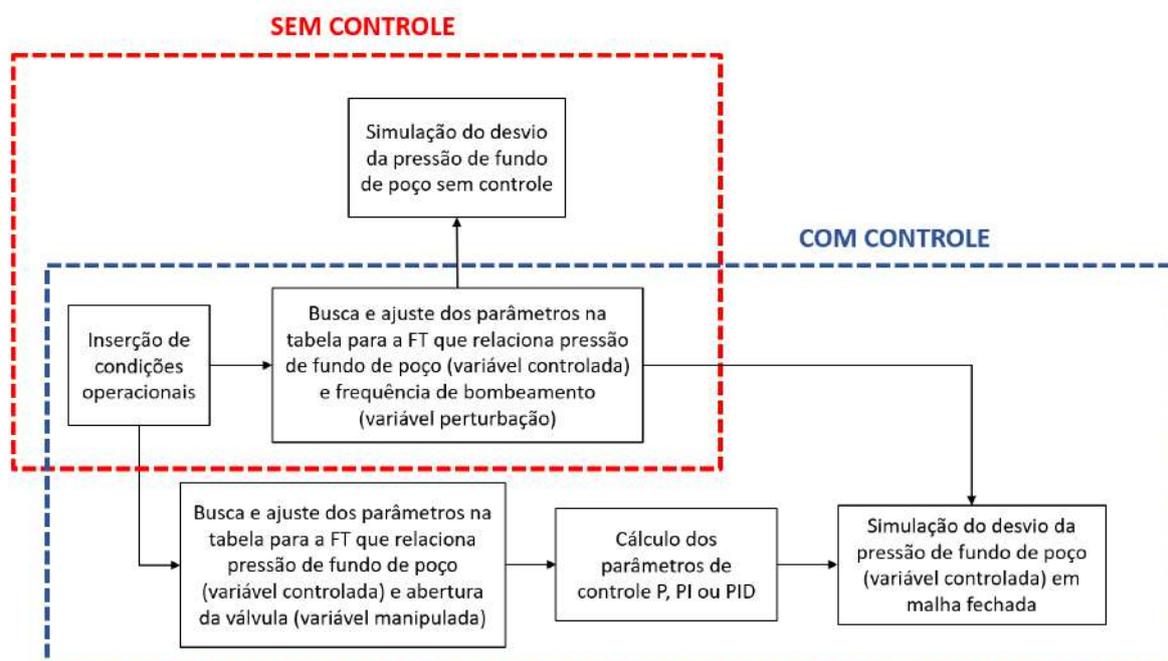


Figura 7 – Rota realizada pelo simulador nos casos com e sem controle.

Primeiramente, solicita-se que o usuário indique se a frequência de bombeamento está aumentando ou diminuindo, a profundidade do poço, o índice de abertura da válvula

de estrangulamento no momento da incidência da perturbação e a maior frequência da bomba – isto é, a frequência final se a vazão estiver aumentando ou a vazão inicial se a vazão estiver diminuindo.

Com o intuito de possibilitar a abordagem de ganho programado por meio da definição de diferentes funções de transferência de acordo com as condições operacionais especificadas, foram definidas no código as tabelas de busca contendo os valores e limites obtidos experimentalmente por VEGA et. al (2016).

Para todos os casos adota-se, como no procedimento experimental, a frequência mínima de bombeamento equivalente a 15 Hz. Ademais, para evitar extrapolações, consideram-se apenas os intervalos experimentalmente aplicados da abertura da válvula (25% a 55%) e de frequência máxima de bombeamento na perturbação degrau (30 Hz a 60 Hz).

Por sua vez, a indicação sobre o aumento ou diminuição da frequência de bombeamento permite o ajuste do sinal da função de transferência, o que se faz necessário uma vez que se tem apenas o valor absoluto do degrau aplicado sobre a frequência de bombeamento.

Com os dados fornecidos, é realizada a busca pelos valores de ganho, tempo morto e constante de tempo para tais condições operacionais. Ademais, se não houver correspondência exata entre os valores inseridos e as condições explicitadas na tabela de busca, é realizada uma interpolação linear para que se obtenha um valor aproximado de cada parâmetro das funções de transferência do modelo.

Observa-se que, no caso sem controle, esta busca é realizada apenas na Tabela 1, a qual possui os parâmetros para a função de transferência G_L , isto é, aquela que relaciona a pressão de fundo de poço e a perturbação sobre a frequência de bombeamento.

Já para os cenários com controle, são realizadas buscas na Tabela 1, para a definição de G_L , e na Tabela 2, para a definição da função de transferência G_P , que relaciona a pressão de fundo de poço (variável controlada) ao índice de abertura da válvula (variável manipulada).

A partir dos valores obtidos para G_P , o algoritmo calcula os parâmetros de controle segundo Ziegler-Nichols e Cohen-Coon para cada técnica de controle, conforme as tabelas 4 e 5.

Por fim, o algoritmo simula e representa graficamente o comportamento dinâmico da pressão de fundo de poço para a perturbação na frequência de bombeamento inserida.

Em função do grande número de cenários disponibilizados pelo simulador desenvolvido

no presente trabalho, optou-se por apresentar e discutir os resultados das simulações para dois cenários específicos e distintos. Sendo assim, foram simuladas condições, em malha aberta e em malha fechada, para um poço de 6000 m de profundidade sofrendo uma diminuição na frequência de bombeamento de 60 Hz para 15 Hz. A Tabela 6 apresenta os dois casos analisados, definindo-se um estado estacionário inicial com abertura da válvula de estrangulamento em 25% e 55% para os casos A e B, respectivamente.

Tabela 6 – Cenários trabalhados nas simulações.

| Caso | Índice inicial de abertura da válvula de estrangulamento |
|------|--|
| A | 25% |
| B | 55% |

Tal que a mesma perturbação é aplicada a uma mesma profundidade, sendo a abertura da válvula no instante da incidência da perturbação a única distinção entre os casos.

4.2 ESTUDO DE CASO EM MALHA ABERTA

Para o sistema sem controle nos casos A e B, foram encontrados os parâmetros de G_L apresentados na Tabela 7:

Tabela 7 – Parâmetros obtidos em cada caso na simulação em malha aberta.

| Caso | Ganho estático (psi/Hz) | Constante de Tempo Ajustada (s) | Tempo Morto Ajustado (s) |
|------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| A | 3,187 | 60 | 44 |
| B | 1,248 | 78 | 47 |

A Figura 8 apresenta as curvas obtidas para cada caso trabalhado em uma situação sem controle, representando o comportamento dinâmico da pressão de fundo de poço para uma perturbação incidida na superfície em $t = 0s$.

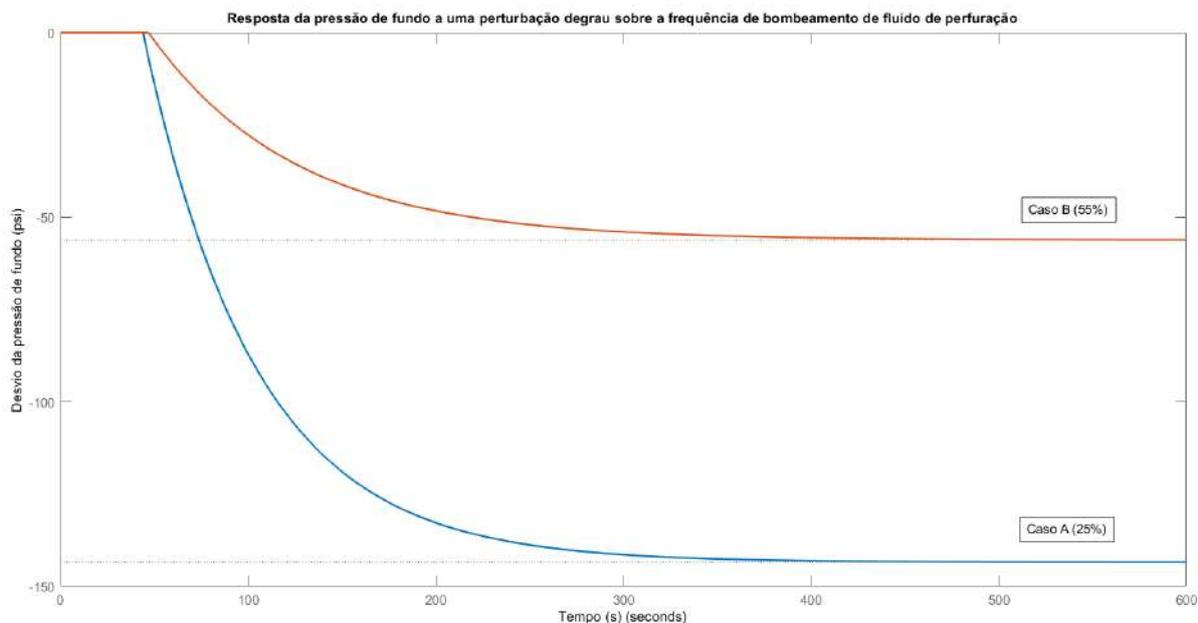


Figura 8 – Comportamento dinâmico da pressão de fundo de poço nos casos A e B.

Adicionalmente, a Figura 8 evidencia a importância de reproduzir as não linearidades do sistema, haja vista que, para uma mesma perturbação, a pressão de fundo de poço apresentou comportamentos bastante distintos para cada caso. Para o caso A, em que a válvula estava 25% aberta no momento de incidência da perturbação, foi observado maior ganho (3,187 psi/Hz) e menor tempo de resposta (300 segundos após a passagem do tempo morto). Em contrapartida, a maior abertura da válvula no caso B proporcionou menor ganho (1,248 psi/Hz) e tempo de resposta mais lento (390 segundos após a passagem do tempo morto).

Estas observações condizem com o esperado, uma vez que, quanto menor é a abertura da válvula, mais complexa é a dinâmica de fluxos do sistema, sendo provocado um *loop* de interações *feedback* entre seus componentes. Com isso, o sistema se torna menos estável e mais sensível a perturbações. (STROGATZ, 2019)

4.3 ESTUDO DE CASO EM MALHA FECHADA

4.3.1 Controle Proporcional

Os cenários A e B foram simulados com controle proporcional, aplicando as relações propostas por Ziegler & Nichols (1942) e Cohen & Coon (1953). A Tabela 8 apresenta o ganho estático e o *offset* observado em cada um destes cenários:

Tabela 8 – Parâmetros obtidos em cada caso na simulação sem controle.

| Caso | $K_{p_{ZN}}$ | $Offset_{ZN}$ | $K_{p_{CC}}$ | $Offset_{CC}$ |
|------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| A | 4,4901 | 118,0 psi | 5,0698 | 115,0 psi |
| B | 2,0045 | 51,2 psi | 2,3064 | 50,5 psi |

As Figuras 9 e 10 ilustram o desvio da pressão de fundo de poço ao longo do tempo nos casos A e B, respectivamente, para as duas técnicas de sintonia e em malha aberta. Deste modo, verifica-se que o ajuste de Cohen-Coon gerou menor *offset* em ambos os cenários.

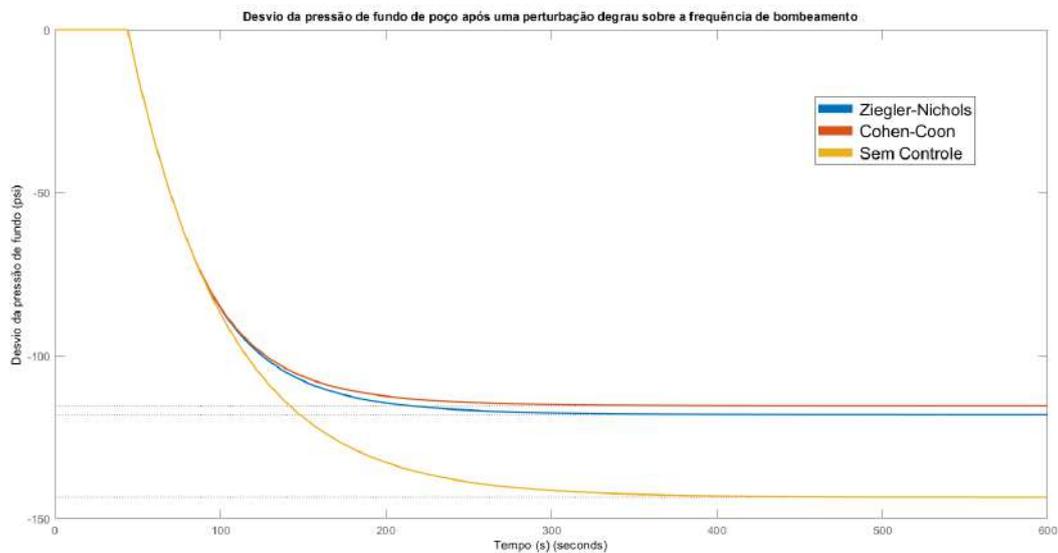


Figura 9 – Desvio de pressão de fundo de poço com controle proporcional no cenário A.

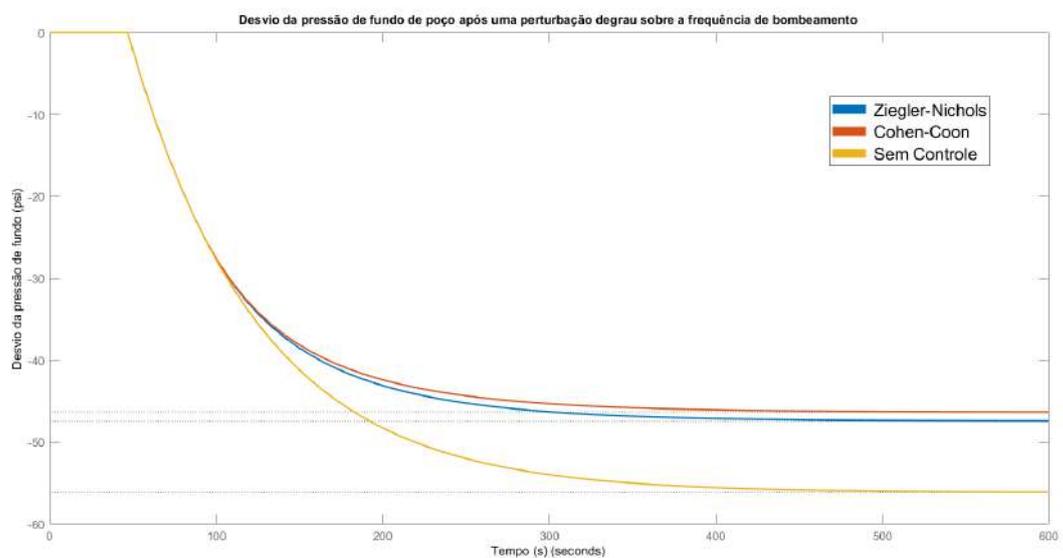


Figura 10 – Desvio de pressão de fundo de poço com controle proporcional no cenário B.

Todavia, para ambas as técnicas de sintonia, o controle P apresentou desempenho insatisfatório, gerando valores de *offset* equivalentes a aproximadamente 80% do desvio que seria provocado no sistema sem controle. Esta ação corretiva, especialmente para operações com janelas estreitas de tolerância de pressão, é insuficiente para o método de pressão de fundo constante.

4.3.2 Controle Proporcional-Integral

Os casos A e B foram simulados com controle proporcional-integral, aplicando as relações propostas por Ziegler & Nichols (1942) e Cohen & Coon (1953). A Tabela 9 indica os parâmetros de ganho proporcional e tempo integral obtidos em cada técnica.

Tabela 9 – Parâmetros obtidos em cada caso na simulação com controle PI.

| Caso | K_{pZN} | K_{pCC} | T_{iZN} (s) | T_{iCC} (s) |
|------|-----------|-----------|---------------|---------------|
| A | 4,0411 | 4,1860 | 59,94 | 33,49 |
| B | 1,8041 | 1,8795 | 69,93 | 36,51 |

A Figura 11 ilustra o desvio da pressão de fundo de poço ao longo do tempo nos casos A e B, permitindo observar que a presença da ação integral leva ao anulamento do *offset* – o que necessariamente não ocorre no controle puramente proporcional.

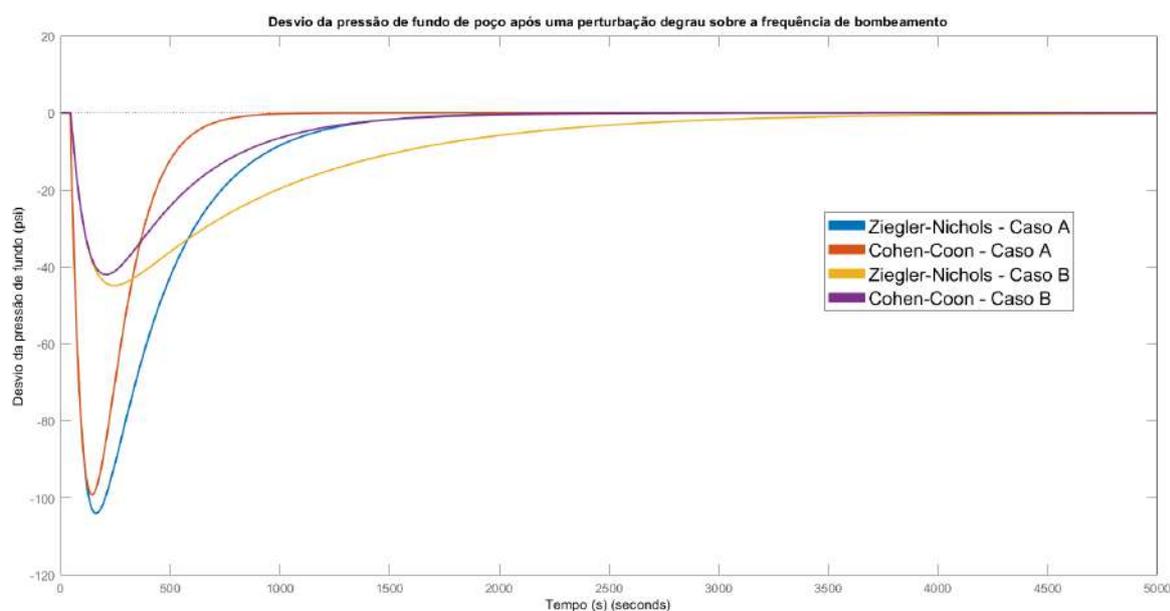


Figura 11 – Desvio de pressão de fundo de poço nos casos A e B com controle PI ajustado por Ziegler-Nichols e por Cohen-Coon.

Destaca-se que o ajuste de Cohen-Coon apresentou respostas significativamente mais rápidas em ambos os casos, tal que os ajustes de Ziegler-Nichols levaram os sistemas a atingirem um novo estado estacionário de 10 a 20 minutos após os ajustes de Cohen-Coon.

Em ambos os casos trabalhados, nota-se que o tempo integral segundo Cohen-Coon foi significativamente menor, equivalendo aproximadamente à metade do tempo integral dado por Ziegler-Nichols. Como o tempo integral determina a taxa na qual o controlador ajusta sua variável de saída para redução do erro, é esperado que o sistema de controle PI com menor T_i – isto é, o de Cohen-Coon – tenha resposta mais rápida.

4.3.3 Controle Proporcional-Integral-Derivativo

Os casos A e B foram simulados com controle proporcional-integral-derivativo, aplicando as relações propostas por Ziegler & Nichols (1942) e Cohen & Coon (1953). A Tabela 10 apresenta os parâmetros de ganho proporcional, tempo integral e tempo derivativo obtidos para cada técnica de sintonia.

Tabela 10 – Parâmetros obtidos em cada caso na simulação com controle PID.

| Caso | K_{pZN} | K_{pCC} | T_{iZN} (s) | T_{iCC} (s) | T_{dZN} (s) | T_{dCC} (s) |
|------|-----------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| A | 5,3881 | 6,4216 | 36,00 | 42,85 | 9,00 | 6,11 |
| B | 2,4054 | 2,8991 | 42,00 | 48,93 | 10,50 | 7,06 |

A Figura 12 ilustra o comportamento da pressão de fundo nos cenários trabalhados com controle PID. Novamente, a presença da ação integral permite que o *offset* seja anulado. Todavia, a correção do erro é realizada mais rapidamente em comparação ao controle PI, haja vista que a ação derivativa permite antecipar desvios na variável medida.

Em comparação às simulações do controle P e PI, os controladores ajustados conforme Ziegler-Nichols e Cohen-Coon apresentaram desempenho mais próximo entre si. Apesar disso, os controladores de Cohen-Coon ainda apresentaram a melhor performance, reagindo alguns segundos antes dos controladores de Ziegler-Nichols.

A Figura 13 permite observar a inflexão no desvio da pressão de fundo para o caso A com maior nível de detalhe, verificando-se que o desvio da pressão de fundo atinge seu valor mínimo em $t = 133$ s para Cohen-Coon e em $t = 135$ s para Ziegler-Nichols, sendo estes os instantes em que a ação de controle tem início.

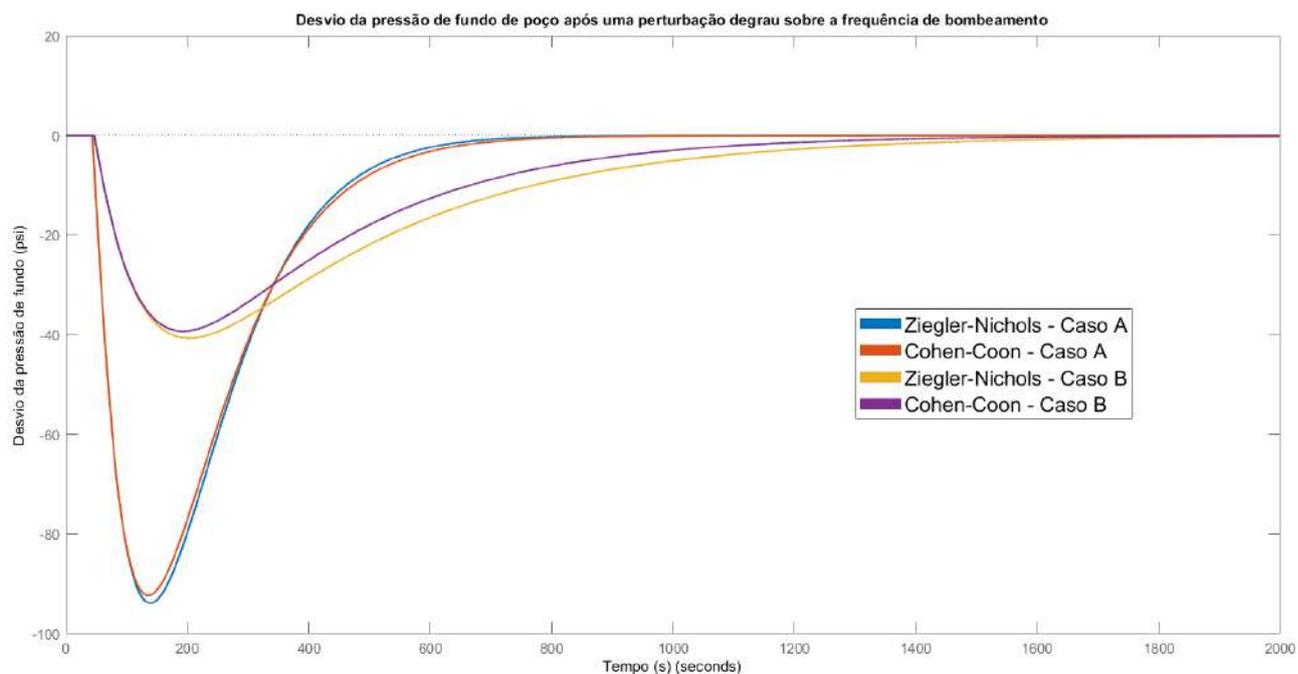


Figura 12 – Desvio de pressão de fundo de poço nos casos A e B com controle PID ajustado por Ziegler-Nichols e por Cohen-Coon.

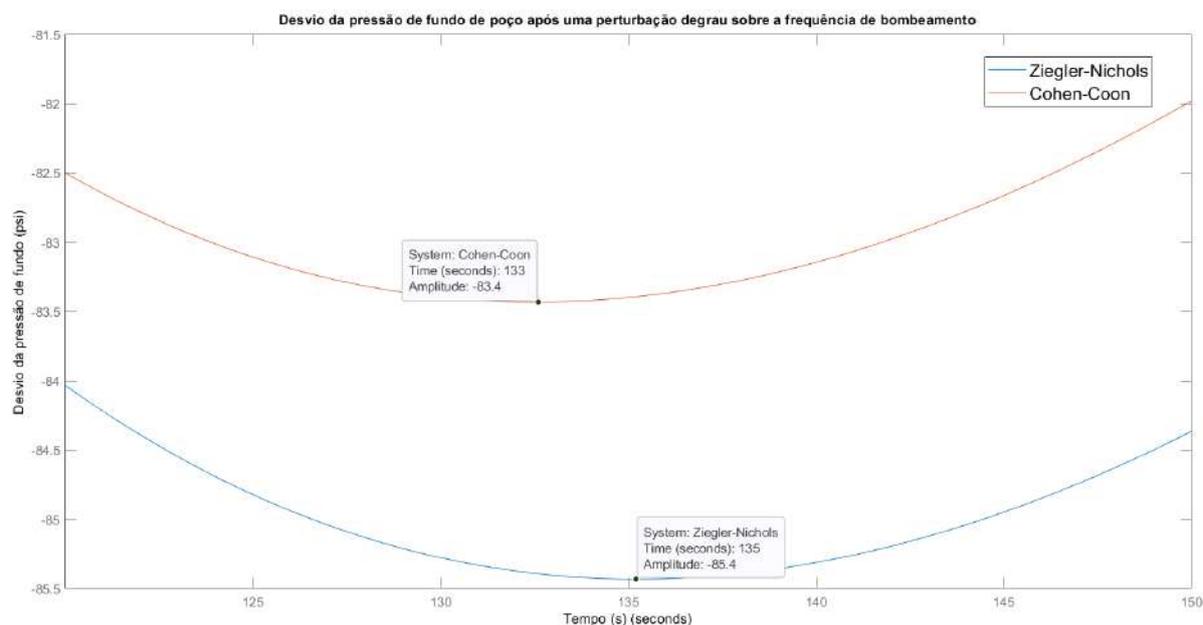


Figura 13 – Inflexão do desvio da pressão de fundo de poço com o início da ação de controle no caso A.

Em oposição ao ocorrido no controle PI, o método de Cohen-Coon gerou os maiores valores de tempo integral, o que diminuiria sua velocidade de resposta em comparação a

Ziegler-Nichols. No entanto, o método de Cohen-Coon também apresentou os menores valores de tempo derivativo, o que aumentaria sua velocidade de resposta. Por conta desta relação entre a ação integral e a ação derivativa em cada sistema, há uma menor discrepância entre a velocidade de reação em cada método em comparação ao controle PI.

4.4 ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS DE SINTONIA E ESTRATÉGIAS DE CONTROLE UTILIZADAS

Os resultados das simulações para o cenário A foram reunidos para permitir a análise comparativa dos efeitos das técnicas de sintonia e estratégias de controle aplicadas no presente trabalho. Selecionou-se o cenário A em função da menor abertura inicial da válvula de estrangulamento em comparação ao cenário B, proporcionando uma ação corretiva de maior amplitude e permitindo a melhor visualização e comparação de seus efeitos. A seguir, são apresentadas discussões acerca da estabilidade e velocidade de correção verificados em cada sistema.

4.4.1 Atraso no início da ação de controle

A malha em *feedback* conforme proposta apresenta um intervalo de tempo significativo entre o ajuste de bombeamento e a estabilização da pressão de fundo de poço. Adotando como exemplos as simulações feitas para o caso A verifica-se que, para uma perturbação sobre a frequência de bombeamento incidida na superfície em $t = 0s$, seu efeito sobre a pressão no fundo do poço de 6000 m de profundidade tem início apenas em $t = 44s$ devido à propagação da pressão ao longo da coluna. A partir de então, supondo uma reação imediata da válvula de estrangulamento, esperam-se mais 18 segundos para que esta ação comece a ter efeito sobre a pressão de fundo de poço.

Deste modo, uma malha de controle *feedback* apresentará, para este problema, um atraso significativo entre a incidência da perturbação e o início da ação de controle devido aos altos valores de tempo morto envolvidos.

4.4.2 Métodos de Sintonia

A Figura 14 ilustra os sistemas de controle simulados no caso A, permitindo observar que aqueles que tiveram seus parâmetros de controle ajustados pelo método de Cohen & Coon apresentaram resposta significativamente mais rápida.

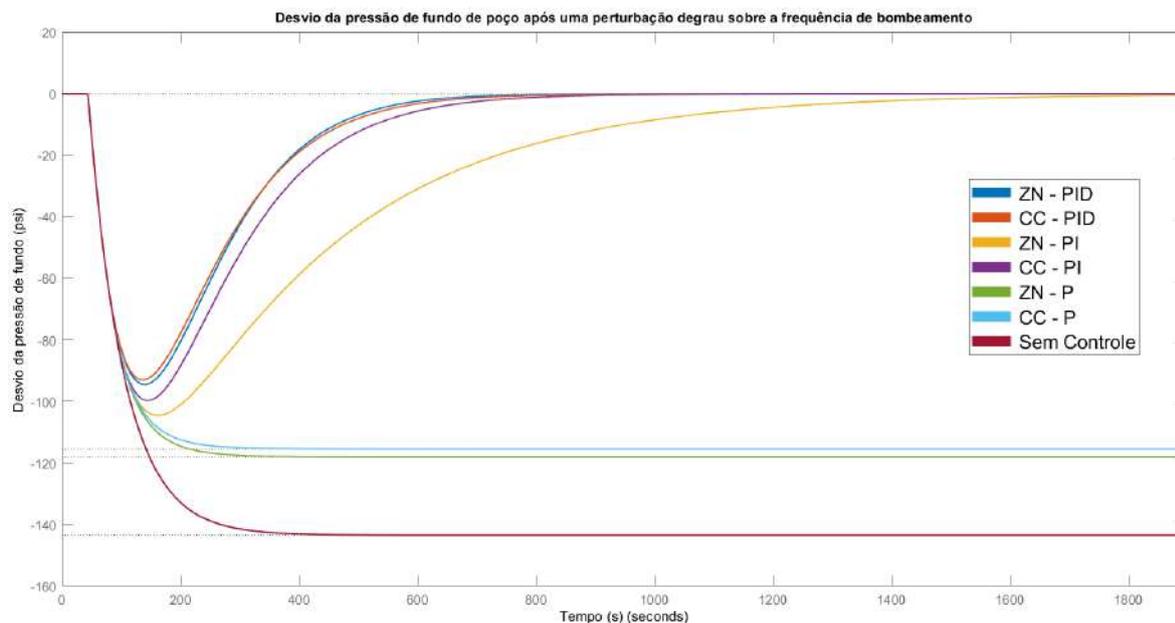


Figura 14 – Comparação da pressão de fundo de poço no caso A para todas as combinações entre técnicas de controle e métodos de sintonia abordados.

A velocidade de correção de desvios na pressão de fundo é um fator decisivo para a mitigação de influxos indesejáveis durante a perfuração de poços, sendo um dos critérios de maior importância na avaliação de sistemas de controle de MPD. (REHM et al., 2009) Deste modo, considera-se que o ajuste de Cohen-Coon proporcionou os melhores resultados para o problema em questão.

O melhor desempenho da técnica de Cohen-Coon é esperado para o problema em questão, pois este usualmente apresenta respostas mais rápidas em processos de tempo morto prolongado quando comparado ao método de Ziegler-Nichols. (SMUTS, 2016)

4.4.3 Técnicas de Controle

Uma vez definido que o método de ajuste de Cohen-Coon apresenta o melhor desempenho no problema em questão, cabe avaliar a performance dos sistemas de controle P, PI e PID sintonizados por este método. A Figura 15 apresenta os desvios de pressão de fundo de poço no caso A para os sistemas de controle P, PI e PID ajustados conforme Cohen-Coon.

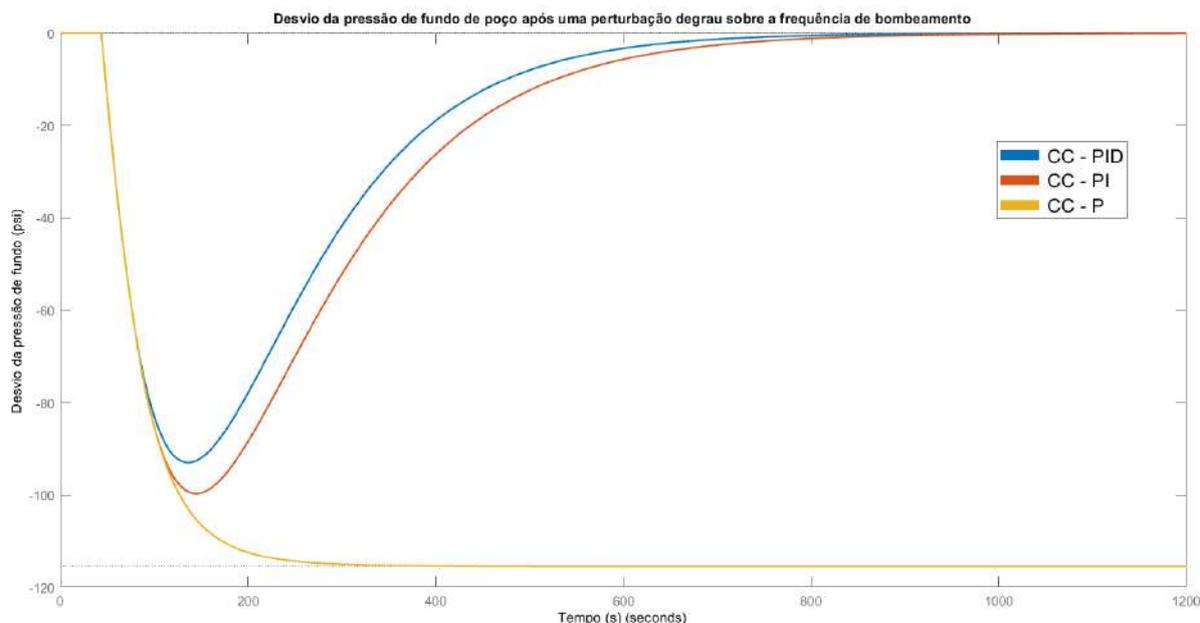


Figura 15 – Comparação de desvio da pressão de fundo de poço no caso A para sistemas de controle P, PI e PID conforme o método de sintonia de Cohen-Coon.

Como a abordagem de MPD estudada tem como objetivo manter a pressão de fundo constante, a presença de *offset* no desvio da pressão determina a exclusão do controle puramente proporcional como alternativa.

Em contrapartida, a ação integral presente nos sistemas de controle PI e PID proporciona o anulamento do *offset*, permitindo que a pressão de fundo de poço seja efetivamente mantida constante.

Ademais, a presença da ação derivativa no sistema de controle PID proporciona, conforme demonstrado, uma resposta ainda mais veloz à perturbação exercida. Por reagir mais rapidamente do que o sistema PI, o sistema PID não apenas corrige o desvio em menor tempo, como também reduz a amplitude máxima do desvio observada no instante da perturbação. Observa-se que, quanto menor é a amplitude do desvio no instante da perturbação, menores são as chances de que a pressão de fundo ultrapasse momentaneamente os limites de sua janela operacional, evitando a perfuração sub-balanceada ou sobre-balanceada.

Assim, por proporcionar o anulamento do *offset*, o menor tempo para correção do erro, a reação mais rápida e o menor desvio no instante da perturbação, o controlador PID é o que apresenta melhor desempenho para o problema em questão.

5 CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÃO

Com o objetivo de desenvolver um sistema de controle para a técnica de *Managed Pressure Drilling*, este trabalho foi desenvolvido com base no método da pressão de fundo de poço constante. Os modelos do comportamento dinâmico entre pressão de fundo de poço e a frequência de bombeamento e do comportamento dinâmico entre a pressão de fundo de poço e o índice de abertura da válvula de estrangulamento foram elaborados a partir de dados experimentais disponibilizados na literatura, os quais foram escalonados para as dimensões do problema.

Organizando os dados experimentais em uma tabela de busca, o simulador considera as não linearidades do processo e, com isso, proporciona maior acurácia na análise de múltiplos cenários em malha aberta ou fechada, com índices de abertura da válvula de estrangulamento entre 25% e 95% e frequências de bombeamento entre 30 e 60 Hz.

Sistemas de controle P, PI e PID foram elaborados e simulados em MATLAB utilizando os métodos de sintonia Ziegler-Nichols (1942) e Cohen-Coon (1953). Como critérios de avaliação de performance foram considerados a agilidade de resposta e o tempo necessário para a correção do erro em cada sistema de controle.

Os sistemas de controle puramente proporcional foram excluídos devido ao *offset* gerado, enquanto os sistemas de controle PI apresentaram baixa velocidade de correção do erro em comparação aos sistemas de controle PID, principalmente no ajuste de Ziegler-Nichols. Quanto aos métodos de sintonia, foram observadas respostas mais rápidas pelo ajuste segundo Cohen-Coon em todos os sistemas de controle.

Portanto, a análise e comparação das respostas dos diferentes sistemas de controle propostos permitiu concluir que a melhor performance para o problema em questão é dada pelo sistema de controle PID ajustado conforme o método de Cohen & Coon.

5.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

O simulador desenvolvido pode ser utilizado com fins didáticos e de treinamento, bem como amplia as possibilidades de trabalhos futuros acerca do controle de pressão de fundo de poço em poços de petróleo. Recomenda-se que futuras pesquisas explorem

a possibilidade de retirar algumas das simplificações empregadas no desenvolvimento do problema com o intuito de elevar a precisão dos resultados e obter respostas mais rápidas. Propõe-se, adicionalmente, a avaliação de outros métodos de sintonia de controladores e emprego de funções de transferência de maior ordem.

Especificamente para diminuição do atraso entre a incidência da perturbação e o início da ação de controle, propõe-se a elaboração de uma malha *feedback-feedforward*, haja vista que é conhecida a relação entre o desvio da frequência de bombeamento e o desvio na pressão de fundo de poço, não sendo necessário aguardar a medição da pressão no fundo do poço para dar início à ação de controle.

REFERÊNCIAS

- CARLSEN, L. A.; NYGAARD, G.; GRAVDAL, J. E.; NIKOLAOU, M.; SCHUBERT, J. Performing the dynamic shut-in procedure because of a kick incident when using automatic coordinated control of pump rates and choke-valve opening. *SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition*, 01 2008.
- COHEN, G. H.; COON, G. A. Theoretical consideration of retarded control. *Journal of Fluids Engineering*, v. 75, p. 827–834, 07 1953.
- CRUMPTON, H. Introduction and well control fundamentals. *Well Control for Completions and Interventions*, p. 1–64, 2018.
- FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A.; SANJAY, H. S. *Feedback control of dynamic systems*. 8. ed. [S.l.]: Pearson, 2015.
- GHORBANI, H.; ABDALI, M. R.; MOHAMADIAN, N.; WOOD, D. A. Petroleum well blowouts as a threat to drilling operation and wellbore sustainability: Causes, prevention, safety and emergency response. *Journal of Construction Materials*, 02 2021.
- GOMES, D.; FRØYEN, J.; FJELDE, K.; BJØRKEVOLL, K. Transient modelling and sensitivity analysis of influxes in backpressure mpd systems. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, OnePetro, 10 2018.
- HOQUE, A. *Definition of: Managed Pressure Drilling (MPD) – Oil and Gas Drilling Glossary - IADCLexicon.org*. 2013. Disponível em: <<https://iadclexicon.org/managed-pressure-drilling-mpd/>>.
- HUQUE, M. M.; IMTIAZ, S.; RAHMAN, A.; HOSSAIN, M. Kick detection and remedial action in managed pressure drilling: a review. *SN Applied Sciences*, v. 2, 06 2020.
- JOHNSON, M. A.; MORADI, M. H. *PID Control: New Identification and Design Methods*. 1. ed. [S.l.]: Springer-Verlag London Limited, 2005. v. 1. 290-292 p.
- NANDAN, A.; PATIENCE, G. S.; BUTT, S. Robust control of managed pressure drilling. *OCEANS Conference*, 09 2014.
- NISE, N. S. *Control systems engineering*. [S.l.]: Wiley, 2019.
- OWEN, E. W. *Trek of the oil finders: a history of exploration for petroleum*. [S.l.]: American Association of Petroleum Geologists, 1975.
- PARASKEVOPOULOS, P. N. *Modern control engineering*. [S.l.]: Marcel Dekker, 2002.
- REHM, B.; SCHUBERT, J.; HAGHSHENAS, A.; PAKNEJAD, A. S.; HUGHES, J. *Managed pressure drilling*. [S.l.]: Gulf Pub, 2009.
- SAFINA, C. The 2010 gulf of mexico oil well blowout: A little hindsight. *PLoS Biology*, v. 9, p. e1001049, 04 2011.

- SHAMMA, J.; ATHANS, M. Analysis of gain scheduled control for nonlinear plants. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 35, p. 898–907, 1990.
- SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. B. *Principles and practice of automatic process control*. [S.l.]: Wiley, 2006.
- SMUTS, J. F. *Process Control For Practitioners*. 1. ed. [S.l.]: OptiControls, 2016.
- ST.CLAIR, D. W. *Controller Tuning and Control Loop Performance*. [S.l.]: ISA, 1993.
- STROGATZ, S. H. *Nonlinear dynamics and chaos : with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. [S.l.]: Crc Press, 2019.
- TAN, W.; LIU, J.; CHEN, T.; MARQUEZ, H. J. Comparison of some well-known pid tuning formulas. *Computers Chemical Engineering*, v. 30, p. 1416–1423, 07 2006.
- VEGA, M. P.; VIEIRA, F. B.; FERNANDES, L. D.; FREITAS, M. G.; RUSSANO, E.; MARTINS, A. L. Smart monitoring and decision making for regulating annulus bottom hole pressure while drilling oil wells. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 33, p. 969–983, 12 2016.
- ZHANG, J. Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches. *Earth-Science Reviews*, v. 108, p. 50–63, 09 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825211000821>>.
- ZHOU, H.; NIU, X.; FAN, H.; WANG, G. Effective calculation model of drilling fluids density and esd for hthp well while drilling. *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference*, SPE-180573-MS, 08 2016.
- ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum settings for automatic controllers. *Journal of Fluids Engineering*, v. 64, p. 759–765, 11 1942.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CÓDIGOS

```
%%%%%%%%%% INPUT %%%%%%%%%%%

% Input das condicoes operacionais
SinalInput = input('A frequencia de bombeamento esta
    aumentando (1) ou diminuindo? (0)? '); %Ajuste do sinal na
    FT
ProfundidadeInput = input('Indique a profundidade do poço em
    metros: '); % Pede a profundidade do poço para scale-up
ChokeInput = input('Indique a abertura da valvula de
    estrangulamento (0.25 - 0.55): '); % Pede a abertura da
    valvula
BombaInput = input('Indique a frequencia maxima da bomba
    (30-60 Hz): '); % Pede a frequencia da bomba
SistemaControle = input('Indique o sistema de controle a ser
    empregado (P, PI ou PID) ', 's'); % Pede o sistema de
    controle

% Ajuste do sinal

if SinalInput == 1
    Sinal = -1;
elseif SinalInput == 0
    Sinal = 1;

end
```

```
%%%%%%%%%% DETERMINACAO DE GL %%%%%%%%%%%
```

```
% Definicao dos pontos de quebra
```

```
Choke_L = [0.25, 0.35, 0.45, 0.55, 0.65, 0.75, 0.95]; %
```

```
    Pontos de quebra da abertura da valvula de estrangulamento
```

```
Bomba_L = [30, 40, 50, 60]; % Pontos de quebra da frequencia  
    maxima da bomba
```

```
% Definindo tabelas de ganho, tempo morto e constante de  
    tempo para cada cenario
```

```
Ganho_Busca = [2.299 1.281 0.926 0.723 0.519 0.443 0.389;  
    2.872 1.782 1.259 0.908 0.678 0.544 0.458; 3.063 2.141  
    1.524 1.087 0.815 0.657 0.542; 3.187 2.362 1.726 1.248  
    0.927 0.749 0.628];
```

```
TempoMorto_Busca = [0.027 0.023 0.024 0.019 0.018 0.017  
    0.019; 0.037 0.036 0.034 0.030 0.026 0.028 0.029; 0.043  
    0.041 0.039 0.038 0.038 0.039 0.038; 0.044 0.047 0.046  
    0.047 0.046 0.046 0.045];
```

```
ConstanteDeTempo_Busca = [0.023 0.024 0.021 0.025 0.021 0.023  
    0.019; 0.012 0.017 0.017 0.018 0.019 0.017 0.015; 0.008  
    0.011 0.015 0.015 0.015 0.015 0.014; 0.010 0.012 0.012  
    0.013 0.014 0.014 0.015];
```

```
% Definicao da funcao de transferencia para a perturbacao
```

```
Ganho_L = interp2(Choke_L, Bomba_L, Ganho_Busca, ChokeInput,  
    BombaInput); % Calculo do ganho
```

```
TempoMorto_L = interp2(Choke_L, Bomba_L, TempoMorto_Busca,  
    ChokeInput, BombaInput); % Calculo do tempo morto
```

```
ConstanteDeTempo_L = ProfundidadeInput*interp2(Choke_L,  
    Bomba_L, ConstanteDeTempo_Busca, ChokeInput, BombaInput);
```

```

    % Calculo da constante de tempo
TempoMortoAjustado_L = TempoMorto_L*ProfundidadeInput/6;

s = tf('s');
GL = Sinal*Ganho_L*exp(-TempoMortoAjustado_L*s)/(
    ConstanteDeTempo_L*s + 1);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Choke_P = [0.4, 0.6, 0.7]; %Amplitude de abertura da valvula
Bomba_P = [30, 40, 50, 60];

Ganho_P_Busca = [0.336 0.167 0.143; 0.600 0.344 0.264; 0.861
    0.539 0.412; 1.104 0.745 0.575];
TempoMorto_P_Busca = [0.037 0.033 0.018; 0.028 0.020 0.018;
    0.020 0.022 0.016; 0.021 0.019 0.018];

% Definicao da funcao de transferencia para o processo

AmplitudeChoke = (0.95 - ChokeInput);
Ganho_P = interp2(Choke_P, Bomba_P, Ganho_P_Busca,
    AmplitudeChoke, BombaInput); % Calculo do ganho
TempoMorto_P = interp2(Choke_P, Bomba_P, TempoMorto_P_Busca,
    AmplitudeChoke, BombaInput); % Calculo do tempo morto
ConstanteDeTempo_P = 37 + 0.00473625*(ProfundidadeInput -
    4000); % Calculo com escalonamento da constante de tempo
TempoMortoAjustado_P = TempoMorto_P*ProfundidadeInput/6; %
    Escalonamento do tempo morto

s = tf('s');

```

```
GP = Ganho_P*exp(-s*TempoMortoAjustado_P)/(ConstanteDeTempo_P
*s+1);

if strcmp(SistemaControle, 'P')
    Kp_ZN = (ConstanteDeTempo_P/(Ganho_P*TempoMortoAjustado_P
));
    Kp_CC = (ConstanteDeTempo_P/(Ganho_P*TempoMortoAjustado_P
))* (1+TempoMortoAjustado_P/(3*ConstanteDeTempo_P));
    Ti_ZN = 0;
    Ti_CC = 0;
    Td_ZN = 0;
    Td_CC = 0;

elseif strcmp(SistemaControle, 'PI')
    Kp_ZN = 0.9*(ConstanteDeTempo_P/(Ganho_P*
TempoMortoAjustado_P));
    Kp_CC = (ConstanteDeTempo_P/(Ganho_P*TempoMortoAjustado_P
))* (0.9+TempoMortoAjustado_P/(12*ConstanteDeTempo_P));
    Ti_ZN = 3.33*TempoMortoAjustado_P;
    Ti_CC = TempoMortoAjustado_P*((30+3*(TempoMortoAjustado_P
/ConstanteDeTempo_P))/(9+20*(TempoMortoAjustado_P/
ConstanteDeTempo_P)));
    Td_ZN = 0;
    Td_CC = 0;

elseif strcmp(SistemaControle, 'PID')
    Kp_ZN = 1.2*(ConstanteDeTempo_P/(Ganho_P*
TempoMortoAjustado_P));
    Kp_CC = (ConstanteDeTempo_P/(Ganho_P*TempoMortoAjustado_P
))* ((4/3)+TempoMortoAjustado_P/(4*ConstanteDeTempo_P))
;
    Ti_ZN = 2*TempoMortoAjustado_P;
```

```

Ti_CC = TempoMortoAjustado_P*((36+6*(TempoMortoAjustado_P
    /ConstanteDeTempo_P))/(13+8*(TempoMortoAjustado_P/
    ConstanteDeTempo_P)));
Td_ZN = 0.5*TempoMortoAjustado_P;
Td_CC = TempoMortoAjustado_P*(4/(11+2*(
    TempoMortoAjustado_P/ConstanteDeTempo_P)));

else
    MensagemErro =('Escolha um sistema P, PI ou PID');
    disp(MensagemErro)
end

% Definicao das funcoes de transferencia
Gc_ZN = pidstd(Kp_ZN, Ti_ZN, Td_ZN); % Controlador de Ziegler
    -Nichols
Gc_CC = pidstd(Kp_CC, Ti_CC, Td_CC); % Controlador de Cohen-
    Coon
GV = 0.0625; % FT da valvula
GM = 1.33; % FT do medidor
GMF_ZN = feedback(Gc_ZN*GV*GP*GM, 1); % Funcao de
    transferencia em malha fechada com Ziegler-Nichols
GMF_CC = feedback(Gc_CC*GV*GP*GM, 1); % Funcao de
    transferencia em malha fechada com Cohen-Coon

% Aplicacao da perturbacao sobre a FTMF

Perturb = (BombaInput - 15);
Resposta_ZN = Perturb*GL*GMF_ZN;
Resposta_CC = Perturb*GL*GMF_CC;

```

```
% Plot do desvio da pressao de fundo de poco com o tempo
t = 0:0.1:3000;
figure
step(-GL*Perturb+Resposta_ZN,t)
hold on
step(-GL*Perturb+Resposta_CC,t)
title('Desvio da pressao de fundo de poco depois de uma
      perturbacao degrau sobre a frequencia de bombeamento')
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Desvio da pressao de fundo (psi)')
legend('Ziegler-Nichols', 'Cohen-Coon')
```