

Bernardo Ordoñez

**PROPOSTA DE CONTROLE DE OPERAÇÃO DE
POÇOS COM BOMBEIO MECÂNICO ATRAVÉS DA
PRESSÃO DE FUNDO**

FLORIANÓPOLIS

2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS

**PROPOSTA DE CONTROLE DE OPERAÇÃO DE
POÇOS COM BOMBEIO MECÂNICO ATRAVÉS DA
PRESSÃO DE FUNDO**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia
de Automação e Sistemas.

Bernardo Ordoñez

Florianópolis - Junho de 2008.

PROPOSTA DE CONTROLE DE OPERAÇÃO DE POÇOS COM BOMBEIO MECÂNICO ATRAVÉS DA PRESSÃO DE FUNDO

Bernardo Ordoñez

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas, Área de Concentração em *Controle, Automação e Sistemas*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina.’

Orientador Ubirajara Franco Moreno

Prof. Eugênio de Bona Castelan Neto
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ubirajara Franco Moreno
Presidente

Prof. Dr. Eduardo Camponogara

Prof. Dr. Valter Júnior de Souza Leite

Eng. Dr. Manuel de Almeida Barreto Filho

AGRADECIMENTOS

A meus pais Ana e Daniel que sempre apoiaram minha educação com bastante dedicação, e mais, não posso pedir.

A minha irmã Manuela, pelo simples laço fraternal que nos une, o que muito significa para mim.

Aos amigos e camaradas do "Sindicato do LCMI", que sempre se fez presente em eventos esportivos (campeão do JECA 2007.2), churrascos, aniversários, hora do café... é um prazer conviver com estas pessoas!

A meu amigo Helton pelo convívio salutar, e muitas vezes divertido. E também outro grande amigo Rodrigo, pela grande receptividade na Ilha.

Aos professores e funcionários do DAS e especialmente ao professor Ubirajara pela orientação, incentivo e constantes conversas gerais.

A equipe do Projeto GeDIG, especialmente aos professores Eduardo e Agostinho pelo apoio e entusiasmo no desenvolvimento do projeto, e também ao colega Andrés Codas, parceiro de bombeio mecânico com muita ajuda e vontade de trabalhar.

Ao CENPES pelo auxílio financeiro, em especial os engs. Alex Teixeira e Sthener Campos.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas.

PROPOSTA DE CONTROLE DE OPERAÇÃO DE POÇOS COM BOMBEIO MECÂNICO ATRAVÉS DA PRESSÃO DE FUNDO

Bernardo Ordoñez

Junho/2008

Orientador: Ubirajara Franco Moreno

Área de Concentração: Controle, Automação e Sistemas

Palavras-chave: Elevação Artificial, Bombeio Mecânico, Carta Dinamométrica, Pressão de Fundo e Controle *Gain-Scheduling*

Número de Páginas: 1 + 84

Neste trabalho sobre o sistema de elevação artificial por bombeio mecânico é avaliada a contribuição que a pressão de fundo pode aportar ao sistema de controle de unidades de bombeio. Com o desenvolvimento de uma nova classe de sensores de fundo baseados em tecnologia de fibra óptica e custo reduzido surge a possibilidade de aplicar novas estratégias de controle, e neste trabalho, é proposto o controle VSD (*Variable Speed Drive*) com sintonia através de *gain-scheduling* para o controle dinâmico do nível no anular, o qual tem forte influência sobre a produção de óleo. Como proposta final utilizam-se em conjunto as informações da carta e pressão de fundo para o controle sobre unidades de bombeio mecânico, o que possibilita trabalhar em um ponto ótimo de operação e diminuir os gastos com manutenção. Para a simulação dos algoritmos de controle foi desenvolvido um simulador para o processo de bombeio mecânico que faz parte de uma plataforma de trabalho que conta também com um CLP (onde estão implementados os algoritmos de controle) conectados através de tecnologia OPC, caracterizando assim, uma situação com condições semelhantes aos campos de produção.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Systems and Automation Engineering.

PROPOSAL OF SUCKER-ROD PUMPING SYSTEMS CONTROL USING BOTTOM HOLE PRESSURE

Bernardo Ordoñez

June/2008

Advisor: Ubirajara Franco Moreno

Area of Concentration: Control, Automation and Systems

Key words: Artificial Lifting, Sucker-Rod Pumping, Dynamometer Cards, Bottom Hole Pressure and Gain-Scheduling Control

Number of Pages: 1 + 84

In this work the sucker-rod pumping system is evaluated in order to evaluate the downhole pressure contribution in the pump unit control. With the development of a new class of low cost downhole sensors based in optical-fiber technology, new control strategies could be applied, and, a control framework using the downhole pressure combined with a Variable Speed Drive (VSD) structure and gain-scheduling tuning is proposed to the dynamic level control of the annular, which has high influence on the oil production. The final proposal used the downhole pressure and dynamometer cards informations to the unit pump control, making possible to operate in the optimized operational point and to reduce the maintenance costs. A hardware in the loop platform was developed for the controlled system simulation, composed by a process simulator (where the dynamic simulator for the sucker-rod pump system is placed) and a CLP (where the control algorithms are placed) connected by OPC technology, which characterizes a situation with similar conditions to the production fields.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Bombeio Mecânico no Contexto GeDIg	3
1.2	Motivação e Proposta de Trabalho	4
1.3	Trabalhos Relacionados	6
1.4	Organização do Trabalho	10
2	Elevação Artificial por Bombeio Mecânico	13
2.1	Aspectos de Operação	15
2.1.1	Pancada de Fluido	16
2.2	Carta Dinamométrica de Fundo	17
2.3	Modelagem e Simulador do Bombeio Mecânico	20
2.3.1	Descrição do Simulador	21
2.3.2	Dados do Poço de Produção	32
2.3.3	Curvas de Resposta do Simulador	33
2.4	Conclusão	37
3	Operação de Poço com Bombeio Mecânico	39
3.1	Metodologias de Controle	39
3.1.1	Estratégia de Controle <i>Pump-Off</i>	39

3.1.2	Estratégia de Controle VSD	41
3.2	Controle do Sistema de Bombeio Mecânico Utilizando a CDF	41
3.2.1	Controle <i>Pump-Off</i> Utilizando a Carta Dinamométrica de Fundo	43
3.2.2	Controle VSD Utilizando a Carta Dinamométrica de Fundo	44
3.3	Simulação e Análise dos Resultados	46
3.4	Conclusão	50
4	Proposta de Operação de Poço com Bombeio Mecânico Utilizando a Pressão de Fundo	53
4.1	Controle do Sistema de Bombeio Mecânico Utilizando a Pressão de Fundo	53
4.1.1	Controle <i>Pump-Off</i> Utilizando a Pressão de Fundo	54
4.1.2	Controle VSD Utilizando a Pressão de Fundo	55
4.2	Simulação e Análise dos Resultados	62
4.3	Conclusão	67
5	Proposta de Operação de Poços com Bombeio Mecânico Utilizando a P_{wf} e CDF	69
5.1	Caracterização do Problema Através de Exemplo Ilustrativo	70
5.2	Controle Utilizando Pressão de Fundo e Carta Dinamométrica de Fundo	72
5.3	Simulação e Análise dos Resultados	74
5.4	Conclusão	76
6	Conclusão	77
6.1	Perspectivas de Trabalho	78
6.2	Trabalhos Desenvolvidos	79

Lista de Abreviaturas

Símbolo

<i>UB</i>	:	Unidade de bombeio
<i>CDF</i>	:	Carta dinamométrica de fundo
<i>CDS</i>	:	Carta dinamométrica de superfície
<i>P_{wf}</i>	:	Pressão de fundo (<i>Well flowing pressure</i>)
<i>CPM</i>	:	Ciclos por minuto
<i>VSD</i>	:	Velocidade de bombeio variável (<i>Variable Speed Drive</i>)
<i>GeDig</i>	:	Gerenciamento digital integrado de campos de petróleo e gás
<i>RPC</i>	:	Controlador de bombeio mecânico (<i>Rod pump controller</i>)
<i>POC</i>	:	Controladores <i>pump-off</i> (<i>Pump-off controllers</i>)
<i>DTS</i>	:	Sensoriamento distribuído de temperatura(<i>Distributed temperature sensing</i>)
<i>RGO</i>	:	Razão gás-óleo
<i>BSW</i>	:	Quantidade de água no fluido (<i>Basic sediment and water</i>)
<i>RGL</i>	:	Razão gás-líquido
<i>EPT</i>	:	Curso efetivo do pistão (<i>Effective plunger course</i>)
<i>MPT</i>	:	Curso máximo do pistão (<i>Maximum plunger course</i>)

Lista de Figuras

1.1	Dinâmicas variadas da produção de petróleo	3
1.2	Proposta de controle do poço utilizando P_{wf} e CDF	5
2.1	Sistema de elevação artificial por bombeio mecânico	14
2.2	Representação gráfica do fenômeno da pancada de fluido	17
2.3	Ciclo de bombeio	18
2.4	Carta dinamométrica de fundo	19
2.5	Carta dinamométrica de fundo associada à pancada de fluido	20
2.6	Diagrama de blocos para o simulador de bombeio mecânico	21
2.7	Sistema massa-mola-amortecedor para modelagem da coluna de hastes	23
2.8	Curva de IPR para o modelo linear	26
2.9	Esquema do poço de produção GeDIg CP-1316	29
2.10	Hipóteses de composição do fluido no anular do poço	31
2.11	Plataforma de trabalho	34
2.12	Ensaio sobre o nível de equilíbrio do anular	34
2.13	Ensaio sobre o potencial da vazão de formação do reservatório	34
2.14	Comportamento dinâmico da coluna de hastes	35
2.15	Evolução da pressão de fundo em malha aberta	36
2.16	Evolução da velocidade de bombeio em malha aberta	36

2.17	Evolução do nível do anular em malha aberta	36
2.18	Evolução da vazão de formação em malha aberta	37
3.1	Controle do sistema de bombeio mecânico utilizando a CDF	42
3.2	Determinação do ponto de <i>pump-off</i>	43
3.3	Analogia entre o padrão da pancada de fluido e o enchimento da câmara da bomba	44
3.4	Diagrama de blocos para o controle <i>pump-off</i> utilizando a CDF	44
3.5	Algoritmo de controle <i>pump-off</i> utilizando a CDF	45
3.6	Diagrama de blocos para controle VSD utilizando a CDF	45
3.7	Algoritmo de controle VSD utilizando a CDF	46
3.8	Evolução da P_{wf} para o controle <i>pump-off</i> utilizando a CDF	47
3.9	Evolução do sinal de controle para $v_{bombeio} = 8$ CPM	47
3.10	Evolução da P_{wf} para o controle VSD utilizando a CDF (70%)	48
3.11	Velocidade de bombeio para o controle VSD utilizando a CDF (70%)	49
3.12	Evolução da P_{wf} para o controle VSD utilizando a CDF (95%)	49
3.13	Velocidade de bombeio para o controle VSD utilizando a CDF (95%)	50
4.1	Diagrama de blocos para o controle <i>pump-off</i> utilizando a P_{wf}	55
4.2	Algoritmo de controle <i>pump-off</i> utilizando a P_{wf}	55
4.3	Diagrama de blocos para o controle VSD utilizando a P_{wf}	56
4.4	Ensaio em malha aberta	56
4.5	Métodos de identificação de Ziegler-Nicholls e Hagglund	57
4.6	Parâmetros K e τ para diferentes cenários de reservatório	58
4.7	Efeito do filtro passa-baixas sobre a pressão de fundo	61
4.8	Evolução da P_{wf} para $v_{bombeio} = 8$ CPM - Controle <i>pump-off</i>	63

4.9	Evolução do sinal de controle para $v_{bombeio} = 8$ CPM - Controle <i>pump-off</i>	63
4.10	Evolução de P_{wf} para $v_{bombeio} = 12$ CPM - Controle <i>pump-off</i>	64
4.11	Evolução do sinal de controle para $v_{bombeio} = 12$ CPM - Controle <i>pump-off</i>	64
4.12	Evolução da pressão de fundo utilizando P_{wf} - Controle VSD	65
4.13	Evolução da velocidade de bombeio utilizando P_{wf} - Controle VSD	65
4.14	Comparação entre o tempo de resposta dos controles com P_{wf} e CDF	67
5.1	Diagrama de blocos para integração dos controles	70
5.2	Evolução no nível no anular - Exemplo ilustrativo	71
5.3	Evolução do enchimento da câmara da bomba de fundo - Exemplo ilustrativo	71
5.4	Diagrama de blocos com realimentação da P_{wf} e CDF	72
5.5	Associação entre o nível da pancada de fluido e a nova referência de P_{wf}	73
5.6	Variação de BSW ao longo do tempo	75
5.7	Comportamento do nível no anular frente a mudanças na operação	75
5.8	Comportamento da P_{wf} frente a mudanças na operação	76

Lista de Tabelas

3.1	Índices de produção para o controle <i>pump-off</i> utilizando a CDF	48
3.2	Índices de produção para o controle VSD utilizando a CDF	49
4.1	Limites de frequência para a velocidade de bombeio [CPM]	61
4.2	Índices de produção para o controle <i>pump-off</i> utilizando a pressão de fundo	65
4.3	Índices de produção para o controle VSD utilizando a pressão de fundo	66
4.4	Índices de produção para o controle VSD	67

Capítulo 1

Introdução

O sistema de bombeio mecânico é um método de elevação artificial utilizado em instalações terrestres (termo muitas vezes denominado como *onshore*), e data como umas das primeiras técnicas de elevação utilizadas na indústria do petróleo. Dado este motivo histórico, o sistema de bombeio apresenta um caráter de desenvolvimento mecânico dos seus componentes bastante consolidado, porém, quando atenta-se sobre as estratégias de controle e novas tecnologias de sensores de fundo, existem alguns aspectos passíveis de melhorias com o intuito de incrementar a produção e também diminuir os custos relacionados à manutenção do processo.

Essencialmente, o bombeio mecânico é baseado em um método que transforma um movimento rotativo do motor principal (energia elétrica) em um movimento alternativo através da viga principal, e este por sua vez é transferido para a bomba de fundo pelo conjunto de hastes na forma de um deslocamento vertical que fornece energia mecânica ao fluido propiciando sua elevação até a superfície.

A operação do sistema de bombeio mecânico requer o monitoramento ininterrupto do comportamento da bomba de fundo, já que grande parte dos problemas relacionados ao desempenho da UB ocorre sobre os elementos que constituem a bomba de fundo. Para este monitoramento do sistema as cartas dinamométricas de fundo constituem uma ferramenta bastante conhecida na indústria e representam o comportamento da carga atuante na bomba de fundo vs deslocamento do pistão refletidos na superfície através da coluna de hastes.

A automatização de poços está caracterizada pela utilização de instrumentos e sensores que têm o objetivo de monitorar algumas variáveis de interesse referentes ao processo. No bombeio mecânico, basicamente duas medições estão disponíveis mediante o uso de sensores de carga e posição, são elas: posição e carga referidas à haste polida. Estas duas variáveis correspondem aos dados fornecidos para

a geração da CDS e são medidas na superfície. A carta de fundo é calculada a partir desses dados fornecidos na superfície utilizando modelos para o movimento dinâmico da coluna de hastes. Para o controle do sistema de bombeio é importante contar com sensores de fundo, principalmente sobre a pressão no fundo do poço, já que a propagação de efeitos até a superfície pela coluna de hastes pode sofrer alterações significativas. Sendo assim, vários esforços foram realizados com intuito de obter dados consistentes sobre a pressão de fundo, alguns métodos diretos como sensores e transdutores de pressão, e outros métodos indiretos como modelos e equacionamentos matemáticos [Gibbs, 1963], [Wang, 2001], [Shepherd *et al.*, 1999].

Na indústria petrolífera existem duas principais estratégias de controle, são elas: os controles *pump-off* e VSD. A primeira delas apresenta as limitações de um controle liga e desliga (comportamento dinâmico e erro em regime permanente), e a segunda, permite alterar a característica do bombeio através da variação da velocidade de bombeio, definida em CPM, com a utilização de um inversor de frequência. Os controladores são utilizados fundamentalmente para assegurar o enchimento completo da bomba visando um máximo de produção, evitando assim, problemas causados pelo enchimento parcial da bomba. Estes problemas podem ser a pancada de fluido e desgastes nos componentes da bomba. O desempenho da bomba está associado ao balanço volumétrico de entrada (vazão de formação do reservatório) e saída de fluido (vazão de produção da unidade de bombeio), e também a problemas no funcionamento mecânico da bomba de fundo. Outro fator importante no desempenho da bomba que reflete sobre o controlador, está associado ao ponto de operação relacionado a um nível de fluido no anular. Este ponto de operação é caracterizado pelo enchimento completo da bomba com a menor pressão de fundo possível, o que proporciona uma menor contra pressão sobre os canhoneados do reservatório, e incrementa a vazão de formação. O nível associado a este ponto é próximo à sucção da bomba.

Em maio de 2007 foram realizadas visitas técnicas aos campos de produção de Carmópolis (SE) e Araçás (BA), além de uma participação em um curso sobre a automatização do bombeio mecânico realizado em Taquipe (BA), todos estes campos de produção pertencem a Petrobras. Em Carmópolis está instalado um piloto do projeto GeDIg que conta com seis poços operando com elevação artificial por bombeio mecânico com características próprias, como a completação inteligente e painéis de controle e elétrico localizados na superfície com equipamentos diferenciados, como o inversor de frequência que possibilita trabalhar com a estratégia de controle VSD. Em Carmópolis localiza-se o maior campo de produção terrestre da Petrobras no Brasil. Em Araçás, o campo de produção conta com um sistema automatizado para o bombeio mecânico desenvolvido da unidade da Petrobras na Bahia.

Estas visitas contribuíram bastante para o entendimento do processo geral do bombeio mecânico. Em visitas às oficinas de manutenção constataram-se as dificuldades encontradas na operação no fundo do poço, na qual visivelmente os componentes da bomba de fundo encontravam-se danificados dada a presença de areia, parafina e golpes mecânicos sobre os mesmos, ocasionado pela pancada de fluido. Aspectos importantes sobre as estratégias de controle também foram discutidos, além de obter detalhes acerca das estratégias de controle atualmente empregadas, como o *pump-off*, em discussões ficou ressaltada a importância de medições de fundo de poço na otimização da produção.

1.1 Bombeio Mecânico no Contexto GeDIg

A pesquisa sobre a utilização da pressão de fundo para o controle da operação de poços com bombeio mecânico está inserida no contexto do GeDIg, que caracteriza-se por ter uma visão sistêmica do campo de produção. Dado este caráter colaborativo entre os elementos do campo de produção, pretende-se desenvolver um sistema integrado que incorpore novas medições disponíveis (em especial medições de fundo) e seja capaz de tomar as decisões corretas conforme o cenário avaliado, considerando as diferentes dinâmicas que estão involucradas ao campo de produção, vide Figura 1.1.

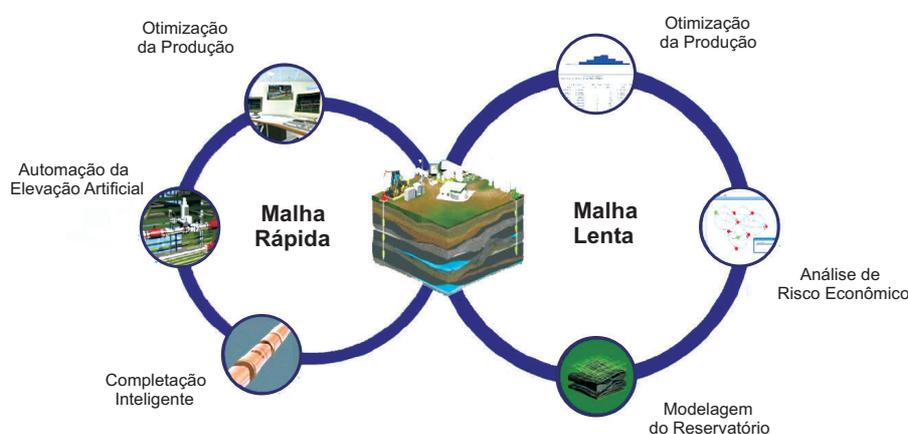


Figura 1.1: Dinâmicas variadas da produção de petróleo

Na Figura 1.1 são mostrados processos que têm dinâmicas diferentes e por isso, é necessário separar e analisar cada malha de acordo com características próprias. O processo de completação inteligente, automação de técnicas de elevação artificial e otimização da produção requerem um acompanhamento diário, e em alguns casos, em tempo real. A pesquisa sobre o poço operando com bombeio mecânico utilizando a pressão de fundo encaixa-se nesse contexto de tempo real. Por outro lado, existem dinâmicas mais lentas, como estudos sobre o histórico da produção, avaliação e mode-

lagem do reservatório e análise de riscos, e por isso, possibilitam um maior tempo de estudo e análise. O objetivo é entender o poço de produção como a união destas dinâmicas, e tomar decisões avaliando todos estes elementos.

O projeto está alinhado com o conceito de poços inteligentes (do termo inglês, *smart wells*), no qual existe um processo de completação, denominado inteligente, que está associado a equipamentos de fundo que proporcionam novas medições sobre pressão, temperatura e composição de fluxo. Neste trabalho ressalta-se a importância que a pressão de fundo pode aportar ao controle. Ainda sobre o GeDIg, cada poço de produção está inserido no contexto de campos inteligentes (do termo inglês, *smart fields*), que além do próprio poço de produção, preocupa-se no controle sobre os equipamentos de superfície e reservatório, que leva a um objetivo final que é a otimização do funcionamento do campo de produção.

1.2 Motivação e Proposta de Trabalho

Nos poços que operam com bombeio mecânico é utilizada como ferramenta principal de controle e monitoramento as cartas dinamométricas de superfície e fundo. Dado o histórico de uso desta ferramenta, admite-se que estas representam um correto diagnóstico sobre o funcionamento dos componentes da bomba de fundo, e portanto, acerca do desempenho de bombeio. Porém, sob o contexto de controle as cartas limitam o desempenho da produção de óleo. Os motivos para tal empecilho baseiam-se no tempo demandado por um algoritmo específico para gerar a carta de fundo, que efetivamente auxilia no controle, e também o custo computacional que envolve o reconhecimento de padrões de cartas, que é baseado em técnicas de inteligência artificial.

Ainda que a geração da carta de fundo e o reconhecimento do padrão sejam realizados com bastante rapidez e disponibilizem a informação da carta em tempo real, a própria proposta que utiliza exclusivamente a carta no controle não permite que a bomba de fundo trabalhe constantemente com enchimento completo, e dado este motivo, acredita-se que existem possibilidades de melhoria no controle com a adição de novas informações sobre outras variáveis envolvidas no processo.

Segundo Vazquez e Fernandes [1999], o monitoramento da pressão de fundo em tempo real permite maximizar a produção de óleo, minimizar os custos operacionais e estender a vida útil dos equipamentos envolvidos diretamente no bombeio mecânico, uma vez que o comportamento dinâmico da pressão de fundo é afetado rapidamente por qualquer discrepância na operação da unidade de bombeio. Existe portanto, uma correlação entre o comportamento da pressão de fundo e a condição de operação da bomba de fundo.

O desenvolvimento de sensores de fundo com baixo custo possibilitam a adição da informação da pressão de fundo (P_{wf}) ao controle do poço de bombeio mecânico para verificar possíveis ganhos na produção de óleo. O objetivo principal é utilizar a pressão de fundo para estimar o nível de fluido no anular, e assim, trabalhar em conjunto com estas duas informações: carta de fundo (associada ao enchimento da câmara do pistão) e pressão de fundo (associada ao monitoramento do nível no anular). A perspectiva sobre esta estratégia híbrida entre P_{wf} e CDF é incrementar a produção de óleo sem a necessidade da pancada de fluido (importante fenômeno que pode acentuar o desgaste dos componentes da bomba de fundo), o que certamente levará a menores custos com a manutenção dos equipamentos.

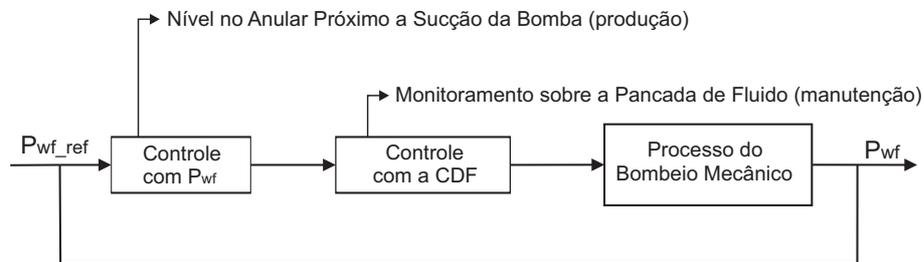


Figura 1.2: Proposta de controle do poço utilizando P_{wf} e CDF

Na Figura 1.2 é ilustrado o cenário descrito anteriormente, mostrando o impacto que a pressão de fundo pode causar no controle do poço de produção. A possibilidade de aliar informações de sensores de superfície e fundo é importante para fundamentar a investigação do bombeio mecânico sobre os conceitos do GeDIg, envolvendo os elementos do campo de produção de forma conjunta com o intuito de incrementar a produção do poço de petróleo.

Dado este caráter investigativo do trabalho, propõe-se:

- Desenvolver um simulador para o bombeio mecânico com baixo custo computacional que possibilite o teste de estratégias de controle;
- Desenvolver um algoritmo de controle para a operação de poço com bombeio mecânico baseado na pressão de fundo;
- Consolidar uma estratégia de controle que utilize de forma conjunta dados da pressão de fundo e carta dinâmométrica de fundo.

1.3 Trabalhos Relacionados

As publicações sobre o sistema de bombeio mecânico são freqüentes no âmbito da indústria do petróleo, assim, elas são basicamente encontradas em periódicos e congressos relacionados a este segmento industrial. Os artigos sobre o processo podem ser divididos em três áreas de interesse: (1) Modelagem do sistema para desenvolvimento do simulador do bombeio mecânico, (2) Operação de poços com bombeio mecânico para contextualizar as principais ferramentas e estratégias de controle utilizadas pela indústria, e (3) Sensoriamento do poço de produção na indústria do petróleo, no qual é realizada uma exposição sobre trabalhos relevantes que envolvem o desenvolvimento da tecnologia de sensores de fundo.

Modelagem do Bombeio Mecânico

O modelo fenomenológico do sistema de bombeio mecânico foi gradativamente melhorado com a adição de termos relacionados à dinâmica do sistema, sempre com intuito de obter condições de simulação próximas à realidade encontrada em poços de produção de petróleo. O avanço das ferramentas computacionais constituiu-se em um importante fator para o refinamento das equações que descrevem o sistema em questão.

O Método de Mill (1930's), um dos primeiros métodos de modelagem, assume um modelo simplificado, no qual se admitem duas equações para situações limites de carga atuante (máxima e mínima) sobre a coluna de hastes submetida apenas às acelerações, além de negligenciar a inércia do fluido. A dinâmica do conjunto de hastes é modelada como um movimento harmônico simples em que se considera a massa da haste concentrada. Uma grande contribuição para a modelagem do sistema é apresentada em Gibbs [1963], no qual é proposto um modelo matemático para o comportamento dinâmico da coluna de hastes, através de uma equação diferencial (equação da onda amortecida) e uma região de condições limites. A discussão do modelo de Gibbs baseia-se em três principais fatores: a equação da onda, o movimento do conjunto de hastes e as condições de operação da bomba de fundo.

O modelo de Gibbs é alvo de estudo em Lea [1991]. Para as forças de amortecimento nas hastes anteriormente atribuídas empiricamente através de um coeficiente que utilizava a velocidade local das hastes, é modelada uma expressão para este coeficiente de amortecimento em função da viscosidade do fluido e diâmetros do pistão, tubulação e hastes. Ainda um outro avanço sobre o comportamento dinâmico do fluido é encontrado em Doty e Schmidt [1983], no qual é proposto um modelo matemático que incorpora a dinâmica da coluna de fluido, incluindo as propriedades físicas

deste, como os efeitos de inércia e viscosidade do fluido. Essas propriedades exerceram um papel importante no estudo do curso do pistão, máximo e mínimo de carga atuante nas hastes, potência do motor e carga atuante na bomba de fundo.

O importante trabalho de Snyder e Bossert [1963] trata de uma simulação completa sobre o sistema do bombeio mecânico. Existiam limitações tecnológicas à época que limitavam a capacidade de processamento, porém, os conceitos básicos sobre grande parte dos fenômenos ocorridos durante o ciclo de bombeio são de grande valia para entendimento do processo, e o acoplamento que existe entre as variáveis de processo.

Operação de Unidades de Bombeio Mecânico

Os controladores industriais estão em sua maioria associados a sistemas automatizados responsáveis por um gerenciamento total do poço de produção, este caráter integrador foi um dos principais impulsores da expansão do uso de controladores automáticos no bombeio mecânico. Existem dois principais tipos de controladores industriais, são eles os controladores *pump-off* e VSD. A escolha por uma das estratégias de controle dá-se por condições de localização dos poços, políticas empresariais, espaço físico e viabilidade no caso dos controladores VSD, entre outros fatores que contribuem na avaliação final, como custos iniciais de instalação e capacidade de produção do poço de petróleo.

Existe uma linha de controladores industriais, denominados RPC ou POC, que utilizam em sua maioria o controle *pump-off* para determinar o tempo de desligamento da unidade de bombeio, cessando assim o movimento da bomba, monitorando as mudanças ocorridas na elaboração das respectivas cartas de fundo para cada ciclo de bombeamento, ou um número determinado de ciclos [Boyer *et al.*, 2007], [Weatherford, 2007]. A razão custo/benefício dos controladores *pump-off* é um dos motivos da sua vasta aplicação nos poços terrestres, e tem sua utilização aconselhada para poços com pouca produção onde um custo inicial em equipamentos mais sofisticados para um controle mais apurado não será convertido em produção. Assim, dada a simplicidade de controle (liga e desliga), a relação custo/benefício fica fortemente evidenciada.

Alguns trabalhos pioneiros com o controle VSD já indicam os benefícios que os inversores de frequência propiciam ao controle da unidade, destacando a estabilidade que o controle proporciona à vazão de saída, mesmo com alguma presença de gás no fluido. Os custos iniciais com a instalação de equipamentos são superados pelos ganhos em produtividade e capacidade de lidar com problemas como a presença de areia ou partículas sólidas no fluido dado a flexibilidade na velocidade de bombeio [Collins e Autrey, 1986].

Sobre o controle VSD, um importante trabalho é realizado em Peterson *et al.* [2006], no qual explana-se a utilização destes controladores em um campo de produção com 100 unidades de bombeio mecânico com intuito de melhorar o comportamento do sistema em aspectos tais como otimização da produção, diminuição dos custos de manutenção e utilização racional de energia elétrica. O resultado foi um incremento médio de 21% da produção de fluido. O controlador também foi capaz de inferir resultados sobre outras características importantes do sistema como problemas nas válvulas de pé e passeio, parâmetros elétricos do motor e o comportamento da bomba.

Existe uma grande quantidade de dados que as CDFs fornecem sobre o estado do sistema e é importante um diagnóstico rápido acerca do comportamento da bomba de fundo. Nesse contexto, técnicas baseadas em inteligência artificial (Sistemas Especialistas, Lógica Fuzzy, Redes Neurais) auxiliam em tempo real o monitoramento remoto do sistema, e uma rápida resposta frente a problemas na unidade possibilita a maximização da produção, redução do custo de operação mínimo e o aumento da vida útil do equipamento [Derek *et al.*, 1988], [Vazquez e Fernandes, 1999].

Existem diversos padrões de cartas identificados na literatura, cada qual associado a determinadas características e efeitos que ocorrem durante o bombeamento. Alguns destes efeitos são: pancada de fluido, interferência de gás na produção, vazamento nas válvulas (passeio ou pé), ancoragem deficiente da coluna de produção, ruptura da coluna de hastes e pistão preso. Porém, quando ocorre a superposição destes efeitos, a classificação da carta dinamométrica é bastante dificultada, já que nestes casos não existem padrões com aplicação genérica. Em Corrêa [1998], para análise do poço, um conjunto de pontos significativos é extraído e avaliado utilizando-se princípios de redes neurais e funções nebulosas, e como resultado, faz-se a comparação dos padrões com as cartas de fundo geradas na coluna de produção. Ainda, em Takacs [2007] é proposta uma técnica alternativa para o processamento de cartas convencionais na qual são utilizados padrões associados a condições normais para inferir as condições de bombeio.

Os controladores têm papel importante na prevenção de problemas na unidade de bombeio. Sobre esses problemas, em Muth e Walker [2001] é tratada a questão da areia nos poços de produção, que é produzida juntamente com hidrocarbonetos e água. Essa areia pode acelerar o desgaste do pistão e da bomba, estes problemas são geralmente resolvidos com freqüentes trabalhos de manutenção, porém, tal processo tem alto custo já que é necessário desligar a UB e utilizar o trabalho com sonda. Outros custos operacionais relacionados ao bombeio mecânico são os reparos necessários relacionados às hastes e tubulação e revestimento, no qual alguns poços são levados a reparos freqüentemente, tornando-se marginalmente econômicos. Este problema tem efeito acentuado pelos dias de perda de produção [Bommer e Shrauner, 2006].

Em McCoy *et al.* [2003] destaca-se que um dos principais problemas de eficiência é o enchimento incompleto da bomba, isto é causado quando a capacidade da bomba excede a produção do reservatório, ou também existe uma pobre separação de gás na entrada da bomba, e assim, perde-se um pouco de deslocamento útil do pistão devido à interferência do gás. Para operações mais eficientes e utilização de pouca potência, sugere-se trabalhar com a bomba cheia de fluido. O primeiro passo é eliminar qualquer interferência de gás na bomba, e livrar a bomba de problemas mecânicos, e assim, o passo seguinte é otimizar o deslocamento da bomba para remover todo fluido disponível no poço apto para elevação.

Sensoriamento do Poço de Produção na Indústria do Petróleo

O desenvolvimento de uma tecnologia de sensoriamento nos poços de produção que disponibiliza novas informações sobre variáveis principalmente do fundo do poço, tais como pressão, temperatura e fluxo está sob o contexto do GeDIg associado ao conceito de completação inteligente, mas que também pode ser denominado por "poços do futuro", que entre suas várias linhas de pesquisa, trata o sensoriamento de fundo do poço como uma forte área para desenvolvimento, com o objetivo de tornar um poço análogo ao que encontra-se atualmente em processo industrial qualquer em questões de sensores [Knabe *et al.*, 2008], [Mubarak, 2008].

O monitoramento das variáveis em tempo real através de um gerenciamento digital do poço de produção pode ser denominado por vários nomes, porém, ressalta-se a importância dos resultados obtidos sobre a produção de óleo, onde existe preocupação no desenvolvimento de recursos humanos e tecnologia para melhorar a produção e segurança do processo através da correta utilização da informação em tempo real [Cramer, 2008].

Para maiores informações sobre o conceito de GeDIg pode-se procurar em Moisés *et al.* [2008]. Neste trabalho está destacado o campo piloto de Carmópolis onde foi realizada a completação inteligente com quatro medições de temperatura e pressão utilizando sensores de fibra ótica [Pinto *et al.*, 2006]. Este trabalho está baseado nos poços de Carmópolis, e como já mencionada, ainda em fase de pesquisa, foi realizada uma visita técnica ao campo de produção de Carmópolis (SE).

A tecnologia de sensores de fibra ótica na indústria possibilitou uma nova visão acerca de sensores permanentes de fundo de poço já que existe uma medição contínua da variável envolvida no processo que pode auxiliar na tomada de decisão sem a necessidade de parada do poço. A adoção desta tecnologia conta com aceitação cada vez mais consolidada desde sua introdução em meados dos anos 90, e conta principalmente com sensores de fundo para pressão, temperatura e fluxo [Wang *et al.*,

2008], [Smith *et al.*, 2008] . Desde que o primeiro sensor de fibra óptica para pressão e temperatura foi instalado na Europa, 1993, foram desenvolvidos sensores com várias características e capacidades, tais como: DTS, que não necessita equipamentos elétricos/eletrônicos para medição, e suporta condições adversas com grande capacidade de transmissão de dados. Mais especificamente sobre a medição de pressão, foi instalado no Golfo do México em 2000 um sensor sobre o *packer* de produção e até hoje funciona e auxilia no monitoramento do reservatório justificando plenamente sua utilização [Drakeley e Omdal, 2008].

Outra tecnologia surgente no sensoriamento de poços de petróleo envolve os sensores sem fio, que conta com potencial custo-benefício para solução de várias aplicações de produção e exploração. Um sistema de comunicação é capaz também de monitorar variáveis tanto analógicas como digitais em diversos métodos de elevação artificial. São admitidos sistemas que avaliam o enlace de comunicação em relação à quantidade de pacotes perdidos em diferentes ambientes de exploração, outro diferencial que as redes sem fio proporcionam é o baixo custo aliados a sensores de baixa potência que disponibilizam informação de diversas variáveis em diferentes pontos do processo, o que possibilita otimizar a produção e ter maior segurança sobre a evolução do processo [Campos, 2006], [Petersen *et al.*, 2008].

1.4 Organização do Trabalho

A dissertação está fundamentada sob a seguinte estrutura de capítulos brevemente descritos:

- **Capítulo 1 - Introdução**

Neste capítulo é apresentado o tema da dissertação e a motivação para o desenvolvimento do trabalho. Ainda são discutidos alguns artigos relevantes na área da pesquisa, e por fim é mostrada a organização desta dissertação.

- **Capítulo 2 - Elevação Artificial por Bombeio Mecânico**

O funcionamento do sistema elevação artificial por bombeio mecânico é apresentado neste capítulo, no qual se ressaltam as ferramentas e os fenômenos associados ao processo. Uma modelagem do processo é desenvolvida, o que culmina na proposta de um simulador com objetivo específico de testar as estratégias de controle. Ainda, uma importante discussão sobre a estimação do nível no anular utilizando a pressão de fundo é tratada no capítulo.

- **Capítulo 3 - Operação de Poço com Bombeio Mecânico**

As estratégias de controle VSD e *pump-off* são abordadas destacando-se as principais características de cada uma. Uma emulação para o controle utilizando a carta dinamométrica de fundo é proposta, e os resultados alcançados são mostrados e discutidos.

- **Capítulo 4 - Proposta de Operação de Poços com Bombeio Mecânico Utilizando a Pressão de Fundo**

Neste capítulo são tratados os principais aspectos de cada estratégia de controle baseada exclusivamente na pressão de fundo (P_{wf}). O controle *pump-off* é discutido sob a perspectiva da pressão de fundo, e uma metodologia de síntese para os controladores é desenvolvida considerando o controle VSD associado a uma sintonia *gain scheduling*. Os resultados obtidos são avaliados e comparados com os do capítulo anterior.

- **Capítulo 5 - Proposta de Operação de Poços com Bombeio Mecânico Utilizando a P_{wf} e CDF**

No capítulo é proposta uma estratégia de controle híbrido baseado nos dados da pressão de fundo e carta dinamométrica, onde a pressão de fundo permite o controle de nível dinâmico no anular, e a informação da CDF é utilizada na avaliação da estimativa de nível no anular. Por fim, faz-se um estudo sobre a eficiência energética que a pressão de fundo aporta ao controle da unidade de bombeio.

- **Capítulo 6 - Conclusão**

Finalmente, são relatadas as conclusões acerca da introdução da pressão de fundo na operação de poços com bombeio mecânico, algumas perspectivas de trabalhos futuros são apresentadas.

Capítulo 2

Elevação Artificial por Bombeio

Mecânico

Os métodos de elevação artificial têm como objetivo propiciar as melhores condições possíveis para a extração de petróleo, dada pela elevação de fluido do reservatório até a superfície. O reservatório é definido como uma rocha formada por espaços vazios, que definem a porosidade da mesma, que podem estar interconectadas ou não e têm capacidade de armazenar fluido. Em grande parte dos poços de produção, no início da vida produtiva do poço a pressão do reservatório é suficientemente elevada para emergir os fluidos lá presentes, e portanto, é denominado como poço surgente (do termo inglês, *flowing well*). Contudo, dado que exista uma produção contínua ao longo dos anos, a pressão do reservatório decresce impossibilitando a elevação natural do fluido devido às perdas de pressão no caminho de elevação. Neste momento da vida útil do poço, faz-se necessário a utilização de algum método de elevação artificial, que fornecerá de alguma forma energia ao fluido para sua elevação [Takács, 2003], [Filho, 1993].

Entre os métodos de elevação artificial, o presente trabalho aponta na direção do bombeio mecânico, que caracteriza-se pelo baixo custo com investimentos e manutenção, flexibilidade na vazão e profundidade, boa eficiência energética e possibilidade de operar com fluidos com diferentes composições e viscosidades em uma larga faixa de temperatura [Nascimento, 2004], [Campos, 2006].

Para contextualizar as principais características da elevação artificial por bombeio mecânico, o sistema pode ser dividido entre os equipamentos de superfície e fundo, conforme é mostrado na Figura 2.1. A principal característica deste método é transformar a energia elétrica entregue ao motor principal em energia mecânica fornecida para o fluido através da coluna de hastes e bomba de fundo, possibilitando assim, a elevação de fluido até a superfície. Com o intuito de facilitar a explicação

sobre os elementos que constituem o sistema, os mesmos serão apresentados sob a forma de itens com suas respectivas funcionalidades.

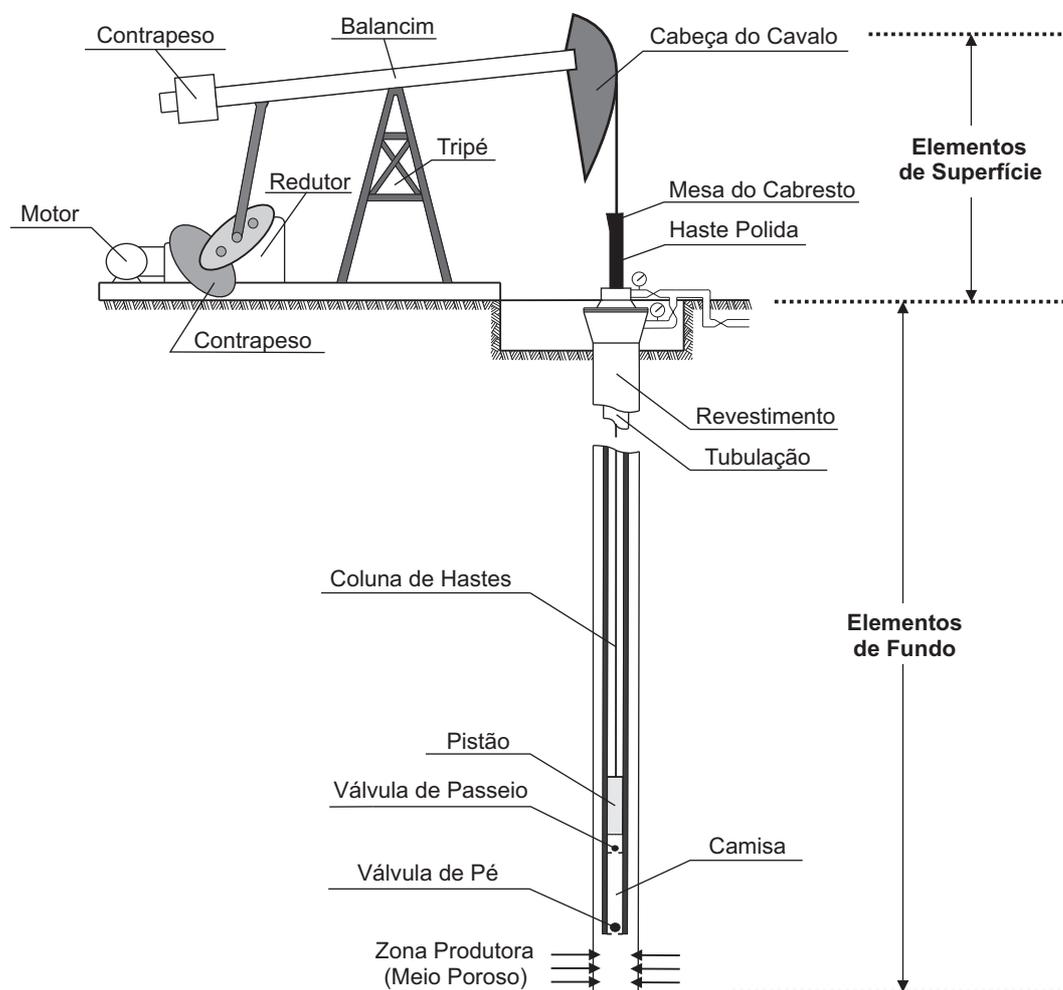


Figura 2.1: Sistema de elevação artificial por bombeio mecânico

- **Elementos de Superfície:**

- Motor: É o elemento responsável por fornecer potência à coluna de hastes através da energia que recebe da rede elétrica. Uma das principais variáveis envolvidas no processo relaciona-se ao motor principal, denominado como CPM da unidade e também, a forma com que se define a velocidade de bombeio;
- Redutor: Reduz a alta velocidade do motor principal para a velocidade de bombeio (CPM);
- Contrapeso: Existe uma diferença de carga exercida na coluna de hastes na sucessão dos movimentos ascendente e descendente e este discrepante comportamento não é aconselhável ao motor. Assim, o contrapeso é utilizado para que o motor não trabalhe com um torque muito

diferente entre estes movimentos. Durante a subida o contrapeso auxilia o motor a levantar toda a coluna de hastes, aliviando um pouco a carga sobre o motor; e no ciclo de descida, a coluna hidrostática é o principal responsável pelo movimento, porém o contrapeso agora aumenta o torque sobre o motor, e assim, durante todo o ciclo de bombeio, o motor trabalhar com um torque equivalente;

- Balancim (ou Viga Principal): Tem importante função de transladar a energia elétrica rotativa do motor para um movimento alternativo da coluna de hastes. Constitui o denominado "cavalinho mecânico" que caracteriza visualmente esta técnica de elevação artificial;

- Haste Polida: Este elemento fica exposto à intempérie, e por isso, tem um acabamento e constituição diferenciados em relação as demais hastes de todo o conjunto que fica abaixo da superfície. Na haste polida encontra-se acoplado o sensor de carga;

- Tripé: É a estrutura mecânica que suporta a viga principal. No tripé está localizado o sensor de posição para o movimento da haste polida, responsável por um dos dados da carta de superfície.

- **Elementos de Fundo:**

- Coluna de Hastes: O conjunto é o elo mecânico entre a UB (superfície) e a bomba de fundo. Através deste elo, a potência do motor é transmitida à bomba de fundo pelo conjunto, dado os atritos existentes sobre este movimento, existe uma perda da potência fornecida pelo motor na superfície;

- Bomba de Fundo: O diferencial de pressão fornecido ao fluido para que este se eleve é diretamente provido pela bomba de fundo, e por isso, a bomba de fundo é considerada o elemento ativo do sistema de bombeio mecânico. A bomba de fundo possui uma parte móvel que é o pistão que está conectado diretamente ao conjunto de hastes, nele encontra-se a válvula de passeio. A parte fixa da bomba é denominada por camisa, e nela está localizada a válvula de pé. É através desta válvula que ocorre a sucção do fluido para o interior da bomba.

2.1 Aspectos de Operação

Nesta subseção pretende-se introduzir alguns fenômenos que ocorrem no bombeio mecânico, com destaque a pancada de fluido. Alguns fenômenos relacionados à geração da carta dinamoétrica de fundo podem ser interpretados de forma qualitativa. Estes aspectos são importantes na análise do comportamento do sistema de bombeio mecânico.

Elasticidade das Hastes:

Este fenômeno ocorre devido ao carregamento e descarregamento da bomba. Durante o ciclo de subida, conforme a câmara da bomba é preenchida pelo fluido, a carga sobre a coluna de hastes aumenta, provocando um alongamento destas. Já no ciclo de descida, conforme a câmara da bomba é descarregada, a carga sobre o conjunto de hastes diminui, provocando uma contração destas, que retornam ao seu comprimento inicial.

Forças de Aceleração:

No início do ciclo de subida, as forças de aceleração devem ser máximas. Durante o movimento ascendente estas forças diminuem (desaceleram) até zero, quando o pistão alcança o curso máximo e pára momentaneamente para iniciar o ciclo de descida. No curso descendente acontece o efeito oposto, as forças de aceleração vão aumentando durante a descida, até que o pistão retorna ao ponto inicial.

Vibração das Hastes:

Um efeito que dificulta a interpretação das cartas de superfície é a introdução de harmônicas de amortecimento na coluna de hastes devido a variações bruscas de carga nas hastes (situações de pancada de fluido ou até mesmo o carregamento da bomba durante o ciclo de subida do pistão). Resultado disso é uma oscilação das tensões na coluna de hastes que não são bem representadas na carta de superfície.

2.1.1 Pancada de Fluido

Um fenômeno do processo com incidência sobre a produção e os custos com manutenção é a pancada de fluido. Esta pancada ocorre quando o nível no anular é insuficiente para o enchimento total da câmara do pistão durante o ciclo de subida, em A na Figura 2.2. Em uma situação normal, no início do ciclo descendente, a válvula de passeio abre-se ao encontrar a câmara cheia de fluido, cuja pressão permite um descarregamento suave da bomba. Porém, dado que a câmara não foi completamente preenchida, o pistão depara-se com uma coluna de gás, em B, cuja baixa pressão não é suficiente para a abertura da válvula de passeio. Conforme o avanço do pistão, em algum momento, o mesmo encontrará a coluna de fluido no interior da câmara repentinamente, em C, o que causará uma brusca transferência da carga, e por conseguinte, um forte golpe mecânico sobre os componentes da bomba de fundo.

A pancada acelera o processo de desgaste mecânico sobre os equipamentos do sistema, uma situação limite seria a parada do poço para intervenção com sonda para reparo e/ou troca dos equipa-

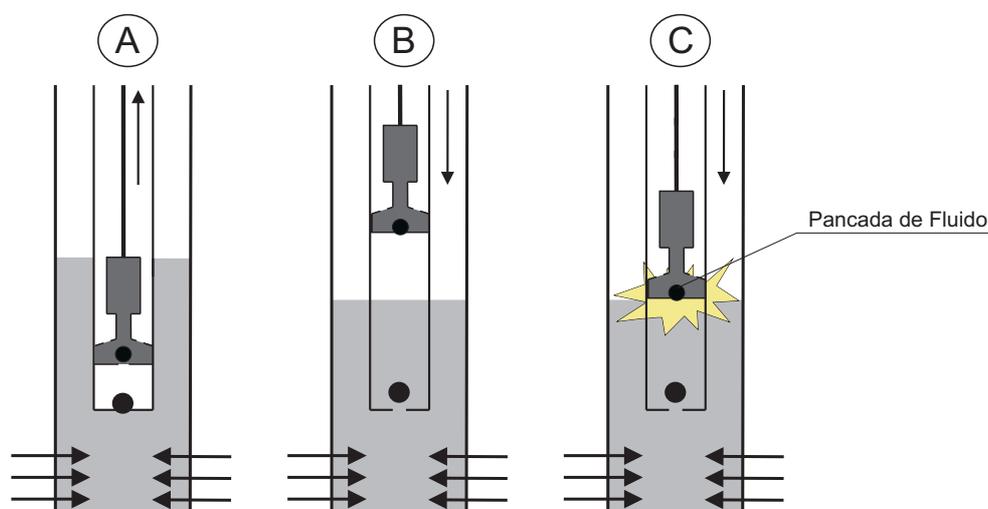


Figura 2.2: Representação gráfica do fenômeno da pancada de fluido

mentos danificados. Além da perda de produção associada ao enchimento parcial da câmara da bomba de fundo.

2.2 Carta Dinamométrica de Fundo

As cartas dinamométricas de fundo constituem uma importante ferramenta para a análise e avaliação das condições do bombeio mecânico, nela estão representados os efeitos gerados pela carga atuante na bomba de fundo durante um ciclo de bombeio que são registrados na superfície, através de modelos matemáticos, é possível inferir o comportamento no fundo do poço mediante os dados de superfície. A carta de superfície é um traçado da carga vs deslocamento (ambos referenciados à haste polida), e nela não descreve-se o que efetivamente ocorre na parte inferior da bomba uma vez que perturbações e alterações devido à propagação dos fenômenos através do conjunto de hastes são incorporadas [Filho, 1993]. Entretanto, com a utilização de alguns modelos matemáticos para a dinâmica da coluna de hastes, é possível elaborar a carta dinamométrica de fundo, que efetivamente, auxilia no monitoramento da produtividade do poço e no diagnóstico de problemas na operação de bombeio. Na Figura 2.3 é apresentado o comportamento das válvulas de pé e passeio durante um ciclo de bombeio, e por definição:

- **P_s** = Pressão de Sucção da Bomba (pressão devido à coluna de fluido no anular somada a pressão devido a coluna de gás e pressão na superfície);
- **P_c** = Pressão da Câmara da Bomba de Fundo;

- P_d = Pressão de Descarga (pressão devido a coluna hidrostática da coluna de hastes somada a pressão na superfície).

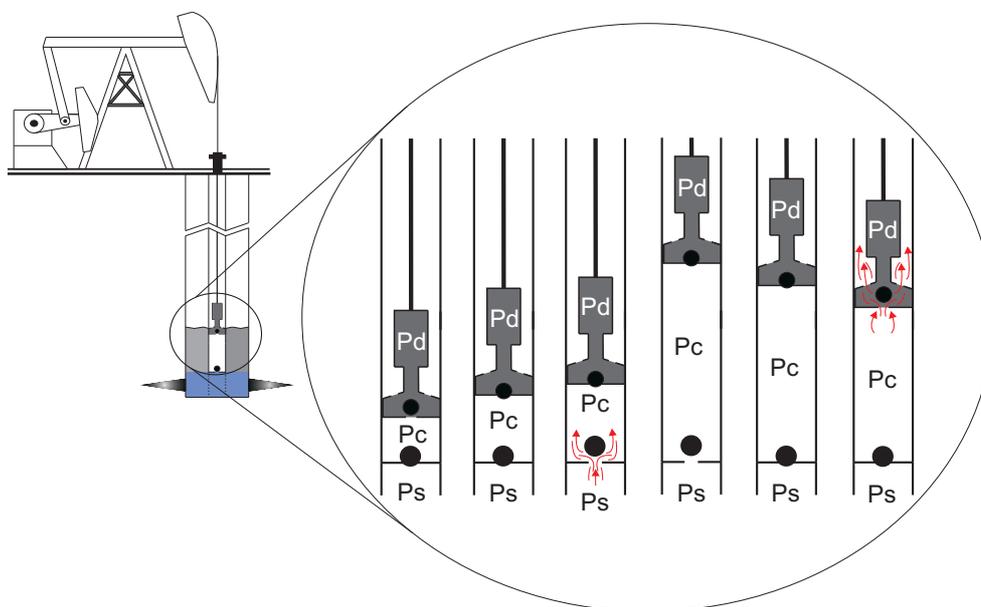


Figura 2.3: Ciclo de bombeio

Na Figura 2.4 é exemplificada a geração da carta de fundo destacando-se as forças atuantes na bomba de fundo.

Em *A*, o movimento ascendente encontra-se na sua iminência. A válvula de passeio está aberta, e portanto a diferença entre P_d e P_c é nula, já que o fluido da câmara do pistão está em contato com a coluna de fluido. Todo o peso da coluna hidrostática está depositado sobre a válvula de pé, e tem-se: $P_d = P_c \gg P_s$. Quando o pistão inicia o seu curso, o volume da câmara expande-se fazendo com que P_c diminua, e tem-se: $P_d > P_c \gg P_s$, mesmo com o decréscimo de P_c , a contra pressão que P_s faz sobre a válvula de pé ainda não é suficiente para abri-la. A diferença entre P_d e P_c aumenta conforme o pistão continua com o seu movimento ascendente.

Em *B*, a contra pressão exercida por P_s já é suficiente para abrir a válvula de pé com uma máxima diferença entre P_d e P_c , e tem-se: $P_d \gg P_c = P_s$. Existe fluxo para o interior da câmara a partir do momento em que $P_c < P_s$. O pistão sobe até seu curso máximo, em *C*, onde o fluxo através da válvula de pé cessa e a esfera aloja-se devido a pressão exercida sobre ela. A presença de gás pode reduzir o curso útil do pistão dado o caráter de expansão do gás.

Em *D*, o pistão desloca-se na descendente reduzindo assim, o volume entre as válvulas de pé e passeio, o que provoca o aumento de P_c em relação a P_d . Conforme o curso descendente do pistão,

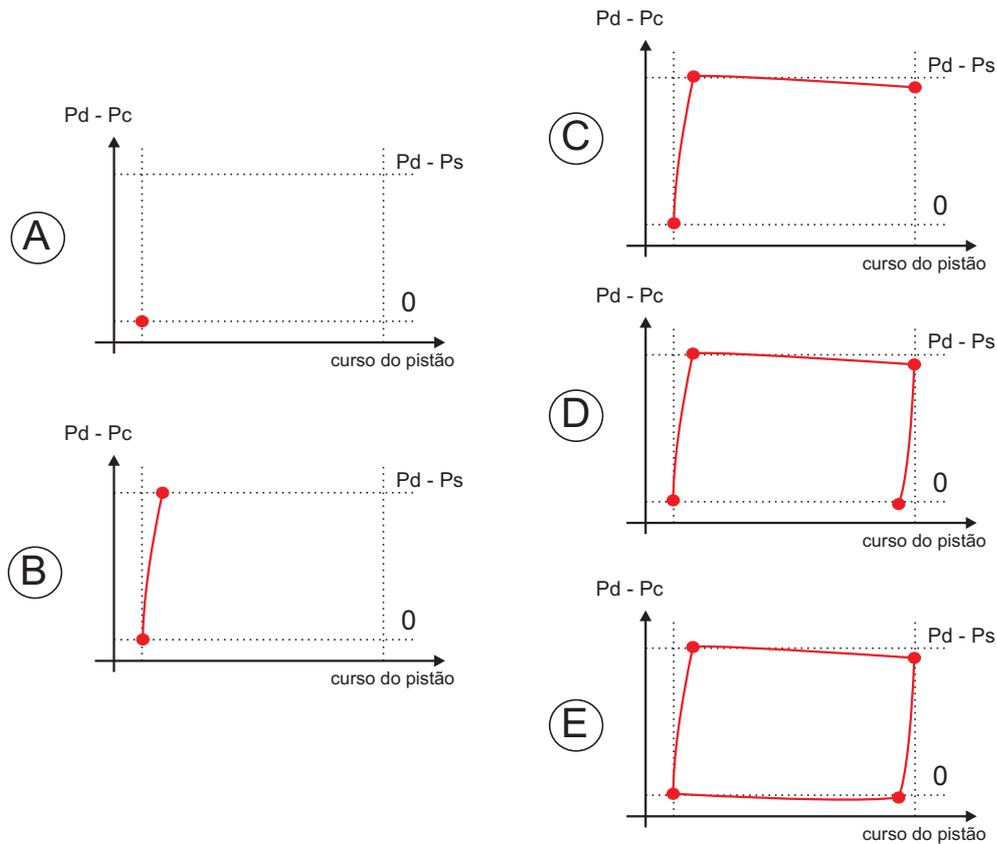


Figura 2.4: Carta dinamométrica de fundo

P_c torna-se maior que P_d , e existe fluxo de fluido através da câmara do pistão para a coluna. Neste momento tem-se: $P_d < P_c \gg P_s$. Finalmente em *E*, cessa o fluxo através da válvula de passeio, e a esfera aloja-se na sede devido a pressão exercida sobre a mesma.

No traçado da Figura 2.4 é mostrado uma carta dinamométrica com enchimento completo, pode-se afirmar que um funcionamento anormal da bomba de fundo (vazamentos nas válvulas de pé ou passeio, pistão preso, pancada de fluido, entre outros problemas) ocasionará um traçado diferente do mostrado na Figura 2.4 e será identificado. Na literatura, este enchimento completo da bomba é denominado por carta cheia.

Carta Dinamométrica de Fundo para a Pancada de Fluido

Na figura 2.5 é mostrada a carta de fundo, a qual caracteriza a pancada de fluido. No ponto P o ciclo de descida é iniciado. Neste momento, a válvula de passeio deveria abrir pela pressão da coluna hidrostática que se encontra abaixo dela, transferindo a carga da coluna de hastes para a válvula de pé. Porém, como a válvula encontra uma região de baixa pressão, ela não consegue abrir, e parte do

ciclo de descida é feito com a válvula de passeio fechada, já que a pressão exercida pelo gás dentro da câmara não é suficiente para abri-la. Quando a válvula de passeio encontra a coluna de fluido, ela abre provocando um aumento da pressão P_c (transferência de carga da válvula de passeio para a válvula de pé), entretanto neste momento o pistão já sofreu um deslocamento.

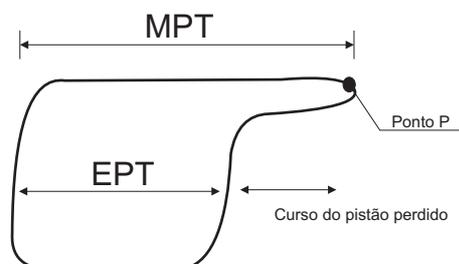


Figura 2.5: Carta dinamométrica de fundo associada à pancada de fluido

A Figura 2.5 permite concluir que a pancada não só provoca um prejuízo na produção de óleo, já que este fenômeno diminui o curso efetivo do pistão, como também existe uma relação indireta entre intensidade da pancada e enchimento da bomba, quanto menor for este, o percurso do pistão sem encontrar o fluido será maior, e conseqüentemente a aceleração do pistão no instante do impacto com o fluido no interior da câmara será maior, o que ocasionará certamente um maior desgaste dos componentes da bomba de fundo.

2.3 Modelagem e Simulador do Bombeio Mecânico

A modelagem do sistema foi desenvolvida com o principal objetivo de simular os algoritmos de controle sugeridos para o processo de elevação artificial por bombeio mecânico. Como resultado deste estudo sobre o sistema, um simulador que representa a evolução das principais variáveis de interesse foi desenvolvido.

No simulador estão representados os fenômenos físicos mais importantes que caracterizam o sistema de bombeio mecânico, dentre os quais destacam-se o efeito do nível do anular sobre a vazão do canhoneado (reservatório), o fenômeno de alongamento do conjunto de hastes e a dinâmica do fluido. Um importante aspecto simulado que interessa principalmente às estratégias de controle é o efeito da pancada de fluido por consequência do baixo nível no anular.

Ressalta-se que muitos modelos simplificados são utilizados com intuito de um baixo custo computacional devido a necessidade de uma simulação em escala de tempo real para acoplar o simulador ao algoritmo de controle alocado no CLP (Controlador Lógico Programável) localizado em

uma unidade remota junto ao poço de produção. O simulador é implementado no ambiente *simulink* do Matlab ©.

Os modelos apresentados a seguir foram discutidos durante a pesquisa sobre o bombeio mecânico, e também em visita técnica, em conjunto com a Petrobras, em alguns blocos existem significativas colaborações por parte da equipe de engenheiros da Petrobras.

2.3.1 Descrição do Simulador

O simulador representa a evolução das principais variáveis de interesse no processo de bombeio, são elas a pressão de fundo, nível do anular, posição da haste, vazão do canhoneado, conforme apresentado na Figura 2.9. A descrição do modelo é dividida em vários blocos com funcionalidades e equacionamentos diferentes, são eles:

1. Bloco Motor;
2. Bloco Coluna de Hastes Flexíveis;
3. Bloco Válvulas de Pé e Passeio;
4. Bloco Vazão de Formação;
5. Bloco Balanço de Materiais;
6. Bloco Estimação do Nível através da P_{wf} .

Na Figura 2.6 é mostrado um diagrama de blocos sobre a implementação do simulador através de blocos funcionais, e pode-se analisar melhor a dependência que existe entre as variáveis do processo.

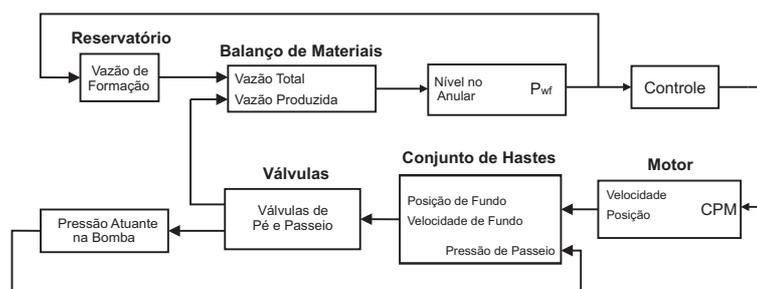


Figura 2.6: Diagrama de blocos para o simulador de bombeio mecânico

1. Bloco Motor:

O movimento do conjunto de hastes é aproximado com uma função senoidal de amplitude definida pelo usuário e frequência definida pela entrada CPM. Esta amplitude está associada ao curso efetivo do pistão, que pode ser modificado mecanicamente na superfície da unidade. Existem vários tamanhos para as UBs, dependendo da unidade, existem geralmente de 3 a 5 posições fixas para esta variação do curso do pistão. Assim o equacionamento fica como a seguir:

$$\omega = \pi \cdot \frac{CPM}{30} \quad (2.1a)$$

$$x = A \sin(\omega t) \quad (2.1b)$$

$$v = A\omega \cos(\omega t) \quad (2.1c)$$

$$a = -A\omega^2 \sin(\omega t) \quad (2.1d)$$

nos quais, ω [rad/s] é a frequência do motor, A [m] é amplitude que está relacionada ao curso do pistão, x [m] a posição da haste, v [m/s] a velocidade da haste e a [m/s²] a aceleração da haste, estes últimos três dados referem-se à haste polida. Observa-se que dada uma troca de CPM na entrada obtêm-se uma descontinuidade de velocidade e aceleração na saída, ainda assim, considera-se este modelo razoável pois supõe-se a dinâmica do motor muito mais rápida que as demais dinâmicas envolvidas no sistema.

2. Bloco Coluna de Hastes Flexíveis:

O modelo que descreve o conjunto das hastes está baseado em um modelo massa-mola-amortecedor proposto em Snyder e Bossert [1963], vide Figura 2.7.

A coluna total de hastes está subdividida em 10 seções (este número de seções apresenta um comportamento aceitável do conjunto de hastes associado a um baixo custo computacional para a simulação dos algoritmos de controle), na qual cada uma admite um modelo com uma massa M [kg], uma constante elástica da mola K [N/m] e um amortecimento B [Ns/m]. A força em cada seção é causada pelo deslocamento relativo das seções adjacentes, e também pelo amortecimento. O equacionamento resultante é mostrado abaixo:

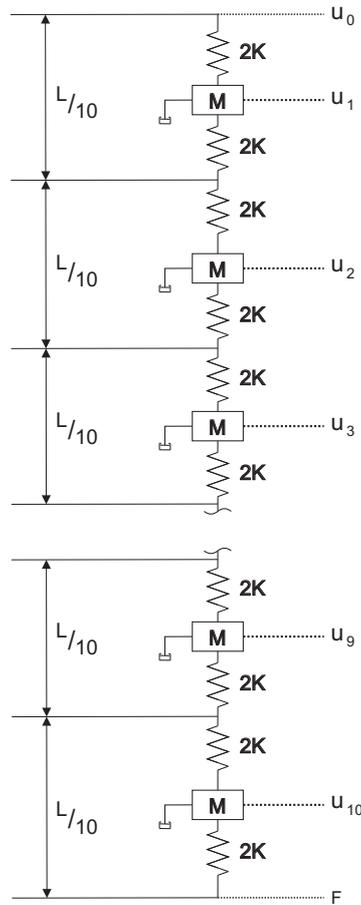


Figura 2.7: Sistema massa-mola-amortecedor para modelagem da coluna de hastes

$$\begin{aligned}
 K(u_0 - u_1) - K(u_1 - u_2) - B\dot{u}_1 &= M\ddot{u}_1 \\
 K(u_1 - u_2) - K(u_2 - u_3) - B\dot{u}_2 &= M\ddot{u}_2 \\
 &\vdots [\dots] \\
 K(u_9 - u_{10}) - F(t) - B\dot{u}_{10} &= M\ddot{u}_{10}
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

no qual u [m] é o deslocamento da seção da haste. A massa M tem 1/10 do peso total da coluna de hastes, e cada mola tem uma constante elástica $2K$, igual a 20 vezes o total da constante elástica do conjunto das hastes.

3. Bloco Válvulas de Pé e Passeio:

Neste bloco está representada a vazão de saída dos canhoneados (reservatório) como consequência do movimento das hastes, a diferença de pressão na válvula de passeio e o efeito da

presença de gás na câmara do pistão, reproduzindo assim, o efeito da pancada de fluido. O equacionamento é dividido em duas situações, um primeiro instante que é o ciclo de subida, e conseqüentemente, um segundo instante para o ciclo de descida.

- Haste com Movimento Ascendente: Admite-se que a válvula de pé está aberta e existe fluxo de fluido para o interior da câmara, e ainda, nesta situação a válvula de passeio permanece sempre fechada. Quando apenas encontra-se água e óleo no fluido considera-se que a vazão para a câmara é dada pela equação:

$$q_{fluido} = S_{pistao} \cdot v_{pistao} \quad (2.3)$$

no qual, q_{fluido} [m^3/s] é a vazão de fluido, S_{pistao} [m^2] a seção do pistão e v_{pistao} [m/s] a velocidade do mesmo. Com isto supõe-se que o fluido vai preenchendo o vazio que o pistão deixa no interior da câmara. Em um segundo caso, quando existe gás adicionado ao fluido, também considera-se que a vazão de gás é proporcional ao movimento do pistão, obedecendo a lei dos gases ideais, indicada no equacionamento abaixo:

$$q_{gas} = \frac{P_{rev} \cdot S_{pistao} \cdot v_{pistao}}{R \cdot T} \quad (2.4)$$

no qual, q_{gas} [mol/s] é o fluxo da gás, P_{rev} [N/m^2] é a pressão do gás existente sobre o nível do anular, T [K] é a temperatura média do gás e R é a constante dos gases perfeitos. Ainda foi modelada uma situação intermediária, quando coexistem óleo, água e gás na sucção da bomba de fundo, com o intuito de modelar o comportamento da sucção de fluido quando o nível do anular se aproxima do nível de sucção da bomba, já que observa-se um chaveamento entre as equações (2.3) e (2.4) que produz fortes discontinuidades nas vazões dos fluidos. Sejam as equações:

$$q_{fluido} = \lambda \cdot S_{pistao} \cdot v_{pistao} \quad (2.5a)$$

$$q_{gas} = (1 - \lambda) \cdot \frac{P_{rev} \cdot S_{pistao} \cdot v_{pistao}}{R \cdot T} \quad (2.5b)$$

$$\lambda = \frac{h_{anular} - (h_{sb} - \alpha)}{2 \cdot \alpha} \quad (2.5c)$$

nas quais, h_{anular} [m] é nível de fluido no anular, h_{sb} [m] é o nível de sucção da bomba, λ e α são constantes de ajuste. A equação (2.5c) aproxima com uma reta a descontinuidade na vazão dos fluidos, que através de α determina quando o ajuste tem efeito e qual será o efeito de cada vazão. A variável α é tipicamente pequena e pode-se associá-la à região em torno da sucção da bomba.

A partir das situações expostas anteriormente, a vazão produzida pela UB é calculada a partir do seguinte equacionamento:

$$Q_{UB} = \eta \cdot q_{fluido} \quad (2.6)$$

no qual, η é a eficiência volumétrica da bomba de fundo. Esta eficiência é sempre menor que 1, devido ao vazamento de líquido em volta do pistão, a compressibilidade do fluido e ao incompleto enchimento da câmara do pistão com o líquido da coluna do anular, este último fator é tratado no trabalho mediante a variável q_{fluido} . A eficiência volumétrica é definida em 0,85 para as simulações dos algoritmos de controle.

- Haste com Movimento Descendente: Admite-se que a válvula de pé está fechada e o estado da válvula de passeio depende da diferença de pressão sobre ela. Quando na câmara encontra-se gás, este acumula-se no topo, já que tem densidade menor. Conforme a válvula de passeio desce, estando ela inicialmente fechada, o gás é comprimido segundo a relação clássica dos gases perfeitos. Existe a compressão, até que a pressão do gás iguale a pressão da coluna de óleo acima da válvula de passeio, esta permanece fechada e quando abre supõe-se que o gás inicia a fluir pela válvula de passeio com uma pressão constante igual à coluna de óleo, como apresentado abaixo:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{P}{RT} \cdot \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.7)$$

no qual, dn/dt [mol/s] é a vazão mássica de gás, V [m^3] o volume que o gás ocupa na câmara do pistão e P é a pressão hidrostática da coluna de óleo. O gás flui até que a válvula de passeio chega a altura em que tem óleo na câmara, momento em que acontece a pancada de fluido e o óleo começa a escoar segundo a seguinte relação:

$$q_{oleo} = S_{pistao} \cdot v_{pistao} \quad (2.8)$$

na qual, q_{oleo} [m^3/s] é a vazão de óleo.

4. Bloco Vazão de Formação:

No modelo admite-se que a dinâmica do reservatório está relacionada com a dinâmica das hastes através da pressão de fundo. A vazão de produção devido ao movimento das hastes diminui o nível do anular (e também P_{wf}), e com esta pressão de fundo menor consegue-se um maior fluxo de fluido através da formação para o revestimento. A capacidade de produção do reservatório é implementada através do modelo linear, que está relacionado ao índice de produtividade do poço (IP), dado por:

$$IP = \frac{q}{P_{estatica} - P_{wf}} \quad (2.9)$$

na qual, q [m/s^2] é a vazão do reservatório e $P_{estatica}$ [Pa] é a pressão estática do reservatório. A equação (2.9) representa uma curva conhecida como IPR (*Inflow Performance Relationship*) na qual a vazão varia linearmente com a pressão de fundo, e na Figura 2.8 é mostrada a curva de IPR para este modelo linear.

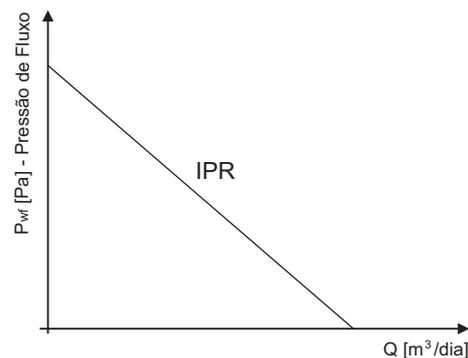


Figura 2.8: Curva de IPR para o modelo linear

O poço considerado possui três zonas produtoras que compartilham a mesma coluna de produção, porém com válvulas independentes (vide Figura 2.9). Assim, a vazão dada pela zona produtora inferior influencia na pressão das zonas de produção superiores, por meio da perda de carga gerada. É importante uma boa modelagem da perda de carga por atrito, já que esta influencia diretamente na leitura dos sensores com os quais será feita a estimativa do nível do anular. A pressão na sucção, P_{sb} [Pa], da bomba é obtida pela equação:

$$P_{sb} = P_{rev} + \rho_{gas} \cdot g \cdot N + \rho_{liq} \cdot g \cdot (L - N) \quad (2.10)$$

na qual, P_{rev} [Pa] é a pressão do revestimento, g [m/s^2] é aceleração da gravidade, ρ_{gas} e ρ_{liq} são as massas específicas do gás e líquido respectivamente. As pressões de fluxo de fundo (P_{wf}) são dadas pelas seguintes equações, referentes às zonas de produção A, B e C,

respectivamente.

$$\begin{aligned}
 P_{wfA} &= P_{sb} + \rho_{fluido} \cdot g \cdot (L_{vA} - L) + \Delta P_{atA} \\
 P_{wfB} &= P_{wfA} + \rho_{fluido} \cdot g \cdot (L_{vB} - L_{vA}) + \Delta P_{atB} \\
 P_{wfC} &= P_{wfB} + \rho_{fluido} \cdot g \cdot (L_{vC} - L_{vB}) + \Delta P_{atC}
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

Nas equações acima tem-se que os ΔP_{at} [Pa] são perdas de carga calculadas por correlações de escoamento multifásico e ρ_f é obtido de forma simplificada pela média das massas específicas do fluido e do gás ponderadas pela razão gás-líquido, como a seguir:

$$\rho_{fluido} = \frac{1}{1 + RGL} \cdot \rho_{liq} + \frac{RGL}{1 + RGL} \cdot \rho_{gas}
 \tag{2.12}$$

Sendo ρ_{liq} apenas água, pode-se então obter RGL a partir da RGO e do BSW pela equação abaixo:

$$RGL = RGO \left(1 - \frac{BSW}{100} \right)
 \tag{2.13}$$

Sobre os modelos assumidos para a perda de carga por atrito (ΔP_{atrito}), descreve-se a continuação a equação que relaciona a perda de carga por atrito, levando em consideração as características geométricas do poço e as propriedades da mistura dos fluidos. Seja o modelo homogêneo:

$$- \frac{\partial P}{\partial h} = 2 \cdot C_f \cdot \rho_{fluido} \cdot \frac{j^2}{D}
 \tag{2.14}$$

no qual, D [m] é o diâmetro do tubo de produção, ρ_{fluido} é massa específica do fluido, C_f é o fator de atrito segundo o modelo de Wood e será calculado a continuação, e j é a velocidade de escoamento do fluido. Integrando a equação (2.14) no trecho de altura onde se tem o fluxo, resulta-se em:

$$\Delta P = 2 \cdot C_f \cdot \rho_{fluido} \cdot \frac{j^2}{D} \cdot \Delta H
 \tag{2.15}$$

na qual j [m/s] é definido como:

$$j = \frac{q_l \cdot (1 + RGL)}{A_{coluna}}
 \tag{2.16}$$

em que q_l [m^3/s] é a vazão de escoamento do líquido pela coluna de produção e A_{coluna} [m^2] é a seção da coluna de produção. O modelo de Wood para o fator de atrito é apresentado abaixo:

$$C_f = a + b \cdot (Re)^{-c} \quad (2.17)$$

Esta equação tende a superestimar o fator de atrito em aproximadamente 5%, comparando com o gráfico de Moody. Porém, como a coluna sofre corrosão, deposição, entre outras coisas, esta correlação atende satisfatoriamente as necessidades de equacionamento. Com a , b , c , Re (Número de Reynolds) e μ (Viscosidade da Mistura) definidos respectivamente abaixo:

$$\begin{aligned} a &= 0,0235 \cdot \left(\frac{\epsilon}{D}\right)^{0,225} + 0,1325 \cdot \left(\frac{\epsilon}{D}\right) \\ b &= 22 \cdot \left(\frac{\epsilon}{D}\right)^{0,44} \\ c &= 1,62 \cdot \left(\frac{\epsilon}{D}\right)^{0,134} \\ Re &= \frac{\rho_{fluido} \cdot \dot{J} \cdot D}{\mu} \\ \mu &= \frac{\left(1 - \frac{BSW}{100}\right) \mu_{oleo} + \frac{BSW}{100} \mu_{(H_2O)} + RGL \mu_{gas}}{1 + RGL} \end{aligned} \quad (2.18)$$

nos quais, D [m^2] o diâmetro do tubo de produção, ρ_{fluido} é a massa específica do fluido e μ_{oleo} , $\mu_{(H_2O)}$ e μ_{gas} são as viscosidades de óleo, água e gás contidas no fluido, respectivamente. O modelo de Wood assumido para a perda de carga por atrito e respectivas variáveis envolvidas está baseado em Saleh [2002].

5. Bloco Balanço de Materiais:

Este bloco é responsável pelo balanceamento de materiais, onde a diferença entre a vazão total (vazão que flui do reservatório para o anular) e a vazão produzida (vazão que flui do anular para a coluna de produção) é o incremento que ocorre na altura do anular, respeitando portanto, um balanço de massa. Esta relação é equacionada como abaixo:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{q_{total} - q_{produzida}}{A_{anular}} \quad (2.19)$$

E o nível h [m] é a diferença entre H [m] (profundidade do poço) e N [m] (profundidade do nível no anular estimado), conforme a Figura 2.9.

6. Estimação do nível do anular através da P_{wf}

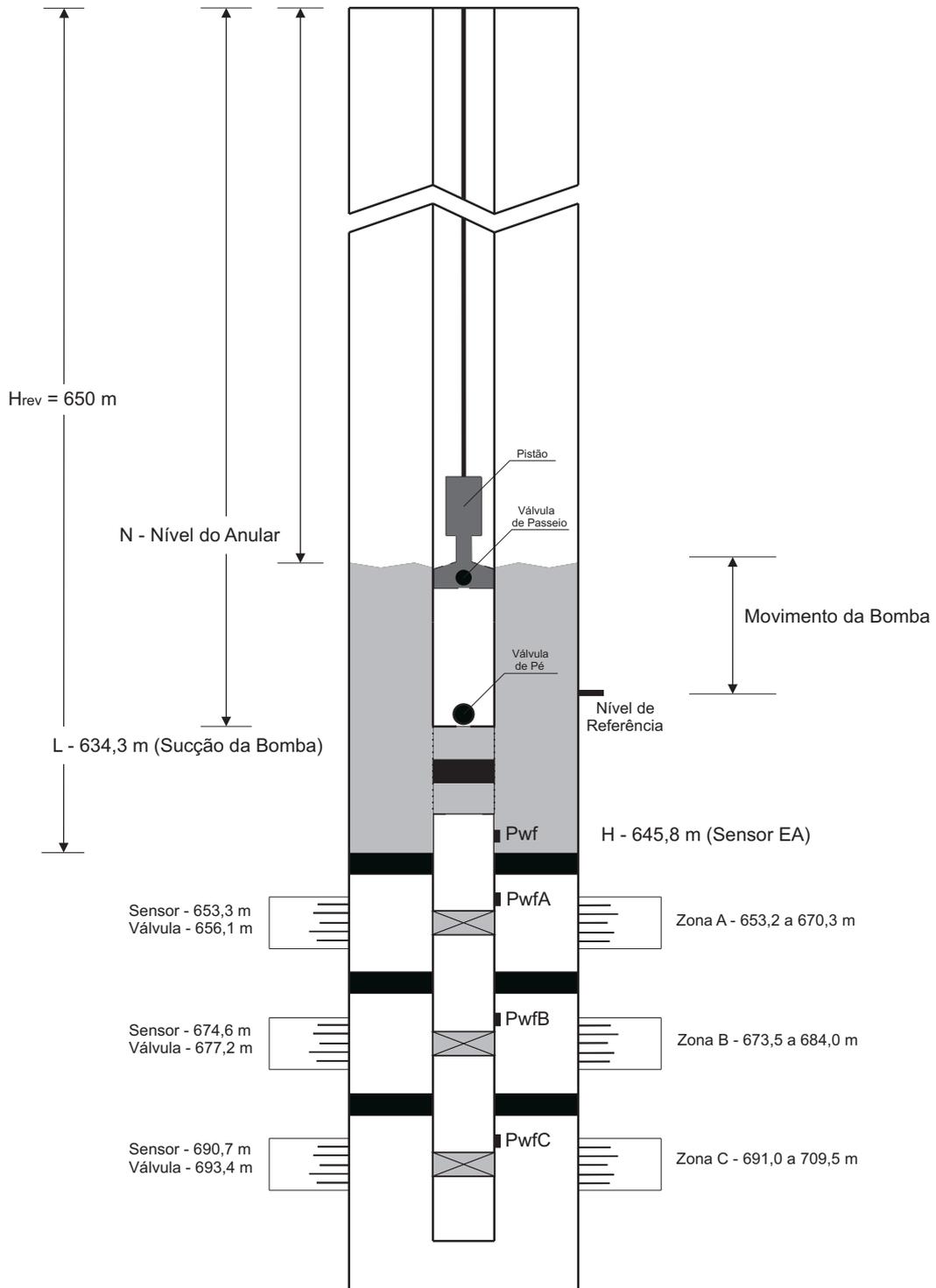


Figura 2.9: Esquema do poço de produção GeDIg CP-1316

Para uma proposta de controle dinâmico do nível do anular definem-se correlações entre a pressão de fundo (P_{wf}) e o nível do anular. Esta utilização da pressão de fundo é o grande diferencial em relação aos outros métodos de controle no bombeio mecânico, e o maior empecilho para a estimação do nível através da P_{wf} é a definição da composição do fluido que se encontra no anular (partes de água, óleo e gás no fluido).

Assim, de forma geral escreve-se a correlação entre P_{wf} e nível do anular como a seguir, com base na Figura 2.9.

$$P_{wf} = P_{rev} + \rho_{gas} \cdot g \cdot N + \rho_{liq} \cdot g \cdot (H - N) \quad (2.20)$$

Existem várias possibilidades para a composição do fluido. Uma primeira hipótese mais simplista, considera a massa específica do líquido como uma média entre as massas específicas do óleo e da água, ponderada pelo BSW, como na equação (2.21). Vide primeira hipótese da Figura 2.10. Assim, o ρ_{liq} em (2.20) é definido como abaixo:

$$\rho_{liq} = \left(1 - \frac{BSW}{100}\right) \cdot \rho_{oleo} + \frac{BSW}{100} \cdot \rho_{H_2O} \quad (2.21)$$

na qual, ρ_{oleo} e ρ_{H_2O} são as massas específicas do óleo e água, respectivamente. Porém, uma melhor hipótese é considerar a segregação gravitacional, admitindo que acima da sucção da bomba encontra-se apenas óleo, e que o espaço entre a sucção da bomba e o sensor de pressão está preenchido com uma mistura entre água e óleo. A relação é apresentada abaixo:

$$P_{wf} = P_{rev} + \rho_{gas} \cdot g \cdot N + \rho_{oleo} \cdot g \cdot (L - N) + \rho_{(H_2O+oleo)} \cdot g \cdot (H - L) \quad (2.22)$$

Na Figura 2.10 é mostrada graficamente esta hipótese que considera a segregação gravitacional. Ressalta-se que embora não mostrado, considera-se a presença de gás no fluido no anular.

A correlação proposta em (2.22) será utilizada nas simulações dos algoritmos de controle. Nota-se que P_{wf} e a profundidade do anular (N) são indiretamente proporcionais e sabe-se que a preocupação principal no controle é o ponto mínimo do nível no anular que pode ocasionar, ou não, a pancada de fluido. Isolando a variável N em (2.22) tem-se:

$$N = \frac{P_{wf} - P_{rev} - \rho_{oleo} g L - \rho_{(H_2O+oleo)} g (H - L)}{g(\rho_{gas} - \rho_{oleo})} \quad (2.23)$$

Ainda, com relação à influência da estimação do nível no controle dinâmico do nível no anular, neste trabalho serão utilizadas as quatro informações de pressão de fundo dos sensores

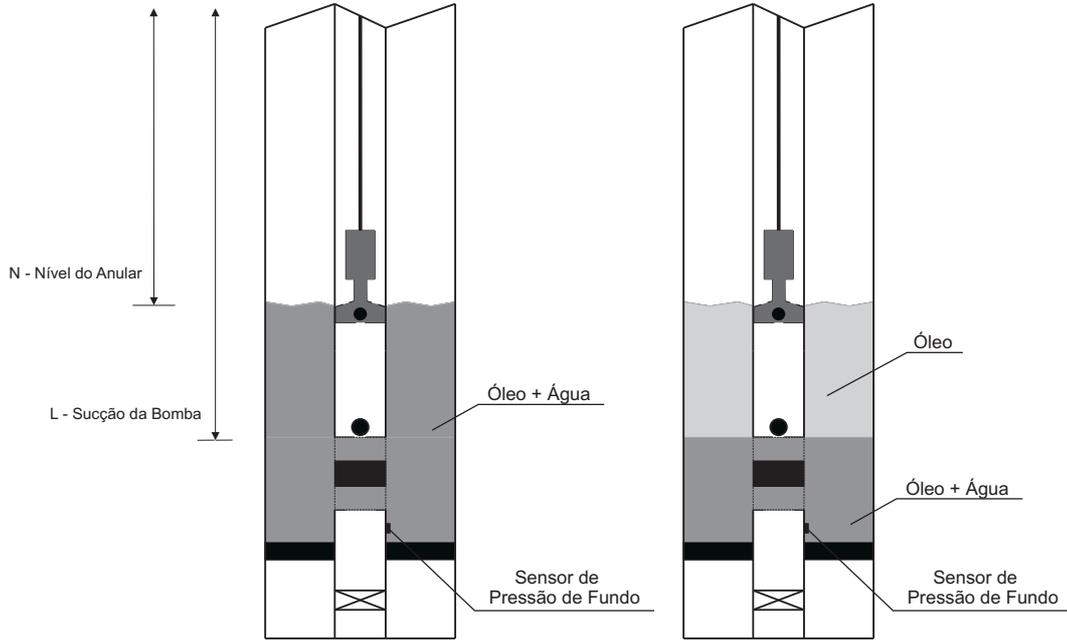


Figura 2.10: Hipóteses de composição do fluido no anular do poço

disponíveis nos poços do GeDIg, com o intuito de tirar a dependência total do sensor denominado *Elevação Artificial*, evitando problemas caso ocorra uma falha com este sensor. Assim, as quatro estimativas de níveis são dadas a seguir, utilizando os sensores de elevação artificial, topo (Zona A), meio (Zona B) e fundo (Zona C), respectivamente. As variáveis indicadas nas equações seguintes são definidas na Figura 2.9.

$$N = \frac{P_{wf} - P_{rev} - \rho_{oleo} g L - \rho_{liq} g (H - L)}{g(\rho_{gas} - \rho_{oleo})} \quad (2.24)$$

$$N_{topo} = \frac{P_{wfA} - P_{rev} - \rho_{oleo} g L - \rho_{fluido} g (L_{valA} - L) - \Delta P_{atA}}{g(\rho_{gas} - \rho_{oleo})} \quad (2.25)$$

$$N_{meio} = \frac{P_{wfB} - P_{rev} - \rho_{oleo} g L - \rho_{fluido} g (L_{valB} - L) - \Delta P_{atA} - \Delta P_{atB}}{g(\rho_{gas} - \rho_{oleo})} \quad (2.26)$$

$$N_{fundo} = \frac{P_{wfC} - P_{rev} - \rho_{oleo} g L - \rho_{fluido} g (L_{valC} - L) - \Delta P_{atA} - \Delta P_{atB} - \Delta P_{atC}}{g(\rho_{gas} - \rho_{oleo})} \quad (2.27)$$

Com estas quatro informações de nível correspondentes a cada um dos sensores de fundo,

realiza-se uma média geométrica entre estas medições, conforme equacionamento abaixo:

$$N_{media} = (N_{EA} \cdot N_{topo} \cdot N_{meio} \cdot N_{fundo})^{1/4} \quad (2.28)$$

Com o resultado desta média (N_{media}) faz-se uma avaliação para detectar a informação mais afastada da média geométrica, e portanto, descartá-la. Logo, faz-se uma média aritmética entre as três informações restantes para a estimação final do nível do anular. A variável N_{media} representa a profundidade estimada de nível no anular, para obter o nível em relação ao fundo do poço, faz-se:

$$h = H - N_{media} \quad (2.29)$$

no qual, h [m] é o nível de fluido referenciado ao fundo do poço e H [m] é o fundo de poço de produção. Todos os algoritmos de controle propostos utilizarão este resultado final para o controle dinâmico do nível no anular.

2.3.2 Dados do Poço de Produção

O poço utilizado para o desenvolvimento do simulador é o poço CP-1316 localizado no campo de produção de Carmópolis (SE), ressaltando que é um poço diferenciado por estar conectado a três zonas produtoras através de válvulas *on/off* localizadas na coluna de produção e operadas hidráulicamente. Cada intervalo de produção está isolado através de *packers*, e a cada um destes intervalos conta com medições de pressão e temperatura através de sensores de fibra óptica. Acima do *packer* de produção também há informação sobre a pressão e temperatura com a utilização de um sensor com mesma tecnologia de fibra óptica.

Os dados sobre o poço de produção estão divididos em revestimento e UB, e propriedades do fluido, e são mostrados a seguir.

- **Revestimento e UB:**

- O revestimento é o 5 1/2 [pol] 15, 5 [lb/pe]. Segundo dados da tabela padronizada de revestimento, tem-se que o diâmetro interno é 4, 95 [pol].
- Diâmetro nominal da coluna de produção, $d_{coluna} = 2\ 7/8$ [pol].
- Diâmetro interno da camisa da bomba, $d_{bomba} = 2$ [pol].

- Pressão do revestimento, $P_{rev} = 1,83 [kgf/cm^2]$.
- Curso da haste polida, $S = 62 [pol]$.
- Profundidade da sucção da bomba, $L = 634,3 [m]$.
- Profundidade do sensor de elevação artificial, $H = 645,8 [m]$.
- Profundidade do revestimento, $H_{rev} = 650 [m]$.

- **Propriedades dos Fluidos:**

- $d_{oleo} = 0,902 \Rightarrow \rho_{oleo} = 902 [kg/m^3]$.
- $d_{gas} = 0,620 \Rightarrow \rho_{gas} = 0,744 [kg/m^3]$ (condições padrão).
- $d_{H_2O} = 1,000 \Rightarrow \rho_{H_2O} = 1000 [kg/m^3]$.
- BSW = 88,2%.
- RGO = 85 [Sm^3/m^3].

- **Condições do Reservatório:**

- Pressão estática da zona A, $P_{rev} = 5,225171 \cdot 10^5 [Pa]$.
- Pressão estática da zona B, $P_{rev} = 6,807996 \cdot 10^5 [Pa]$.
- Pressão estática da zona C, $P_{rev} = 15,132493 \cdot 10^5 [Pa]$.
- Índice de produtividade da zona A, $IP_A = 0,311493 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m^3}{dia} Pa \right]$.
- Índice de produtividade da zona B, $IP_B = 1,103638 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m^3}{dia} Pa \right]$.
- Índice de produtividade da zona C, $IP_C = 1,937927 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m^3}{dia} Pa \right]$.

2.3.3 Curvas de Resposta do Simulador

Nesta subseção são apresentadas as evoluções das principais variáveis envolvidas no processo de elevação artificial por bombeio mecânico, e simuladas utilizando os modelos fenomenológicos descritos anteriormente. Para simular o processo é utilizada uma plataforma de trabalho que conta com o simulador proposto neste capítulo implementado no ambiente *Simulink* do *MatLab* e os algoritmos de controle serão implementados em um CLP ZAP 900 (fabricado pela HI Tecnologia, a utilização deste CLP é sugestão da Petrobras por se tratar de CLP encontrado nos poços de produção da própria Petrobras, isso indica um cenário mais real nas simulações dos algoritmos de controle). A tecnologia OPC faz toda a comunicação entre os componentes do processo. Na Figura 2.11 é apresentada a plataforma de trabalho.

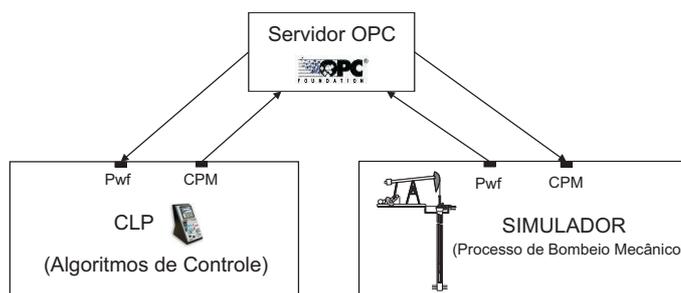


Figura 2.11: Plataforma de trabalho

Na Figura 2.12 é apresentado o comportamento do nível no anular em uma situação que a UB está desligada, este teste é importante porque indica qual é o nível de equilíbrio do anular no qual a contra pressão exercida pela coluna de líquido se iguala com a pressão do reservatório, e assim, não há vazão de formação através dos canhoneados.

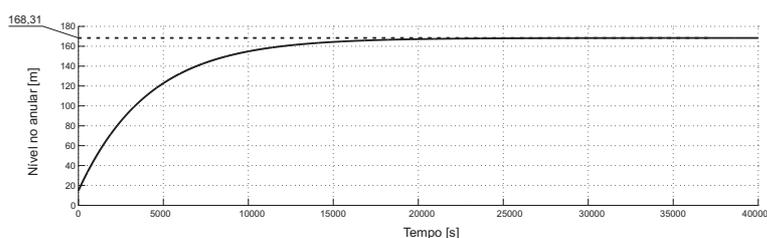


Figura 2.12: Ensaio sobre o nível de equilíbrio do anular

O comportamento da vazão de formação é mostrado na Figura 2.13, na qual a vazão de formação é máxima quando o nível do anular se encontra na sucção da bomba, e portanto, é o ponto máximo de operação para exploração do reservatório.

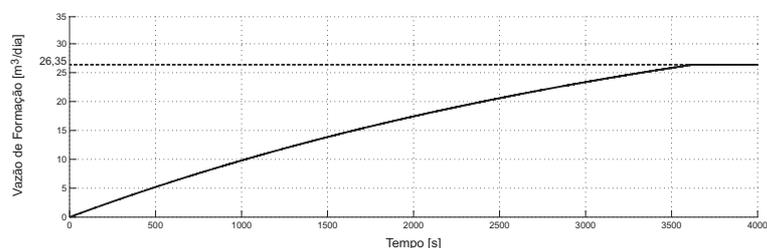


Figura 2.13: Ensaio sobre o potencial da vazão de formação do reservatório

Outras curvas de resposta do simulador são obtidas mediante um ensaio em malha aberta onde a velocidade de bombeio é variada conforme a Figura 2.16. Nas Figuras 2.14 e 2.15 os comportamentos do conjunto de hastes e da pressão de fundo são mostrados, respectivamente.

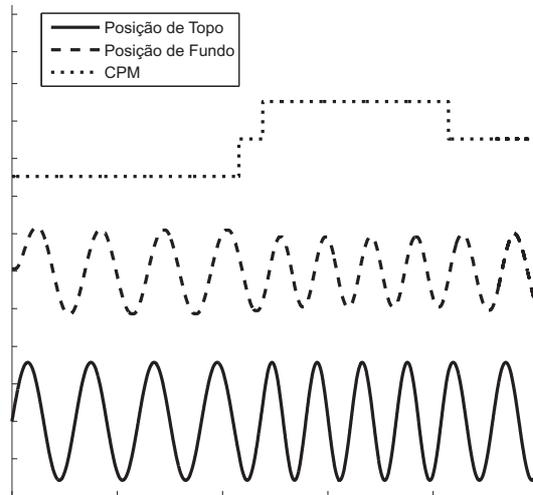


Figura 2.14: Comportamento dinâmico da coluna de hastes

O efeito do alongamento pode ser verificado no atraso entre o movimento no topo da haste polida (superfície) e no pistão (fundo). No início do movimento ascendente no topo da haste polida existe primeiramente um alongamento no conjunto de hastes, e só então, inicia-se o movimento ascendente do pistão. No movimento descendente existe um comportamento análogo, vide Figura 2.14. Ainda sobre a dinâmica das hastes, pode-se constatar que conforme aumenta-se a velocidade de bombeio, o curso útil do pistão diminui, isto ocorre dado a características de flexibilidade do conjunto de hastes, o que dá um comportamento não linear ao sistema de bombeio mecânico. Outro efeito que contribui com esse comportamento é a inércia do movimento, que causa um sobre-deslocamento ao curso do pistão.

Na Figura 2.15 é mostrado o comportamento da pressão de fundo em um ensaio em malha aberta. O sistema apresenta uma oscilação das hastes que é transmitida para a pressão de fundo, dados os sucessivos ciclos de bombeio. Na Figura 2.16 é mostrado o comportamento da velocidade de bombeio, que é a variável manipulada em malha aberta neste ensaio para obtenção das curvas de resposta do simulador.

Outros comportamentos interessantes para análise do simulador são as relações que existem entre a evolução do nível no anular conforme altera-se a velocidade de, e também como comporta-se a vazão que flui do reservatório para o anular do poço de produção através dos canhoneados. Estes comportamentos são mostrados nas Figuras 2.17 e 2.18, respectivamente.

Existe um comportamento análogo entre as evoluções de pressão de fundo e nível do anular. Já com relação ao comportamento da vazão através dos canhoneados, conclui-se que existe uma relação inversamente proporcional com relação à pressão de fundo, por isso, nas estratégias de controle existe

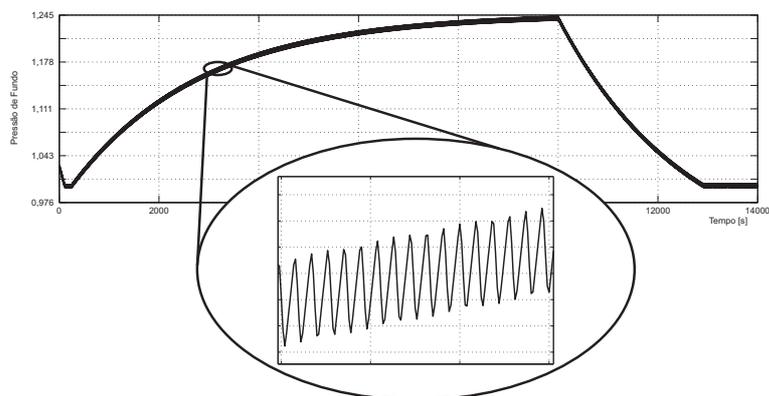


Figura 2.15: Evolução da pressão de fundo em malha aberta

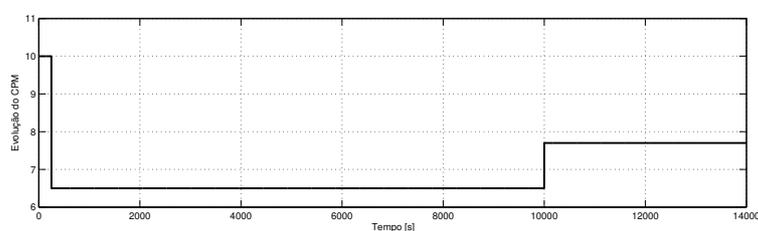


Figura 2.16: Evolução da velocidade de bombeio em malha aberta

o objetivo de trabalhar-se com a menor pressão de fundo possível para maximizar a vazão através dos canhoneados. Ressalta-se que o mesmo comportamento oscilatório que a pressão de fundo apresenta, e é mostrado na Figura 2.15, também ocorre sobre as variáveis do nível no anular e vazão dos canhoneados.

As curvas de resposta do simulador correspondem a uma boa aproximação do cenário encontrado em um poço de produção para a evolução das principais variáveis do processo, e portanto, o simulador cumpre seu papel para a avaliação dos controladores para as unidades de bombeio. Uma etapa crucial para validação seria corroborar os dados com os de uma matriz de testes no poço de produção para analisar os dados, e propor possíveis mudanças na modelagem do processo.

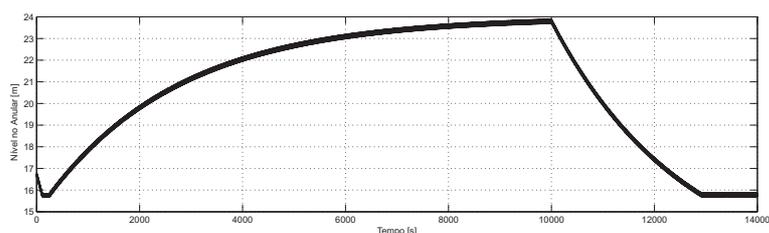


Figura 2.17: Evolução do nível do anular em malha aberta

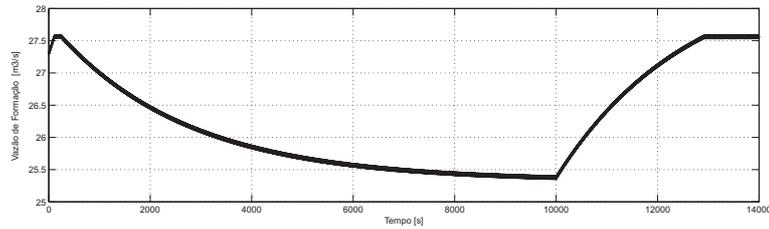


Figura 2.18: Evolução da vazão de formação em malha aberta

2.4 Conclusão

Neste capítulo apresentou-se um simulador que através de um modelo fenomenológico consegue reproduzir a evolução das principais variáveis do processo, e portanto, cumpre seu objetivo principal de desenvolvimento que é o teste de algoritmos de controle utilizando a pressão de fundo. É possível a partir desta base construída, propor a incorporação de modelos matemáticos mais específicos como a modelagem da dinâmica do motor principal, um modelo mais completo para a coluna de hastes e reservatório, e assim, ter o objetivo principal de desenvolver um simulador completo para o bombeio mecânico.

Uma matriz de testes no campo de produção é essencial para a validação dos dados reproduzidos pelo simulador e também de alguns modelos assumidos, por exemplo, a utilização do modelo linear para a curva *IPR*, que relaciona a vazão de formação e a pressão de fundo.

A simulação dos algoritmos propostos é realizada sobre uma plataforma de trabalho constituída pelo próprio simulador e um CLP, dispositivo usado para a implementação dos algoritmos de controle. A utilização desta plataforma torna este processo inicial de testes mais compatível com as condições que se encontram nos campos de produção.

Capítulo 3

Operação de Poço com Bombeio Mecânico

A operação e análise do sistema de bombeio mecânico conta com uma importante e consolidada ferramenta para avaliação do comportamento da bomba de fundo denominada por carta dinamométrica de fundo, conforme explicado no capítulo anterior. As estratégias *pump-off* e VSD são apresentadas sob o contexto da carta dinamométrica de fundo e para tal, define-se uma analogia entre o reconhecimento do padrão da carta e o enchimento da câmara da bomba de fundo para emular o controle utilizando a carta de fundo.

3.1 Metodologias de Controle

Na indústria do petróleo duas metodologias de controle para operação dos sistemas de bombeio mecânico têm ampla empregabilidade, na qual cada uma conta com características próprias. A grande diferença entre elas é que o controle VSD possibilita variar a velocidade de bombeio conforme exista necessidade para tal, e por outro lado o controle *pump-off* trabalha apenas com dois estados de velocidade de bombeio, ligado ou desligado. A seguir são expostos os principais aspectos e características que envolvem estes dois métodos de controle para unidades de bombeio mecânico.

3.1.1 Estratégia de Controle *Pump-Off*

O *pump-off* é um forma genérica de denominar os controles intermitentes sobre o sistema de bombeio mecânico, esta estratégia está basicamente fundamentada em cinco métodos [Westerman,

1977]. Na literatura, destes cinco métodos, os mais utilizados baseiam-se em sensores de vibração, monitoramento da corrente do motor principal, e a carga atuante na bomba (dado adquirido através de um dinamômetro, ou célula de carga, fixado à haste polida). Um outro método é utilizar um sensor de fluxo, e pré-determinar momentos de parada do poço, através dos instantes de tempo em que não existe um fluxo total [Neely e Tolbert, 1988], [Amezcuca, 1980]. E por fim, existe a possibilidade de controlar o nível do anular, e para tal, pode-se utilizar a pressão de fundo como parâmetro de realimentação do controle.

Esta idéia de controle intermitente baseia-se em garantir a menor pressão de fundo possível ocasionando uma maior produção de fluido, já que a contra pressão sobre os canhoneados é menor. O objetivo principal é levar o nível do fluido até a sucção da bomba no período final de operação. O momento crítico ao analisar o nível no anular e determinar o desligamento do poço é quando a bomba se encontra na iminência do curso ascendente, já que um nível insuficiente de fluido no anular do poço ocasionará um enchimento parcial da bomba, o que certamente levará a uma pancada de fluido.

Um controle ideal, que possibilitaria controlar o nível em uma determinada referência exigiria um chaveamento infinito do sinal de controle, o que em termos práticos não é possível. Assim, na estratégia de controle *pump-off* se trabalha com o controle do nível sobre uma faixa próxima ao nível de referência. Existem dois parâmetros que devem ser ajustados conforme projeto e necessidade de controle, são eles:

- Velocidade da unidade de bombeio;
- Nível de religamento da unidade de bombeio, ou tempo de espera (também denominado como tempo de *pump-off*).

Ressalta-se que o parâmetro velocidade da UB é objeto de estudo na parte do projeto, e uma vez definido, é mais complicado atuar sobre este. Uma alternativa é aumentar o curso efetivo do pistão. Caso não seja suficiente tal procedimento, é necessário intervir o poço com sonda e aumentar a capacidade da bomba, isso se faz com uma bomba com diâmetro maior, fica evidenciado que é alto o custo para a troca da bomba de fundo. Por isso, é vital que esta parte do projeto seja bem executada. Já o nível de religamento está relacionado à política de controle, e é alvo de estudo para as estratégias de controle.

A utilização do *pump-off* na indústria expandiu-se rapidamente dado seu caráter de simplicidade e eficiência. Como um dos primeiros métodos de controle, o *pump-off* propiciou uma economia de energia (já que a UB era desligada por períodos durante o dia) e evitava ao máximo o fenômeno

da pancada, ocasionando redução nos custos com manutenção. Apesar das limitações que existem no aspecto de controle é um método que procura sempre manter o menor nível possível no anular.

3.1.2 Estratégia de Controle VSD

O controle VSD está baseado em uma velocidade variável de bombeio propiciada utilizando um inversor de frequência instalado na superfície junto a UB, este dispositivo permite uma maior flexibilidade ao projeto, uma vez que, para manter o nível desejado no anular do poço de produção, pode-se ajustar a velocidade de bombeio, e conseqüentemente a vazão de óleo, conforme a necessidade de controle. Portanto, uma grande diferença em relação ao controle *pump off* é que antes a vazão de produção variava discretamente (ou seja, bombeamento total ou nulo), e agora, com o VSD, a variação da vazão de saída dá-se de forma contínua e suave. Esta estratégia é bem empregada quando existe informação sobre a pressão de fundo e permite configurar a capacidade de bombeamento conforme a dinâmica do nível do anular [Divine, 1980], [Collins e Autrey, 1986], [Wilson e Liu, 1985].

Dado este caráter de produção contínua, quando no controle *pump-off* a carta acusa que o nível de fluido no anular está próximo ao da sucção da bomba desliga-se a UB para que o nível no anular aumente assegurando a operação da UB sem a pancada de fluido, agora, com o controle VSD, pode-se diminuir a velocidade de bombeio a desligar a UB, e portanto, existe uma possibilidade de controlar o nível no anular sobre uma pequena faixa próxima a sucção da bomba. Além de trabalhar em um ponto de operação ótimo para a produção de fluido, elimina-se o custo operacional envolvido em desligar e ligar a UB, mas existe um custo fixo de instalação do inversor de frequência.

A velocidade da unidade de bombeio é definida em CPM (Ciclos por Minuto) e tem valores limites especificados, segundo informações obtidas em visita técnica e na literatura, o limite mínimo está associado à lubrificação necessária no redutor localizado na superfície, e o limite máximo está associado aos esforços mecânicos suportados pela própria unidade, e também pela coluna de hastes.

3.2 Controle do Sistema de Bombeio Mecânico Utilizando a CDF

A principal ferramenta de auxílio ao controle na indústria do petróleo relacionada ao bombeio mecânico é a carta de fundo. Dada as limitações de processamento do CLP e o algoritmo com alto custo computacional para a geração da carta de fundo, encontra-se um fator limitante no tempo de varredura do ciclo de controle. Uma nova carta de fundo é gerada em intervalos de aproximadamente

de 120 segundos (conforme dados oriundos de visita técnica a campos de produção), que pode ser uma limitação no tempo de resposta do algoritmo de controle.

O controle utilizando cartas dinamométricas utiliza o reconhecimento de assinaturas padrões de cartas associadas à defeitos já bastantes conhecidos na literatura para alertar sobre qualquer eventualidade os responsáveis pela produção, minimizando assim as perdas. Para o reconhecimento das cartas de forma automática são utilizadas várias técnicas baseadas em inteligência artificial, em Xu *et al.* [2006] são utilizadas redes neuronais artificiais (do termo inglês, *Artificial Neural Network*) para a classificação das cartas, em Filho *et al.* [1996] é apresentado um algoritmo que gera a carta de fundo através dos dados da carta de superfície, e faz a classificação da carta de fundo através de lógica *Fuzzy* associada a redes neuronais que analisam um conjunto de pontos significativos e normalizados da carta de fundo.

Um fator limitante no controle baseado nas cartas é que a produção de fluido, q_{total} [m^3/dia], responde à seguinte equação:

$$q_{total} = I_p (P_{estatica} - P_{wf}) \quad (3.1)$$

na qual, I_p [$m^3/dia Pa$] é o índice de produtividade do poço e $P_{estatica}$ [Pa] é a pressão no reservatório. Uma análise sobre a eq. (3.1) permite concluir que P_{wf} e q_{total} são indiretamente proporcionais, portanto, o objetivo de controle é encontrar um ponto de operação com a menor P_{wf} possível sem a ocorrência da pancada de fluido. Um cenário simplificado de controle exclusivamente com as cartas de fundo admite 2 hipóteses principais, conforme a Figura 3.1.

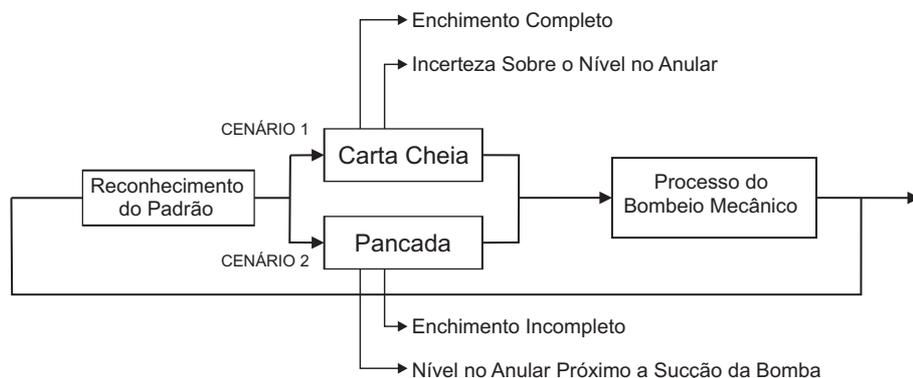


Figura 3.1: Controle do sistema de bombeio mecânico utilizando a CDF

Ao trabalhar com a carta cheia (cenário 1, na Figura 3.1) tem-se a vantagem de assegurar-se um enchimento completo da câmara da bomba de fundo, porém falta informação sobre o nível no anular,

e sabe-se que este nível tem forte impacto sobre a produção de óleo (o ponto ótimo de operação é caracterizado pelo nível do anular próximo ao da sucção da bomba). Portanto, para garantir a proximidade do nível no anular com a sucção da bomba faz-se necessário optar por trabalhar com uma pancada de fluido leve (cenário 2, na Figura 3.1), porém, este fenômeno acelera o desgaste dos componentes da bomba de fundo.

3.2.1 Controle *Pump-Off* Utilizando a Carta Dinamométrica de Fundo

A política de controle para o *pump-off* determina um ponto de parada pré-estabelecido de acordo com características individuais de cada poço. Isto pode ser visto na Figura 3.2, onde é definido um valor relativo ao curso do pistão e carga atuante, que podem ser relacionados ao enchimento da bomba. Assim, o controle é feito considerando apenas um enchimento parcial da bomba de fundo.

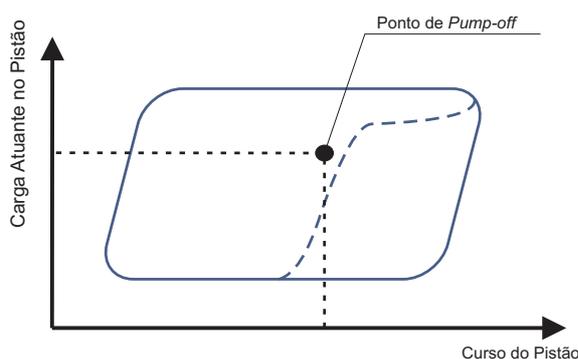


Figura 3.2: Determinação do ponto de *pump-off*

Para emular o controle *pump-off* através das cartas de fundo serão considerados 2 cenários. O primeiro com alto desempenho de reconhecimento, no qual admite-se que o sistema identifique a pancada de fluido com um enchimento de 95% da câmara da bomba de fundo (o dado de enchimento da câmara do pistão é fornecido pelo simulador), e um segundo cenário mais tolerante e próximo à realidade dos poços de produção, no qual a capacidade de reconhecimento da pancada se dá com um enchimento de 70% da câmara da bomba de fundo. Na Figura 3.3 são mostradas as duas hipóteses para emulação do controle utilizando a carta de fundo.

A emulação do controle se faz presente para substituir o reconhecimento do padrão através das cartas, já que este não é o objetivo da pesquisa, e também a Petrobras conta com seu próprio sistema para reconhecimento dos padrões. Portanto, para avaliação dos algoritmos a emulação do controle através das cartas cumpre seu objetivo. O sistema de controle é apresentado na Figura 3.4 sob a forma de um diagrama de blocos.

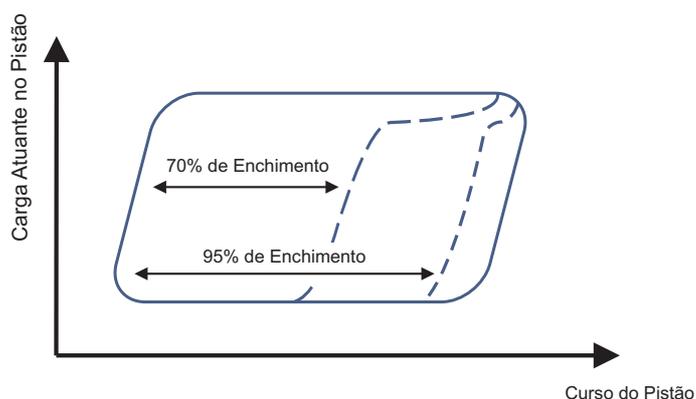


Figura 3.3: Analogia entre o padrão da CDF para a pancada de fluido e o enchimento da câmara da bomba de fundo

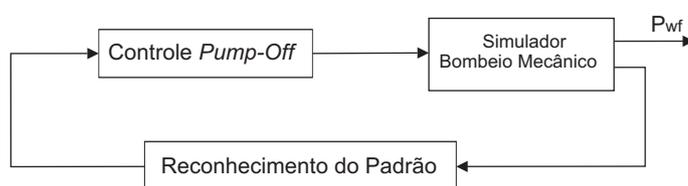


Figura 3.4: Diagrama de blocos para o controle *pump-off* utilizando a CDF

O algoritmo de controle é mostrado na Figura 3.5, e está baseado em algoritmo da Petrobras [Corrêa, 2007]. Este algoritmo está implementado no bloco *Controle Pump-Off* no diagrama da Figura 3.4.

Na Figura 3.5 o algoritmo avalia se a carta gerada no poço de produção é semelhante ao padrão da pancada de fluido, se afirmativo, desliga-se automaticamente a UB e espera-se pelo tempo pré determinado segundo condições locais e individuais do histórico do poço de produção. Caso o sistema não identifique a pancada, a UB continua operando admitindo que o enchimento parcial da bomba de fundo ainda proporciona condições satisfatórias de produção. O tempo determinado para geração e avaliação da carta de fundo gerada na coluna de produção é de 120 segundos.

3.2.2 Controle VSD Utilizando a Carta Dinamométrica de Fundo

Para a simulação do controle VSD utiliza-se a mesma analogia entre o reconhecimento do padrão das cartas e o enchimento da câmara da bomba de fundo. Novamente admitem-se 2 cenários com enchimentos de 70% e 95%, e tempo para geração e avaliação das cartas de 120 segundos. A implementação do controle é apresentada da Figura 3.6 sob a forma de um diagrama de blocos.

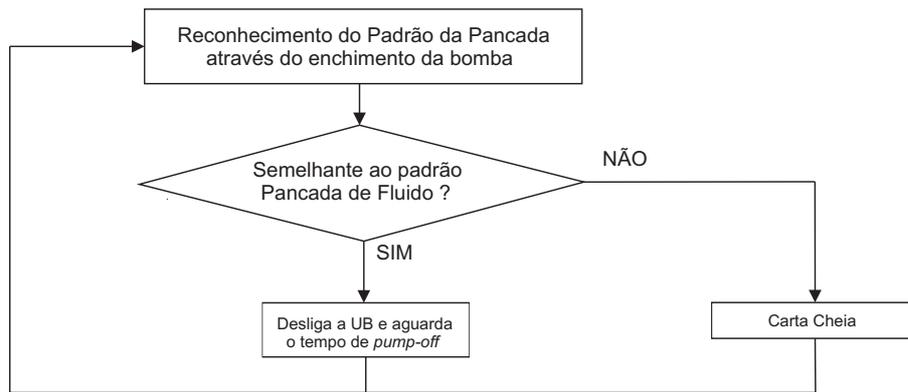


Figura 3.5: Algoritmo de controle *pump-off* utilizando a CDF

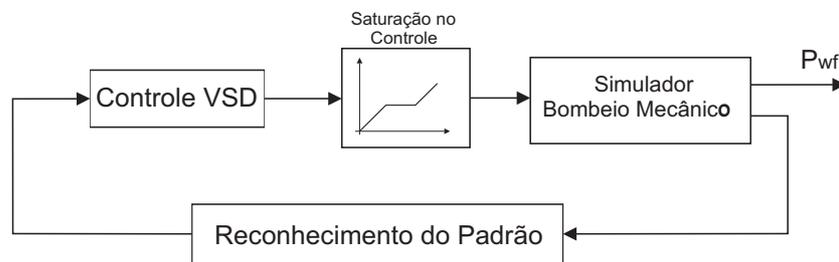


Figura 3.6: Diagrama de blocos para controle VSD utilizando a CDF

De acordo com o diagrama nota-se que não existe uma referência de pressão. A única referência para o controle se dá quando o sistema detecta a pancada de fluido, e assim, pode-se inferir que o nível do anular está próximo à sucção da bomba, na realidade, um pouco abaixo deste nível. Por isso, o controle faz uma excursão sucessiva entre os limites máximo e mínimo de velocidade da UB buscando sempre uma pancada suave para assegurar que o nível esteja próximo a um ponto ótimo de operação.

O algoritmo de controle é mostrado na Figura 3.7, e esta baseado em algoritmo da Petrobras [Corrêa, 2007]. O algoritmo apresentado está implementado no bloco *Controle VSD* na Figura 3.6.

O algoritmo verifica a semelhança da CDF com o padrão da pancada fluido, se a resposta for positiva, ou a velocidade de bombeio é diminuída ($CPM > CPM_{min}$), ou alerta-se na tela que a velocidade mínima foi atingida ($CPM \leq CPM_{min}$). Outra possibilidade é que não exista semelhança com o padrão da pancada, nesta situação, a velocidade pode ser incrementada ($CPM < CPM_{max}$), ou é indicado que a velocidade máxima foi atingida ($CPM \geq CPM_{max}$).

Este algoritmo trabalha constantemente entre situações com carta cheia e pancada de fluido. Depois de uma situação com carta cheia, aumenta-se a velocidade da UB até ocorrer a pancada, e assim, tem-se a garantia sobre a proximidade do nível com a sucção da bomba. De forma análoga,

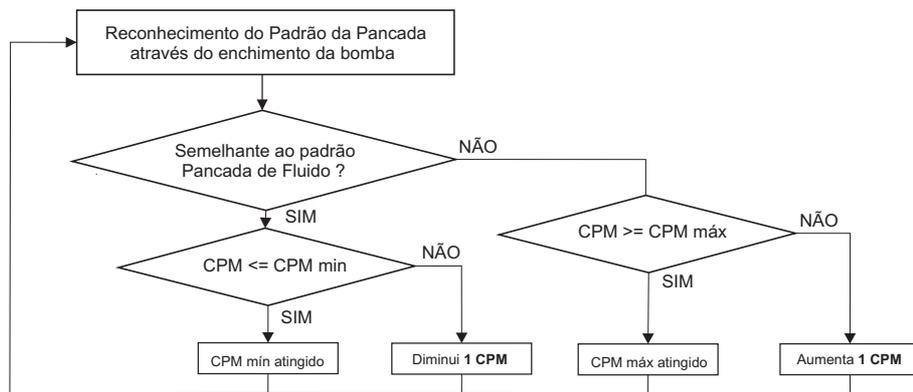


Figura 3.7: Algoritmo de controle VSD utilizando a CDF

depois de uma situação com pancada, a velocidade é diminuída até uma situação com carta cheia, para garantir enchimento completo da bomba.

Este chaveamento é necessário, pois admitindo-se trabalhar apenas com a carta cheia, o nível no anular pode encontrar-se próximo à sucção da bomba, ou 10, 50, 100 metros acima deste ponto. Para resolver este problema, admite-se trabalhar com uma pancada de fluido para garantir que o nível no anular se encontre próximo à sucção da bomba.

Dada a demora de 120 segundos que existe na atuação do controle para a geração e avaliação das cartas, quando existe uma situação de mudança de velocidade da UB, o acréscimo (ou decréscimo) da velocidade de bombeio é de uma unidade de CPM com intuito de compensar este tempo de espera.

3.3 Simulação e Análise dos Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com as simulações e seus respectivos comentários acerca de cada estratégia empregada utilizando a carta de fundo.

Simulação do Controle *Pump-off*

Um aspecto importante para a simulação do controle *pump-off* é a definição do tempo de parada do poço (denotado por T), dado que a pancada de fluido é reconhecida pelo sistema, para esta simulação, admite-se que a pancada será reconhecida com um enchimento de 70% de enchimento da bomba. Outro fator para definição é a velocidade de bombeio da UB, para a simulação do *pump-off* será utilizado uma velocidade de 8 CPM. Este patamar de velocidade influi diretamente na vazão de produção da UB, que deve ser maior do que a vazão de formação quando a UB está funcionando.

Nas Figuras 3.8 e 3.9 são mostrados os comportamentos da pressão de fundo e velocidade de bombeio. O monitoramento da pressão de fundo está associado diretamente ao controle do nível no anular, e a velocidade de bombeio está associada a energia consumida pelo motor para a elevação do fluido.

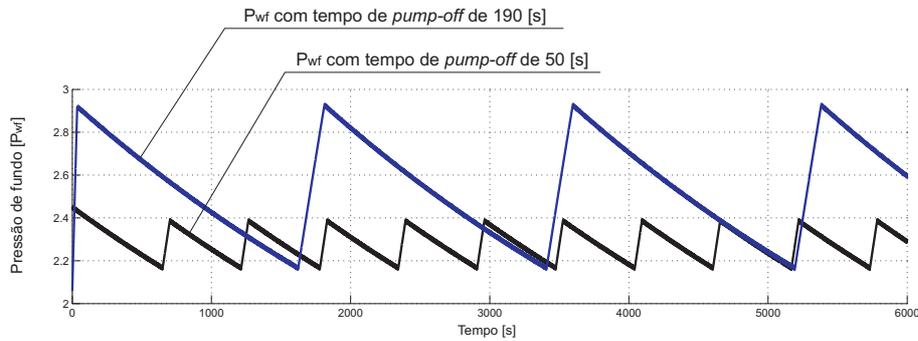
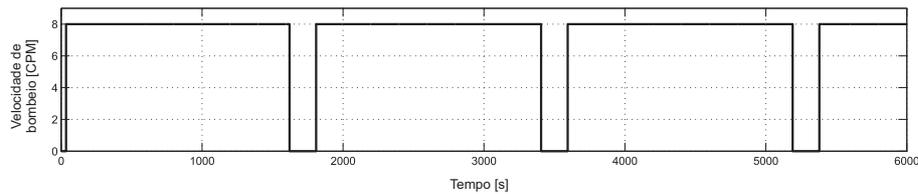
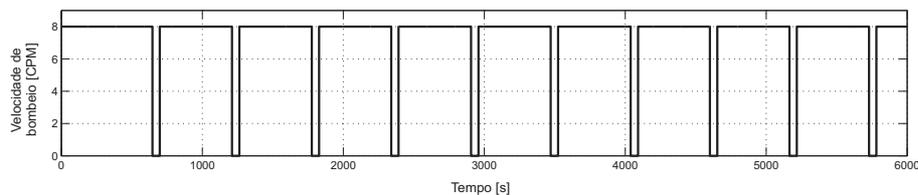


Figura 3.8: Evolução da P_{wf} para o controle *pump-off* utilizando a CDF



(a) Sinal de controle com tempo de pump-off em 50 s



(b) Sinal de controle com tempo de pump-off em 190 s

Figura 3.9: Evolução do sinal de controle para $v_{bombeio} = 8$ CPM

Na Figura 3.8 os tempos de parada são definidos em $T_1 = 50$ s e $T_2 = 190$ s. Este tempo de parada tem que ser definido sob um grande conhecimento do poço de produção e da capacidade do reservatório. O intuito desta simulação é mostrar a influência que tempos de parada diferentes têm na produção de óleo do poço, por isso, os tempos definidos como T_1 e T_2 foram arbitrados.

Na Tabela 4.2 são indicados alguns índices de produção, entre os quais, Q_f é a vazão média de formação (conhecida da relação (3.1)), Q_{UB} é a vazão média produzida pela UB (calculada a partir da relação (2.6)), $v_{bombeio}$ é a velocidade média de bombeio e N_{parada} é o número de paradas do poço, associado ao desligamento da UB.

Tabela 3.1: Índices de produção para o controle *pump-off* utilizando a CDF

	Q_f [m^3/dia]	Q_{UB} [m^3/dia]	$v_{bombeio}$ [CPM]	N_{parada}
pump-off de 50 s	27,715978	23,558581	7,303709	3
pump-off de 190 s	26,936939	22,896398	7,197552	10

Os resultados mostrados na Tabela 3.1 indicam que existe uma maior produção para um tempo de *pump-off* menor. Isso se justifica por dois principais motivos: (1) o tempo total de *pump-off* para T_1 é de 570 s e para T_2 é de 500 s, ou seja, o poço produziu por mais tempo sob um *pump-off* de 50 s, e (2), além de produzir por mais tempo, os níveis de pressão de fundo são menores, que conforme esclarecido em (3.1), incrementa os níveis de produção da formação, já que existe uma contra pressão menor sobre os canhoneados. Outro fator é que o número de paradas do poço, este é maior quanto menor for o tempo de *pump-off*, e existe um custo envolvido no processo de parada e religada do poço de produção.

Simulação do Controle VSD

Com relação ao controle VSD utilizando a carta de fundo, nas Figuras 3.10 e 3.11 são mostrados os comportamentos da pressão de fundo e velocidade de bombeio admitindo um reconhecimento da pancada em 70% de enchimento da câmara da bomba. A velocidade de bombeio, em CPM, é analisada já que existe uma relação direta entre esta variável e o consumo de energia.

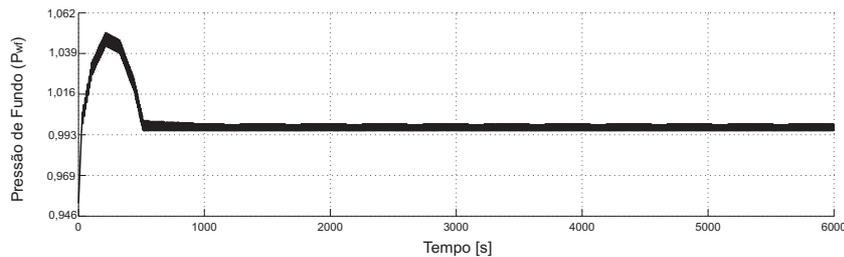


Figura 3.10: Evolução de P_{wf} para o controle VSD admitindo um reconhecimento da pancada com 70% enchimento da câmara da bomba de fundo

Em 3.12 e 3.13 são mostrados os comportamentos da P_{wf} e velocidade de bombeio da UB admitindo um reconhecimento da pancada com 95% de enchimento da bomba. Com relação a emulação do controle utilizando a CDF ressalta-se que o reconhecimento da pancada com enchimento de 95% tem propósito de comparação apenas, já que o custo computacional envolvido neste processo seria muito alto, a condição de operação mais comum é certamente trabalhar com um reconhecimento do padrão da pancada de fluido associado a um enchimento da câmara em aproximadamente 70%.

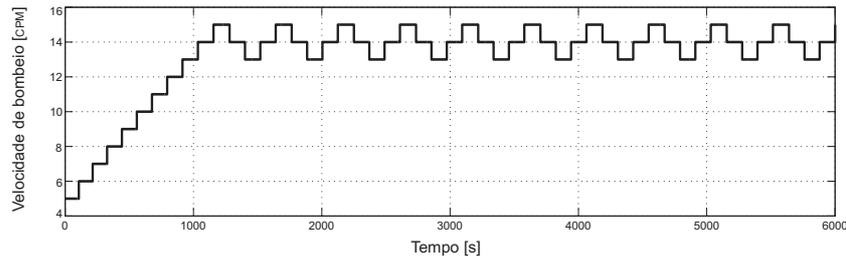


Figura 3.11: Evolução da velocidade de bombeio para o controle VSD admitindo um reconhecimento da pancada com 70% enchimento da câmara da bomba de fundo

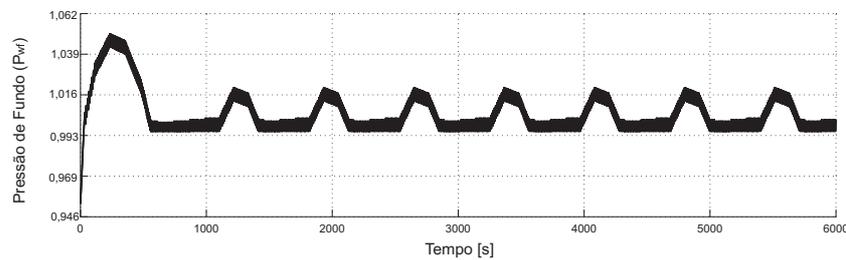


Figura 3.12: Evolução de P_{wf} para o controle VSD admitindo um reconhecimento da pancada com 95% enchimento da câmara da bomba de fundo

Ao trabalhar com o reconhecimento do padrão da pancada com enchimento de 70% é necessário operar em um patamar de velocidade maior, se comparado ao enchimento de 95%. Isto ocorre porque é necessário esvaziar mais a câmara da bomba, e para tal, incrementa-se a velocidade de bombeio diminuindo o nível do anular. Por isso, nas Figuras 3.11 e 3.13, existe uma diferença entre os patamares de trabalho, a excursão da velocidade para um enchimento de 70% encontra-se entre 13 e 15 CPM, e para um enchimento de 95% fica entre 6 e 9 CPM.

Na Tabela 3.2 são indicados alguns índices de produção, entre os quais, Q_f é a vazão média de formação (conhecida da relação (3.1)), Q_{UB} é a vazão média produzida pela UB (calculada a partir da relação (2.6)) e $v_{bombeio}$ é a velocidade média de bombeio.

Tabela 3.2: Índices de produção para o controle VSD utilizando a CDF

	Q_f [m^3/dia]	Q_{UB} [m^3/dia]	$v_{bombeio}$ [CPM]
Enchimento de 70%	29,563007	25,128556	13,165282
Enchimento de 95%	30,719315	26,111418	7,577162

Uma análise sobre os dados da Tabela 3.2 permite concluir que a vazão de formação para o reconhecimento do padrão associado a um enchimento de 70% da câmara da bomba é maior, se comparada a produção com enchimento de 95%, o que é esperado, já que o nível do anular é mais

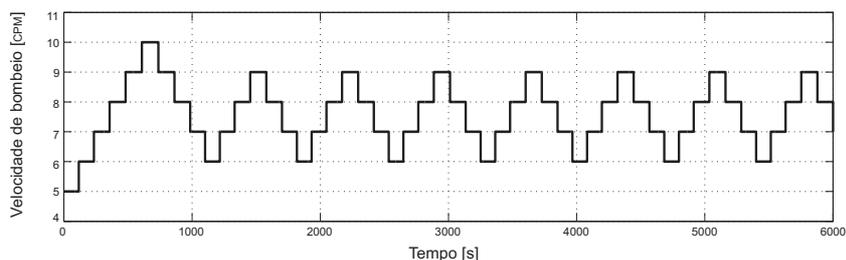


Figura 3.13: Evolução da velocidade de bombeio para o controle VSD admitindo um reconhecimento da pancada com 95% enchimento da câmara da bomba de fundo

baixo, dado que é necessário esvaziar mais a câmara para que o sistema reconheça a pancada. Porém, esta produção não é refletida na vazão produzida pela UB, o fluido fica retido no anular já que o enchimento da bomba é incompleto, uma indicação desta situação está refletida sob o índice r , o qual, para a simulação com enchimento de 95% é maior.

Os índices de produção de óleo são bastante parecidos, porém, as condições de operação têm importante papel sobre estes resultados. Primeiro, a severidade da pancada de fluido para o enchimento de 70% é maior, e assim, provocará danos maiores aos componentes do sistema, e segundo, a velocidade de bombeio média para um enchimento de 95% é praticamente a metade da velocidade média obtida na simulação para um enchimento de 70%, e esta velocidade média está associada diretamente ao gasto de energia para a elevação do fluido.

3.4 Conclusão

Neste capítulo foram abordadas as estratégias de controle sob o contexto apenas da informação da carta de fundo. Na estratégia de controle *pump-off* é essencial um conhecimento *a priori* do poço de produção, tanto na definição da velocidade de bombeio para operação da unidade de bombeio, como na determinação do tempo de parada do poço. Depois desta etapa inicial a implementação do controle é bastante simples, porém, a produção de óleo não é maximizada (vide os resultados expostos nas Tabelas 3.2 e 3.1). Outro problema é a ocorrência da pancada de fluido, que certamente aumenta os custos com a manutenção dos equipamentos da bomba de fundo e coluna de hastes, e que pode acentuar os problemas de produção caso seja necessária uma intervenção com sonda no poço para reparos nos equipamentos de fundo.

Pelas limitações do controle *pump-off*, a utilização da estratégia VSD foi expandida nos campos de produção. O custo inicial com a instalação do inversor de frequência é recuperado com o ganho

de produção que o controle proporciona (vide Tabela 3.2). Ainda existe uma limitação no controle por trabalhar-se apenas com a informação da carta dinamométrica de fundo e, portanto, existe a necessidade de buscar sempre a pancada de fluido para assegurar que o nível do anular esteja próximo ao da sucção da bomba. E outro fator limitante é o tempo de atuação que depende da geração da carta de fundo e do reconhecimento do padrão da carta, que dada as limitações de processamento existentes no poço de produção, está na faixa de 120 segundos.

Capítulo 4

Proposta de Operação de Poço com Bombeio Mecânico Utilizando a Pressão de Fundo

Neste capítulo objetiva-se incluir a informação da pressão de fundo (P_{wf}) para aprimorar o controle dinâmico do nível do anular com intuito de incrementar a produção do poço visando maximizar a relação: produção de óleo vs velocidade de bombeio da UB (relacionado diretamente ao gasto de energia). Outro fator importante passível de discussão são os custos envolvidos com a manutenção, principalmente com os equipamentos de fundo, com a adição da P_{wf} ao controle pretende-se que estes gastos diminuam com a eliminação da pancada de fluido durante o ciclo de bombeio. Assim, aspectos sobre esta nova proposta de controle utilizando a pressão de fundo para o controle do sistema de bombeio mecânico são discutidos.

4.1 Controle do Sistema de Bombeio Mecânico Utilizando a Pressão de Fundo

Nesta seção são apresentadas as estratégias de controle sob o contexto da informação da pressão de fundo para o controle do sistema de bombeio mecânico. Novamente faz-se o uso das estratégias *pump-off* e VSD para comparação de resultados. O diferencial é que a malha de controle trabalha com um referencial de pressão que está associado a um nível de operação no anular do poço de produção, para tal, faz-se uma estimativa desse nível a partir do próprio dado da P_{wf} , fornecido pelo sensor de

fundo. O sistema empregado na Petrobras para monitoramento do processo faz a aquisição do dado da pressão de fundo com uma taxa de amostragem de 1 segundo.

4.1.1 Controle *Pump-Off* Utilizando a Pressão de Fundo

A estratégia de controle objetiva manter um nível de segurança que está referenciado à entrada de sucção da bomba. Este nível está relacionado ao intuito de deixar a bomba operando sempre submersa e portanto, evitar a pancada de fluido. Para tal, monitora-se o comportamento dinâmico do nível no anular durante o ciclo de bombeio, se for constatado que o nível no anular é menor do que o nível de referência estabelecido, desliga-se a unidade de bombeio interrompendo a produção, até que o nível atinja um valor definido em função das condições locais do poço e reservatório, e denominado neste trabalho como: *nível de religamento*. A determinação deste nível leva em consideração o número de desligamentos do motor, a produção de óleo e os custos envolvidos nestes processos. Sobre esta variável pode-se dizer que é o principal parâmetro de controle para a estratégia *pump-off* utilizando informação da pressão de fundo.

A estratégia de controle associa-se individualmente a cada poço, já que são necessárias informações sobre este, como a velocidade angular do motor (responsável pelo movimento harmônico das hastes polidas), comprimento total do conjunto das hastes e respectivo curso do pistão, capacidade da bomba de fundo, condições do reservatório, entre outros aspectos. Posteriormente a definição da velocidade de bombeio (que definirá qual será a capacidade de bombeio da UB), o principal aspecto do controle *pump-off* utilizando informação da pressão de fundo é:

- Definição do tempo de *pump-off*: tempo no qual a UB permanece desligada até que o nível de anular atinja o *nível de religamento*, definido em projeto. A partir deste momento a UB permanecerá ligada até o nível atingir a sucção da bomba de fundo, definindo o ciclo de bombeio.

O tempo de *pump-off* está ligado fortemente ao controle, e pode ser ajustado conforme verifique-se a necessidade de fazê-lo. Daí, pode-se dizer que é este o principal parâmetro de controle na estratégia *pump-off* para o controle dinâmico do nível do anular. Nas Figuras seguintes este nível é identificado como *nível de religamento*.

Um diagrama de blocos explicativo sobre a estratégia de controle é mostrado na Figura 4.1. É uma estratégia de controle realimentado simples, na qual, compara-se um sinal de referência de pressão (a referência de pressão, $P_{wf\ ref}$, está associada ao nível de sucção da bomba de fundo) com

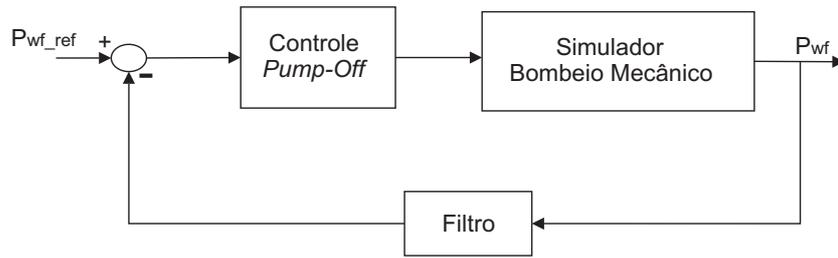


Figura 4.1: Diagrama de blocos para o controle *pump-off* utilizando a P_{wf}

a pressão fornecida pelo sensor de fundo. Desta comparação tem-se o sinal de erro, e através deste, determina-se o desligamento (ou religamento) da unidade de bombeio.

O algoritmo implementado no bloco *Controle Pump-off* na Figura 4.1 é apresentado na Figura 4.2.

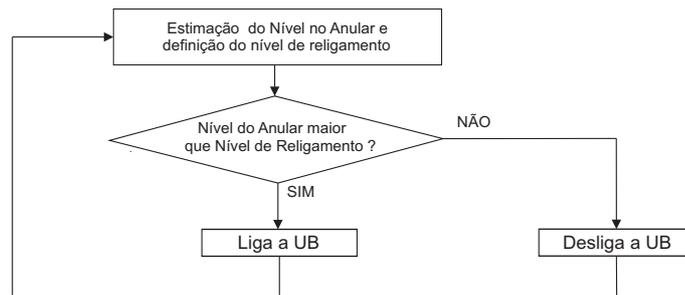


Figura 4.2: Algoritmo de controle *pump-off* utilizando a P_{wf}

No algoritmo é definido qual é o nível de religamento. A função do algoritmo é comparar o nível atual com o nível de religamento, se o nível do anular for maior, a UB é ligada até que o nível atinja a sucção da bomba de fundo, e então a UB é desligada, até que o nível do anular atinja o valor do nível de religamento.

4.1.2 Controle VSD Utilizando a Pressão de Fundo

Na Figura 4.3 é apresentada a estrutura de controle utilizando dados da P_{wf} , o que permite fechar a malha e trabalhar com uma referência de pressão, que pode ser modificada conforme as condições do poço sofram alterações.

A informação da P_{wf} é utilizada para o controle dinâmico do nível do anular, e portanto, incrementar a produção de óleo. O monitoramento do nível é feito usando a variável controlada P_{wf} com a manipulação da velocidade da UB. O modelo da planta para sintonia do controlador é definido

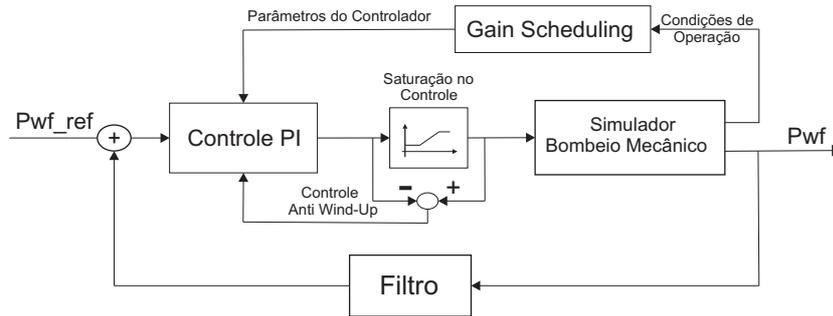
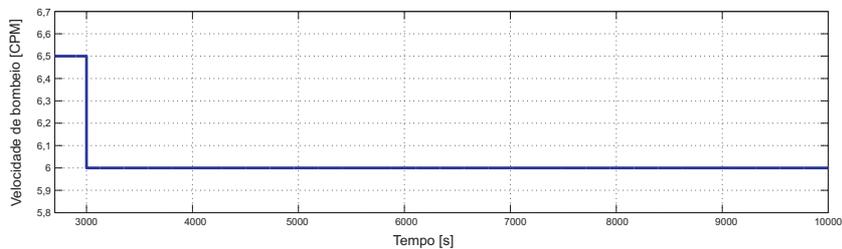


Figura 4.3: Diagrama de blocos para o controle VSD utilizando a P_{wf}

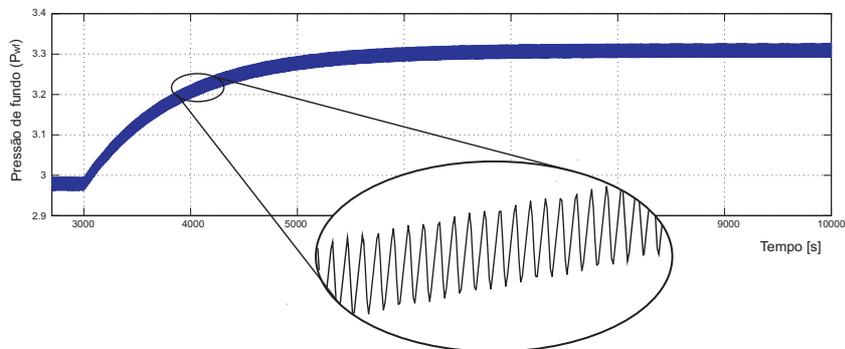
a partir de ensaio em malha aberta para a resposta ao degrau sobre a velocidade de bombeio, vide Figura 4.4. A resposta se aproxima de um modelo de primeira ordem com oscilação, causada pelo movimento harmônico da coluna de hastes. Aproxima-se a máscara da planta desconsiderando a componente oscilatória pelo modelo abaixo:

$$H_p(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (4.1)$$

no qual, K é o ganho estático e τ é a constante de tempo do sistema.



(a) Degrau na velocidade de bombeio



(b) Evolução da pressão de fundo

Figura 4.4: Ensaio em malha aberta

Na Figura 4.4 (b), constata-se que o atraso causado pela flexibilidade da coluna de hastes frente

à dinâmica de todo o sistema pode ser desconsiderado, já que este atraso não é significativo na resposta do processo.

O controle proposto utiliza a técnica de controle VSD com sintonia através de *gain scheduling*, considerada uma forma de controle adaptativa, na qual os parâmetros do controlador são modificados conforme a evolução das condições de operação do processo, reduzindo possíveis efeitos negativos que esta mudança da planta possa causar sobre o desempenho do controlador [Aström e Wittenmark, 1994].

Identificação dos Parâmetros

Para a sintonia do controlador são desprezadas as dinâmicas associadas às hastes admitindo um modelo com uma vazão média de saída. Em malha aberta, são aplicados degraus dentro dos limites de velocidade da UB com intuito de obter as curvas de respostas sobre diferentes pontos de operação para sintonizar o controlador conforme a variação destes pontos. O limite de operação da UB é definido por motivos construtivos, portanto, a UB tem velocidade mínima de 5 *CPM* (para lubrificação mínima do redutor) e velocidade máxima de 14 *CPM* (esforço mecânico máximo suportado pelo conjunto de hastes).

Na literatura existem diversos métodos para sintonia utilizando a curva de resposta ao degrau. Na Figura 4.5 é mostrado como são calculados os parâmetros K e τ .

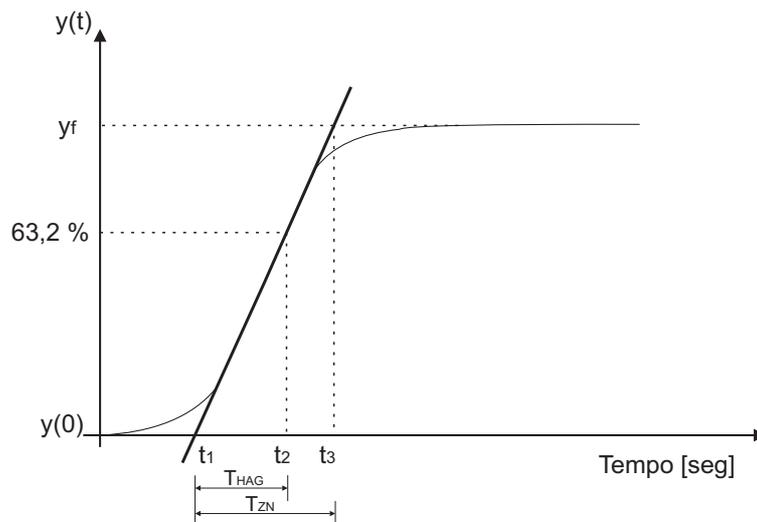


Figura 4.5: Métodos de identificação de Ziegler-Nicholls e Haggglund

A reta traçada corresponde a tangente do ponto de máxima inclinação da curva de reação do

sistema. O atraso não é calculado já que a resposta no sistema sobre os parâmetros citados anteriormente é bastante rápida. No método de Ziegler-Nicholls a constante τ_{ZN} é determinada pelo instante de tempo entre t_1 e t_3 , este último é definido quando a reta tangente toca a reta $y(t) = y_f$. Já no método de Hagglund, a mesma constante τ_{HAG} é calculada pelo intervalo entre os instantes t_1 e t_2 , este último é definido quando a curva de resposta alcança o valor $y(t) = y(0) + 0,63 \cdot y_f$. Em ambos métodos o parâmetro K é calculado pela equação a seguir:

$$K = \frac{\Delta y(t)}{\Delta u(t)} \tag{4.2}$$

na qual, $u(t)$ é o sinal de entrada e $y(t)$ o sinal de saída do sistema. Neste trabalho será utilizado o método de Ziegler-Nicholls para identificação.

Para a sintonia do controlador foram realizados três ensaios em malha aberta, no qual são modificadas as condições do reservatório. Como é possível atuar de forma independente sobre as válvulas que regulam a entrada de fluido na coluna de produção, são propostas três situações, a primeira produzindo apenas com a zona C, a segunda com as zonas C e B, e uma terceira com todas as zonas produzindo. Um cuidado especial é necessário já que pode existir fluxo cruzado, ou seja, uma zona alimentar outra zona do reservatório, e não o poço de produção.

Para cada degrau aplicado na velocidade de bombeio é obtido um ponto de operação da planta, que tem uma sintonia fixa associada a este ponto, conforme a equação (4.2) e Figura 4.5. Estes pontos operação são mostrados na Figura 4.6, e utilizando o método dos mínimos quadrados são extrapolados estes pontos com intuito de fornecer uma sintonia para o controlador dentro de toda a faixa de operação do sistema.

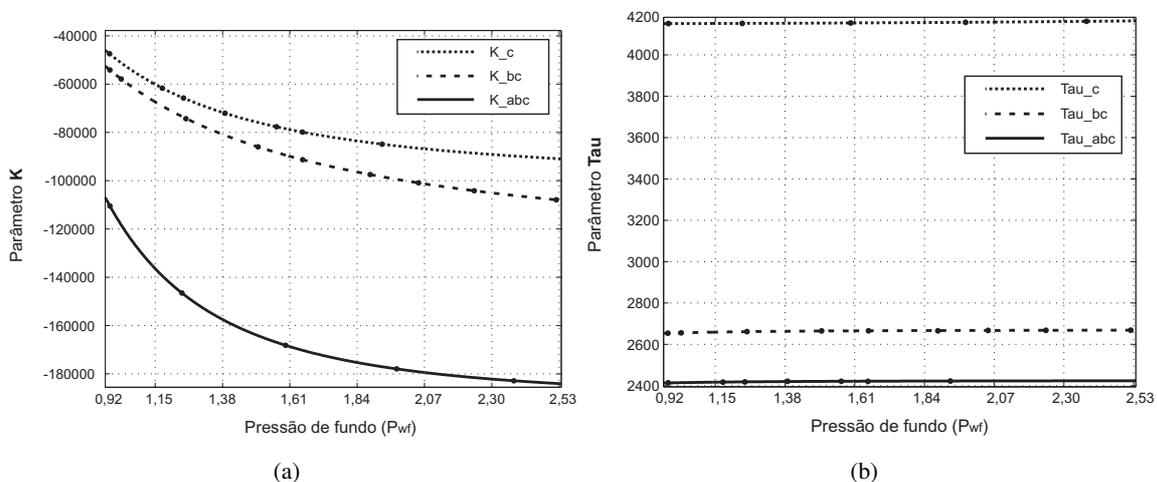


Figura 4.6: Parâmetros K e τ para diferentes cenários de reservatório

Para adaptação dos valores de K e τ utilizam-se os dados fornecidos pelas curvas da Figura 4.6, e assim existe um valor de K e τ para qualquer ponto de operação dentro dos limites de operação da UB, e de acordo com as zonas produtoras. Conforme pode-se observar na Figura 4.6, o parâmetro τ tem uma variação bastante pequena sobre a faixa de operação, e portanto, é utilizado um valor médio e constante para a sua implementação. As curvas aproximadas são mostradas a seguir:

$$\begin{aligned} K_C &= 7,371 \cdot P_{wf}^{-1,902} - 9,975 \cdot 10^4 \\ \tau_C &= 4155 \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} K_{BC} &= 7,903 \cdot P_{wf}^{-1,315} - 1,304 \cdot 10^5 \\ \tau_{BC} &= 2663 \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} K_{ABC} &= 2,389 \cdot P_{wf}^{-2,713} - 1,904 \cdot 10^5 \\ \tau_{ABC} &= 2429 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Conforme a evolução do processo e mudanças que possam ocorrer no ponto de operação, a sintonia do controlador é ajustada automaticamente, e portanto, garante-se uma auto sintonia sobre o controlador. O controlador utilizado é um PI, dado sua simplicidade de implementação associada a um desempenho satisfatório para este tipo de sistema. Seja a função de transferência do controlador PI:

$$H_c(s) = K_p \frac{T_i s + 1}{T_i s} \quad (4.6)$$

Com base em Skogestad [2001] a sintonia de K_p e T_i , são respectivamente apresentadas abaixo. Onde T_c é um parâmetro de ajuste de projeto, que interfere nos valores do ganho do controlador K_p e no tempo integral T_i .

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{\tau}{KT_c} \\ T_i &= 4T_c \end{aligned} \quad (4.7)$$

O valor ótimo de T_c é determinado por um compromisso entre uma rápida resposta e boa rejeição à perturbação no processo (pequeno valor de T_c) com a robustez e menor esforço de controle (alto valor de T_c). Neste trabalho, depois de resultados experimentais, utilizar-se-á $T_c = 35$.

Observa-se na Figura 4.3 que uma saturação é adicionada ao sistema por motivos já explicado sobre os limites da velocidade de bombeio da UB e isso requer um cuidado na implementação do algoritmo em relação a porção integral do controle, denominado *wind-up* da ação integral. Quando o sinal de controle é saturado (atinge os valores limites mínimo ou máximo), a malha de realimentação é de certa forma interrompida, já que para o controlador consta o cálculo do sinal de controle sem saturação, mas para o processo, o sinal recebido é o saturado, e assim, de alguma forma é necessário informar o controlador que o sinal foi saturado. A idéia principal é opor-se ao carregamento do integrador quando ocorre a saturação realimentando a saturação sobre a porção integral do controlador. Portanto, utiliza-se um controle *anti wind-up* com objetivo de melhorar o desempenho do controlador. Portanto, o controlador tem a seguinte função de transferência:

$$u(s) = K_p \left(\frac{T_i s + 1}{T_i s} \right) \cdot e(s) + \left(\frac{1}{T_t s} \right) \cdot e_{sat}(s) \quad (4.8)$$

na qual, $u(s)$ é o sinal de controle, $e(s)$ é o sinal de erro e $e_{sat}(s)$ é o sinal de erro do controle saturado.

Filtragem do Sinal da Pressão de Fundo

Com relação a P_{wf} , o movimento da coluna de hastes nos sucessivos ciclos de bombeio provocam um comportamento oscilatório na pressão de fundo com freqüência associada a velocidade da bombeio. Para minimizar este efeito na entrada do controlador, utiliza-se um filtro na realimentação do controle com o objetivo de que a saída de controle (velocidade da unidade de bombeio) não apresente esta oscilação, melhorando assim, o desempenho do controlador.

Para a síntese do filtro determina-se uma faixa de atenuação para o filtro. Dado que as oscilações que se desejam suprimir são as causadas pela velocidade de bombeio, então a faixa de atenuação é definida através dos limites de velocidade da UB (responsável pela oscilação na pressão de fundo). Estes valores limites são definidos na tabela 4.1.

O filtro projetado é um passa-baixas, com ganho unitário e freqüência de corte em $0,05 \text{ rad/s}$. Esta freqüência de corte é fixada uma década abaixo da mínima freqüência de oscilação, relacionada

Tabela 4.1: Limites de frequência para a velocidade de bombeio [CPM]

$v_{bombeio}$	w [rad/s]
5 CPM	0,5234
14 CPM	1,4658

à velocidade da UB de 5 CPM. Na equação 4.9 é mostrada a função de transferência para o filtro projetado.

$$H_f(s) = \frac{0,05}{s + 0,05} \quad (4.9)$$

Na Figura 4.7 é mostrado o efeito de suavização do sinal que o filtro causa no comportamento oscilatório da pressão de fundo.

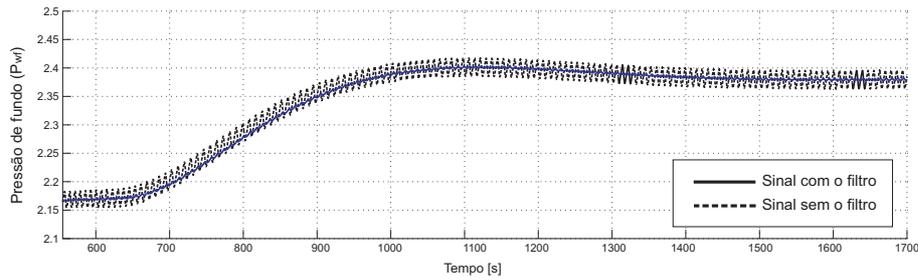


Figura 4.7: Efeito do filtro passa-baixas sobre a pressão de fundo

Definição da pressão de referência

A pressão de referência é definida para um dado nível no anular, N , que está relacionado com o nível de sucção da bomba, e também de acordo com as partes de água e óleo supostas com base no histórico de produção do poço, ou algum teste inicial de completação. Portanto, a pressão de referência utilizada no controlador é dada a seguir:

$$P_{wf_ref} = P_{rev} + \rho_{gas}gN + \rho_{oleo}g(L - N) + \rho_{H_2O}g(H - L) \quad (4.10)$$

A pressão de fundo é normalizada nos gráficos desta dissertação, nos quais, a base é a pressão de referência inicial, calculada mediante a eq. (4.10).

Aspectos de Implementação

O CLP é um instrumento digital que possui limitações para amostrar as leis de controle projetadas no tempo contínuo. Para as implementações do controlador e filtro são investigadas as dinâmicas do sistema de bombeio mecânico que estão envolvidas na malha de controle. A oscilação de fundo causada pelo movimento das hastes é a principal dinâmica sobre tal comportamento oscilatório, e para minimizar este efeito um filtro analógico foi projetado. A frequência de amostragem do filtro precisa ser duas vezes mais rápida do que a frequência fundamental de oscilação da pressão de fundo para evitar o fenômeno de *aliasing*. A máxima velocidade de bombeio é 14 CPM, e portanto, o período de amostragem T_s é determinado como a seguir:

$$T_s < \frac{1}{F_s} = \frac{60 \cdot 2}{14} = 8.57 \text{ s} \quad (4.11)$$

As funções de transferência do controlador e do filtro são implementadas no CLP através de equações a diferenças. A discretização é feita utilizando o método de Tustin. Esta aproximação é feita como a seguir:

$$s = \frac{2}{h} \cdot \frac{z - 1}{z + 1} \quad (4.12)$$

no qual, h é o período de amostragem definido em 1 segundo. A implementação do controlador é mostrada a continuação:

$$u(z) = 0.028673 \frac{\tau}{K} \left(\frac{z - 0.992883}{z - 1} \right) \cdot e(z) + 0.008333 \left(\frac{z + 1}{z - 1} \right) \cdot e_{sat}(z) \quad (4.13)$$

e a função de transferência do filtro passa-baixas discretizado é dada a seguir:

$$H_f(z) = \frac{0.04309z + 0.04309}{z - 0.9138} \quad (4.14)$$

4.2 Simulação e Análise dos Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com as simulações e seus respectivos comentários acerca do desempenho de cada estratégia empregada utilizando a informação da pressão de fundo na malha de controle.

Simulação do Controle *Pump-off*

Para a simulação do controle *pump-off* através da pressão de fundo é necessário definir a velocidade de bombeio e o *nível de religamento*, conforme discutido na seção 4.1.1. Nesta simulação serão utilizados dois patamares de velocidade de bombeio, 8 *CPM* e 12 *CPM*, e ainda, são definidos dois níveis de religamento da UB (associados a $P_{wf\ ref}$, que está referenciada à pressão na boca de sucção da bomba) com intuito de verificar como estas variáveis influenciam o comportamento da pressão de fundo, e conseqüentemente, a produção de óleo do poço.

Na Figuras 4.8 e 4.9 (a) e (b) são apresentados os comportamentos da pressão de fundo e sinal de controle para a velocidade de bombeio definida em 8 *CPM*, respectivamente.

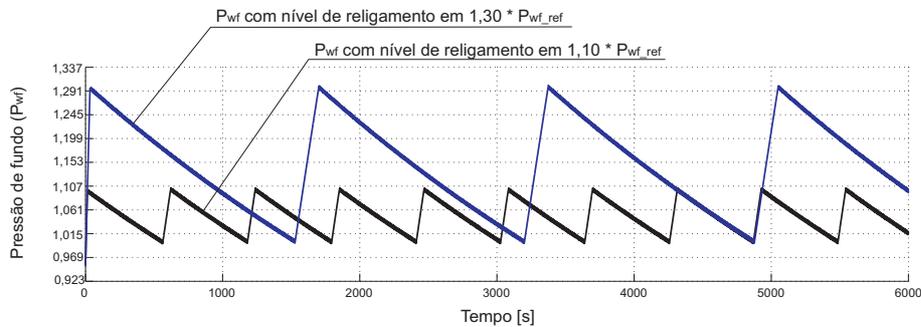
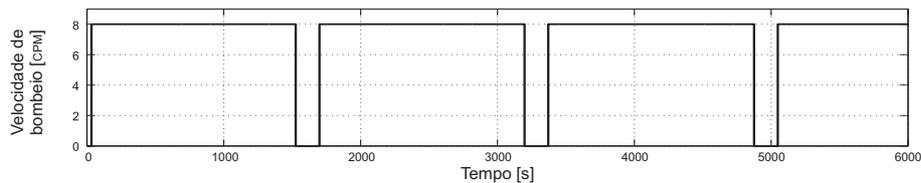
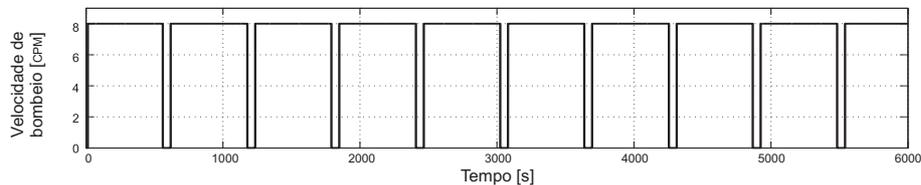


Figura 4.8: Evolução da P_{wf} para $v_{bombeio} = 8$ CPM - Controle *pump-off*



(a) Sinal de controle para $v_{bombeio} = 8$ CPM com nível de religamento em $1,10 \cdot P_{wf\ ref}$



(b) Sinal de controle para $v_{bombeio} = 8$ CPM com nível de religamento em $1,30 \cdot P_{wf\ ref}$

Figura 4.9: Evolução do sinal de controle para $v_{bombeio} = 8$ CPM - Controle *pump-off*

Na Figuras 4.10 e 4.11 (a) e (b) são apresentados os comportamentos da pressão de fundo e sinal de controle, nos quais foi variada a velocidade de bombeio para 12 *CPM*.

Nas figuras 4.8 e 4.10 tem-se o intuito de mostrar diferentes cenários que o controle *pump-off* utilizando a pressão de fundo admite. Tanto a velocidade de bombeio como o *nível de religamento*

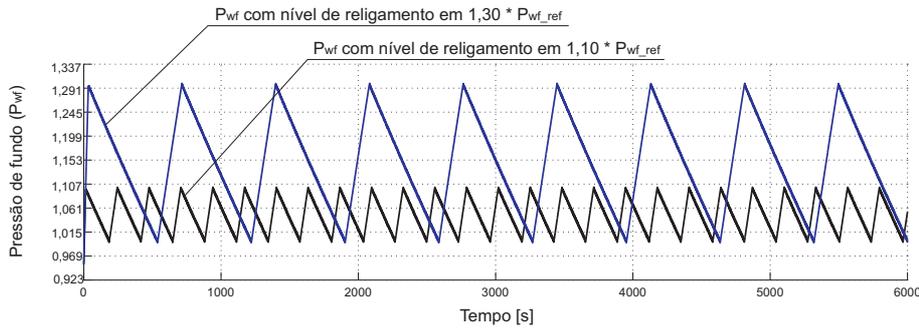


Figura 4.10: Evolução de P_{wf} para $v_{bombeio} = 12$ CPM - Controle *pump-off*

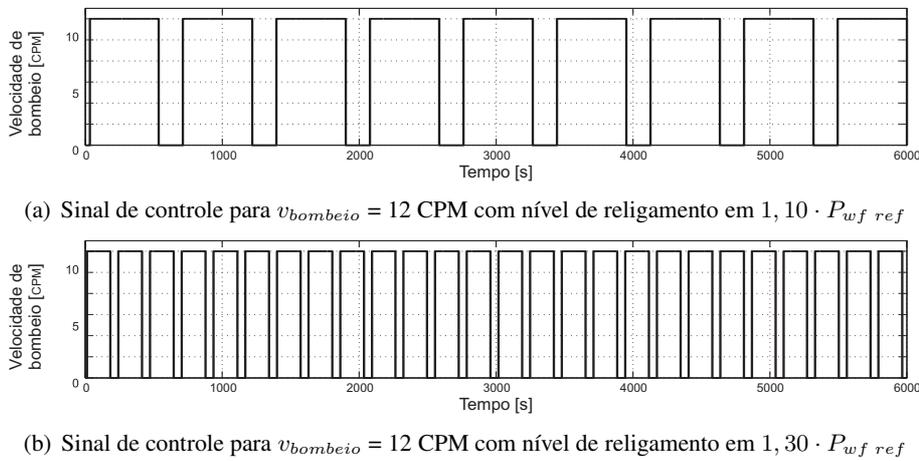


Figura 4.11: Evolução do sinal de controle para $v_{bombeio} = 12$ CPM - Controle *pump-off*

(que define o tempo de *pump-off*) influenciam na produção de fluido e o número de paradas do poço. Uma velocidade de bombeio maior diminui o tempo de funcionamento da UB entre os tempos de parada do poço, já que a vazão produzida pela UB é proporcional à velocidade de bombeio. Os níveis de religamento são variados para mostrar a ligação que existe entre o *nível de religamento* e o número de paradas do poço, já que o processo de parada do poço envolve um custo operacional.

Na Tabela 4.2 são indicados alguns índices de produção, entre os quais, Q_f é a vazão média de formação (conhecida da relação (3.1)), Q_{UB} é a vazão média produzida pela UB (calculada a partir da relação (2.6)), $v_{bombeio}$ é a velocidade média de bombeio e N_{parada} é o número de paradas do poço, associado ao desligamento da UB.

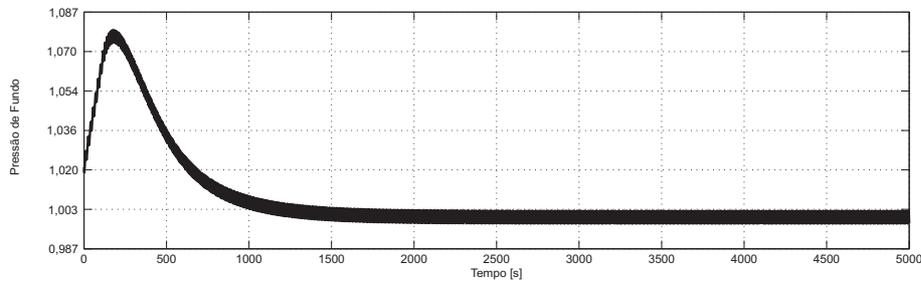
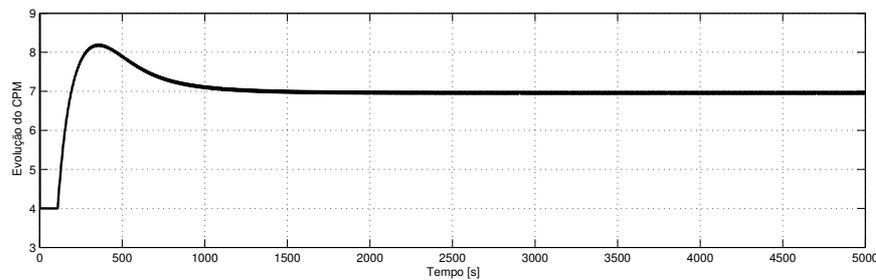
Como resultado das simulações, pode-se afirmar que para o controle *pump-off* é necessário um compromisso entre produção de óleo e parada do poço. Ao trabalhar mais próximo do nível de sucção da bomba a vazão de formação é incrementada, porém, o número de paradas do poço também é maior, conforme mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Índices de produção para o controle *pump-off* utilizando a pressão de fundo

	$Q_f [m^3/dia]$	$Q_{UB} [m^3/dia]$	$v_{bombeio} [CPM]$	N_{parada}
Relig. em 1, 10 $\dot{P}_{wf ref}$ - 8 CPM	27,304446	23,208779	7,296162	3
Relig. em 1, 30 $\dot{P}_{wf ref}$ - 8 CPM	26,881184	22,849007	7,262870	9
Relig. em 1, 10 $\dot{P}_{wf ref}$ - 12 CPM	27,309745	23,213283	8,994762	8
Relig. em 1, 30 $\dot{P}_{wf ref}$ - 12 CPM	26,898572	22,863786	9,106219	26

Simulação do Controle VSD

Os resultados obtidos com o controle VSD para os comportamentos da pressão de fundo e velocidade de bombeio são mostrados nas Figuras 4.12 e 4.13, respectivamente.

Figura 4.12: Evolução da pressão de fundo utilizando P_{wf} - Controle VSDFigura 4.13: Evolução da velocidade de bombeio utilizando P_{wf} - Controle VSD

Com o controle VSD é possível controlar a pressão de fundo, e por conseguinte, é possível controlar o nível do anular sobre o nível de referência. Na Tabela 3.2 são indicados alguns índices de produção, entre os quais, Q_f é a vazão média de formação (conhecida da relação (3.1)), Q_{UB} é a vazão média produzida pela UB (calculada a partir da relação (2.6)) e $v_{bombeio}$ é a velocidade média de bombeio.

Como esperado, o controle VSD proporciona maior produção quando comparado ao controle *pump-off*, ambos trabalhando com pressão de fundo. Nota-se mediante o índice Q_{UB} , que, para um

Tabela 4.3: Índices de produção para o controle VSD utilizando a pressão de fundo

	Q_f [m^3/dia]	Q_{UB} [m^3/dia]	$v_{bombeio}$ [CPM]
PI com P_{wf}	34,059079	28,950217	6,842718

mesmo período, existe uma produção maior para o controle PI com P_{wf} , e mais, uma análise sobre o índice r indica que o incremento de vazão é acompanhado por uma melhor relação da vazão produzida pelo gasto de energia, demonstrado através da velocidade de bombeio. Outro fator que acompanha o controle VSD é a não necessidade de parada do poço, já que a velocidade de bombeio pode ser ajustada conforme as condições de operação do poço.

Análise dos resultados entre os controles utilizando a P_{wf} e carta de fundo

Conforme os resultados obtidos nos capítulos 3 e 4 constatou-se que o controle VSD aporta um importante incremento da produção do poço, assim, faz-se necessário uma avaliação entre a estratégia VSD utilizando ora a carta dinamométrica de fundo, ora a pressão de fundo. Nss simulações constatam-se algumas vantagens na utilização do controle com a P_{wf} em relação a metodologia das cartas de fundo, já que se trabalha no ponto de operação sem a pancada de fluido. O controle via *gain scheduling* proporciona uma melhor sintonia para diferentes cenários relacionados a mudanças no reservatório que implicam na alteração dos pontos de operação.

A diferença do tempo de atuação do controle é significativa, passam-se dos 120 segundos de espera do reconhecimento do padrão das cartas para 1 segundo, que é o tempo de amostragem da P_{wf} . Como exemplo, admitindo uma velocidade de bombeio de 10 CPM, com o reconhecimentos das cartas em 120 segundos tem-se informação do sistema somente após 20 ciclos de bombeio, e com a P_{wf} tem-se 6 informações sobre o comportamento da pressão durante 1 ciclo, o que permite dizer que o controle com P_{wf} tem uma resposta mais rápida sobre as condições de operação. Na Figura 4.14 é apresentado um esquema gráfico sobre este comentário acerca dos tempos de resposta das estratégias.

Dado que o controle VSD aporta um importante incremento na produção, na tabela 4.4 é mostrada uma comparação entre os desempenhos do controle VSD para a carta de fundo e pressão de fundo, de acordo com as dados mostrados nas tabelas 3.2 e 4.3.

Outro fator de discussão é que ao trabalhar somente com a carta de fundo e conseqüentemente, admitir uma pancada de fluido, é maior a probabilidade de que ocorram problemas na bomba de fundo

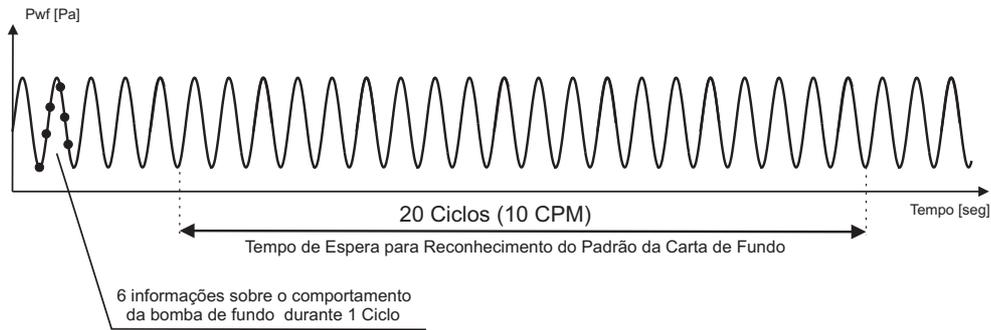


Figura 4.14: Comparação entre o tempo de resposta dos controles com P_{wf} e CDF

Tabela 4.4: Índices de produção para o controle VSD

	Q_f [m^3/dia]	Q_{UB} [m^3/dia]	$v_{bombeio}$ [CPM]
Enchimento de 70%	29,563007	25,128556	13,165282
Enchimento de 95%	30,719315	26,111418	7,577162
PI com P_{wf}	34,059079	28,950217	6,842718

que justifiquem um processo mais problemático na manutenção dos equipamentos. Evitar a pancada de fluido é também uma das vantagens que a informação sobre a pressão de fundo aporta ao sistema de controle do poço com bombeio mecânico.

4.3 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas as estratégias de controle sob a perspectiva dos dados da pressão de fundo. A grande vantagem que a pressão de fundo aporta ao controle é a informação sobre o nível no anular estimado, e assim, evita-se trabalhar com o fenômeno da pancada de fluido, garantindo melhores condições de trabalho para o sistema de bombeio, além da diminuição dos gastos com manutenção dos equipamentos da bomba de fundo e coluna de hastes.

Sob o aspecto de controle fica comprovado que o tempo de resposta do controlador frente a mudanças no sistema melhora com a informação da pressão de fundo, este dado reflete rapidamente comportamentos discrepantes na operação da bomba de fundo, e com isso, o desempenho do controle sobre o sistema de bombeio melhora.

Uma investigação sobre a média de fluido produzido associada ao gasto de energia permite dizer que o controle VSD associado aos dados da pressão de fundo tem desempenho melhor do que um controle que utiliza somente dados da carta dinamométrica de fundo. A informação da pressão

de fundo incrementa a produção já que o nível do anular se mantém próximo a sucção da bomba, e existe uma melhor relação entre vazão produzida e energia consumida ($v_{bombeio}$ [CPM]).

A estimação do nível do anular utilizando a pressão de fundo pode ficar comprometida se existir uma variação paramétrica significativa das partes de água, óleo e gás presentes no fluido. Assim, vislumbra-se uma estratégia de controle que utilize os dados de pressão de fundo e carta dinamométrica de fundo em conjunto, conforme será apresentado no próximo capítulo.

Capítulo 5

Proposta de Operação de Poços com Bombeio Mecânico Utilizando a P_{wf} e CDF

O controle baseado em dados da pressão de fundo aporta um incremento na produção de óleo do poço, conforme demonstrado no capítulo anterior. Por outro lado, tem-se a percepção sobre a importância e relevância que a informação da carta dinamométrica de fundo carrega e que portanto, pode aportar ao controle de sistemas de bombeio mecânico. Como proposta final de controle propõe-se um controle híbrido que mantenha o desempenho alcançado com o dado da pressão de fundo e utilize a carta dinamométrica de fundo para ajustar possíveis mudanças na referência de P_{wf} , que podem tornar-se necessárias por alguma deficiência no estimador de nível e/ou defeito nos sensores de fundo. O sistema de controle é composto por duas malhas de controle, uma primeira bastante rápida que utiliza a pressão de fundo para controlar o nível do anular, e uma segunda malha mais lenta, baseada na geração e reconhecimento da carta de fundo, que tem condição de avaliar o fenômeno da pancada de fluido.

Na Figura 5.1 é apresentado um diagrama que ajuda o entendimento da proposta de integração do controle com os dados da carta dinamométrica de fundo e pressão de fundo.

5. Proposta de Operação de Poços com Bombeio Mecânico Utilizando a P_{wf} e CDF70

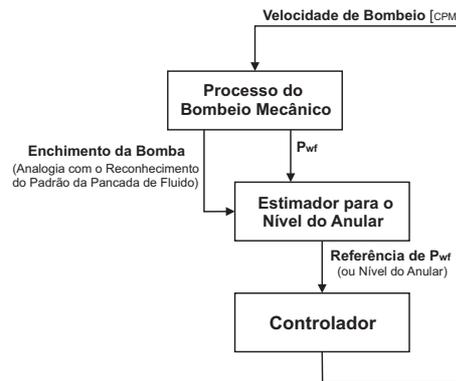


Figura 5.1: Diagrama de blocos para integração dos controles

5.1 Caracterização do Problema Através de Exemplo Ilustrativo

A justificativa para a implementação desta estratégia colaborativa de controle é apresentada nas Figuras 5.2 e 5.3, nas quais é exemplificado um problema que pode surgir a partir da variação paramétrica das partes de água, óleo e gás presentes no fluido, ou algum erro de medição do próprio sensor de fundo. Na Figura 5.2 (a), aparentemente o controlador recebe uma informação que parece correta sobre o nível estimado e o cenário de produção está otimizado, com ponto de operação próximo ao nível de sucção da bomba. Porém, vide Figura 5.2 (b), existe um erro sobre o nível estimado e isto compromete o desempenho da produção como pode-se constatar analisando a evolução do enchimento da câmara da bomba de fundo, na Figura 5.3.

Este problema ocorre porque o controlador trabalha apenas com o nível estimado (dado oriundo da pressão de fundo medida) e não tem outra informação sobre o desempenho da bomba de fundo para validação da informação recebida do sensor. Esta informação complementar sobre as condições de operação da bomba de fundo pode ser obtida a partir da carta de fundo. Caso a carta detecte a pancada de fluido, significa que o estimador não está fornecendo a referência correta para o controlador. Isso pode ocorrer, *a priori* por dois motivos:

- A composição do fluido sofreu alteração, e portanto as partes de água, óleo e gás são bastante diferentes das admitidas para a estimação. Ressalta-se que a forte presença de gás no fluido torna crítica a estimação do nível do anular;
- A calibração, ou funcionamento, dos sensores de fundo estão por algum motivo desconhecido prejudicados, e portanto, existe um erro de medição que compromete o valor de P_{wf} .

Com relação às hipóteses apresentadas, reescreve-se a seguir, o equacionamento que fornece o

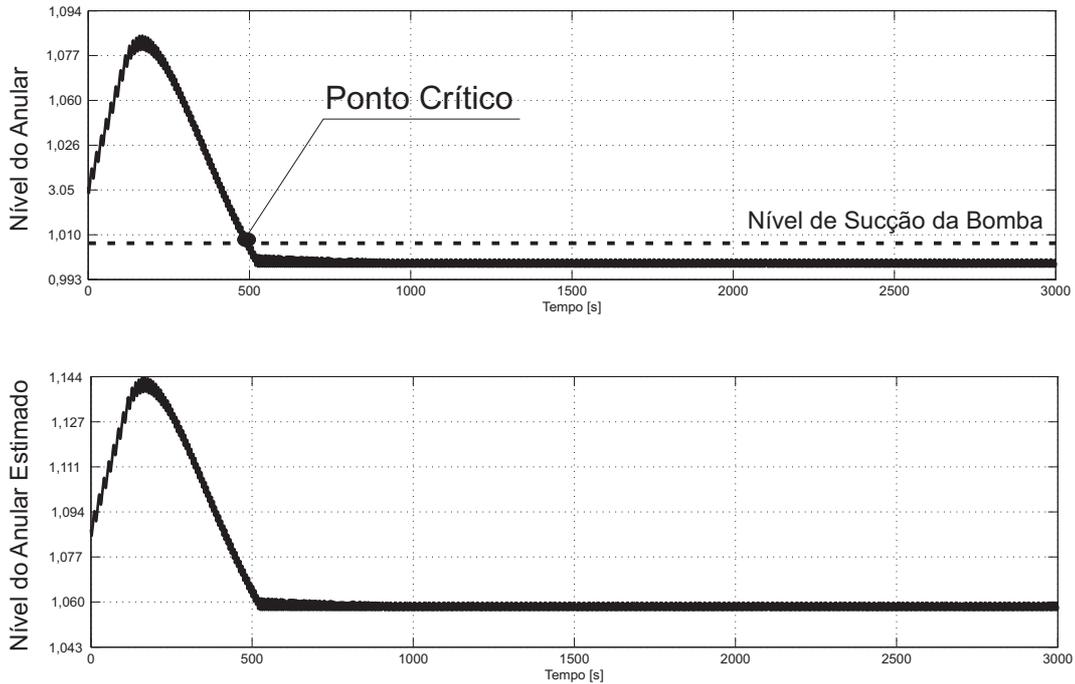


Figura 5.2: (a) Evolução do nível no anular estimado; (b) Evolução do nível no anular

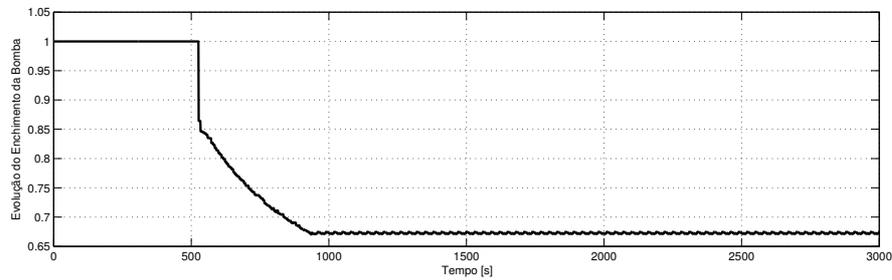


Figura 5.3: Evolução do enchimento da câmara da bomba de fundo - Exemplo ilustrativo

nível estimado para o controlador com intuito de avaliar como estas se manifestam sobre os parâmetros da equação a seguir:

$$N = \frac{P_{wf} - P_{rev} - \rho_{oleo} g L - \rho_{liq} g (H - L)}{g(\rho_{gas} - \rho_{oleo})} \quad (5.1)$$

A hipótese que admite um mau funcionamento do sensor está relacionada à variável P_{wf} na eq. (5.1), e constatado tal problema, a solução está baseada em intervenção com sonda para troca ou reparo do sensor de fundo. A hipótese que admite variações paramétricas sobre as partes de água, óleo e gás no fluido está diretamente relacionada a:

5. Proposta de Operação de Poços com Bombeio Mecânico Utilizando a P_{wf} e CDF72

$$\rho_{liq} g (H - L) = [(1 - BSW) \cdot \rho_{oleo} + BSW \cdot \rho_{H_2O}] g (H - L) \quad (5.2)$$

Na equação (5.2) fica evidenciado que as partes de água e óleo estão refletidas sob as respectivas massas específicas. O BSW reflete a quantidade de água presente no fluido, e uma variação paramétrica de BSW no tempo pode comprometer o nível estimado na eq. (5.1).

5.2 Controle Utilizando Pressão de Fundo e Carta Dinamométrica de Fundo

A estratégia de controle consiste-se em utilizar os dados da pressão de fundo e carta de fundo. Na Figura 5.4 é apresentado o diagrama de blocos para a implementação da estratégia de controle que utiliza os dados da pressão de fundo e da carta de fundo.

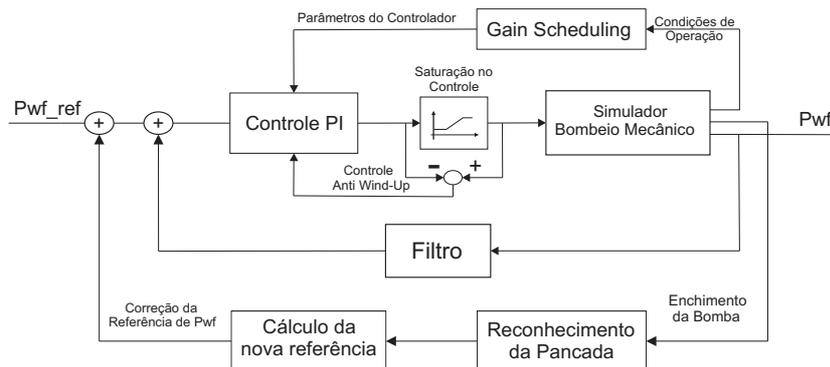


Figura 5.4: Diagrama de blocos com realimentação da P_{wf} e CDF

A estrutura de controle é composta por uma malha interna de controle mais rápida baseada nos dados de pressão de fundo (com período de amostragem de 1 segundo), e externamente, existe uma malha mais lenta (tempo necessário para o reconhecimento do padrão da carta, aproximadamente 120 segundos) que faz o monitoramento sobre o enchimento da câmara da bomba de fundo (analogia com a pancada de fluido) e conforme o resultado obtido corrige a referência de pressão.

Assim, quando o sistema detectar a pancada modifica-se a referência de pressão para um ponto de operação correspondente a um nível maior no anular com intuito de evitar a pancada de fluido. Automaticamente, o controlador diminuirá a velocidade de bombeio da UB para que o nível de fluido aumente no revestimento. Este é o procedimento adotado sempre que a carta de fundo acusar o fenômeno da pancada de fluido.

Outro fator de discussão é a intensidade da pancada de fluido. Em quanto será a mudança de referência de pressão caso ocorra a pancada? Na emulação do reconhecimento padrão das cartas tem-se informação quantitativa sobre o efeito da pancada através da porcentagem de enchimento da câmara do pistão. O que se propõe então, é associar a mudança da referência de pressão com a intensidade da pancada, é dizer, se a pancada for forte (situação hipotética com a bomba operando com enchimento de 50%) então a nova referência de pressão será maior se comparada a um novo ponto de operação para o caso de uma pancada leve (outra situação hipotética na qual a bomba opera com enchimento de 80%).

Na Figura 5.5 é apresentado um gráfico baseado no estudo sobre o poço em questão, que associa a intensidade da pancada de fluido (através do enchimento da câmara da bomba) e um fator multiplicativo que definirá a nova referência de pressão.

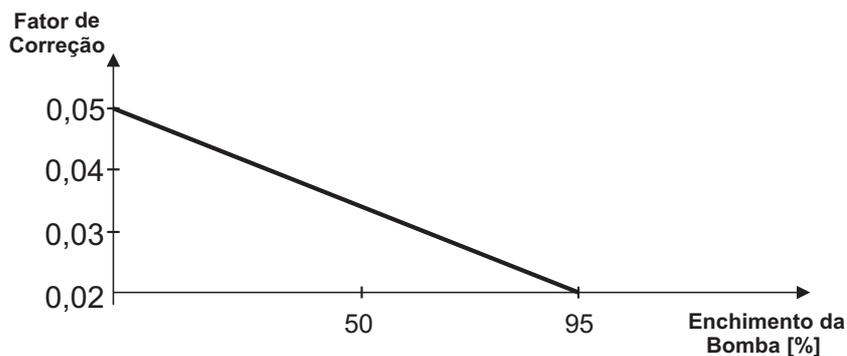


Figura 5.5: Associação entre o nível da pancada de fluido e a nova referência de P_{wf}

O valor do fator de correção da referência é definido como φ e corresponde a faixa em que o enchimento varia entre 0 e 95%. Se a bomba opera com enchimento entre 95% e 100%, a referência de pressão não é modificada. Da Figura 5.5 tem-se que:

$$\varphi = 0,05 - 0,03 \cdot \text{enchimento} \quad (5.3)$$

e portanto, a nova referência de pressão que o controlador receberá é dada pela seguinte relação:

$$P_{wf \text{ novo}} = \varphi \cdot P_{wf \text{ ref}} \quad (5.4)$$

Onde $P_{wf \text{ novo}}$ é a nova referência de pressão, φ é o fator multiplicativo definido a partir do gráfico da Figura 5.5 e $P_{wf \text{ ref}}$ é a referência antiga de pressão.

5. Proposta de Operação de Poços com Bombeio Mecânico Utilizando a P_{wf} e CDF74

Algoritmo de Controle

A estratégia final de controle é apresentada a seguir na forma de um algoritmo para melhor entendimento da proposta e dos passos necessários para o controle de sistemas de bombeio mecânico utilizando dados da pressão de fundo e carta dinamométrica de fundo.

1. Controle Utilizando a P_{wf} :

- Obtenção da curva de resposta ao degrau nos pontos de operação através da variação da velocidade de bombeio;
- Identificação dos parâmetros K e τ para cada ponto de operação da planta;
- Interpolação dos pontos de operação para definição de funções para os parâmetros K e τ ;
- Determinação dos parâmetros do controlador K_c , T_i e T_c em função de K e τ .

2. Controle Utilizando a CDF:

Definir a capacidade de reconhecimento da pancada de fluido do sistema através do enchimento da câmara da bomba de fundo.

3. Controle do Sistema de Bombeio Mecânico:

Para controle do sistema de bombeio através da estratégia proposta são necessários os seguintes passos, na ordem em que aparecem:

- Definição da pressão de referência em função de cada poço de produção;
- Controlador de nível utilizando a pressão de fundo (período de amostragem em 1 segundo);
- Avaliação da carta de fundo sobre a pancada de fluido (período de amostragem em 120 segundos);
- Avaliação sobre a referência da pressão de fundo.

5.3 Simulação e Análise dos Resultados

O algoritmo é testado frente a duas situações operacionais. A primeira na qual a pressão de referência por algum motivo desconhecido (erro de leitura do sensor, suposição sobre as partes de água e óleo equivocada, ou ainda, forte presença de gás) está mal ajustada, e portanto, o controlador está trabalhando com uma referência que provoca a pancada de fluido. Outra situação imposta na simulação é uma variação sobre o BSW ao longo do tempo, conforme na Figura 5.6.

Nas Figuras 5.7 e 5.8, são mostradas as evoluções do nível do anular e pressão de fundo, respectivamente.

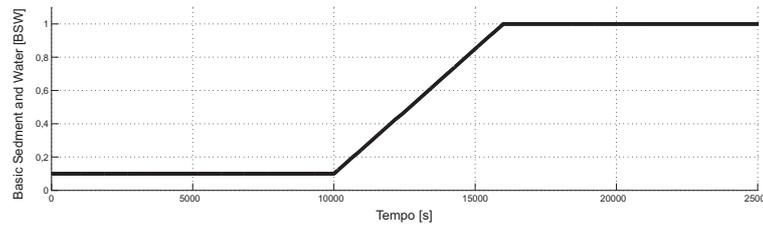


Figura 5.6: Variação de BSW ao longo do tempo

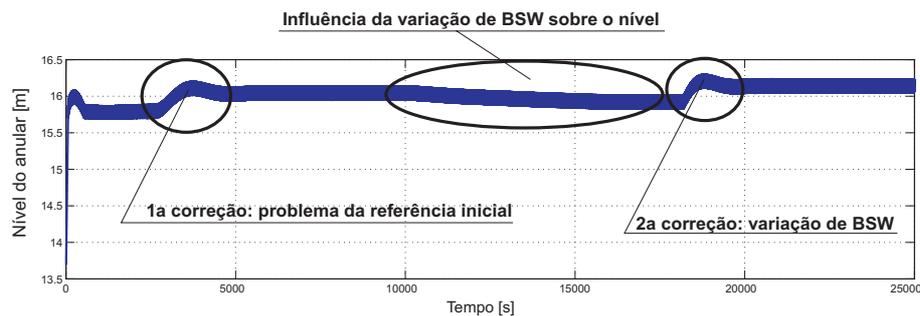


Figura 5.7: Comportamento do nível no anular frente a mudanças na operação

O algoritmo responde satisfatoriamente às mudanças operacionais impostas na simulação. Uma análise sobre os resultados obtidos permite concluir que este algoritmo é capaz de trabalhar com a menor pressão de fundo possível, com o compromisso de evitar o fenômeno da pancada de fluido. Portanto, a próxima etapa é o teste em campo de produção para avaliar o desempenho desta proposta de controle híbrido na operação de poços com bombeio mecânico.

Neste capítulo foi tratado o problema quando a estimação do nível tem como resultado um nível abaixo do encontrado realmente no anular do poço, outra situação possível, é que o nível estimado seja superior ao encontrado no revestimento, ou seja, as variações das partes de água, óleo e gás encontradas no fluido deixaram a coluna no anular mais leve. Esta situação não ocasionaria a pancada de fluido, mas permite um ponto de operação mais próximo ao da sucção da bomba, e para tal, pode-se admitir uma política de aumentar a velocidade da UB. Note que na situação anterior a carta de fundo informa ao controlador a situação de pancada de fluido, e agora, este mecanismo não é mais vigente, já que a carta cheia vale tanto para um nível ótimo de produção, como para pontos de operação 10, 20 ou 30 metros acima deste nível ótimo.

Uma forma de detectar que a coluna de fluido no anular é mais pesada do que a estimada é aumentar a velocidade de bombeio em intervalos definidos, sempre que a operação ocorre com carta cheia. Dois resultados são esperados com este acréscimo de velocidade: (1) a carta continua cheia e portanto, a coluna de fluido de fato está mais pesada, o que está resultando em uma estimação

5. Proposta de Operação de Poços com Bombeio Mecânico Utilizando a P_{wf} e CDF76

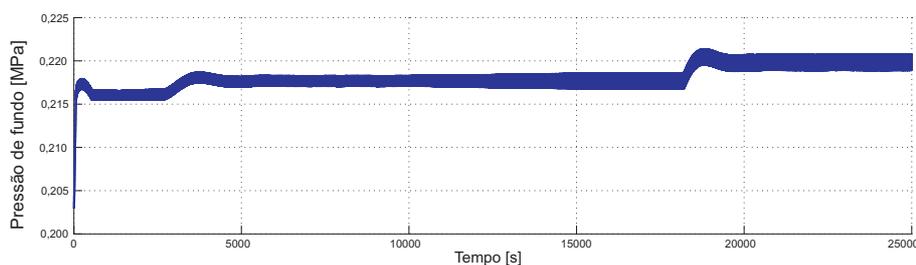


Figura 5.8: Comportamento da P_{wf} frente a mudanças na operação

conservadora do nível, e (2) a carta acusa a pancada de fluido, e portanto, o nível do anular estimado corresponde a um ponto ótimo de operação.

Quando existem variações paramétricas sobre as partes de água, óleo e gás no fluido que deixam o fluido mais pesado a consequência pode ser a pancada de fluido e, portanto, justifica-se a implementação de uma estratégia para detectar estas variações no fluido. Já o contrário, partes de água, óleo e gás que deixam o fluido mais leve, o resultado é um ponto de operação que não é ótimo, mas muito próximo deste, o que em princípio, não justifica a implementação de um mecanismo de detecção baseado na ocorrência, ou não, pancada de fluido.

5.4 Conclusão

No capítulo foi apresentada uma metodologia de controle que trabalha com os dados da pressão de fundo associados a carta dinamométrica de fundo. Com os resultados obtidos é verificado que é possível aliar o grande desempenho que o controlador tem sobre o controle de nível do anular (utilizando dados da P_{wf}) com dados da carta de fundo, para avaliar a estimação do nível no qual se está trabalhando. O controle proposto sobre o nível da anular tem baixo custo computacional e pode perfeitamente ser alocado em um CLP junto ao poço de produção.

Como resultado final tem-se um sistema de controle sobre o sistema de bombeio mecânico que busca sempre trabalhar no ponto ótimo de operação através de uma malha de controle mais rápida que conta com a informação de pressão de fundo, e também garante com a utilização de outra malha de controle mais lenta, que conta com dados da carta de fundo, que o ponto de operação estimado corresponde a realidade encontrada no anular do poço de produção.

Capítulo 6

Conclusão

O método de elevação artificial por bombeio mecânico ainda propicia um interessante campo de estudo principalmente na área de sensoriamento do poço de produção (sob o contexto do GeDIg diz-se *completação inteligente*) com ênfase na aquisição de dados sobre as variáveis do fundo do poço. Juntamente com o desenvolvimento desta classe de sensores com baixo custo, relacionam-se novos aspectos sobre estratégias tradicionais de controle que permitem incrementar o desempenho da produção. Esta nova visão sobre o poço de produção está em sintonia com o conceito do GeDIg.

Para o desenvolvimento de novos algoritmos de controle para o sistema de bombeio mecânico faz-se necessário a utilização de simuladores para este processo de elevação artificial. No capítulo 2, é apresentado um simulador para o bombeio mecânico que cumpre com o objetivo de reproduzir de maneira satisfatória a evolução das principais variáveis do processo, e ainda descreve importantes fenômenos do bombeio mecânico. Outra característica do simulador é seu baixo custo computacional, o que diminui consideravelmente a escala de tempo para as simulações.

As cartas dinamométricas de fundo constituem uma importante e consolidada ferramenta que auxilia no controle do sistema de bombeio através do diagnóstico das condições operacionais da bomba de fundo com base nas informações da carta de fundo. Porém, principalmente no aspecto do controle, existem limitações na utilização das cartas de fundo. Assim, no capítulo 4 é apresentada uma nova abordagem para o controle VSD, com uma realimentação mediante a pressão de fundo, o que aumenta o desempenho desta estratégia na produção de óleo. E mais, este dado de pressão de fundo permite modificar a referência de nível de acordo com as condições do reservatório ou composição de fluido, além de responder mais rapidamente frente a problemas que possam ocorrer no bombeamento.

Finalmente no capítulo 5, é apresentada uma proposta de controle híbrido, na qual, a estratégia de controle que utiliza em conjunto os dados da carta dinamométrica de fundo e pressão de fundo. É

uma abordagem que pode propiciar um alto desempenho da malha de controle sobre o monitoramento do nível do anular usando o dado da pressão de fundo, aliado a segurança sobre a prevenção da pancada de fluido, analisando a carta de fundo. Como consequência deste controle, incrementa-se a produção de óleo e diminuem-se os gastos com a manutenção dos equipamentos, dada a ausência da pancada de fluido no ciclo de bombeio.

6.1 Perspectivas de Trabalho

O simulador proposto está baseado em um modelo fenomenológico com intuito principal de testar as estratégias de controle. Existe uma possibilidade de pesquisa baseada somente em desenvolver um simulador para o bombeio mecânico, e para tal, seria necessário incorporar equacionamentos com maior custo computacional, mas que melhor representem as dinâmicas do processo. Outro fator de desenvolvimento sobre o simulador é desenvolvê-lo em um ambiente de linguagem computacional com uma interface própria para o usuário, e evitar a dependência com o *MatLab*.

Os algoritmos de controle necessitam uma validação em campo como etapa final de desenvolvimento. Este trabalho foi realizado sobre uma plataforma que aproxima a realidade dos campos de produção para o laboratório, porém, as condições não são as mesmas. Em processos industriais é uma etapa importante e final a implementação dos algoritmos, e neste caso, é fundamental o teste dos algoritmos nos campos de produção.

A informação da pressão de fundo pode ser utilizada também para detectar possíveis faltas no funcionamento da bomba de fundo, e para tal, existe a possibilidade de utilização de ferramentas estatísticas de detecção de falhas, com intuito de integrar este sistema de detecção, que atualmente utiliza o reconhecimento de padrões de cartas dinamométricas, com novas metodologias baseadas na pressão de fundo.

Outro estudo importante refere-as as condições do reservatório. O poço utilizado possui três zonas produtoras, é possível estudar políticas de controle para cada zona produtora de forma individual, ou então, para algumas associações entre estas zonas. Neste trabalho, foi estudado o poço operando com as três zonas operando. Outro fator de estudo ligado ao reservatório é a variação de BSW no tempo, e analisar possíveis relações entre a evolução do BSW e a sintonia do controlador.

6.2 Trabalhos Desenvolvidos

A pesquisa sobre o bombeio mecânico propiciou o desenvolvimento de dois artigos que tratam as questões abordadas nos capítulos 2, 3 e 4.

- Ordonez, B., Cudas, A., Moreno, U.F. e Teixeira, A. (2008). Sucker-Rod pumping system: simulator and dynamic level control using bottom hole pressure. *Proceedings of the 13th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, Hamburg, Germany.
- Ordonez, B., Cudas, A. e Moreno, U.F. (2008). Proposta de controle de unidades de bombeio mecânico utilizando sensores de pressão de fundo. *XVII Congresso Brasileiro de Automática*, Juiz de Fora, Brasil.

Referências Bibliográficas

- Amezcuca, J. D. (1980). Comparative analysis of pump-off control systems for field applications. *Proc. SPE 55th Annual Fall Technical Conference and Exhibition*, Dallas, Texas.
- Aström, K. e Wittenmark, B. (1994). *Adaptive Control*. Addison-Wesley.
- Bommer, P. M. e Shrauner, D. (2006). Benefits of slow-speed pumping. *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 58pp. 76–79.
- Boyer, L., Gibbs, S., Nolen, K., Cordova, A., e Roberson, A. (2007). Well production testing using a rod pump controller. <http://www.Lufkinautomation.com>.
- Campos, C. F. P. S. (2006). Estudo e especificação de um sistema de instrumentação para unidades de petróleo utilizando tecnologia sem fio. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.
- Collins, L. C. e Autrey, J. W. (1986). A graphical method to size submersible pumps for variable speed application. *Proc. SPE 61st Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans, LA.
- Corrêa, J. F. S. (1998). Cartapad - cartas dinamométricas padrões. *Proc. II Seminário de Engenharia de Poço*, Rio de Janeiro, Brasil. In Portuguese.
- Corrêa, J. F. S. (2007). Análise do bombeio mecânico automatizado.
- Cramer, R. (2008). Back to the future: A retrospective on 40 years of digital oil field experience. *Proc. SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition*, Amsterdam, Netherlands.
- Derek, H. J., Jennings, J. W., e Morgan, S. M. (1988). Sucker rod pumping unit diagnostics using an expert system. *Proc. Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference*, Midland, Texas.
- Divine, D. L. (1980). Automatic pump-off control for the variable speed submergible pump. *Proc. SPE 55th Annual Fall Technical Conference and Exhibition*, Dallas, Texas.

- Doty, D. R. e Schmidt, Z. (1983). An improved model for sucker rod pumping. *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 23pp. 34–41.
- Drakeley, B. K. e Omdal, S. (2008). Fiber optics sensing systems for subsea applications - sensing capabilities, applications, and the challenges being faced in order to provide reliable transmission of data for online reservoir management. Proc. *SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition*, Amsterdam, Netherlands.
- Filho, M. A. B. (1993). Geração de carta dinamométrica de fundo para diagnóstico do bombeio mecânico em poços de petróleo. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- Filho, M. A. B., Tygel, M., Rocha, A. F., e Morooka, C. K. (1996). Automatic downhole card generation and classification. Proc. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Denver, Colorado.
- Gibbs, S. G. (1963). Predicting the behavior of sucker-rod pumping systems. *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 15pp. 769–778.
- Knabe, S., Shaw, D. C., e Webb, S. J. (2008). Intelligent continual right-time analysis of field data as a service. Proc. *SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition*, Amsterdam, Netherlands.
- Lea, J. F. (1991). Modeling forces on a beam-pump system during pumping of highly viscous crude. *SPE Journal Production Engineering*, Vol. 6pp. 420–426.
- McCoy, J. N., Rowlan, O. L., Becker, D. J., e Podio, A. L. (2003). How to maintain high producing efficiency in sucker rod lift operations. Proc. *SPE Production and Operations Symposium*, Oklahoma City, Oklahoma.
- Moisés, G. V., Rolim, T. A., e Formigli, J. M. (2008). Gedig: Petrobras corporate program for digital integrated field management. Proc. *SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition*, Amsterdam, Netherlands.
- Mubarak, S. M. (2008). Real-time reservoir management from data acquisition through implementation: Closed-loop approach. Proc. *SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition*, Amsterdam, Netherlands.
- Muth, G. M. e Walker, T. M. (2001). Extending downhole pump life using new technology. Proc. *SPE Western Regional Meeting*, Bakersfield, California.

- Nascimento, J. M. A. (2004). Simulador computacional para poços de petróleo com métodos de elevação artificial por bombeio mecânico. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.
- Neely, A. B. e Tolbert, H. O. (1988). Experience with pumpoff control in the permian basin. *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 40pp. 645–649.
- Petersen, S., Myhre, B., Doyle, P., Mikkelsen, E., Carlsen, S., Sjong, D., Skavhaug, A., van der Linden, J. H., e Sansom, M. (2008). A survey of wireless technology for the oil and gas industry. *Proc. SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition*, Amsterdam, Netherlands.
- Peterson, R., Smigura, T., Brunings, C., Quijada, W., e Gomez, A. (2006). A production increases at pdvsa using a improved srp control. *Proc. SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, San Antonio, Texas.
- Pinto, H., Silva, M. S., e Izetti, G. (2006). Integrated multizone low-cost intelligent completion. *Proc. SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition*, Amsterdam, Netherlands.
- Saleh, J. (2002). *Fluid Flow Handbook*. McGraw-Hill.
- Shepherd, C. E., Neve, P., e Wilson, D. C. (1999). Use and application of permanent down-hole pressure gauges in the balmoral field and satellite structures. *SPE Production Engineering*, Vol. 6pp. 271–276.
- Skogestad, S. (2001). Probably the best simple PID tuning rules in the world. *Proc. AIChE Annual meeting*.
- Smith, B., Hall, M., Franklin, A., Johansen, E. S., e Ünalmsis, . H. (2008). Field-wide deployment of in-well optical flowmeters and pressure/temperature gauges at buzzard field. *Proc. SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition*, Amsterdam, Netherlands.
- Snyder, W. E. e Bossert, A. J. (1963). Analog computer simulation of sucker-rod pumping systems. *Proc. Rocky Mountain Joint Regional Meeting - SPE*, Denver, Colorado.
- Takács, G. (2003). *Sucker-Rod Pumping Manual*. PennWell.
- Takacs, G. (2007). Use of conventional dynamometer cards in the analysis of sucker-rod pumped installations. <http://www.ogbus.com/eng/authors/Takacs/useofc.pdf>.
- Vazquez, M. e Fernandes, J. (1999). Rod-pumping optimization through surface and downhole parameter estimation and simulation. *Proc. SPE Mid-Continent Operations Symposium*.

- Wang, S.-W. (2001). Simultaneous determination of reservoir pressure and initial fluid-in-place from production data and flowing bottom hole pressure – application. *Proc. SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery*, Midland, Texas.
- Wang, X., Lee, J., Tigphen, B., Vachon, G., Poland, S., e Norton, D. (2008). Modeling flow profile using distributed temperature sensor (DTS) system. *Proc. SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition*, Amsterdam, Netherlands.
- Weatherford, C. (2007). Soluciones en control del pozo. <http://www.weatherford.com>.
- Westerman, G. W. (1977). Successful application of pump-off control. *Proc. SPE 52nd Annual Fall Technical Conference and Exhibition*, Denver, Colorado.
- Wilson, B. L. e Liu, J. C. (1985). Electrical submersible pump performance using variable speed drives. *Proc. SPE Production Operations Symposium*, Oklahoma City, Oklahoma.
- Xu, P., Xu, S., e Yin, H. (2006). Application of self-organizing competitive neural network in fault diagnosis of suck rod pumping system. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 58pp. 43–48.