



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Curso de Doutorado em Engenharia Elétrica

Tese de Doutorado

Estimação da carta dinamométrica de superfície a partir de medições do sistema de acionamento do motor elétrico e do modelo mecânico do sistema de bombeio por hastes.

Autor: Lázaro Edmilson Brito Silva

Orientadores: Prof. Dr. Jés de Jesus Fiais Cerqueira, Prof. Dr. Antônio Marcus N. Lima, Prof. Dr. Amauri Oliveira

Salvador

2024

Lázaro Edmilson Brito Silva

Estimação da carta dinamométrica de superfície a partir de medições do sistema de acionamento do motor elétrico e do modelo mecânico do sistema de bombeio por hastes.

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Engenharia Elétrica**.

Salvador
2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Bernadete
Sinay Neves, Escola Politécnica – UFBA.

S586 Silva, Lázaro Edmilson Brito.

Estimação da carta dinamométrica de superfície a partir de medições do sistema de acionamento do motor elétrico e do modelo mecânico do sistema de bombeio por hastes / Lázaro Edmilson Brito Silva. – Salvador, 2024.

84f.: il. color.

Orientadores: Prof. Dr. Jês de Jesus Fiais Cerqueira.
Prof. Dr. Antônio Marcus N. Lima.
Prof. Dr. Amauri Oliveira.


Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2024.

1. Petróleo – elevação artificial. 2. Motor de indução. 3. Petróleo – exploração. 4. Medição. 5. Carta dinamométrica. I. Cerqueira, Jês de Jesus Fiais. II. Lima, Antônio Marcus N. III. Oliveira, Amauri. IV. Universidade Federal da Bahia. V. Título.

CDD: 665.5

Universidade Federal da Bahia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica
Curso de Doutorado em Engenharia Elétrica

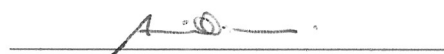
A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, leram e recomendam a aprovação da Tese de Doutorado, intitulada “Estimação da carta dinamométrica de superfície a partir de medições do sistema de acionamento do motor elétrico e do modelo mecânico do sistema de bombeio por hastes. ”, apresentada no dia **10** de **Julho** de 2024, como requisito para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Elétrica**.



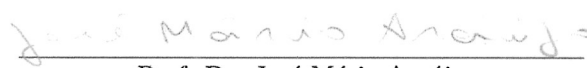
Prof. Dr. Jês de Jesus Fiais Cerqueira
UFBA



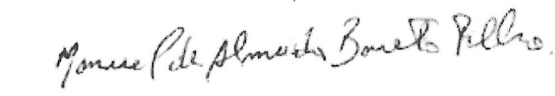
Prof. Dr. Antônio Marcus N. Lima
UFCEG



Prof. Dr. Amauri Oliveira
UFBA



Prof. Dr. José Mário Araújo
PPGEE- IFBA



Prof. Dr. Manuel de Almeida Barreto Filho
UFBA



Prof. Dr. Eduardo Telmo Fonseca Santos
IFBA

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”. (Marthin
Luther King)

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela saúde, força e paz que me auxiliaram na conclusão deste trabalho. Ao meu orientador, Amauri Oliveira, pelo apoio, incentivo e paciência, por quem tenho grande estima. Ao meu atual orientador, Jês Cerqueira, pela motivação ao longo da finalização do trabalho e por me conduzir até aqui. Não menos importante, ao meu coorientador, Antônio Marcus, pela sugestão do tema e problema explorado, por quem tenho admiração.

Agradeço a todos que estiveram presentes na realização deste trabalho, participando direta ou indiretamente, me incentivando e ajudando. Em especial, à minha família pela compreensão nos momentos de minha ausência.

Aos meus colegas de curso, por toda a amizade.

A todos, o meu enorme carinho.

Salvador, Brasil

Lázaro Edmilson Brito Silva

Resumo

Dentre os métodos de elevação artificial do petróleo, o bombeamento mecânico por hastes é um dos mais utilizados em todo o mundo. Neste sistema, um volume de fluido é elevado à superfície por meio de um movimento alternativo mantido por uma máquina de indução associada a uma estrutura mecânica. As condições no fundo do poço apresentam desafios significativos em sistemas de bombeamento por hastes, representando uma preocupação para os profissionais que atuam no campo petrolífero. Embora eficaz, sobretudo para poços rasos (menos de 300 m), este sistema de bombeio requer análises periódicas das cartas dinamométricas, testes de produção bruta e do registro do nível de fluido dinâmico no anular do poço entre a coluna de produção e o revestimento, para diagnóstico de falhas e otimização do processo. No entanto, a obtenção dessas cartas geralmente depende de instrumentação invasiva, o que aumenta os custos e a complexidade do sistema. Essa dependência da instrumentação de campo pode representar um problema, pois qualquer falha nos elementos sensores pode resultar na parada da unidade de bombeio, impactando negativamente na produção. Para enfrentar esse problema, estudos têm buscado soluções alternativas ou redundantes para o sistema de medição de campo, visando minimizar os impactos econômicos associados à parada da unidade e à substituição dos elementos primários de medição. Este trabalho tem como objetivo implementar um estimador para a carta dinamométrica de superfície a partir de medições associadas ao barramento de alimentação do motor de indução e dados da estrutura mecânica do sistema de bombeio por hastes. A pesquisa apresenta uma metodologia que integra medições físicas de tensão, corrente, escorregamento e velocidade no motor de indução, as quais servem como variáveis de entrada de um observador de estado deste motor. A estimação não ocorre em tempo real, mas é gravada em arquivo eletrônico para posterior processamento computacional. A saída deste observador, associada a um modelo do circuito equivalente do motor, é utilizada para inferir o torque produzido no eixo do motor. A velocidade medida no eixo do motor está diretamente ligada à velocidade angular da manivela da unidade de bombeamento, devido à interligação entre as polias e correias que participam desse processo. O ângulo da posição de giro da manivela pode ser obtido a partir da velocidade angular; este ângulo contribui para determinar a posição da haste polida. Para calcular a carga da haste polida, é necessário alimentar um estimador com variáveis de entrada, incluindo o torque no eixo do motor e o ângulo da manivela. A relação entre a carga e a posição da haste polida resulta na composição da carta dinamométrica. Os resultados apresentam cartas dinamométricas de superfície sob distintas condições operacionais simuladas em um poço de petróleo experimental, tais como operação normal, operação com presença de gás no poço, operação com vazamento na válvula de passeio e operação com suprimento insuficiente de fluido, que se alinham mais estreitamente com as reais. Essa aplicação prática oferece um método alternativo para a aquisição das cartas dinamométricas de superfície, que pode funcionar como uma abordagem menos onerosa e complementar no diagnóstico de falhas, quando comparada com os métodos atualmente empregados, contribuindo para decisões de manutenção para a unidade de bombeamento.

Palavras-chave: Motor de Indução, Técnicas de Medição, Carta Dinamométrica, Exploração de Petróleo.

Abstract

Among the artificial lift methods for oil extraction, Sucker Rod Pumping is one of the most widely used worldwide. In this system, a volume of fluid is raised to the surface through an alternating motion maintained by an induction motor associated with a mechanical structure. Downhole conditions pose significant challenges in beam pumping systems, representing a concern for oilfield professionals. Although effective, especially for shallow wells (less than 300 meters), this pumping system requires periodic analysis of dynamometric cards, gross production tests, and monitoring of the dynamic fluid level in the annulus of the well between the production tubing and the casing to diagnose failures and optimize the process. However, obtaining these cards often relies on invasive instrumentation, increasing costs and system complexity. This dependence on field instrumentation can be problematic, as any sensor element failure can result in pumping unit shutdown, negatively impacting production. To address this issue, studies have sought alternative or redundant field measurement system solutions to minimize the economic impacts associated with pumping unit shutdowns and primary measurement element replacement. This study aims to implement an estimator for surface dynamometer cards using measurements associated with the induction motor power supply bus and data from the beam pumping system's mechanical structure. The research presents a methodology that integrates physical measurements of voltage, current, slip, and velocity in the induction motor, serving as input variables for a state observer of this motor. Estimation does not occur in real-time but is recorded in an electronic file for subsequent computational processing. The output of this observer, combined with a model of the motor's equivalent circuit, is used to infer the torque produced on the motor shaft. The velocity measured at the motor shaft is directly linked to the angular velocity of the pumping unit's crankshaft due to the interconnection between pulleys and belts involved in this process. The crankshaft's angular position angle can be obtained from the angular speed; this angle helps determine the polished rod position. To calculate the polished rod load, an estimator needs to be fed with input variables, including the torque on the motor shaft and the crankshaft angle. The relationship between load and polished rod position results in the composition of the dynamometer card. The results present dynamometer cards under various simulated operational conditions in an experimental oil well, such as normal operation, operation with gas presence in the well, operation with leakage in the stuffing box valve, and operation with insufficient fluid supply, which align more closely with real conditions. This practical application offers an alternative method for acquiring surface dynamometer cards, which can function as a less costly and complementary approach in fault diagnosis compared to current methods, contributing to maintenance decisions for the pumping unit.

Keywords: Induction Motor, Measurement Techniques, Dynamometer Card, Oil Drilling.

Sumário

1	Introdução e Estrutura da Pesquisa	1
1.1	Considerações Iniciais	1
1.2	Revisão Bibliográfica	3
1.3	Objetivos	6
1.4	Estrutura do Documento	6
1.5	Publicações Relacionadas ao Trabalho	6
2	Elevação Artificial de Petróleo	8
2.1	Métodos de elevação de petróleo	8
2.1.1	Elevação Artificial por <i>Gas-Lifting</i>	9
2.1.2	Elevação Artificial por BCS	10
2.1.3	Elevação Artificial por BCP	13
2.1.4	Elevação Artificial por BMH.	13
2.2	Principais Componentes de Superfície do BMH	15
2.3	Principais Componentes de Fundo no BMH	17
2.4	Ciclo de Bombeio no BMH	17
2.5	Cinemática da Unidade de Bombeio	18
2.6	Torque Associados à Caixa de Redução	23
2.6.1	Torque Devido às Hastes	23
2.6.2	Torque Devido ao Contrabalanceio	24
2.6.3	Torques Inerciais	24
2.7	Comentários Conclusivos	27
3	Fundamentação Teórica do Método	28
3.1	Carta Dinamométrica	29
3.2	Aplicação da Metodologia Proposta	43
3.3	Comentários Conclusivos	50
4	Análise e Discussão dos Resultados	51
4.1	Introdução	51
4.2	Comparando o estimador proposto com o proposto por Li et al. (2019).	59
4.3	Discussão dos Resultados	66
4.4	Comentários Conclusivos	72
5	Considerações finais	73
5.1	Contribuições da Metodologia Desenvolvida	73
5.2	Perspectivas para Trabalhos Futuros	74
	Referências	75
A	Apêndice A	78
B	Apêndice B	83

Lista de Tabelas

3.1	Tamanho geométrico dos parâmetros da unidade de bombeamento.	40
3.2	Especificações do Motor de Indução (LEA-UFBA)	48
3.3	Parâmetros do Circuito Equivalente do Motor de Indução (LEA-UFBA) . .	49
3.4	Características do Poço de Petróleo Artificial (LEA-UFBA).	49
4.1	Tabela Comparativa dos Métodos.	66

Lista de Figuras

2.1	Fotografia de Um Sistema GL.	11
2.2	Componentes do Sistema BCS.	12
2.3	Estrutura para Bombeio por BCP.	14
2.4	Ilustração de BM automatizado.	15
2.5	Operação da Bomba de Fundo.	19
2.6	Etapas do Curso Ascendente.	19
2.7	Etapas do Curso Descendente.	20
2.8	Geometria da Unidade de Bombeio.	21
3.1	Ilustração de Carta Dinamométrica.	30
3.2	Sensores Próximo da Haste Polida no BMH	31
3.3	Esboços de Cartas Dinamométricas Indicando Possíveis Problemas.	33
3.4	Diagrama de Blocos do Sistema Acoplado.	34
3.5	Estratégia de	35
3.6	Estrutura Interna de Motores de Indução.	37
3.7	Modelo do circuito equivalente do motor empregado no estudo	38
3.8	Diagrama Simplificado da Unidade de Bombeamento.	39
3.9	Unidade de Bombeio Instalada na Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia.	45
3.10	Estrutura de hardware para monitoramento do sistema de bombeio por hastes.	46
3.11	Detalhe da Célula de Carga e o Transdutor de Posição.	47
3.12	Diagrama de Blocos para Aquisição das Informações Elétricas do Motor de Indução.	47
3.13	Motor de Indução (LEA-UFBA).	48
4.1	Comportamento da Carga na Haste Polida.	52
4.2	Carga na Haste Polida Estimada em Destaque.	53
4.3	Comparação entre A Carga na Haste Polida Medida no SCADA e Estimada pelo Modelo.	54
4.4	Carga na Haste Polida Estimada com Taxa de 10 Ciclos por Minuto.	55
4.5	Resultado da comparação da carga na haste polida medida e estimada - novo conjunto de dados do SCADA.	55
4.6	Detalhes da Carga na Haste Polida Estimada - Novo Conjunto de Dados.	56
4.7	Posição da Haste Polida em Ciclos Distintos de Bombeio.	57
4.8	Operando sob Condições Normais	60
4.9	Presença de Gás no Poço	61
4.10	Vazamento na Válvula de Passeio	62
4.11	Suprimento de Fluido Insuficiente	63
4.12	Estratégia para estiamdor de carga e posição da haste polida.	64
4.13	Operando sob Condições Normais	67
4.14	Presença de Gás no Poço	68
4.15	Vazamento na Válvula de Passeio	69
4.16	Suprimento de Fluido Insuficiente	70

Lista de Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
API	American Petroleum Institute
BCP	Bombeio de Cavidades Progressivas
BCS	Bombeio Centrífugo Submerso
BMH	Bombeio Mecânico por Hastes
BM	Bombeio Mecânico
CDF	Carta Dinamométrica de Fundo
CDS	Carta Dinamométrica de Superfície
CLP	Controlador Lógico Programável
EN	Elevação Natural
FVM	Fluxo Vertical Multifásico
GL	<i>Gás-Lift</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IP	Protocolo de Internet
LEA	Laboratório de Elevação Artificial
LIA	Laboratório de Instrumentação e Automação
MHS	Movimento Harmônico Simples
MIT	Motor de indução trifásico
NBR	Norma Brasileira
ND	Nível de Fluido Dinâmico
OPC	Conectividade e Produtividade Aberta
Pmec	potência mecânica;
Rrt	rotor travado (Rrt)
rpm	Revoluções por minuto
SCADA ..	Sistema de Supervisão, Controle, Aquisição de Dados
TCP	Protocolo de Controle de Transmissão
TPB	Teste de Produção Bruta
UB	Unidade de Bombeio
UBM	Unidade de Bombeio Mecânico por hastes;
UFBA ...	Universidade Federal da Bahia;
USB	<i>Universal Serial Bus</i> ;
Vth	Tensão de Thevenin;
VSI	<i>Voltage Source Converter</i> .

Lista de Símbolos

A	Dimensão Geométrica da Unidade de Bombeio
C	Dimensão Geométrica da Unidade de Bombeio
DP_R	Diâmetro da polia do rotor em in
DP_M	Diâmetro da polia do motor em in
EF_M	Eficiência do motor
EF_R	Eficiência do redutor
G	Dimensão Geométrica da Unidade de Bombeio
H	Dimensão Geométrica da Unidade de Bombeio
I	Dimensão Geométrica da Unidade de Bombeio
I_2 ou I_{M2}	Momento de inércia associado às partes girantes da Unidade de Bombeio
I_3 ou I_{M3}	Momento de inércia associado às partes articuladas da Unidade de Bombeio
J	Dimensão Geométrica da Unidade de Bombeio
K	Dimensão Geométrica da Unidade de Bombeio
M	Momento Atual de Contrabalanceio para Unidades com Contrapesos instalados na Manivela
P	Dimensão Geométrica da Unidade de Bombeio
Q_{PR}	Carga na Haste Polida
Q_{SU}	Desbalanceio Estrutural da Unidade de Bombeio
R	Raio da Manivela
REL_{polias}	Relação de polias
REL_R ...	Relação de redução da caixa de redução.
$s(\theta)$	Posição da Haste Polida
S_{UB} ou S	Curso da Haste Polida
SV	Válvula de Pé
TF	Fator de Torque
T_M	Torque no Motor de Indução
T_R	Torque no Rotor da Unidade de Bombeio
TV	Válvula de Passeio
$T[\theta(t)]$...	Torque na Manivela da Unidade de Bombeio
UB	Unidade(s) de Bombeio
ζ	Ângulo de Giro da Manivela
ϕ	Ângulo Associado à Cinemática da Unidade de Bombeio
β	Ângulo Associado à Cinemática da Unidade de Bombeio
ψ	Ângulo Associado à Cinemática da Unidade de Bombeio
ψ_t	Ângulo Associado à Cinemática da Unidade de Bombeio
ψ_b	Ângulo Associado à Cinemática da Unidade de Bombeio
$\theta(t)$	Ângulo de Giro da Manivela em função do tempo

Introdução e Estrutura da Pesquisa

1.1 Considerações Iniciais

O petróleo é um material oleoso, inflamável e de alto valor energético. Geralmente menos denso do que a água, possui um característico cheiro e coloração (Aldini, 2020). Sua extração pode ocorrer em terra (*onshore*) ou abaixo do leito do mar (*offshore*). Se a pressão do poço não for suficiente para elevar os fluidos presentes no reservatório, torna-se necessário utilizar algum método de elevação artificial. A prospecção e exploração comercial do petróleo demandam anos de preparação e significativos investimentos, que aumentam progressivamente de acordo com a localização e a complexidade dos reservatórios.

A exploração do petróleo ocorre normalmente por meio de métodos de elevação, que são técnicas utilizadas para extrair o óleo do poço. Essas técnicas são escolhidas levando em consideração fatores como a presença de areia ou gás no reservatório, a profundidade do reservatório, a viscosidade dos fluidos encontrados, a disponibilidade de energia elétrica, a distância dos poços às estações ou plataformas de produção, o custo operacional, entre outros. Dentre as técnicas mais utilizadas na indústria do petróleo, podem ser citadas a Elevação Natural (EN), *Gás-Lift* (GL), Bombeio Mecânico com Hastes (BMH), Bombeio Centrífugo Submerso (BCS) e Bombeio por Cavidades Progressivas (BCP).

Durante o processo de extração de petróleo, o sistema de bombeio por hastes está sujeito a falhas. Um método amplamente utilizado para o diagnóstico dessas falhas é o uso de cartas dinamométricas. Essas cartas representam a relação entre a carga e o deslocamento da haste polida durante o ciclo de bombeio. Através dessa representação gráfica, é possível identificar com confiabilidade e simplicidade as condições de trabalho nas unidades de bombeamento (Rizzo Filho, 2011).

Há dois tipos de cartas dinamométricas: cartas de fundo e cartas de superfície. Conforme mencionado por Lima et al. (2009), as cartas de fundo registram as cargas no fundo do poço, logo acima da bomba, em função do curso da mesma. Elas representam uma ferramenta para o acompanhamento de sistemas de bombeio mecânico e diagnóstico de falhas, proporcionando revelações sobre as condições da bomba de fundo. Já as cartas de superfície revelam as condições de operação do poço, utilizando sensores acoplados na mesa do cabresto da Unidade de Bombeio Mecânico (UBM).

A Carta Dinamométrica de Superfície (CDS), que representa a relação entre a carga

medida na haste polida e o deslocamento da haste, não é suficiente por si só para diagnosticar a operação de um poço de Bombeio Mecânico (BM). Isso se deve, em parte, ao fato de que a relevância da CDS (sua assinatura) se limita a poços rasos, ou seja, com profundidade inferior a 300 m. Em poços mais profundos, a propagação de ruídos durante a onda de pressão através da coluna de hastes, originada no pistão da bomba de fundo, distorce o formato da Carta Dinamométrica de Fundo (CDF), que é onde os registros deveriam ser feitos. A assinatura da CDF é crucial para definir o diagnóstico geral da operação do BM.

Os equipamentos sub-superficiais de um sistema de Bombeio Mecânico tornam a obtenção física da Carta Dinamométrica de Fundo (CDF) uma tarefa custosa e complexa. Como alternativa viável, a CDF pode ser gerada a partir da respectiva Carta Dinamométrica de Superfície (CDS), que registra a resposta ao impulso gerado no pistão, através de simulação computacional. Esse método é conhecido como Problema Inverso, onde a excitação é determinada com base na resposta do sistema. Os modernos simuladores de operação de sistemas de Bombeio Mecânico já incorporam essa funcionalidade de maneira eficiente. A informação da CDF, ou da CDS para poços rasos, só possui valor se acompanhada do resultado do Teste de Produção Bruta (O+A+G) com duração de 24 horas (TPB), realizado na superfície, e do registro do nível de fluido dinâmico no anular do poço entre a coluna de produção e o revestimento (ND).

Tanto a geração da Carta Dinamométrica de Fundo (CDF) quanto o registro da Carta Dinamométrica de Superfície (CDS), assim como o registro do nível de fluido dinâmico (ND), devem ser realizados durante a execução do Teste de Produção Bruta (O+A+G) para refletir com precisão a relação entre os esforços registrados no sistema de Bombeio Mecânico (BM) e a produtividade do poço onde o sistema está operando. A CDS é obtida medindo a carga na haste polida ao longo de um ciclo completo de bombeio. Isso pode ser feito manualmente com um dinamômetro conectado a uma camisa espaçadora próxima ao topo da haste polida, ou automaticamente por meio de uma célula de carga instalada no mesmo local, junto com um sensor de posição. Os sistemas modernos de automação implementados nos campos de produção terrestres já incorporam essa capacidade, facilitando a obtenção e o registro precisos da CDS durante as operações normais.

As unidades de bombeio mecânico dispõem de um motor, que pode ser de combustão interna ou elétrico. A escolha por motores elétricos é condicionada às condições de fornecimento de energia elétrica. Quando o fornecimento de energia elétrica é comprometido pela ausência de redes de distribuição ou inviabilidade econômica para sua construção, geralmente opta-se por motores a base de combustão interna. Contudo, é mais comum a presença de motores elétricos em UBMs.

Diante desse contexto a respeito da estrutura das unidades de bombeio mecânico, este documento objetiva responder a seguinte pergunta: é possível estabelecer um método alternativo para a obtenção da carta dinamométrica que a partir de informações elétricas contidas no barramento de alimentação do motor de indução da unidade de bombeio?

1.2 Revisão Bibliográfica

Durante o ciclo de bombeio, sensores medem o deslocamento e a carga na haste polida. Tais sensores são invasivos, caros e requerem adaptação mecânica. Qualquer falha nestes sensores contribui para erros na obtenção das cartas dinamométricas anteriormente citadas. Este fato pode comprometer a análise e diagnóstico de problemas no poço (Li et al., 2019). Diante disso, pesquisas têm sido desenvolvidas para encontrar formas alternativas de obter a carta dinamométrica de superfície, de modo a evitar a dependência dos sensores tradicionalmente utilizados.

O trabalho de de Souza Neto (2013) desenvolveu um algoritmo computacional em linguagem C para a obtenção da carta dinamométrica de superfície de poços de petróleo equipados com unidades de bombeio convencionais. O método proposto utiliza uma sonda de corrente baseada no Efeito Hall e um sensor de posição magnético do mesmo princípio para, a partir da curva de torque em função do tempo estimada no motor de indução e da posição inicial do ciclo de bombeio, gerar a carta dinamométrica de superfície do poço de petróleo.

O modelo proposto foi testado e validado com dados obtidos através de um simulador desenvolvido por Barreto Filho (2003) e dados experimentais coletados em colaboração com Silva (2014). Os resultados gerais foram promissores; no entanto, para poços rasos, o valor da inércia das partes articuladas mostrou ser relevante para o modelo. Além disso, a análise da sensibilidade dos dados e dos parâmetros de entrada demonstrou a influência desses fatores na obtenção da carta dinamométrica.

Silva (2014) apresentou uma alternativa para a estimação do escorregamento, velocidade e torque de motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo, operando tanto em condições estacionárias quanto não estacionárias. A metodologia proposta utilizou uma ferramenta de processamento de sinais, denominada pelo autor como transformada de tempo curto de Fourier com chirp-Z ampliada. Esta ferramenta foi desenvolvida para aumentar a resolução na obtenção da frequência fundamental de operação do motor. Os sinais utilizados no estudo foram os harmônicos de ranhuras do rotor, presentes nas correntes estatóricas do motor de indução, que contribuíram para a estimação dos parâmetros dos motores elétricos mencionados. A metodologia foi aplicada em sistemas de elevação de petróleo que utilizam bombeio mecânico por hastes, destacando-se como

uma abordagem alternativa para a obtenção da carta dinamométrica de superfície e a identificação do desbalanceamento da unidade de bombeio.

A complexidade das condições de fundo de poço apresenta desafios para o diagnóstico e a previsão de falhas em Sistemas de Bombeio por Hastes, sendo uma questão importante e preocupante para o pessoal do campo petrolífero. Abordando esse problema, o trabalho de Sun et al. (2023) adota a teoria do momento invariante para extrair os autovalores da carta dinamométrica e utiliza estes autovalores como variáveis de predição do modelo que propõem. A teoria do momento invariante pode ser utilizada para analisar características de extração de recursos do poço de petróleo, por meio de processamento de imagens.

A teoria do momento invariante é um conceito matemático utilizado na análise de padrões em imagens e formas. Essa teoria faz parte do campo da visão computacional e reconhecimento de padrões. Os momentos invariantes são características numéricas derivadas de uma imagem ou forma que permanecem constantes, ou invariantes, sob transformações como rotação, escala e translação. Na citação mencionada no contexto do bombeio por hastes, a teoria do momento invariante pode estar sendo aplicada para extrair características relevantes dos sinais obtidos do dinamômetro, contribuindo para a análise e diagnóstico dos sistemas de bombeio por hastes. No entanto, o uso desse modelo requer a obtenção prévia de imagens das cartas dinamométricas.

Em Xiao et al. (2023) propõe-se uma estrutura baseada em aprendizado para o diagnóstico das condições operacionais de poços de petróleo por meio da identificação de cartas de dinamométricas. A expressão estrutura baseada em aprendizado refere-se a um modelo, arquitetura ou sistema que utiliza princípios de aprendizado de máquina ou aprendizado profundo para realizar uma determinada tarefa. No caso específico mencionado, proposta se utiliza de uma arquitetura de rede neural projetada para analisar dados relacionados ao bombeamento de petróleo e aprender padrões que possam ser usados para diagnosticar as condições operacionais de poços de petróleo. Um campo petrolífero foi utilizado como fonte de pesquisa para investigar as propriedades dos sistemas de bombeamento em diferentes condições de trabalho, resultando na criação de um conjunto de dados. Esse estudo orientou o projeto e a implementação de um sistema inteligente de diagnóstico das condições operacionais de poços de petróleo baseado em aprendizado. Contudo, a técnica incorre em um aumento significativo nos custos computacionais devido ao treinamento de redes neurais convolucionais. Além disso, o treinamento de redes neurais requer uma grande quantidade de dados.

Motores elétricos assíncronos são comumente utilizados como fonte de alimentação para o Sistema de Bombeio por Hastes. O movimento rotativo do eixo desses motores é convertido em um movimento de bombeamento mecânico. As cargas estáticas e dinâmicas exercidas na haste também são transmitidas a esses motores elétricos. Assim, é possível

estabelecer uma relação entre o motor elétrico e as forças atuantes na haste polida (Li et al., 2019; Zuo et al., 2022).

Em Zuo et al. (2022) é proposto um modelo híbrido para a medição da carta dinamométrica com base na potência medida do motor. Ao analisar o modelo mecânico da estação de bombeio, eles construíram um conjunto de dados, transformando a potência do motor e os parâmetros geométricos da estação no torque da haste polida, incluindo suas primeiras e segundas derivadas por meio de um algoritmo matemático. O modelo híbrido, fundamentado em redes neurais artificiais, foi empregado para analisar as condições de operação da estação de bombeio, incluindo o estado normal, suprimento de fluido insuficiente e a presença de gás no poço. Apesar dos resultados experimentais e das previsões apresentarem um erro relativo médio inferior a 3% ao comparar as cartas dinamométricas reais com as inferidas pelo método, a aplicação dessa metodologia demanda um custo computacional significativo e contemplou apenas condições específicas de operação do Sistema de Bombeio por Hastes.

Tradicionalmente, a obtenção da carta dinamométrica demanda uma estrutura de instrumentação industrial dedicada. Visando superar a necessidade desses instrumentos externos para diagnóstico em sistemas de bombeamento de haste, o trabalho de Li et al. (2019) desenvolveu um estimador prático de parâmetros para cartas dinamométricas, utilizando dados do terminal de acionamento elétrico de indução trifásico, comumente encontrado em estações de bombeio mecânico. O método combina o modelo tipo T de circuito equivalente de motores de indução e o modelo de unidade de bombeamento por hastes para adquirir a carta dinamométrica de superfície em tempo real. No entanto, os resultados calculados pelo estimador podem ser aprimorados para reduzir o erro relativo médio, considerando os resultados experimentais como referência.

As metodologias apresentadas utilizam técnicas de modelagem e identificação de sistemas lineares e não lineares, inteligência computacional e processamento de dados, bem como a inferência das condições de operação da unidade de bombeamento por meio de informações associadas ao motor de indução da unidade de bombeio. O método aqui apresentado é alternativo e redundante na obtenção da carta dinamométrica, visto que dispensa a necessidade de sensores e cabos de medição normalmente utilizados na cabeça do cavalo mecânico. Falhas em sistemas podem causar diversos danos, principalmente quando afetam o sistema de produção industrial. Neste sentido, a redundância é essencial para a alta disponibilidade de sistemas. Utilizando a metodologia proposta concomitantemente com o sistema tradicional de medição da carga na haste polida, em caso de falha neste último, a unidade de produção envolvida não deixará de ter informações sobre a carga na haste polida durante o ciclo de bombeio. Isso ocorre porque, caso aconteça uma falha que possa desabilitar o sistema primário de medição, um sistema secundário assume a responsabilidade de monitoração.

1.3 Objetivos

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi implementar um estimador para a carta dinamométrica de superfície a partir de medições associadas ao barramento de alimentação do motor de indução e dados da estrutura mecânica do sistema de bombeio por hastes.

Para tanto os objetivos específicos foram:

- (i) Pesquisar e utilizar os modelos mais adequados do circuito equivalente do motor de indução e da estrutura mecânica do sistema de bombeio para a inferência da carta dinamométrica mais fidedigna possível.
- (ii) Elaborar um modelo computacional capaz de associar as informações do barramento de alimentação do motor de indução e dados da cinemática da estrutura mecânica do sistema de bombeio por hastes.
- (iii) Comparar o desempenho do estimador computacional por meio de aspectos estatísticos, utilizando cartas dinamométricas reais e/ou metodologias similares presentes na literatura acadêmica.

1.4 Estrutura do Documento

Este documento apresenta 5 capítulos e está estruturado como segue. No Capítulo 2, aspectos gerais e básicos sobre os sistemas de elevação artificial de petróleo são apresentados, com ênfase nos métodos mais comuns, concentrando nossa descrição nas unidades de bombeio mecânico por hastes. No Capítulo 3 é apresentada a fundamentação teórica do método, descrevendo a metodologia proposta para estimar a carta dinamométrica em sistemas de bombeamento por hastes (BMH), com foco em medições associadas ao motor de indução e dados da estrutura mecânica do sistema de bombeio. No Capítulo 4, são apresentadas a análise e discussão dos resultados obtidos com o uso do método proposto. No Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais, contribuições do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

1.5 Publicações Relacionadas ao Trabalho

- (i) Apresentação oral no III Simpósio Brasileiro de Pesquisa Aplicada e Inovação - 26 a 28 de outubro 2017 - Universidade Estadual da Bahia - Campus I - Salvador - Bahia - Brasil;

- (ii) Elaboração de capítulo do volume 2 do livro do III Simpósio Brasileiro de Pesquisa Aplicada e Inovação - 26 a 28 de outubro 2017 - Universidade Estadual da Bahia - Campus I - Salvador - Bahia - Brasil;
- (iii) Publicação de artigo no XXII Congresso Brasileiro de Automática - 09 a 12 de setembro de 2018 - João Pessoa - PB;
- (iv) Publicação de artigo *“Improving the Estimation of a Sucker Rod Pumping Dynamometer Card based on the Terminal Quantities of the Driving Motor”* no journal *IEEE Access*. ISSN: 2169-3536. *Digital Object Identifier: 10.1109/ACCESS.2023.3335379*.

Elevação Artificial de Petróleo

Neste capítulo, são abordadas as características gerais dos sistemas de elevação artificial de petróleo, com ênfase nos métodos mais comuns, concentrando a descrição nas unidades de bombeio mecânico por hastes. São apresentados e analisados os principais componentes e suas funções no processo de elevação artificial de petróleo.

2.1 Métodos de elevação de petróleo

A palavra petróleo tem origem latina, resultando da combinação das palavras *petra* (pedra) e *oleum* (óleo). O petróleo é um material oleoso, inflamável e de alto valor energético. Geralmente, é menos denso do que a água e possui um odor e uma coloração característicos. Após a identificação da presença de petróleo por meio de estudos geológicos, a área de exploração é isolada, e então iniciam-se as escavações, que podem ocorrer em terra (*onshore*) ou abaixo do leito do mar (*offshore*).

A elevação natural num poço de petróleo só subsiste enquanto a pressão de fluxo de fundo do poço é suficiente para vencer as perdas de carga presentes tanto no fluxo do vertical multifásico (FVM) no interior da coluna de produção, quanto no fluxo multifásico no interior da linha de produção (linha de coleta), a saber: perda de carga associada à parcela gravitacional devido ao peso do fluido gaseificado (líquido menos óleo + água e gás), perda de carga associada ao atrito intrínseco inerente ao escoamento do fluido viscoso, perda de carga associada ao atrito entre o fluido e a coluna de hastes, e entre o fluido e a parede interna da coluna e da linha de produção, e as perdas de carga associadas à aceleração do fluido em ambos os trechos citados, quero dizer, na coluna de produção e na linha de coleta, que liga a cabeça do poço a estação coletora da produção, onde se faz a armazenagem inicial e algum processo, tipo separação de gás e tratamento do óleo. Essas perdas estão relacionadas a qualquer tipo de obstrução nas linhas de escoamento, como válvulas, conexões, reduções de diâmetro, curvas e outros elementos. Além disso, a aceleração imposta ao fluido durante o processo de elevação também pode resultar em uma queda de pressão na superfície, como destacado por (Rizzo Filho, 2011).

Na exploração de petróleo, diversos equipamentos desempenham papéis essenciais. O tubo de revestimento, a broca e a sonda são alguns exemplos que contribuem para perfurar a rocha sedimentar e atingir a camada petrolífera, onde o reservatório de petróleo está localizado. Quando a pressão na jazida não é suficiente para expulsar o petróleo

naturalmente, o fluido é elevado de forma artificial.

Dentro dos Métodos de elevação artificial de petróleo, Takács (2015) os divide em dois grandes grupos, baseados na forma como a energia é fornecida para trazer o fluido do reservatório à superfície. Esses grupos são conhecidos como: (i) elevação a gás (*Gas Lifting*) e (ii) elevação por bombeio (*Pumping*). O método de elevação a gás pode ser subdividido em elevação por fluxo de gás intermitente (*Intermittent Gas Lift*), por fluxo contínuo (*Continuous Gas Lift*) e por êmbolo de elevação (*Plunger Lift*). Por outro lado, os métodos de elevação por bombeio podem ser subdivididos em bombeio com hastes (*Rod Pumping*) e sem hastes (*Rodless Pumping*).

A escolha do método de elevação artificial é um problema complexo que envolve diversos fatores e geralmente se baseia em parâmetros como:

1. Índice de produtividade do poço;
2. Vazão de produção;
3. Profundidade de elevação;
4. Características dos fluidos produzidos (viscosidade, densidade, quantidade de gás);
5. Composição (parafínico, aromático, etc.);
6. Produção de areia;
7. *Onshore* ou *Offshore*;
8. Disponibilidade de energia e gás.

Dentre os métodos mencionados anteriormente, destacam-se o método de elevação por gás (*Gas-Lifting*), o método de elevação sem haste por Bombeio Centrífugo Submerso (*Centrifugal Submersible Pumping*), e os métodos de elevação com haste por Bombeio de Cavidades Progressivas (*Progressing Cavity Pumping*) e Bombeio Mecânico por Hastes (*Sucker-Rod Pumping*).

2.1.1 Elevação Artificial por *Gas-Lifting*

O *Gas-Lifting* (GL) é um método de elevação de petróleo que envolve a injeção de gás em um ponto específico da coluna de produção, reduzindo assim a densidade média dos fluidos produzidos. Isso resulta na diminuição do gradiente de pressão ao longo da tubulação, o que, por sua vez, requer uma pressão menor. O resultado é um aumento na taxa de produção (Hernández, 2016).

Existem basicamente duas categorias de elevação por GL:

Gas-Lifting Contínuo (GL contínuo)- Nesse método, o gás é injetado de forma contínua na coluna de produção por meio de uma válvula instalada em um mandril. O gás se mistura ao óleo, gaseificando-o e reduzindo sua densidade. Poços equipados com esse sistema possuem uma linha de gás natural comprimido conectada a uma das saídas laterais da cabeça de produção.

Gas-Lifting Intermitente (GL intermitente)- Nesse método, o gás é injetado de forma intermitente. Um dispositivo intermitente é instalado na linha de gás, determinando o momento e a duração da injeção de gás. Quando o gás é injetado, uma válvula operadora é aberta, impulsionando a coluna de óleo acumulada no interior da tubulação para a superfície durante o período de injeção.

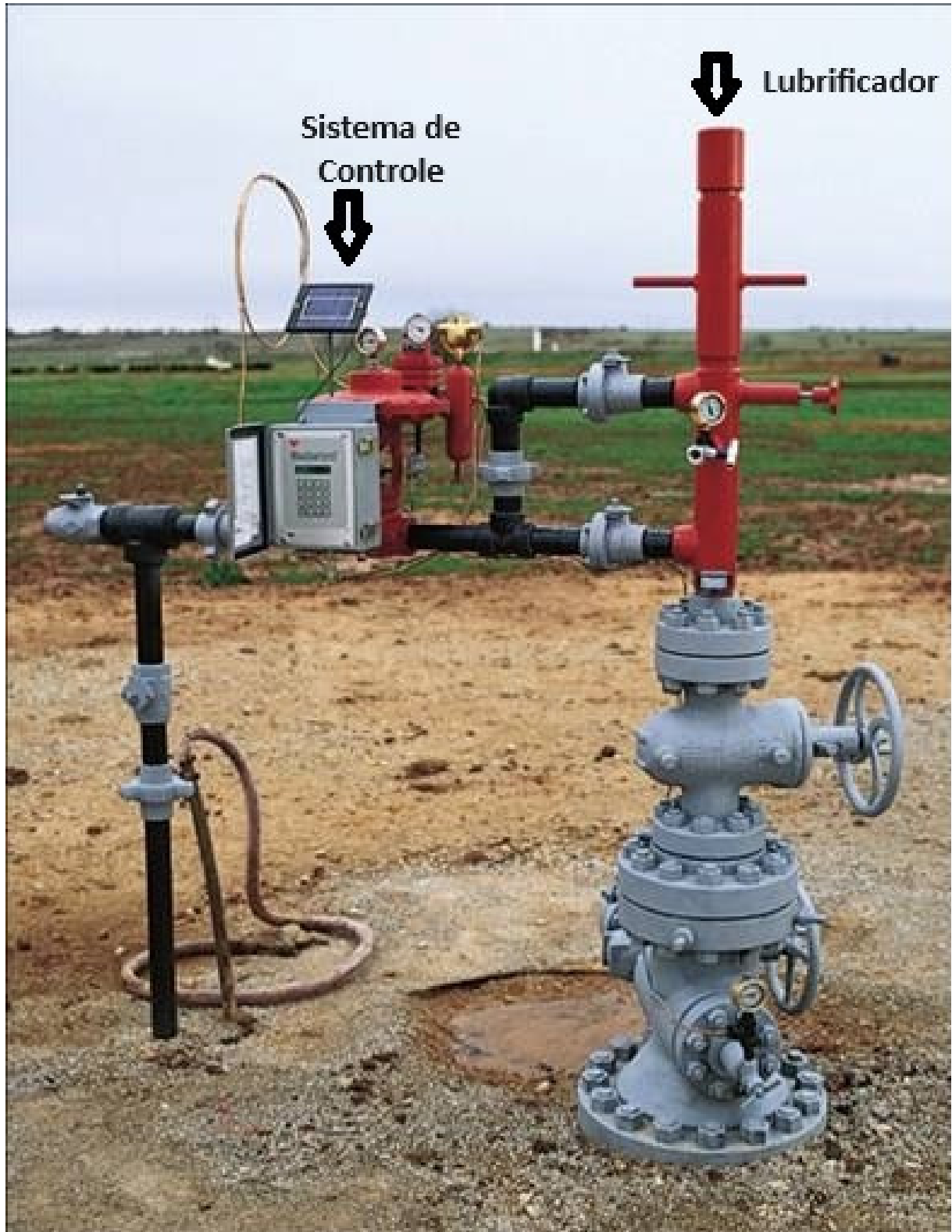
A Figura 2.1 apresenta a fotografia de um sistema GL intermitente utilizando o método *Plunger Lift*. A imagem mostra claramente o sistema de lubrificação da tubulação de produção e o sistema de controle e monitoramento. O método *Plunger Lift* consiste em estabelecer uma interface mecânica entre os fluidos produzidos e o gás do poço para usar a energia do gás como fonte para elevar um pistão de passeio livre (*plunger*) dentro da coluna de produção. Esta interface mecânica reduz drasticamente o escorregamento de líquido (conhecido como *fall-back*), aumentando assim a eficiência do processo de elevação, pois o pistão de passeio livre viaja de forma mais eficaz da parte inferior até a superfície em períodos cíclicos, transportando os fluidos juntamente com o gás.

2.1.2 Elevação Artificial por BCS

O Bombeio Centrífugo Submerso (BCS) é um método usado para elevar grandes volumes de fluidos de poços, geralmente superiores a 30m³/d. Requer um fornecimento considerável de energia elétrica, mas é menos complexo e mais eficiente quando comparado ao sistema de elevação artificial por *Gas-Lifting* (GL). O BCS é projetado para ser submerso no fluido e pode ser instalado diretamente no poço ou em uma base conhecida como *skid*. Esse método de elevação artificial utiliza uma bomba centrífuga de múltiplos estágios, acoplada a um motor elétrico, para bombear o óleo do poço para a superfície. Ele é chamado de submerso porque o conjunto motor-bomba permanece imerso no fluido a ser elevado (Bai and Bai, 2016).

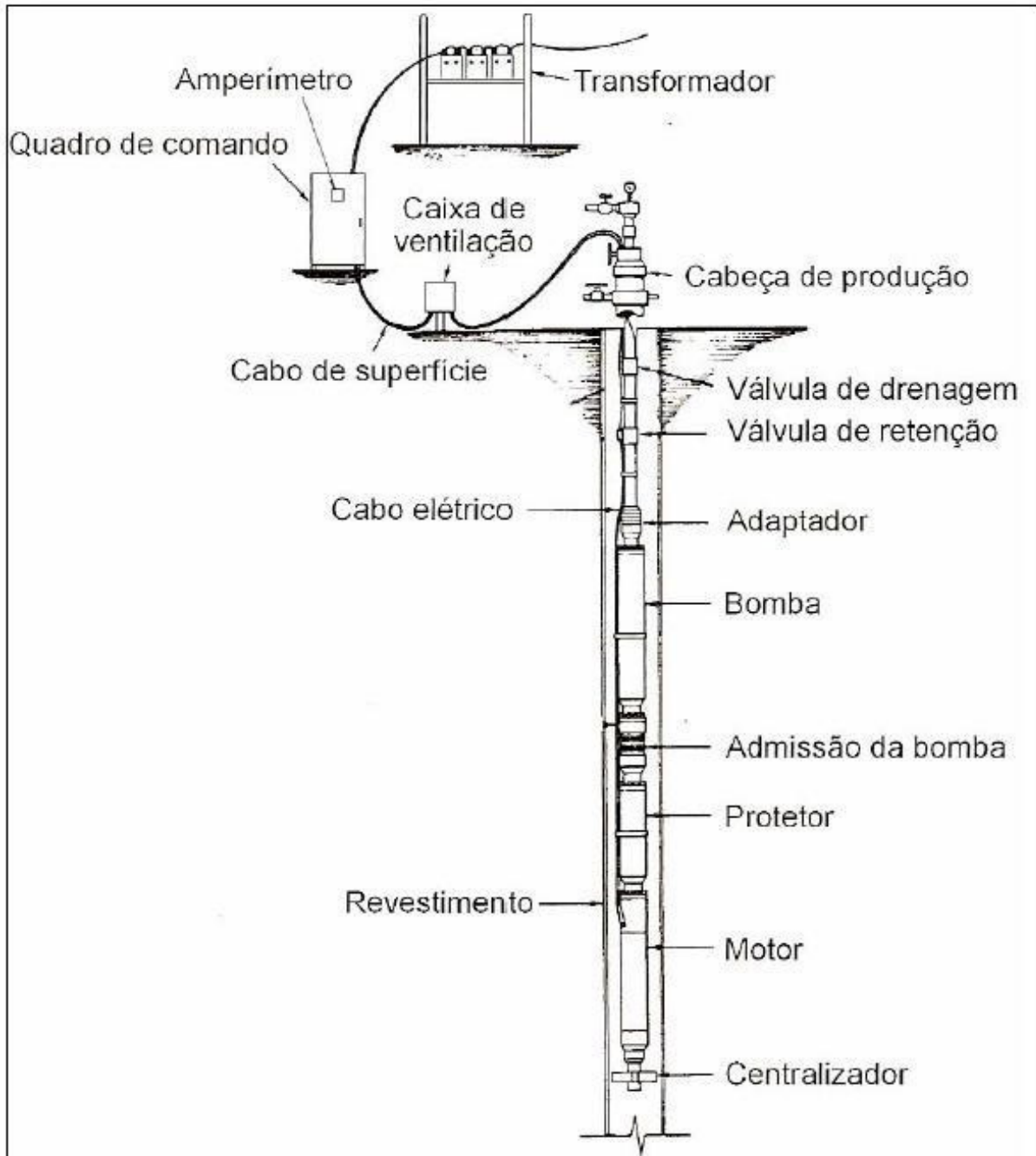
O sistema BCS pode incluir vários componentes, como um motor elétrico trifásico, válvulas de drenagem e retenção, cabeça de produção, bomba centrífuga multifásica, cabos de alimentação elétrica, entre outros. Esses componentes podem ser visualizados na Figura 2.2.

Figura 2.1: Fotografia de Um Sistema GL.



Fonte: (Hernández, 2016)

Figura 2.2: Componentes do Sistema BCS.



Fonte: (Santos and Santana, 2011)

2.1.3 Elevação Artificial por BCP

O sistema BCP, conforme descrito por Silvino et al. (2016), é um método de elevação artificial em que a transferência de energia para o fluido é realizada pela rotação de uma bomba de cavidades progressivas que opera submersa no poço de petróleo. Esse sistema é composto principalmente por um cabeçote ou cabeça de acionamento, um motor elétrico, uma coluna de hastes e uma bomba conhecida como BCP.

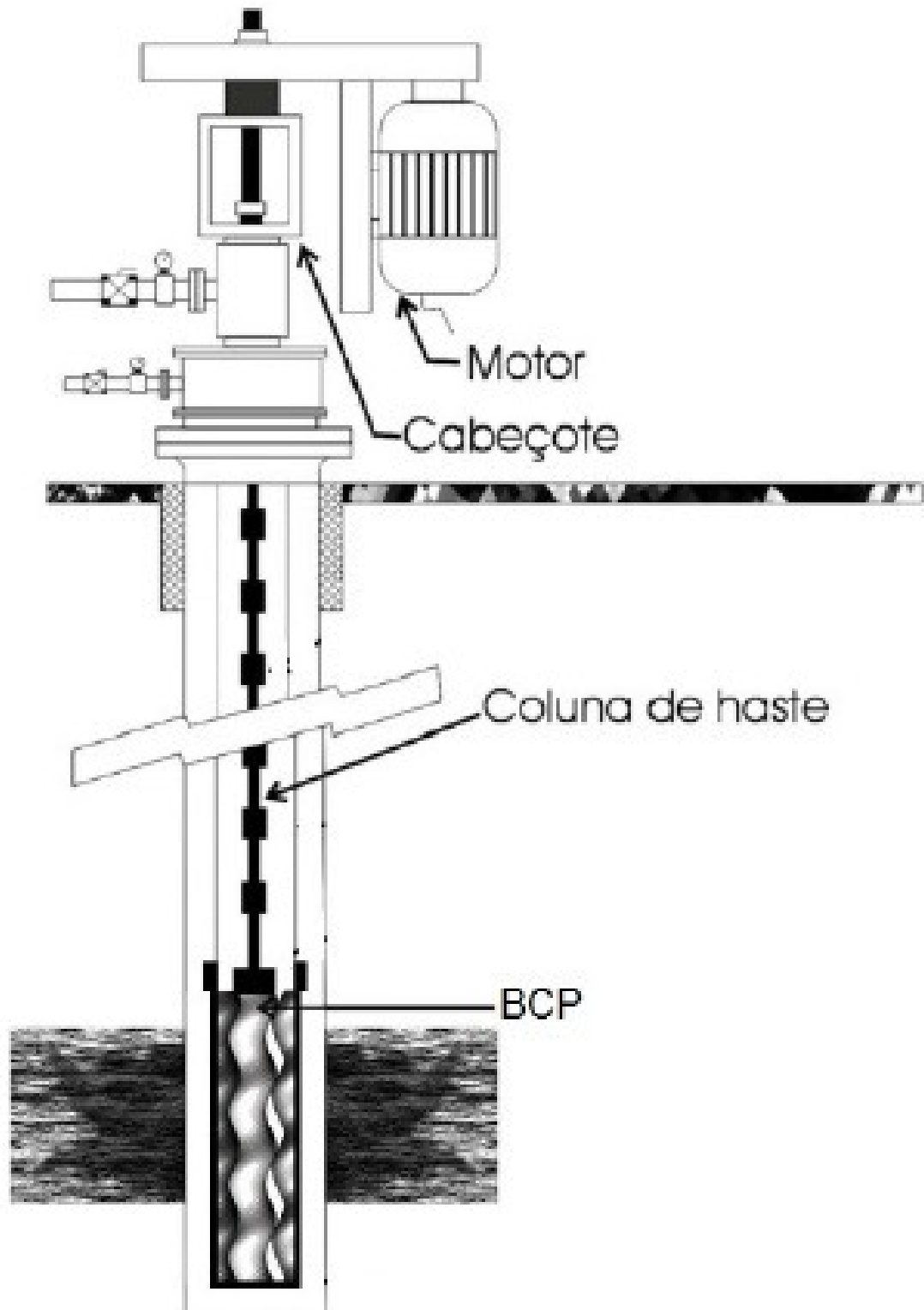
De forma simplificada, o sistema de BCP opera da seguinte maneira: A cabeça de acionamento, ou cabeçote, reduz a rotação inicial de cerca de 3000 rpm, que vem do motor, para uma faixa de rotação entre 300 a 600 rpm, transmitindo torque à coluna de hastes. Essa coluna de hastes, por sua vez, transfere o movimento rotacional à bomba submersa conhecida como BCP. A rotação do eixo do motor, transmitida para a bomba, aciona um rotor. À medida que esse rotor se move, cria regiões com diferentes pressões no interior da BCP, o que resulta no bombeio dos fluidos e, portanto, na elevação artificial do petróleo. A Figura 2.3 apresenta a estrutura do sistema de bombeio por BCP, indicando suas partes principais.

2.1.4 Elevação Artificial por BMH.

O BMH é considerado o mais antigo dos métodos de elevação artificial de petróleo, ainda amplamente utilizado em explorações onshore. Esse método emprega contrapesos acionados, por um motor elétrico ou a combustão, para movimentar um pistão dentro da coluna de produção, realizando movimentos ascendentes e descendentes. Esse movimento do pistão, combinado com a abertura e o fechamento de válvulas, permite bombear o petróleo até a superfície (Gauto, 2016).

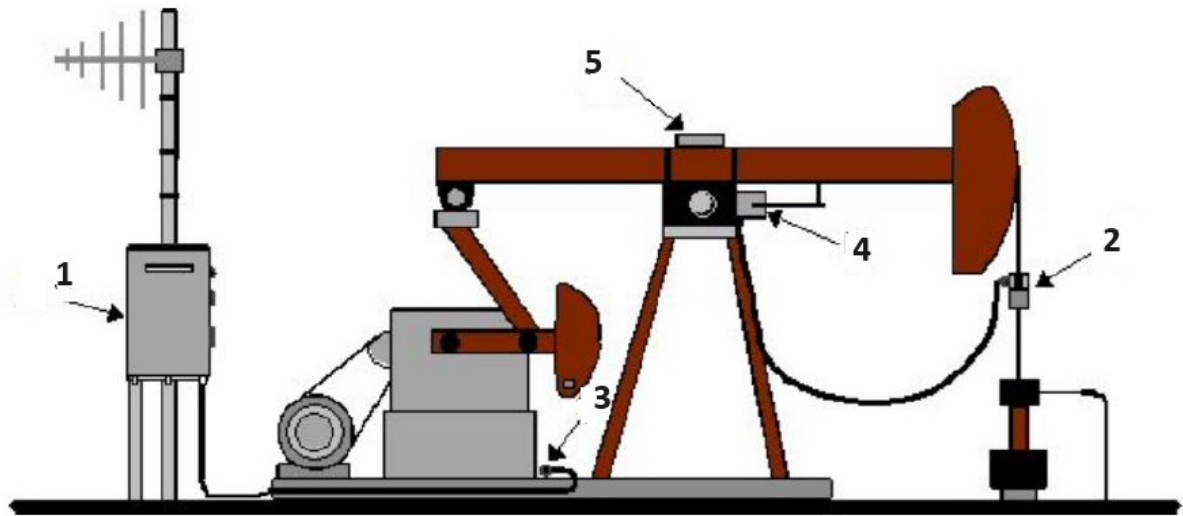
A Figura 2.4 ilustra os componentes do sistema de elevação artificial por BM, que incluem: 1 - Controlador *pump-off*; 2 - Célula de carga da haste polida; 3 - Sensor magnético de posição (opcional); 4 - *Encoder*; 5 - *Strain gauge* do balancim (opcional). O sistema de BM é composto por equipamentos de superfície, como o inversor de frequência (anteriormente conhecido como quadro de comando) e o motor elétrico, que são responsáveis pelo suprimento de energia, além da unidade de bombeio. Também possui equipamentos de sub-superfície, incluindo a coluna de produção, a coluna de hastes (haste polida e hastes convencionais), a camisa da bomba de fundo, o pistão da bomba de fundo (onde está alojada a válvula de passeio) e a válvula de pé.

Figura 2.3: Estrutura para Bombeio por BCP.



Fonte: (Silvino et al., 2016)

Figura 2.4: Ilustração de BM automatizado.



Fonte: Adaptado de (Takács, 2015)

2.2 Principais Componentes de Superfície do BMH

Conforme descrito por Gauto (2016), os principais componentes de superfície da elevação artificial por BMH incluem:

Base - Geralmente moldada em concreto ou composta por perfis de aço, ela serve para alinhar o tripé, a caixa de redução e o motor;

Tripé (*Sampson Post*) - Este componente é formado por três ou quatro perfis de aço que devem ser suficientemente rígidos para suportar toda a carga da haste polida;

Balancim (*Walking Beam*)- Uma viga de aço apoiada no centro por um mancal, que, por sua vez, está preso no topo do tripé. Essa viga deve ser suficientemente rígida para suportar a carga da haste polida de um lado e a força transmitida pela biela do outro;

Cabeça da Unidade de Bombeio (*Horsehead*) - Localizada em uma das extremidades do balancim, ela sustenta a carga da haste polida através de dois cabos de aço (cabresto) e uma barra. A geometria da cabeça da Unidade de Bombeio (UB) faz com que a haste polida se mova verticalmente no poço, reduzindo os esforços e o atrito;

Biela (*Pitman-Crank*) - Essa peça liga o balancim à manivela. A distância entre o eixo da manivela e o mancal da biela define o curso da haste polida, que pode ser ajustado pela posição onde a biela é presa à manivela;

Contrapesos (*Counter-Weight*) - Para elevar os fluidos do poço, o motor é solicitado apenas durante o curso ascendente. Durante o curso descendente, a força da gravidade é responsável pelo movimento das hastes. Isso significa que o motor é exigido de forma cíclica para elevar os fluidos, o que pode reduzir sua vida útil. Para mitigar esse problema, contrapesos são usados na manivela. Durante o curso ascendente, os contrapesos se movem para baixo, reduzindo a potência exigida do motor. No curso descendente, o motor fornece energia para levantar os contrapesos, distribuindo mais uniformemente as cargas ao longo do ciclo de bombeio e prolongando a vida útil do motor. Em uma unidade adequadamente balanceada, o torque máximo no curso ascendente é igual ao torque máximo no curso descendente;

Caixa de Redução (*Reducing Box*) - Esta caixa transforma a energia de alta velocidade e baixo torque do motor em energia de alto torque e baixa velocidade. Geralmente, a velocidade do motor de 600 ou 900 RPM é reduzida para velocidades de 6 a 20 ciclos por minuto por meio de polias e engrenagens;

Motor (*Prime Mover*) - Os motores podem ser elétricos ou de combustão interna. Quando elétricos, são geralmente trifásicos e acionados por inversores de frequência;

Haste polida (*Polished Rod*) - Uma haste padrão em termos de comprimento e diâmetro, projetada com superfície e acabamento adequados para facilitar a selagem de pressão na caixa de engaxetamento e permitir a comunicação entre os equipamentos da superfície e os equipamentos da subsuperfície, conectando a UB à coluna de hastes.

As unidades de bombeio geralmente são identificadas usando uma nomenclatura padronizada pelo *American Petroleum Institute* (API). Essa nomenclatura inclui uma sequência de letras e números, cada um com um significado específico. Ela começa com uma letra que indica a geometria da unidade de bombeio, que pode ser uma unidade balanceada a ar (A), convencional balanceada no balancim (B), convencional balanceada na manivela (C), Mark II (M) ou Torquemaster (TM). Em seguida, há uma sequência de números que representa a capacidade máxima de torque no redutor, na ordem de milhares de libra-força polegada (lbf.pol), seguida por uma letra que indica a categoria de redução. O terceiro grupo de dígitos define a carga máxima na haste polida, na ordem de centenas de libra-força (lbf), e o último conjunto de caracteres estabelece o curso máximo na haste polida. Essa nomenclatura fornece informações importantes sobre as características e capacidades de cada unidade de bombeio. No contexto deste trabalho de pesquisa, o foco foi no arranjo geométrico tipo C, que se refere ao arranjo convencional balanceado no balancim.

2.3 Principais Componentes de Fundo no BMH

Segundo Barros et al. (2013), os principais elementos do sistema de elevação por Bombeio Mecânico por Hastes (BMH) são:

Unidade de Bombeio - É o elemento que fornece a potência à coluna de hastes. Ela transforma o movimento rotativo do motor que a aciona, em movimento alternativo, o qual é imposto à coluna de hastes;

Bomba de subsuperfície ou bomba de fundo (*downhole pump*) - É o elemento ativo do sistema, transmite ao fluido a potência que lhe é entregue pela coluna de hastes. Ela é composta por uma parte móvel, o Pistão (onde é alojada a válvula de passeio), e a a parte fixa, a Camisa (onde é alojada a válvula de pé). Sua função é fornecer energia ao fluido, elevando-o para a superfície. A transmissão de energia ao fluido ocorre sob a forma de aumento de pressão, pois a bomba é do tipo deslocamento positivo;

A coluna de hastes (*rod string*) - É o elemento de ligação entre a bomba de fundo e a unidade de bombeio, ou seja, transmite a potência que lhe foi fornecida na superfície pela unidade de bombeio, para a bomba de fundo. Parte da potência transmitida é dissipada pelas resistências presentes no movimento;

O pistão (*plunger*) - É tipicamente a parte móvel da bomba de fundo, sendo ligado diretamente à coluna de hastes. O pistão abriga a válvula de passeio (válvula de descarga), que durante o curso ascendente do ciclo de bombeio, sustenta e eleva o fluido contido no duto de produção;

A camisa (*barrel*) - é tipicamente a parte fixa da bomba de fundo e contém a válvula de pé. A válvula de pé é fixada na camisa da bomba de fundo e funciona como uma válvula de admissão, permitindo que o fluido do poço penetre na camisa durante o curso ascendente do ciclo de bombeio;

As válvulas de pé (*standing valve*) e de passeio (*traveling valve*) - São ambas do tipo sede/esfera e funcionam de forma combinada durante o ciclo de bombeio. A válvula de passeio é instalada na parte móvel, enquanto a válvula de pé é instalada na parte fixa, permitindo o fluxo somente no curso ascendente, atuando como uma retenção no curso descendente.

2.4 Ciclo de Bombeio no BMH

A Figura 2.5 ilustra o ciclo de bombeio, destacando a posição dos componentes da bomba de fundo, como a camisa, o pistão, a válvula de pé e a válvula de passeio, durante

os cursos ascendente e descendente. Para simplificar a descrição do ciclo de bombeio e melhorar a compreensão, assumiu-se que o fluido bombeado é incompressível.

Na Figura 2.5(a), o pistão está se movendo para baixo, próximo ao fim do ciclo de bombeio. A Figura 2.5(b) mostra a inversão do movimento do pistão e o início de um novo ciclo de bombeio. Na Figura 2.5(c), o pistão está se movendo para cima, próximo à metade do novo ciclo de bombeio. Finalmente, a Figura 2.5(d) apresenta a inversão do movimento do pistão, em direção ao fim do novo ciclo de bombeio.

O ciclo de bombeio é dividido em curso ascendente (*upstroke*) e curso descendente (*downstroke*), durante os quais o motor elétrico da UB é solicitado. A maior parte da elevação do fluido produzido ocorre durante o curso ascendente, por deslocamento positivo. Conforme ilustrado na Figura 2.6, o peso do fluido na coluna de produção mantém a válvula de passeio fechada. A baixa pressão gerada na camisa da bomba, localizada abaixo do pistão e acima da válvula de pé, provoca a abertura desta última, permitindo a passagem do fluido para o interior da bomba.

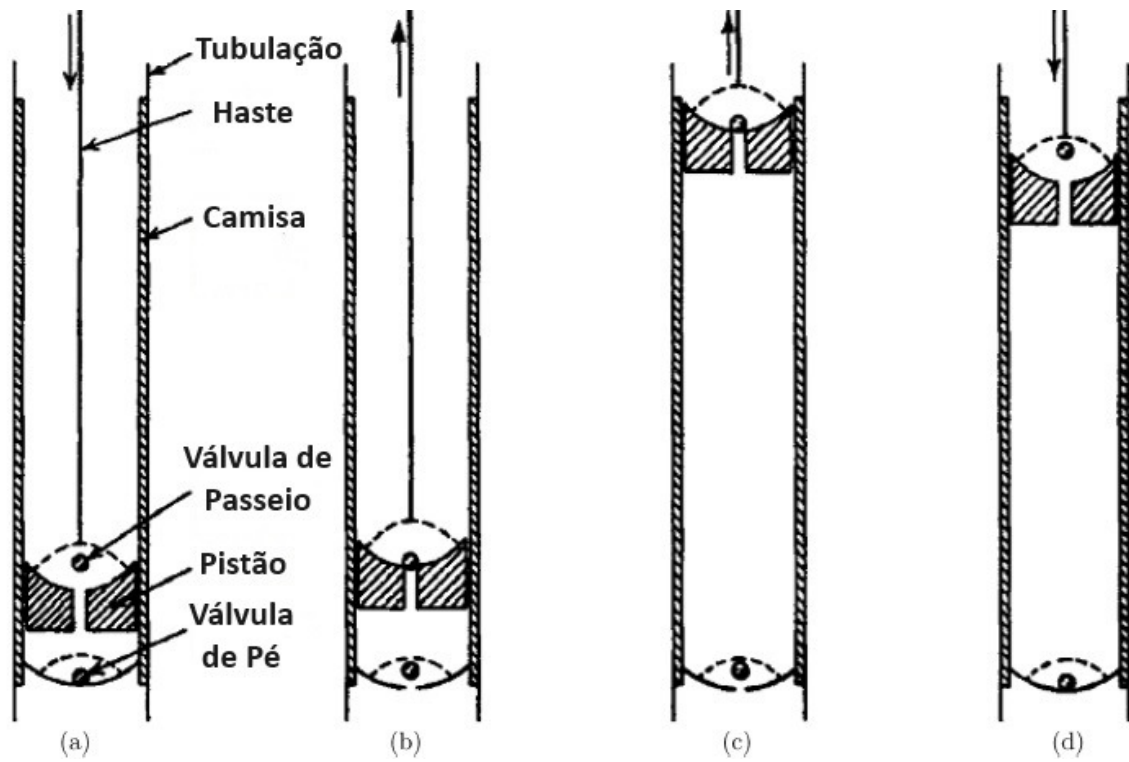
Todo o fluido acima do pistão é elevado juntamente com as hastes. O fluido mais próximo à cabeça do poço entra na linha de produção e, nos ciclos subsequentes, é direcionado para o vaso separador, conforme descrito por (Barros et al., 2013). Vale ressaltar que o vaso separador é um equipamento industrial usado para separar o óleo extraído do poço de elementos como água e areia que podem estar presentes.

No curso descendente, a penetração da haste do pistão de volta para o interior da bomba de fundo resulta na expulsão de um volume de fluido equivalente ao volume deslocado. Conforme ilustrado na Figura 2.7, os fluidos contidos na camisa da bomba são comprimidos, resultando no fechamento da válvula de pé. À medida que o pistão continua sua descida, a diferença de pressão entre a área acima e abaixo da válvula de passeio faz com que esta se abra, permitindo que o fluido seja direcionado para cima do pistão. Quando o pistão atinge o final do curso descendente e inicia o movimento ascendente, a válvula de passeio se fecha enquanto a válvula de pé se abre, iniciando um novo ciclo, conforme explicado por (Barros et al., 2013).

2.5 Cinemática da Unidade de Bombeio

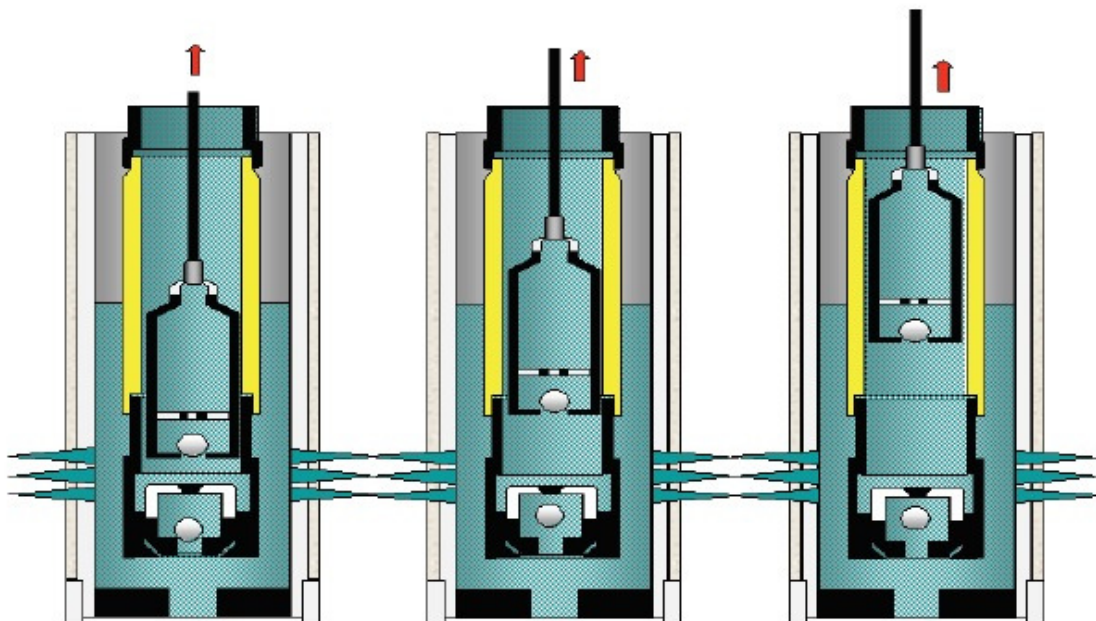
Existem vários Métodos disponíveis para calcular o movimento da haste polida em sistemas de bombeio. No entanto, é importante observar que alguns desses métodos fornecem apenas estimativas aproximadas. Um exemplo disso é o modelo de movimento harmônico simples. Nesse modelo, considera-se que o movimento da haste polida pode ser comparado ao movimento uniforme de um ponto em uma circunferência. Dessa maneira,

Figura 2.5: Operação da Bomba de Fundo.



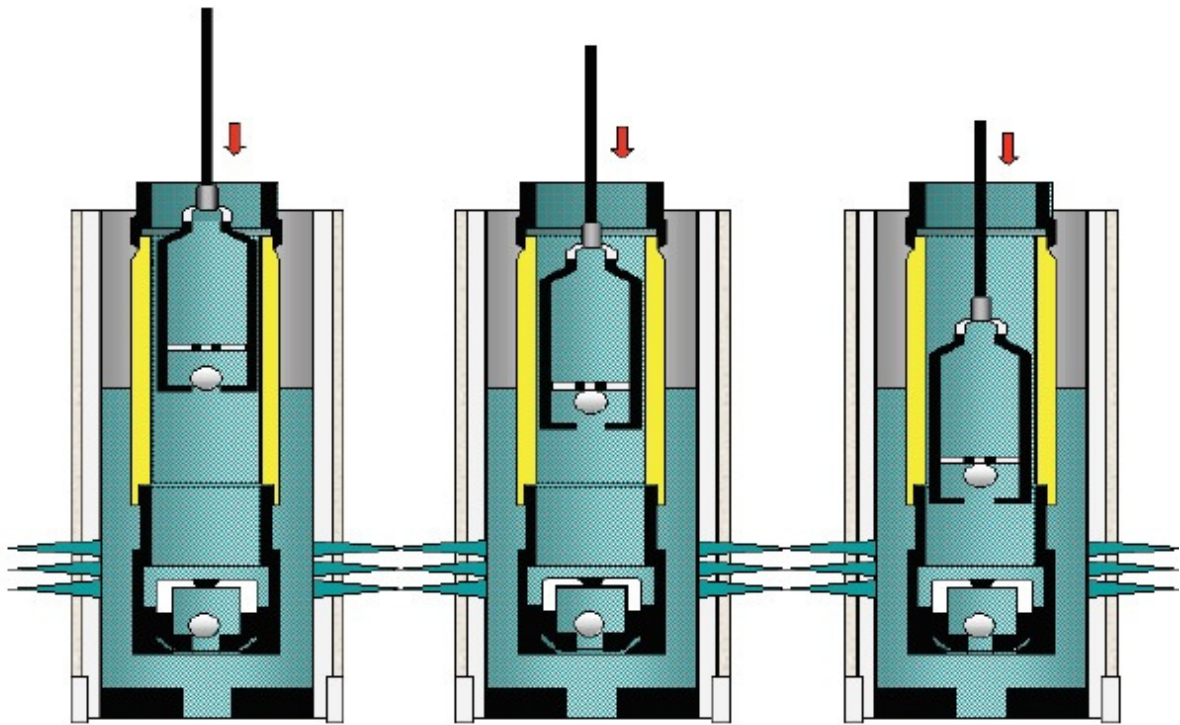
Fonte: (Guo et al., 2007)

Figura 2.6: Etapas do Curso Ascendente.



Fonte: (Oliveira, 2010)

Figura 2.7: Etapas do Curso Descendente.



Fonte: (Oliveira, 2010)

a posição da haste polida é determinada por

$$s(\zeta) = \frac{S}{2}(1 - \cos(\zeta)), \quad (2.1)$$

onde S - é o curso da haste polida e ζ ângulo de giro da manivela, considerando o deslocamento inicial da haste igual a zero.

Assim a velocidade pode ser expressa por

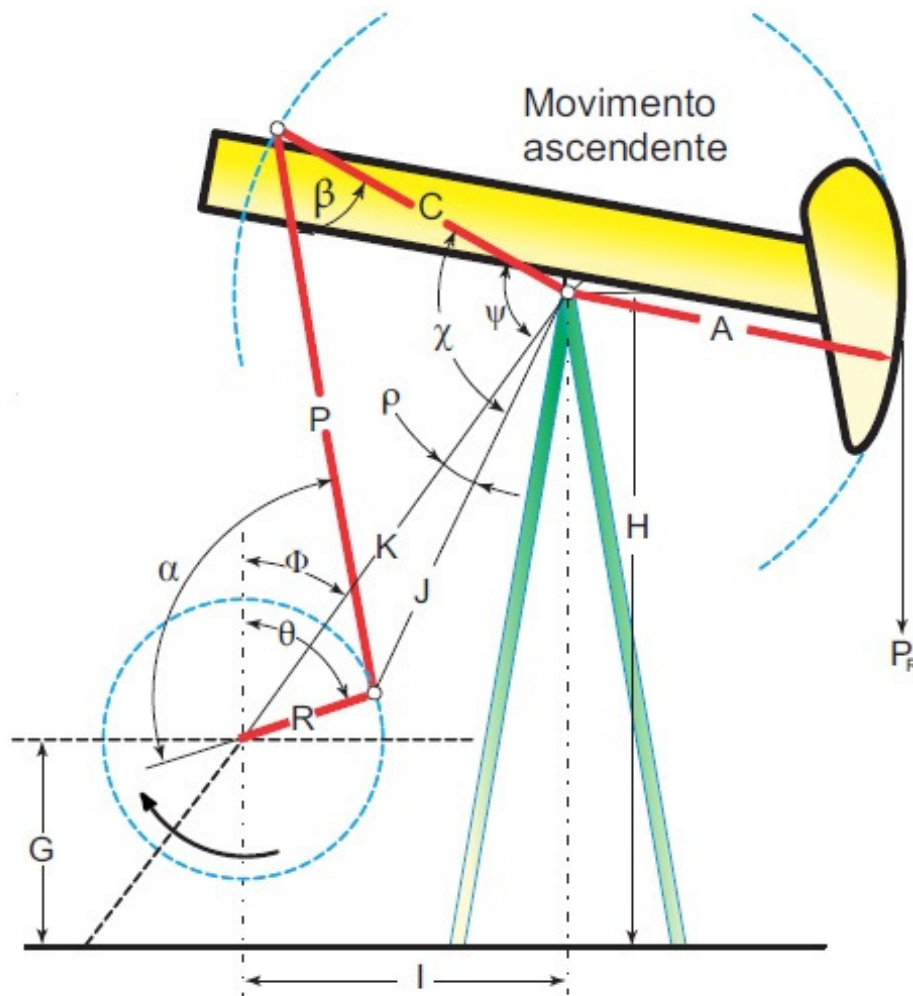
$$v(\zeta) = \frac{ds(\zeta)}{dt} = \frac{ds(\zeta)}{d\zeta} \frac{d(\zeta)}{dt} = \frac{S}{2} \sin(\zeta) w = S \left(\frac{2\pi N}{60} \right) \sin(\zeta), \quad (2.2)$$

onde $\frac{d(\zeta)}{dt} = w = \frac{2\pi N}{60}$ - é a frequência angular; e N - é a velocidade de operação da unidade de bombeio mecânico em ciclos por minutos.

A análise das equações para o modelo de movimento harmônico simples indica que a amplitude angular do movimento da haste polida, somando a fase ascendente e a fase descendente, é de 360° .

O método preciso para calcular o comportamento cinemático da Unidade de Bombeio Mecânico (UBM) foi proposto por Gray (1963) e Svinos (1983). Esse método utiliza

Figura 2.8: Geometria da Unidade de Bombeio.



Fonte:(Silva, 2014)

os dados geométricos da UBM, conforme ilustrado na Figura 2.8, e descreve resumidamente o cálculo do movimento da haste polida usando a cinemática da unidade de bombeio utilizada pelo API.

O trabalho desenvolvido por Gray (1963) e Svinos (1983) permite a determinação de parâmetros essenciais, tais como:

Ângulo ϕ -

$$\phi = \arcsin\left(\frac{1}{K}\right); \tag{2.3}$$

Ângulo β -

$$\beta = \arccos\left(\frac{C^2 + P^2 - K^2 - R^2 + 2KR\cos(\phi - \theta)}{2PC}\right); \tag{2.4}$$

Parâmetro J -

$$J = \sqrt{R^2 + K^2 - 2RK\cos(\theta - \phi)}; \quad (2.5)$$

Ângulo ψ -

$$\psi = \arcsin\left(\frac{P.\sin(\beta)}{J}\right) - \arcsin\left(\frac{P.\sin(\theta - \phi)}{J}\right); \quad (2.6)$$

Para determinar a posição da haste polida, utiliza-se o ângulo θ , que é formado entre uma referência horizontal e a manivela, como ilustrado na Figura 2.8. As expressões que representam o deslocamento máximo e mínimo da haste polida são

$$S_{max}(\theta) = A.(\psi_b - \psi_t) \quad (2.7)$$

e

$$S_{min}(\theta) = A.(\psi_b - \psi), \quad (2.8)$$

onde A é dimensão associada ao Balancim conforme Figura 2.8, θ é ângulo de giro da manivela,

$$\psi_b = \arccos\left(\frac{C^2 + K^2 - (P + K)^2}{2CK}\right), \quad (2.9)$$

e ainda

$$\psi_t = \arccos\left(\frac{C^2 + K^2 - (P - K)^2}{2CK}\right). \quad (2.10)$$

A velocidade é um outro parâmetro importante que pode ser determinado por

$$v(\theta(t)) = \frac{ds[\theta(t)]}{dt} = \frac{ds[\theta(t)]}{d\theta} \frac{d\theta(t)}{dt}; v(\theta) = \frac{ds[\theta(t)]}{d\theta} w. \quad (2.11)$$

Considerando que a manivela gira com velocidade constante e que as perdas por atrito são desprezíveis, a potência de entrada na manivela é equivalente ao trabalho realizado pela haste polida. De acordo com o princípio da conservação de energia, podemos afirmar que

$$T[\theta(t)] d(\theta) = Q_c v[\theta(t)] dt, \quad (2.12)$$

onde $T[\theta(t)]$ é o torque na manivela, e Q_c é a carga na haste polida.

Isolando o torque na manivela na Equação 2.12 e substituindo o valor de $v(\theta)$ tem-se que

$$T[\theta(t)] = Q_c \frac{ds[\theta(t)]}{d\theta} = Q_c TF[\theta(t)] \quad (2.13)$$

O fator de torque $TF[\theta(t)] = \frac{ds[\theta(t)]}{d\theta}$ pode ser conceituado como um braço de alavanca. Esse fator, quando multiplicado pela carga na haste polida, resulta no torque

aplicado à manivela devido a essa carga.

2.6 Torque Associados à Caixa de Redução

O funcionamento da Unidade de Bombeio Mecânico (UBM) está essencialmente vinculado à transmissão da rotação proporcionada pelo Motor de Indução Trifásico (MIT) para um conjunto de hastes durante a elevação do fluido no poço. Essa transmissão de rotação é feita por uma caixa de redução que intermedia o MIT e o conjunto de hastes, e é conectada por correias suportadas por polias interligadas ao eixo do motor. O sistema mecânico entre a caixa de redução e o conjunto de hastes envolve contrapesos, biela, manivela, balancim e a cabeça da unidade. Durante o curso ascendente (*upstroke*), o equipamento demanda considerável esforço mecânico para levantar o conjunto de hastes junto ao fluido. Já durante o curso descendente (*downstroke*), o esforço mecânico é reduzido, uma vez que a força da gravidade atua na movimentação descendente da coluna de hastes.

Os esforços mecânicos durante o ciclo de bombeio se manifestam na caixa de redução e no motor em forma de torque. Conforme mencionado anteriormente, o torque é mais pronunciado no ciclo ascendente do que no ciclo descendente, resultando em um desequilíbrio no sistema eletromecânico composto pela caixa de redução e pelo motor. Para mitigar esse desequilíbrio, são incorporados contrapesos à manivela, visando minimizar o desperdício de energia e reduzir o esforço máximo no motor e na caixa de redução.

A compreensão do torque instantâneo no eixo da manivela é essencial para determinar os requisitos energéticos da UBM. Conforme previsto por autores como Gibbs (1975a); Svinos (1983); Takács (2015), geralmente são considerados três tipos de torque: torque devido às hastes, torque associado ao contrabalanceio e torques inerciais.

2.6.1 Torque Devido às Hastes

O torque devido às hastes é aquele necessário para vencer a carga na haste polida. Normalmente, existe um desequilíbrio estrutural, previamente estimado pelo fabricante da UBM, que deve ser adicionado ou subtraído à carga da haste, dependendo do lado do balancim em que ele se manifesta. Adicionalmente, é crucial considerar o fator de torque, representando um braço imaginário que deve ser multiplicado pelo resultado dessas cargas. Dessa maneira, o torque devido às hastes pode ser calculado por

$$T_h(\theta) = TF(\theta) [Q_c(\theta) \pm SU], \quad (2.14)$$

onde: $T_h(\theta)$ é o torque em função de θ devido às hastes em pol lbs; θ é o ângulo da manivela em graus; $TF(\theta)$ é o fator de torque para o ângulo θ ; $Q_c(\theta)$ é a carga na haste polida no ângulo θ em lbs; e SU é o desbalanceio estrutural em lbs.

2.6.2 Torque Devido ao Contrabalanceio

Conforme mencionado anteriormente, a UBM pode ser equilibrada mecanicamente por meio de contrapesos. O momento mecânico no eixo da manivela proporcionado pelos contrapesos pode ser calculado multiplicando o seu peso pela distância do seu centro de gravidade ao centro do eixo da caixa de redução. Além disso, o ângulo da manivela é fundamental para a determinação desse torque. Dessa forma, a formulação matemática pode ser expressa por

$$T_{cb}(\theta) = -M \sin(\theta), \quad (2.15)$$

onde $T_{cb}(\theta)$ é o torque do contra balanceio em pol.lbs e M é o momento máximo do contrapeso e manivela em lbs.

2.6.3 Torques Inerciais

Geralmente, quando se considera que a manivela opera com velocidade constante, os torques inerciais são desprezados. Contudo, se motores de alto escorregamento forem utilizados para a operação da UBM, variações de velocidade podem ser verificadas, e os torques inerciais devem ser considerados. Conforme Takács (2015), os torques inerciais podem ser divididos em torque inercial de articulação e torque inercial de rotação, e podem ser calculados, respectivamente, por

$$T_{ia}(\theta) = 12 \frac{TF(\theta)}{A} I_a \frac{d^2\theta_b}{dt^2}, \quad (2.16)$$

onde: $T_{ia}(\theta)$ é o torque inercial de articulação no ângulo θ em pol.lbs; $TF(\theta)$ é o fator de torque para o ângulo θ em in; A é a distância do mancal central para cabeça da UBM em in; I_a é o momento de inércia da massa do balancim, cabeça da UBM e biela referidos ao mancal central, slug ft^2 ; $\frac{d^2\theta_b}{dt^2}$ é a aceleração angular do balancim, $\frac{1}{s^2}$, e

$$T_{ir}(\theta) = I_s \frac{d^2\theta_b}{dt^2}, \quad (2.17)$$

onde $T_{ir}(\theta)$ é o torque inercial de rotação no ângulo θ em pol lbs; I_s é o momento de inércia da massa da manivela e contrapesos referidos ao eixo da manivela, slug ft^2 ; $\frac{d^2\theta_b}{dt^2}$

é a aceleração angular do balancim, $\frac{1}{s^2}$.

O torque líquido é o somatório total dos torques percebidos na caixa de redução da UBM. Sua expressão matemática é dada por

$$T_{liq}(\theta) = T_h(\theta) + T_{cb}(\theta) + T_{ia}(\theta) + T_{ir}(\theta). \quad (2.18)$$

Considerando as inércias associadas ao sistema de bombeio mecânico, Gibbs (1975a) propôs um modelo matemático, baseado em equação diferencial, que descreve a dinâmica da UBM, a partir do torque do redutor. A Equação (2.19) que representa este modelo é expressa por

$$T_R(\theta(t)) = TF(\theta(t)) \left(Q_{PR}(\theta(t)) - Q_{SU} \right) M \sin(\theta(t)) + \tau - I_{M2} \frac{dw(t)}{dt} + \frac{TF(\theta(t)) I_{M3}}{A^2} \frac{d^2 S(t)}{dt^2}, \quad (2.19)$$

onde $T_R[\theta(t)]$ é o Torque no redutor em pol lbs; $\theta(t)$ é o ângulo de giro na manivela em função do tempo em rad; $TF\theta(t)$ é o Fator de Torque em in; Q_{PR} é a Carga na haste polida em lbs; Q_{SU} é o Desbalanceamento estrutural da unidade de bombeio em lbs; M é o Momento de contrabalanceio com contrapesos instalados na manivela em pol lbs; τ é o ângulo de fase entre o braço da manivela e a linha de contrapesos em rad; I_{M2} é o Momento de inércia associado às partes girantes da estrutura em pol lbs; I_{M3} é o Momento de inércia associado às partes articuladas da unidade de bombeio em pol.lbs; $S(t)$ é a Posição da haste polida em função do tempo em in; e A é a Dimensão do balancim da unidade de bombeio em in.

As equações para modelagem do torque do motor acoplado à haste polida através do redutor

$$T_M(\theta(t)) = \frac{EF_M}{REL_{polias}} \cdot \frac{EF_R}{REL_R} \cdot T_R[\theta(t)] \quad (2.20)$$

e

$$REL_{polias} = \frac{DP_R}{DP_M}, \quad (2.21)$$

onde: T_M é o torque no Motor em lbs pol; T_R é o torque no rotor em lbs.pol; EF_M é o eficiência do motor; EF_R é o eficiência do redutor; REL_{polias} é a relação de polias; DP_R é o diâmetro da polia do rotor em in; DP_M é o diâmetro da polia do motor em in; e REL_R é a relação de redução da caixa de redução.

Considerando constante $k_x = \frac{REL_{polias} REL_R}{EF_M EF_R}$ então a Equação (2.19) pode ser reescrita como:

$$T_M[\theta(t)] = \frac{1}{k_x} T_R[\theta(t)]. \quad (2.22)$$

Como $\theta(t) = \omega t + \epsilon \therefore \frac{d\theta}{dt} = \omega$ que é a velocidade da manivela em rad/s; então o termo $\frac{d^2 s(t)}{dt^2}$ pode ser definido como

$$\frac{s(t)}{dt} = \frac{ds(t)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}$$

logo,

$$\frac{d^2 s(t)}{dt^2} = \frac{d\left(\frac{ds(t)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}\right)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt},$$

e

$$\frac{d^2 s(t)}{dt^2} = \left[\frac{d^2 s(t)}{d\theta^2} \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\left(\frac{d\theta}{dt}\right)}{d\theta} \frac{ds(t)}{d\theta} \right] \frac{d\theta}{dt}.$$

$$\frac{d^2 s(t)}{dt^2} = \frac{d^2 s(t)}{d\theta^2} \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 + \frac{d\left(\frac{d\theta}{dt}\right)}{d\theta} \frac{ds(t)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}$$

Então $\frac{d^2 s(t)}{dt^2}$ pode ser reescrita como

$$\frac{d^2 s(t)}{dt^2} = \frac{d^2 s(t)}{d\theta^2} w^2 + \frac{ds(t)}{d\theta} \frac{dw}{dt}. \quad (2.23)$$

Substituindo as equações (2.22) e (2.23) em (2.19), encontra-se o modelo matemático usado para inferir a carga na haste polida representado por

$$\begin{aligned} Q_{PR}(\theta(t)) &= \frac{1}{T_F(\theta(t))} \left(T_M(\theta(t)) k_x + M \sin(\theta(t) + \tau) \right) \\ &+ Q_{SU} - \left[\frac{I_{M3}}{A^2} \frac{ds(t)}{d\theta} - \frac{I_{M2}}{T_F(\theta(t))} \right] \ddot{\theta}(t) \\ &- \frac{I_{M3}}{A^2} \left[w(t) \right]^2 \frac{d^2 s(t)}{d\theta^2}. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Considerando I_{M2} e I_{M3} desprezíveis, então a Equação (2.24) pode ser simplificada por

$$\begin{aligned} Q_{PR}(\theta(t)) &= \frac{1}{T_F(\theta(t))} \left(T_M(\theta(t)) k_x + M \sin(\theta(t) + \tau) \right) \\ &+ Q_{SU}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

A Equação 2.26 descreve o Movimento Harmônico Simples (MHS), que pode ser utilizado para modelar o movimento da haste polida. Nessa equação, S é o curso da haste polida, e o ângulo de giro da manivela é dado por $\theta(t) = \omega t + \epsilon$, onde ω representa a velocidade angular e ϵ é a fase inicial.

$$s[\theta(t)] = \frac{S}{2} \left(1 - \cos[\theta(t)] \right). \quad (2.26)$$

A relação entre variação do curso da haste polida em função da carga na mesma haste compõem a carta dinamométrica, um dos elementos que podem ser utilizado para auxiliar no diagnóstico de falhas e condições de operação da UB.

2.7 Comentários Conclusivos

Neste capítulo, foram abordadas as características gerais dos sistemas de elevação artificial de petróleo, com ênfase nos métodos mais comuns, concentrando nossa descrição nas unidades de bombeio mecânico por hastes. Os principais componentes e suas funções no processo de elevação artificial de petróleo foram detalhados. A cinemática da unidade de bombeio, os torques mecânicos envolvidos no bombeio, bem como a modelagem matemática para a descrição da carga e deslocamento da haste polida foram apresentados.

Fundamentação Teórica do Método

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica da metodologia proposta para estimar a carta dinamométrica em sistemas de bombeamento por hastes (BMH), centrando-se em medições associadas ao motor de indução e dados da estrutura mecânica do sistema de bombeio por hastes. Eliminando a necessidade de instrumentação externa, essa abordagem simplifica o processo de obtenção de dados essenciais para análise do desempenho do BMH. A integração de variáveis do motor de indução promete não apenas eficiência operacional aprimorada, mas também a redução de custos na monitorização do sistema de bombeio. Este capítulo descreve como essa metodologia pode transformar a análise convencional dos sistemas de bombeamento, oferecendo uma alternativa perspicaz e econômica para a obtenção de informações cruciais sobre o comportamento do BMH.

O bombeio mecânico por hastes é um dos principais métodos de elevação artificial de petróleo. Entre os métodos utilizados para extrair petróleo, é amplamente adotado em todo o mundo devido à sua simplicidade, confiabilidade e aplicabilidade para uma ampla gama de condições operacionais. Estima-se que cerca de 80% das estações de extração de petróleo adotem essa abordagem em todo o mundo (Bahbahani et al., 2016).

As unidades de produção que utilizam o método de bombeamento com haste são projetadas para extrair óleo do subsolo para a superfície, empregando uma bomba de pistão interligada a uma haste com movimento de vai e vem. Esse movimento pode ser gerado a partir do topo do poço de petróleo, por meio de um dispositivo rotativo acoplado a qualquer acionador rotacional, como um motor elétrico de indução. Um sistema mecânico é necessário para converter o movimento rotacional do motor em movimento linear da haste (Takács, 2015).

Para monitoramento e diagnóstico de falhas na operação do sistema de bombeamento, instrumentos especiais podem ser instalados tanto na superfície como no fundo do poço. No entanto, a instalação desses instrumentos aumenta a complexidade e os custos de manutenção, embora auxiliem na obtenção de cartas dinamométricas, que podem ser adquiridas a partir do fundo ou cabeça do poço. As cartas dinamométricas, especialmente as de superfície, relacionam o deslocamento com a carga na haste polida, sendo úteis para análise das condições operacionais do bombeio.

Os sensores podem ser instalados para medir o deslocamento e a carga na haste polida. O deslocamento da haste pode ser medido por um transdutor de posição, conectado diretamente à haste polida, ou por um sensor discreto que detecta o ponto de referência

da manivela. Essa medição pode indicar o comportamento do deslocamento da haste durante o ciclo de operação, sendo possível avaliar a posição do pistão inferior da bomba. A carga na haste pode ser medida usando uma célula de carga ou um dinamômetro. Esses sensores são invasivos, com custo relativamente alto e requerem adaptação mecânica no poço. Além disso, qualquer falha nesses sensores pode contribuir para a geração de erros nas cartas dinamométricas e comprometer a análise e diagnóstico de problemas no poço (Li et al., 2019).

A principal ferramenta para o diagnóstico de falhas em sistemas de bombeio por hastes é a carta dinamométrica. A obtenção dessa ferramenta geralmente envolve instrumentação invasiva, por meio de instrumentos e sensores caros, os quais, em caso de falha, podem comprometer o monitoramento. Com o avanço tecnológico, pesquisas recentes apresentam estudos de métodos alternativos para a obtenção da carta dinamométrica.

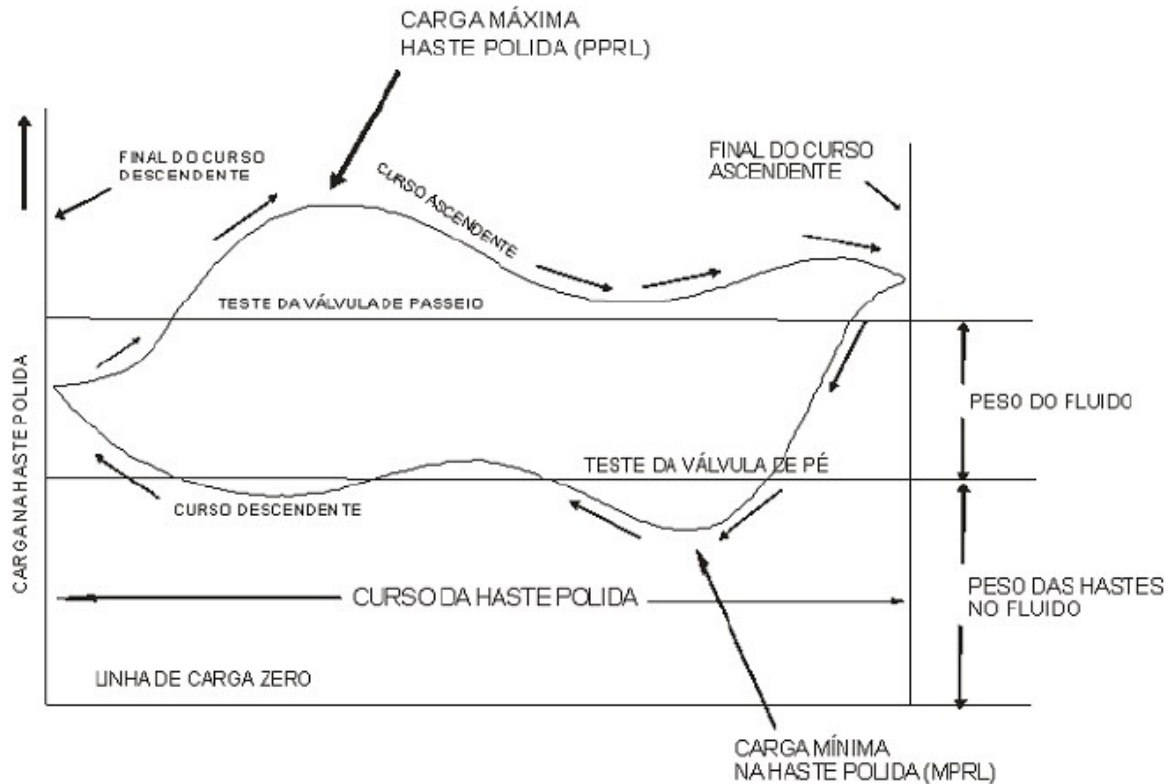
3.1 Carta Dinamométrica

Assim como todo sistema de produção industrial, a UBM precisa ser, constatemente, monitorada e ter suas condições de operação e desempenho, analisadas e avaliadas. Geralmente, o acompanhamento da produção pode ser feito, durante um ciclo completo de bombeio, por meio da análise dos registros efetuados em cartas dinamométricas. Uma carta dinamométrica é um gráfico que comporta a variação da carga na haste polida em função da variação de sua posição durante o ciclo de bombeio. Segundo Silva (2014) a carta dinamométrica é a ferramenta mais importante para o estudo de desempenho da unidade de bombeamento. Com uma carta dinamométrica é possível extrair informações tais como:

- (i) Aspectos do desbalanceamento da unidade;
- (ii) Identificar defeitos na operação das válvulas;
- (iii) Detectar anormalidades na UBM;
- (iv) Determinar cargas na haste polida e na estrutura da UBM;
- (v) Calcular forças mecânicas atuantes na caixa de redução;
- (vi) Informações de problemas de subsuperfície da UBM.

As cartas de superfície registram a variação das cargas da haste polida (primeira haste da coluna de hastes, situada na superfície) em função do seu deslocamento; as cartas de fundo registram a variação das cargas na haste polida em função da posição em algum

Figura 3.1: Ilustração de Carta Dinamométrica.



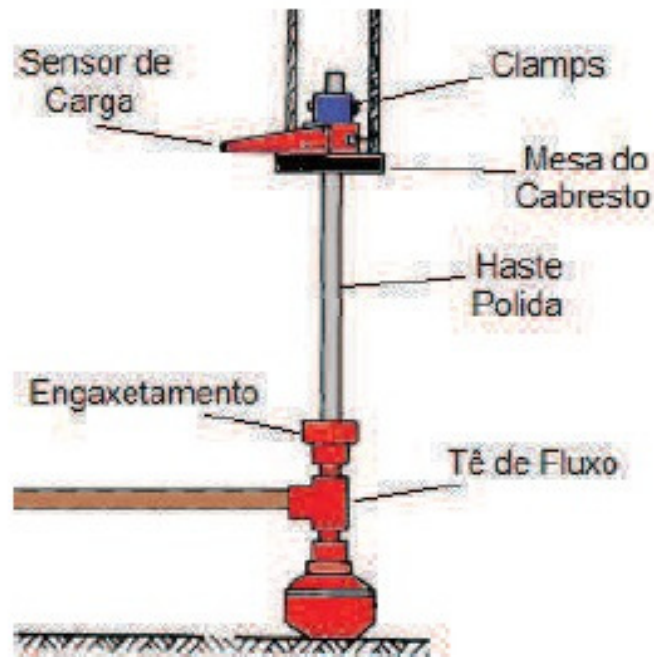
Fonte: (Barreto Filho, 2003)

ponto no fundo do poço de petróleo, geralmente, logo acima da bomba. Uma ilustração de carta dinamométrica de superfície é apresentada na Figura 3.1.

As cartas dinamométricas de fundo registram as cargas no fundo do poço, imediatamente acima da bomba, em função do curso da mesma, e representam a principal ferramenta utilizada no acompanhamento de sistemas de BMH e no diagnóstico de falhas no sistema. Por meio delas, é possível obter informações cruciais sobre as condições da bomba. No entanto, realizar medições diretas nos poços durante a operação da UBM pode ser desafiador devido às dimensões reduzidas das hastes de bombeio em relação a equipamentos, sensores e cabos. Esses componentes ficam sujeitos a condições mecânicas extremas ao transmitir os dados coletados à superfície (Porciúncula et al., 2014). Atualmente, é possível estimar as cartas dinamométricas de fundo por meio das cartas dinamométricas de superfície.

Conforme descrito por Lima (2014), para o registro da variação das cargas na carta de superfície, podem ser utilizados equipamentos como dinamômetros ou células de carga. Esses dispositivos geralmente empregam um anel de aço como elemento de medição de carga, acoplado à mesa do cabresto da UBM e ao grampo de fixação da haste polida. A deflexão desse anel é diretamente proporcional à força aplicada, sendo registrada em papel

Figura 3.2: Sensores Próximo da Haste Polida no BMH .



Fonte: (Lima, 2014)

ligado a um tambor rotativo ou enviada a um controlador de campo após amplificação mecânica ou eletrônica.

O dinamômetro é um dispositivo de medição conectado à haste polida por meio de um suporte dinamométrico. Ele é composto principalmente por uma placa base, uma camisa espaçadora e um suporte. Quando o dinamômetro está acoplado à haste polida, a força que atua nela tem sua intensidade registrada em uma carta por meio de um sistema hidráulico-mecânico. Um tambor porta-carta, um dispositivo mecânico em constante movimento, acompanha o curso ascendente e descendente da haste polida, registrando as variações de carga.

Ao longo dos anos, a função do dinamômetro foi substituída pelas células de carga. Estas atuam como transdutores para a medição de força e como *encoder* para a medição do deslocamento da haste polida. O princípio de funcionamento das células de carga baseia-se na variação da resistência ôhmica do sensor chamado extensiómetro quando este é submetido a deformação elástica. Os extensiómetros são normalmente conectados a uma ponte de *Wheatstone*, e o desequilíbrio dessa ponte, devido à deformação dos extensiómetros, é proporcional à força aplicada. O sensor que contribui para a obtenção da carta dinamométrica é indicado na Figura 3.2.

Takács (2015) afirma que a avaliação precisa das cartas dinamométricas é funda-

mental para realizar tarefas como detecção e prevenção de falhas em equipamentos, aprimoramento na seleção e aplicação de equipamentos de bombeio, e aumento da produção com redução de custos operacionais. Na Figura 3.3 a seguir, apresentam-se esboços da carta dinamométrica de superfície indicando alguns possíveis problemas.

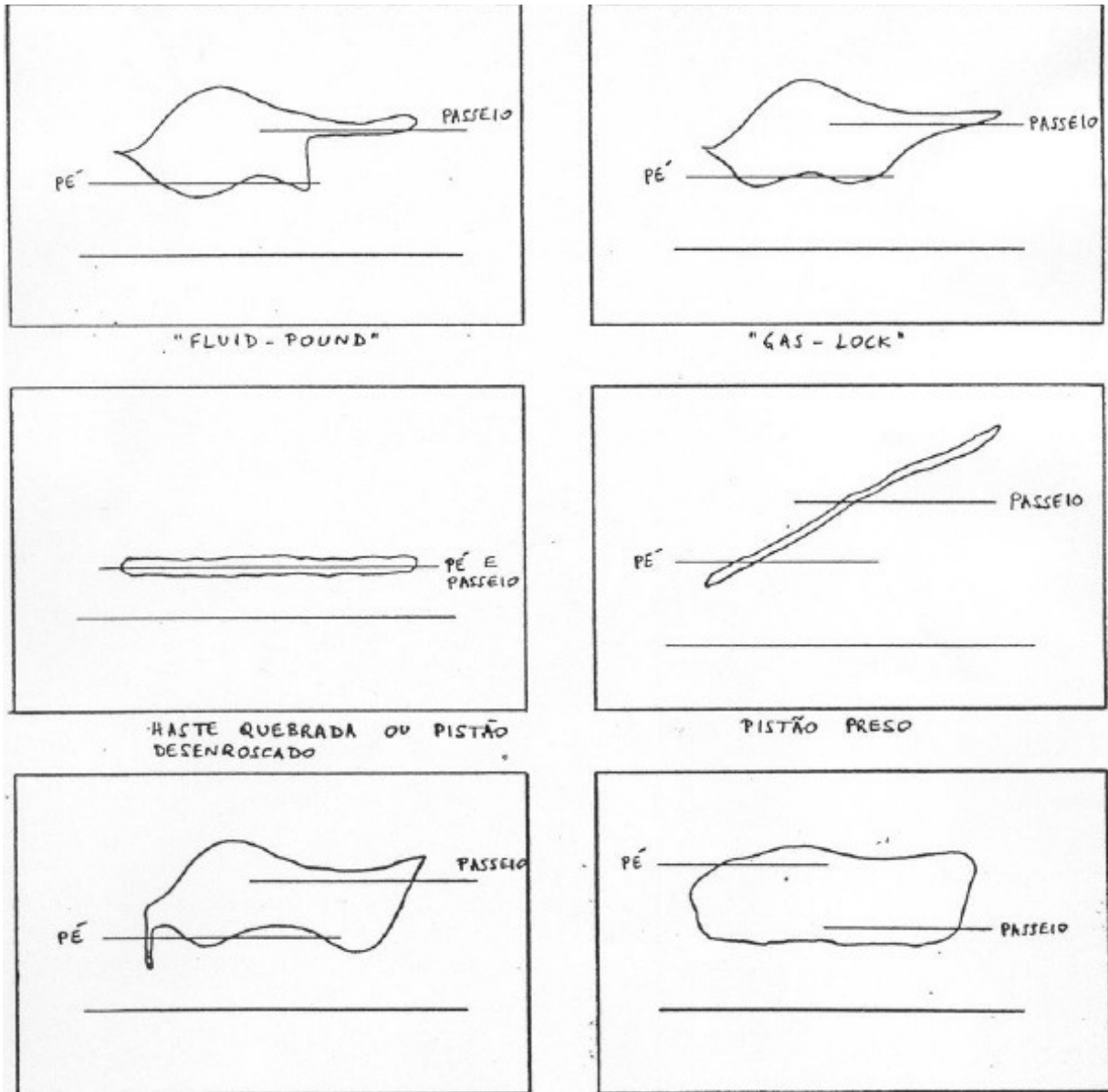
Nesta pesquisa, apresentamos um modelo alternativo a abordagem convencional para o diagnóstico da operação de sistemas de bombeamento por hastes. O modelo proposto atende à necessidade crítica de reduzir a dependência de instrumentos externos para a obtenção de cartas dinamométricas, o que, em última análise, minimiza custos e reduz significativamente o erro relativo quando comparado aos resultados experimentais. O que diferencia o modelo aqui proposto é a incorporação de variáveis de entrada adicionais no estimador e um novo método para aquisição de velocidade do motor de indução. Essa inovação oferece um meio alternativo de obtenção de cartas dinamométricas de superfície, atuando como uma ferramenta complementar para o diagnóstico de falhas e facilitando decisões de manutenção bem informadas para a unidade de bombeamento.

A carta dinamométrica de superfície registra as mudanças na carga da haste polida durante o ciclo de bombeio, relacionadas ao deslocamento da haste polida. Essas variações estão diretamente ligadas ao esforço do motor e, por conseguinte, têm o potencial de influenciar a magnitude da corrente no estator. O diagrama de blocos do sistema acoplado, adaptado de Li et al. (2019), é apresentado na Figura 3.4.

O motor elétrico desempenha um papel crucial ao fornecer a energia necessária para o movimento da manivela. A manivela, por sua vez, está conectada à haste polida e ao conjunto de hastes, impactando diretamente o torque da manivela e o trabalho eletromecânico do motor. Além disso, o conjunto de hastes está interligado à bomba de fundo, a qual é influenciada pela coluna e pelo nível de fluido no reservatório do poço de petróleo. Nesse processo, algumas variáveis são relevantes porque estão diretamente relacionadas com a metodologia proposta. São elas: (i) Velocidade da manivela $\left(\frac{d\theta}{dt}\right)$, rad/s; (ii) Ângulo da manivela (θ), rad; (iii) Torque na manivela (T_d), lbf.in; (iv) Variação da posição da haste polida em relação à variação do ângulo da manivela $\left(\frac{dS_t}{d\theta}\right)$, in/rad; (v) Variação da carga na haste polida em relação à variação do ângulo da manivela $\left(\frac{dF_t}{d\theta}\right)$, lbf/rad.

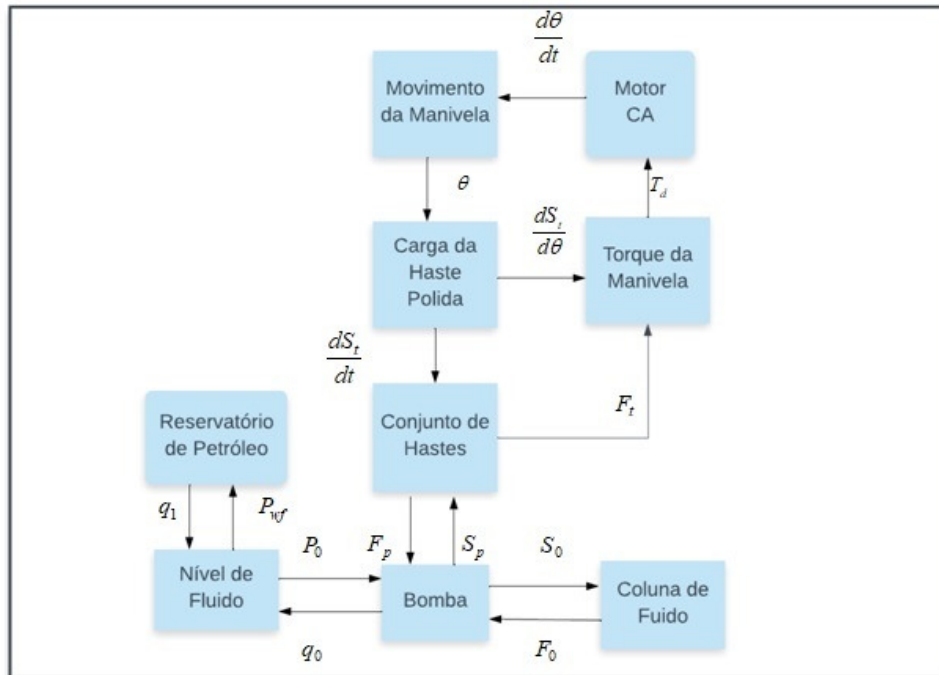
Normalmente, para gerar a carta dinamométrica, é necessário a instalação física no campo de um equipamento conhecido como dinamômetro. Esse equipamento é composto por sensores de força e posição, associados a um algoritmo capaz de relacionar as medidas de força e posição ao longo do ciclo de bombeamento, representando esses dados de forma gráfica. Alternativamente, este gráfico pode ser gerado empregando um sinal de torque do

Figura 3.3: Esboços de Cartas Dinamométricas Indicando Possíveis Problemas.



Fonte: (Barreto Filho, 2003)

Figura 3.4: Diagrama de Blocos do Sistema Acoplado.

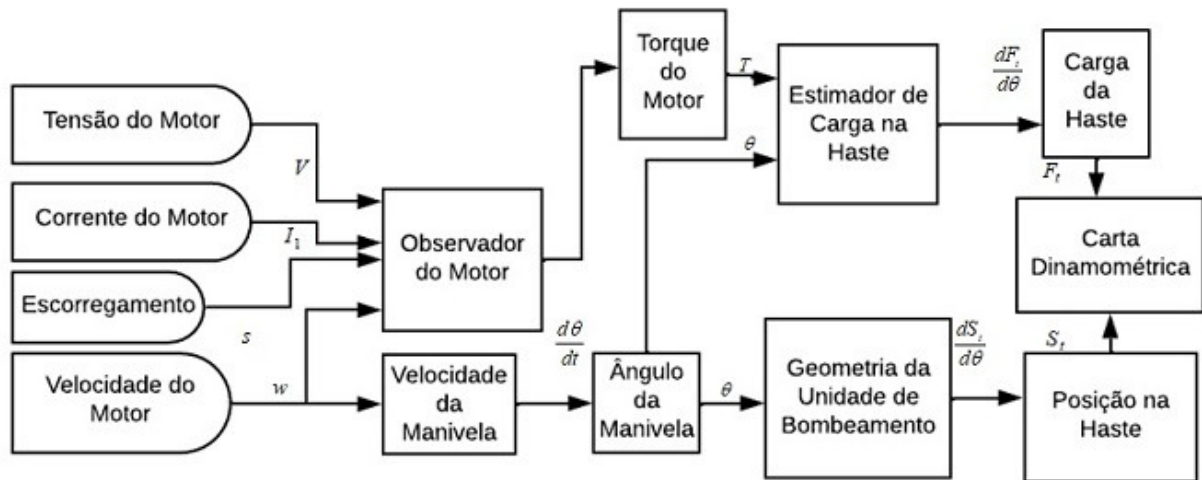


motor e, em seguida, derivando a força na haste polida. Essa abordagem é útil devido à abundância de informações sobre sistemas de bombeamento que estão presentes nas formas de onda de energia em tempo real do motor da unidade de bombeamento (Enikeeva and Alaeva, 2023; Li et al., 2019; Zuo et al., 2022).

Levando em consideração as contribuições de Li et al. (2019), propôs-se um aprimoramento para a estimativa da carta dinamométrica de superfície. Este método inova em relação às entradas do observador do motor, bem como na aquisição da velocidade do ângulo da manivela. A expansão das variáveis de entrada do observador do motor e a incorporação de medições de velocidade do ângulo da manivela resultaram em ajustes no gráfico estimado da carta dinamométrica, aproximando-o da realidade. Adaptada de Li et al. (2019), a Figura 3.5 mostra o diagrama de blocos do sistema de estimação de parâmetros.

Para aplicação do método, são realizadas medições das correntes elétricas, tensões, escorregamento e velocidade do motor. A partir dessas medições, o torque no motor pode ser estimado em uma função do tempo. A velocidade do motor pode ser medida por diversas formas; uma dessas formas pode utilizar um tacômetro óptico e, com isso, o escorregamento pode ser obtido, conhecendo-se a velocidade síncrona. A corrente do estator do motor é medida com o auxílio de uma sonda de corrente, e a tensão, com o voltímetro.

Figura 3.5: Estratégia de



O deslocamento angular da manivela da UBM pode ser obtido a qualquer momento a partir da integração da velocidade do motor. O torque do sistema é uma função do Ângulo da manivela e dos parâmetros geométricos da UBM, o que contribui para o cálculo da carga na haste polida. Dessa forma, a carta dinamométrica de superfície pode ser estimada utilizando a relação entre a carga e o deslocamento na haste polida.

O observador do motor de indução é um algoritmo numérico desenvolvido em um software interativo projetado para aplicações de alto desempenho. A partir do modelo de circuito equivalente tipo T do motor de indução trifásico e utilizando as variáveis de entrada, estima-se o torque do motor. No apêndice A são apresentados os algoritmos para estimação dos parâmetros e torque do motor, bem como códigos relevantes da metodologia proposta.

Como o estimador da carga na haste polida depende tanto do ângulo da manivela quanto do torque do motor, este pode ser utilizado para calcular a carga da haste. Consequentemente, ao integrar esses cálculos com os parâmetros de geometria da unidade de bombeamento e o Ângulo de deslocamento da manivela ao longo do tempo, torna-se possível estimar a carta de dinamométrica de superfície.

Os MITs são máquinas elétricas que convertem energia elétrica em energia mecânica. Sua aplicação prática é evidenciada em sistemas industriais que envolvem acionamento de esteiras transportadoras, equipamentos de extrusão de resinas, bem como abertura e fechamento de válvulas de grande porte, entre outros. Os MITs são comumente utilizados em ambientes de trabalho adversos, nos quais a presença de poeira e outros materiais abrasivos é justificativa para sua ampla adoção. Conforme afirmado por Sen (2013), os

motores de indução são as máquinas mais robustas e amplamente utilizadas na indústria. Com o avanço da eletrônica e o desenvolvimento de conversores e, posteriormente, inversores de frequência, tornou-se possível controlar a velocidade do rotor e variar a frequência desses motores.

Os MITs possuem uma estrutura interna composta por enrolamentos chamados estator e rotor, e pode ser classificados quanto ao sincronismo como motores assíncronos. Nos motores assíncronos, há uma diferença entre a velocidade do campo girante e a do rotor, representada pelo escorregamento. O campo girante é um campo eletromagnético que gira em uma direção específica, originado a partir dos campos eletromagnéticos gerados nas bobinas do MIT quando é alimentado por uma fonte de potência trifásica. (Fitzgerald et al., 2006).

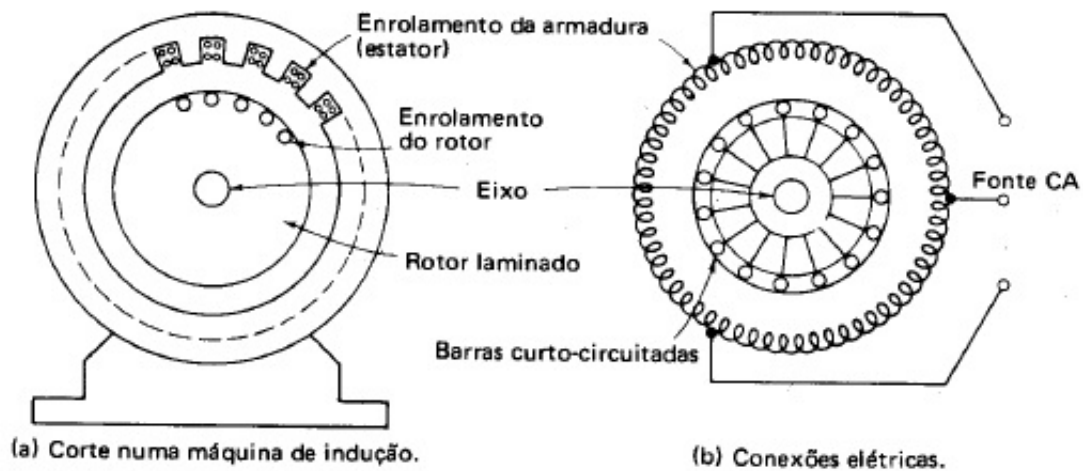
A Figura 3.6 apresenta a construção interna de um MIT. O estator, que é a parte fixa do motor, geralmente está preso à carcaça metálica da máquina. O rotor, por sua vez, é a parte interna do motor que possui movimento rotativo. Entre os enrolamentos do estator e do rotor, há um espaço muito pequeno chamado entreferro. O núcleo do rotor é um cilindro, geralmente feito de ferro ou aço laminado, onde condutores de cobre ou alumínio são fundidos ou enrolados paralelamente ao eixo em ranhuras ou orifícios existentes no núcleo (Kosow, 1982).

Na Figura 3.6, uma fonte de alimentação de tensão alternada trifásica está conectada às bobinas do enrolamento do estator. Isso significa que cada fase da fonte de alimentação está eletricamente ligada a uma bobina do estator. O enrolamento do rotor conduz corrente alternada induzida pelo enrolamento do estator. Em MITs do tipo gaiola de esquilo, anéis terminais são colocados nas duas extremidades dos terminais do rotor, interligando-os; em rotores bobinados, os anéis terminais são fixos em um terminal apenas.

A modelagem de motores de indução trifásicos envolve a representação matemática e física do comportamento do motor em diferentes condições de operação. Alguns passos básicos na elaboração dessas modelagens podem ser considerados, dependendo da aplicação, como o desenvolvimento de um circuito elétrico equivalente, a determinação dos parâmetros desse circuito equivalente, a criação de modelos dinâmicos e estáticos, com suas respectivas equações matemáticas, e a análise de eficiência. É importante destacar que a modelagem precisa ser adaptada aos objetivos específicos da aplicação e aos detalhes do motor de indução em questão. O uso de ferramentas de simulação avançadas também é prática comum nesse campo.

Segundo Kosow (1982), a maior utilidade do circuito equivalente para um MIT é sua aplicação no cálculo do desempenho da máquina. Todos os cálculos são feitos em

Figura 3.6: Estrutura Interna de Motores de Indução.



Fonte: (Kosow, 1982)

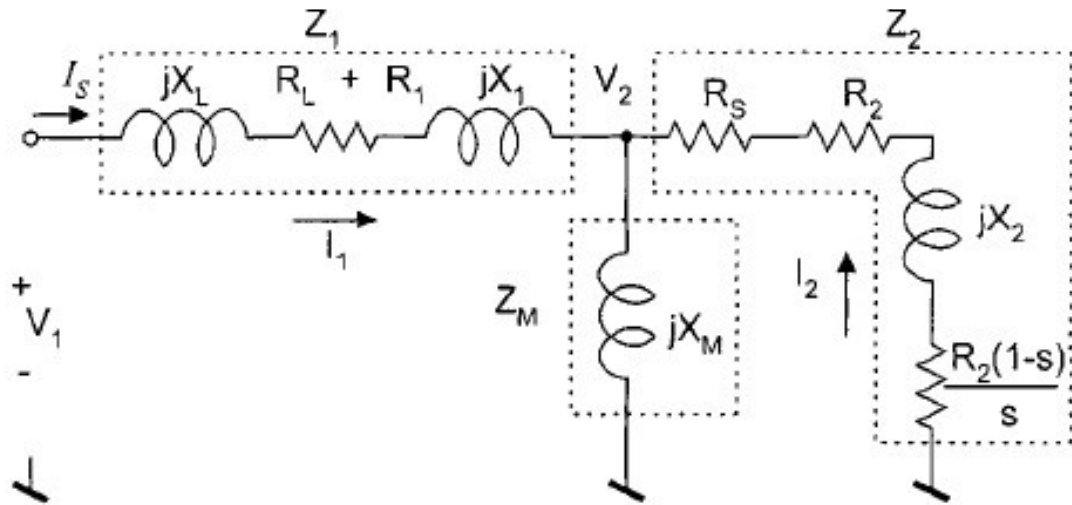
termos monofásicos, ou seja, considerando cada uma das três fases que alimenta o motor, e presumindo uma operação balanceada da máquina. Isso implica que as correntes nas três fases são iguais em magnitude, embora defasadas em 120° .

A literatura apresenta circuitos elétricos que podem representar o MIT. Para descrever o motor de indução da unidade de bombeamento, foi empregado o modelo de circuito equivalente tipo T, conforme representado na Figura 3.7.

A representação do circuito elétrico equivalente apresentado refere-se a uma das fases do MIT e estabelece as relações eletromagnéticas entre o estator e o rotor. É possível observar parâmetros tais como: V_1 é a Tensão elétrica por fase; R_1 é a Resistência por fase efetiva do estator; R_2 é a Resistência do rotor; X_1 é a Reatância de dispersão por fase do estator; X_2 é a Reatância de dispersão por fase do rotor referida ao estator; X_M é a Reatância de magnetização do núcleo; R_S é a Resistência que representa perdas suplementares na linha de transmissão; R_L é a Resistência que representa perdas na linha de transmissão; e X_L é a Reatância da linha de transmissão.

Dado que os poços de petróleo podem estar situados em locais remotos, o modelo tipo T foi aprimorado, incorporando elementos adicionais, especificamente R_S , R_L e X_L , para contabilizar perdas suplementares decorrentes da resistência da linha de alimentação e indutância, respectivamente.

Figura 3.7: Modelo do circuito equivalente do motor empregado no estudo



Fonte: (Li et al., 2019)

A partir da análise nodal, as correntes de malhas são dadas por

$$I_1 = V_1 \frac{1 + \frac{Z_2}{Z_M}}{Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_M}}, \quad (3.1)$$

e

$$I_2 = \frac{V_1}{Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_M}}, \quad (3.2)$$

onde

$$Z_1 = R_1 + R_L + j(X_1 + X_L), \quad (3.3)$$

$$Z_2 = R_2 + R_S + \frac{R_2(1-s)}{s} + jX_2 \quad (3.4)$$

e

$$Z_M = jX_M. \quad (3.5)$$

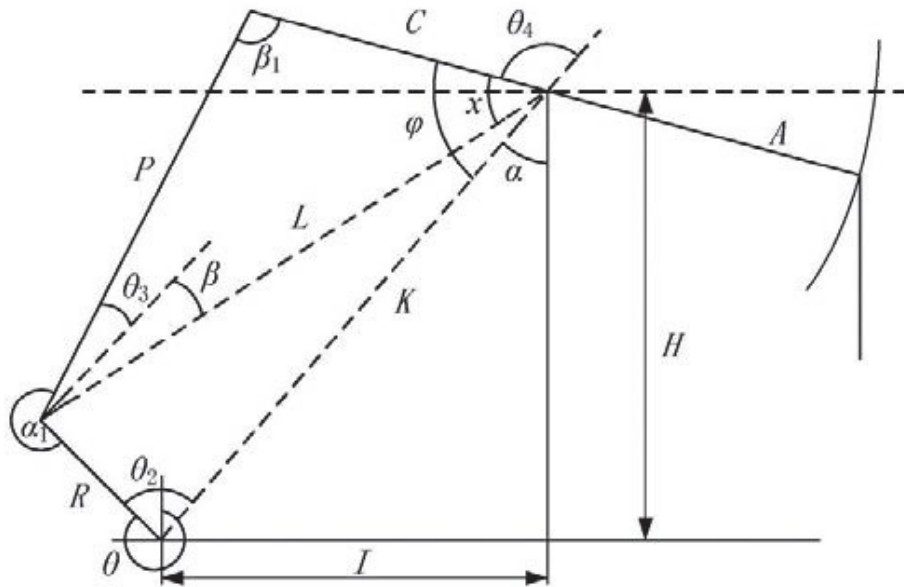
A potência complexa de entrada e o torque de saída são

$$P_1 = V_1 I_1^* \quad (3.6)$$

e

$$T = \frac{P_2}{2\pi f_s}. \quad (3.7)$$

Figura 3.8: Diagrama Simplificado da Unidade de Bombeamento.



A potência real entregue a carga é dada por

$$P_2 = \frac{R_2(1-s)}{s} I_2^2, \quad (3.8)$$

onde s é o escorregamento, $f_0 = 60\text{Hz}$ é a frequência elétrica da rede de alimentação trifásica e $f_s = f_0(1-s)$ é a frequência de rotação do rotor.

Um sistema de bombeamento por hastes compreende vários componentes-chave, incluindo um motor principal, redutor de engrenagem, manivela, haste de sucção e bomba subterrânea. Dentro deste sistema, a unidade de bombeamento desempenha um papel fundamental, funcionando como um mecanismo de ligação de quatro barras. Essa unidade converte eficientemente o movimento rotativo gerado pelo motor em um movimento vertical aplicado à haste polida. A Figura 3.8 ilustra o diagrama simplificado da unidade de bombeamento.

Com base nas relações geométricas descritas no diagrama, pode-se deduzir as seguintes equações:

$$K = \sqrt{H^2 + I^2}, \quad (3.9)$$

$$L = \sqrt{R^2 + K^2 - 2KR\cos(\theta_2)}, \quad (3.10)$$

$$\theta_2 = 2\pi - \theta + \alpha, \quad (3.11)$$

$$\alpha = \arcsin(1/K), \quad (3.12)$$

$$\chi = \arccos\left(\frac{C^2 + L^2 - P^2}{2CL}\right), \quad (3.13)$$

Tabela 3.1: Tamanho geométrico dos parâmetros da unidade de bombeamento.

Parâmetro	Valor
A	1800 mm
C	1440 mm
P	2010 mm
H	3174 mm
I	1380 mm
L	2472,59 mm
K	3461,02 mm
R	690 mm
θ_0	0°

$$\phi = \chi + \beta, \quad (3.14)$$

$$\theta_3 = \arccos \left(\frac{P^2 + L^2 - C^2}{2PL} - \beta \right), \quad (3.15)$$

e

$$\theta_4 = \arccos \left(\frac{P^2 - L^2 - C^2}{2PL} - \beta \right). \quad (3.16)$$

Nas Equações 3.9 a 3.16 apresentadas anteriormente, as variáveis foram definidas da seguinte forma: R como o raio da manivela; P como o comprimento do braço de acionamento ao balancim; C como o comprimento do posterior da viga horizontal do mecanismo central de bombeio; A como o comprimento do anterior da viga horizontal do mecanismo central de bombeio; K como o comprimento da haste fixa; L como a linha auxiliar que conecta a viga ao raio da manivela; I como a altura horizontal do ponto de apoio ao centro da caixa de redução; H como a altura vertical do ponto de apoio ao centro da caixa de redução.

O tamanho de cada parâmetro geométrico da unidade de bombeio utilizada no estudo é fornecido na Tabela 3.1. A relação matemática entre a posição da haste polida e o Ângulo da manivela $\theta(t) = \omega t + \epsilon$, (onde ω é a velocidade angular e ϵ é a fase inicial), é dada por:

$$s[\theta(t)] = \frac{S}{2} \left(1 - \cos[\theta(t)] \right) \quad (3.17)$$

A análise durante cada ciclo de bombeamento revela que a haste polida experimenta perfis de carga cíclicos Diversos métodos, como células de carga e dinamômetros, são empregados para medir essa carga. Esses sensores são normalmente inseridos na parte superior do corpo da haste polida. é crucial observar que qualquer falha nesses compo-

mentos pode interromper a produção de petróleo, exigindo a manutenção da unidade de bombeamento.

Tanto a modelagem da carga na haste polida quanto a medição indireta (inferência) dessa carga podem ser encontradas em publicações relevantes na literatura técnica relativamente recente (Teclé and Ziuzev, 2019; Torgaeva et al., 2019; Wang et al., 2019; Zuo et al., 2022).

No contexto da modelagem matemática, uma descrição da dinâmica do bombeamento que leva em conta a inércia do sistema foi proposta em (Gibbs, 1975b). O título sugere um enfoque no cálculo dos parâmetros associados é dinâmica do bombeamento por hastes, o que é crucial para entender e otimizar o desempenho de sistemas de bombeamento. A Equação a seguir expressa o torque experimentado pelo rotor do motor de indução da unidade de bombeamento conforme

$$\begin{aligned} T_R[\theta(t)] = & T_F(\theta(t)) \left(Q_{PR}(\theta(t)) - Q_{SU} \right) \\ & - M \sin \left(\theta(t) + \tau \right) - \left(I_{M2} \dot{\omega}(t) \right) \\ & + \left(\frac{T_F(\theta(t)) I_{M3}}{A^2} \ddot{s}(t) \right), \end{aligned} \quad (3.18)$$

onde $Q_{PR}(\theta(t))$ é a carga da haste polida; $T_F(\theta(t))$ é um fator de torque; M é o momento de contrabalanceio; Q_{SU} é o desbalanceamento estrutural; τ é o Ângulo de fase (medido em radianos, referenciando ao modelo de regime permanente senoidal); θ é o Ângulo da manivela (medido em radianos); I_{M2} é o momento de inércia das partes girantes; I_{M3} é o momento de inércia das partes articuladas; $s(t)$: é a posição da haste polida ao longo do tempo; $\omega(t)$ é a velocidade angular da manivela (medido em rad/s); e A é o comprimento anterior da viga horizontal.

Esta pesquisa apresenta um método para a estimação da carga na haste polida sem depender de dispositivos externos, como células de carga ou transdutores de posição. Nesse processo, o ângulo da manivela e a geometria da viga horizontal da estrutura de bombeamento desempenham papéis fundamentais. É crucial observar que um subsistema elétrico está acoplado a um subsistema mecânico, operando em diferentes escalas de tempo. O sistema elétrico opera em regime permanente senoidal, enquanto o sistema mecânico é influenciado por fatores como inércia e não linearidade em seus componentes. Essas considerações impactam a seleção das taxas de amostragem e larguras de banda durante o processamento do sinal para minimizar erros na estimação dos resultados.

O torque do motor é acoplado à haste polida por meio de uma unidade redutora, e

esse acoplamento pode ser modelado por

$$T_M(\theta(t)) = \frac{EF_M EF_R}{REL_{polias} REL_R} T_R[\theta(t)], \quad (3.19)$$

e

$$REL_{polias} = \frac{DP_R}{DP_M}, \quad (3.20)$$

onde EF_M é a eficiência do motor; EF_R é a eficiência do redutor; DP_R é o diâmetro da polia redutora; DP_M é o diâmetro da polia do motor; REL_{polias} é a relação entre as polias; e REL_R é a taxa de redução.

Como $\frac{REL_{polias} REL_R}{EF_M EF_R} = cte$, então a Equação 3.19 pode ser reescrita como

$$T_M(\theta(t)) = \frac{1}{k_x} T_R[\theta(t)], \quad (3.21)$$

onde k_x é uma constante.

Ainda, $w(t) = \dot{\theta}(t)$ então pode-se obter

$$\begin{aligned} \ddot{S}(t) &= \frac{\dot{S}(t)}{dt} = \frac{\dot{S}(t)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}, \\ \ddot{S}(t) &= \frac{d\left(\frac{dS(t)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}\right)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}, \end{aligned}$$

e

$$\ddot{S}(t) = [\ddot{\theta}(t)]^2 \frac{d^2 S(t)}{d\theta^2} + \frac{dS(t)}{d\theta} \frac{dw(t)}{d\theta} \dot{\theta}(t).$$

Assim $\ddot{S}(t)$ pode ser reescrita como

$$\ddot{S}(t) = [\ddot{\theta}(t)]^2 \frac{d^2 S(t)}{d\theta^2} + \frac{dS(t)}{d\theta} \dot{\theta}(t). \quad (3.22)$$

Ao substituir as Equações 3.22 e 3.21 na Equação 3.18, é possível determinar um modelo matemático para inferir a carga na haste polida por

$$\begin{aligned} Q_{PR}(\theta(t)) &= \frac{1}{T_F(\theta(t))} \left(T_M(\theta(t)) k_x + M \sin(\theta(t) + \tau) \right) \\ &+ Q_{SU} - \left[\frac{I_{M3}}{A^2} \frac{dS(t)}{d\theta} - \frac{I_{M2}}{T_F(\theta(t))} \right] \ddot{\theta}(t) \\ &- \frac{I_{M3}}{A^2} \left[w(t) \right]^2 \frac{d^2 S(t)}{d\theta^2}. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Assumindo como desprezíveis os termos relacionados às inércias associadas à cinemática do sistema de bombeamento por hastes ($I_{M2}; I_{M3}$), a Equação 3.23 pode ser simplificada, tornando-se

$$Q_{PR}(\theta(t)) = \frac{1}{T_F(\theta(t))} \left(T_M(\theta(t)) k_x + M \sin(\theta(t) + \tau) \right) + Q_{SU}. \quad (3.24)$$

Ou seja, a Equação 3.23 sugere que se o MHS está sendo utilizado para descrever o movimento da haste polida (velocidade angular constante), despreza-se o valor do termo I_{M3} ; ou ainda, se a cinemática da unidade de bombeio está sendo utilizada para descrever o movimento da haste polida, despreza-se os valores dos termos I_{M2} e I_{M3} . Neste trabalho o MHS foi utilizado na descrição do movimento da haste polida.

O Apêndice A apresenta o algoritmo principal para inferência da carga na haste polida, enquanto o Apêndice B apresenta a sub-rotina do algoritmo principal para inferência da carga na haste polida.

3.2 Aplicação da Metodologia Proposta

Na indústria petrolífera, os poços operacionais frequentemente são inacessíveis para pesquisas acadêmicas. Portanto, a metodologia proposta foi aplicada na estrutura representada na Figura 3.9. Essa estrutura corresponde ao Laboratório de Elevação Artificial (LEA) da Universidade Federal da Bahia (UFBA), no Brasil. O LEA foi concebido para reproduzir condições semelhantes às encontradas em operações de perfurações e extração de petróleo, desempenhando um papel fundamental como um recurso valioso para pesquisas científicas e estudos relacionados a métodos de elevação de petróleo.

O laboratório possui três poços de produção em escala real dedicados a pesquisas. O primeiro poço está equipado com um sistema de bombeamento centrífugo submerso. O segundo poço possui um sistema de bombeamento por haste, que é um componente experimental desta pesquisa e foi submetido a testes e validações. O terceiro poço está equipado com bombeamento mecânico submerso de duplo efeito. A estratégia proposta para a estimativa de parâmetros foi implementada no LEA, simulando condições de operação, incluindo operação normal, interferência de gás, vazamento na válvula de deslocamento e fornecimento insuficiente de líquido.

As características do motor de indução, o deslocamento e a carga da haste polida são obtidos diretamente pelo sistema de aquisição de dados de bombeamento de haste,

conforme representado na Figura 3.10. A velocidade do rotor, definida como $\left(\frac{d\theta}{dt}\right)$, é capturada por um sensor óptico. O drive CA é responsável pelo controle da velocidade do motor e simultaneamente transmite informações de controle do motor, incluindo tensão CA V , corrente do estator I e escorregamento s , para o controlador lógico programável (CLP) através da rede industrial DeviceNet14. O CLP, por sua vez, se comunica com o servidor *OLE for Process Control* (OPC) usando o protocolo *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*(TCP/IP). Os sinais do transdutor de posição e da célula de carga são transmitidos ao CLP em padrão 4-20mA.

OPC é um padrão de comunicação amplamente utilizado na indústria para facilitar a interoperabilidade entre sistemas de automação e controle. OPC permite a troca de dados entre diferentes dispositivos de hardware e software de diferentes fabricantes. OPC Server (Servidor OPC) é um componente de software que fornece uma interface padronizada para comunicação entre sistemas de controle, como controladores lógicos programáveis, e sistemas de software supervisor, Sistemas de Controle e Aquisição de Dados. Em essência, o servidor OPC atua como uma ponte que permite que diferentes dispositivos e softwares troquem informações entre si, facilitando a integração em sistemas de automação industrial.

TCP/IP é o conjunto de protocolos de comunicação padrão que sustenta a Internet. Ele fornece a base para a comunicação de dados em redes, permitindo que dispositivos em diferentes locais se comuniquem de maneira eficiente. O TCP é responsável pelo controle de transmissão, garantindo que os dados sejam entregues corretamente do remetente para o destinatário. Ele divide os dados em pacotes, os envia, e então o destinatário os reorganiza na ordem correta. O IP é responsável pelo roteamento dos pacotes de dados entre dispositivos em diferentes redes. Ele atribui endereços únicos a cada dispositivo na rede para que os pacotes saibam para onde devem ser enviados.

Existe um transdutor de posição e uma célula de carga para auxiliar na geração da carta dinamométrica de superfície e servir para avaliar o desempenho do estimador neste estudo, conforme ilustrado na Figura 3.11. Essa instrumentação auxilia na aquisição autêntica de cartas dinamométricas em vários cenários operacionais. Dessa forma, cartas dinamométricas reais foram comparadas com cartas geradas pela metodologia proposta.

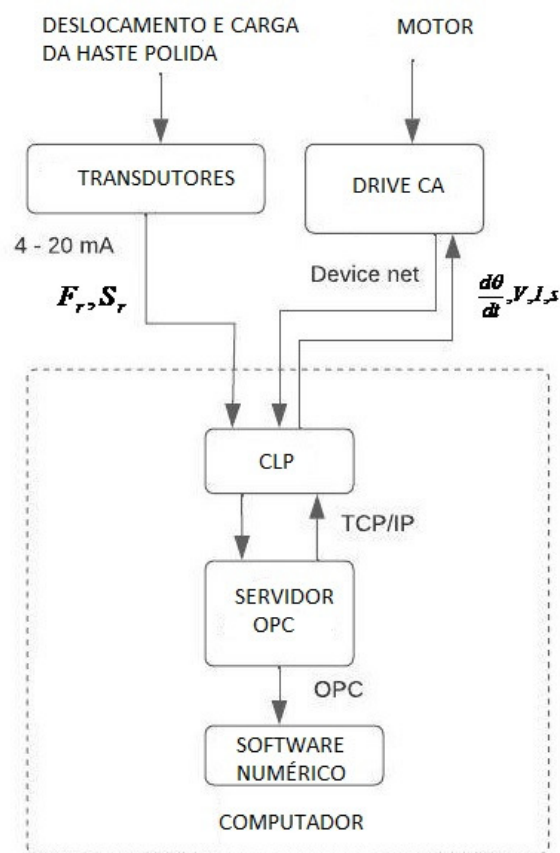
As grandezas associadas ao motor de indução e ocultas no barramento do drive de acionamento do motor são medidas diretamente usando sensores, como sondas e voltímetros dedicados. As informações adquiridas são entradas para o módulo de acondicionamento de sinais. A saída desse módulo alimenta o módulo de energia elétrica trifásica, que, por sua vez, fornece os parâmetros elétricos para a unidade de processamento. A Figura 3.12 apresenta um diagrama de blocos que ilustra o processo descrito.

Figura 3.9: Unidade de Bombeio Instalada na Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia.



Fonte: própria autoria

Figura 3.10: Estrutura de hardware para monitoramento do sistema de bombeio por hastes.



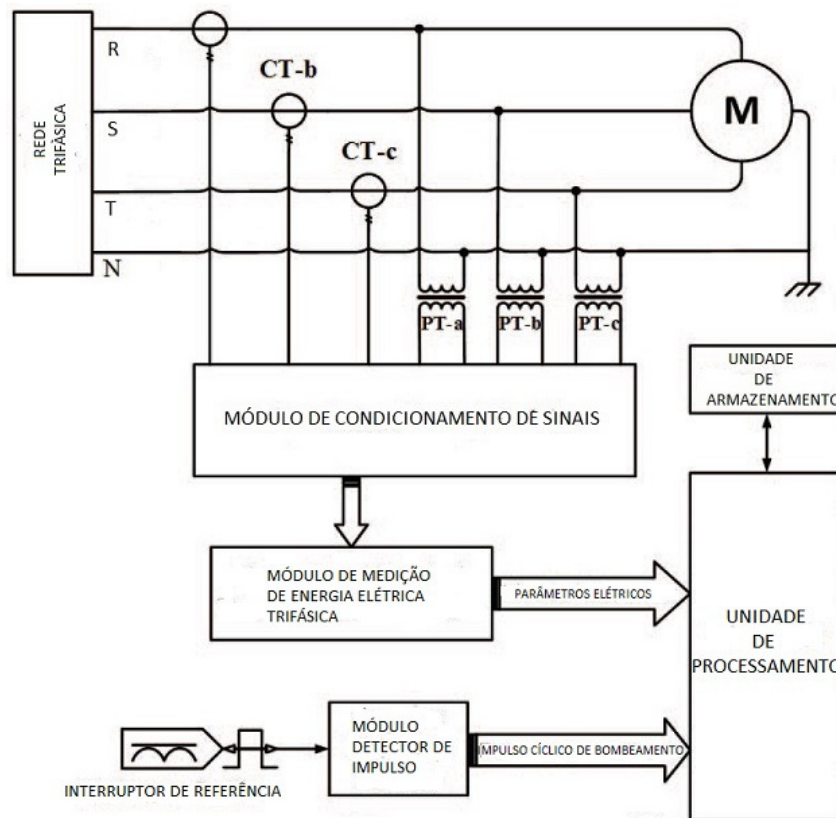
Fonte: própria autoria

Figura 3.11: Detalhe da Célula de Carga e o Transdutor de Posição.



Fonte: própria autoria

Figura 3.12: Diagrama de Blocos para Aquisição das Informações Elétricas do Motor de Indução.



Fonte: adaptado de (Li et al., 2019)

Figura 3.13: Motor de Indução (LEA-UFBA).



As Tabelas 3.2 e 3.4 exibem as especificações do motor de indução (ver Figura 3.13) e os dados da geometria da unidade de bombeamento do LEA, respectivamente. Os dados da estrutura mecânica da estação de bombeamento são obtidos do manual do fabricante.

A Tabela 3.3 apresenta os parâmetros do motor de indução da UB do LEA, obtidos a partir dos ensaios realizados em laboratório, incluindo o teste em vazio, o ensaio com rotor bloqueado e o teste de corrente contínua. Os procedimentos seguiram as diretrizes estabelecidas pelas Normas ABNT NBR 17094-3 e IEEE 112.

Tabela 3.2: Especificações do Motor de Indução (LEA-UFBA)

Item	Especificações
Frequência Nominal	60 Hz
Velocidade Nominal	1160 rpm
Potência Nominal	3728,5 kW
Corrente Nominal	8,86 A
Tensão Nominal	380 V

Tabela 3.3: Parâmetros do Circuito Equivalente do Motor de Indução (LEA-UFBA)

Parâmetro	valor em Ω
Resistência por fase efetiva do estator (R_1)	1,115
Resistência efetiva do rotor (R_2)	1,09
Reatância de dispersão por fase do estator (X_1)	0,0069
Reatância de dispersão por fase do rotor referida ao estator (X_2)	0,0064
Reatância de magnetização do núcleo (X_M)	0,204

Tabela 3.4: Características do Poço de Petróleo Artificial (LEA-UFBA).

Dados	Medidas(m)
Profundidade	32
Diâmetro	0,251
Comprimento da haste polida	0,635
Diâmetro da tubulação de descarga	0,0588
Diâmetro do pistão atuador	0,100
Diâmetro da haste do atuador	0,040
Diâmetro do pistão da Bomba	0,080
Diâmetro da haste do atuador de bombeamento	0,040
Curso de atuadores de força e bombeamento	1,5

Os dados do motor são registrados em um arquivo e processados junto com as informações mecânicas. Um algoritmo desenvolvido em um software numérico (MATLAB) gerencia todos esses dados offline. é importante observar que este aspecto apresenta uma limitação que necessita de melhorias, uma vez que testes de aquisição de dados em tempo real ainda não foram realizados.

3.3 Comentários Conclusivos

Neste capítulo, foram destacados aspectos da fundamentação teórica associados ao método proposto. Características de cartas dinamométricas, detalhes da instalação de sensores do Bombeio Mecânico por Hastes, diagrama de blocos do sistema acoplado, estratégia de estimação adotada, estrutura interna de motores de indução, modelo do circuito equivalente do motor empregado no estudo, diagrama simplificado da unidade de bombeamento e a aplicação da metodologia proposta foram temas discutidos. Também foram apresentadas tabelas contendo informações sobre as especificações do motor de indução utilizado no estudo, bem como características da estrutura mecânica do poço de petróleo artificial (LEA-UFBA).

Análise e Discussão dos Resultados

Neste capítulo, é apresentada a análise dos resultados com a aplicação da metodologia proposta. Dados sobre a estimação da carga na haste polida, comportamento da posição da haste polida em diferentes ciclos de bombeio e inferência da carta dinâmométrica são apresentados e discutidos. Ao final do capítulo, a metodologia proposta é comparada com metodologias recentemente empregadas para análise de desempenho.

4.1 Introdução

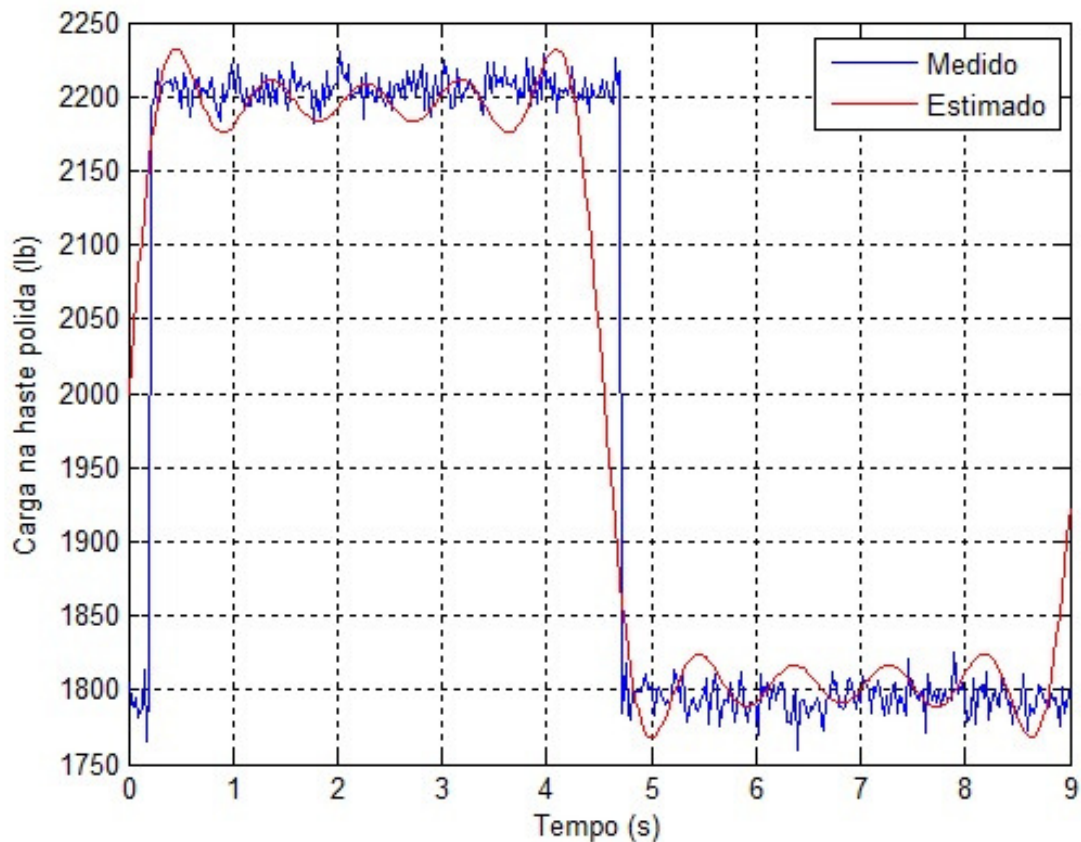
A eficiência operacional e a confiabilidade dos sistemas de bombeamento por hastes na indústria petrolífera são vitais para a produção eficaz de poços de petróleo. Nesse contexto, a obtenção da carta dinâmométrica de superfície desempenha um papel crucial na compreensão e otimização do desempenho desses sistemas. Tradicionalmente, a obtenção dessa carta envolve instrumentação especializada e métodos invasivos, muitas vezes restritos por limitações logísticas e custos associados.

Este capítulo aborda uma abordagem inovadora para a inferência da carta dinâmométrica de superfície, centrando-se nas informações disponíveis no barramento de acionamento do motor de indução, associadas aos dados da estrutura mecânica do sistema de bombeio por hastes. Ao explorar as nuances dessas informações e dados, busca-se oferecer uma alternativa eficaz e economicamente viável para a obtenção dessa carta crucial. A metodologia proposta, desenvolvida e testada no Laboratório de Elevação Artificial (LEA) da Universidade Federal da Bahia, destaca-se pela sua capacidade de fornecer estimativas precisas, minimizando a dependência de instrumentação externa intrusiva.

No decorrer deste capítulo, são apresentados os resultados obtidos por meio da aplicação dessa metodologia em condições diversas de operação, incluindo cenários normais e situações desafiadoras, como a presença de gás no poço e suprimento insuficiente de fluido. A análise detalhada dos resultados objetiva validar a eficácia da abordagem proposta, identificando suas potencialidades e limitações. Além disso, discute-se as implicações práticas dessas descobertas para a indústria petrolífera, destacando a relevância desse avanço para a operação eficiente e a manutenção preditiva em sistemas de bombeamento por hastes.

A Figura 4.1 apresenta o comportamento gráfico da variação da carga na haste polida em função do tempo. São exibidos dois traçados: um medido pelo sistema de

Figura 4.1: Comportamento da Carga na Haste Polida.



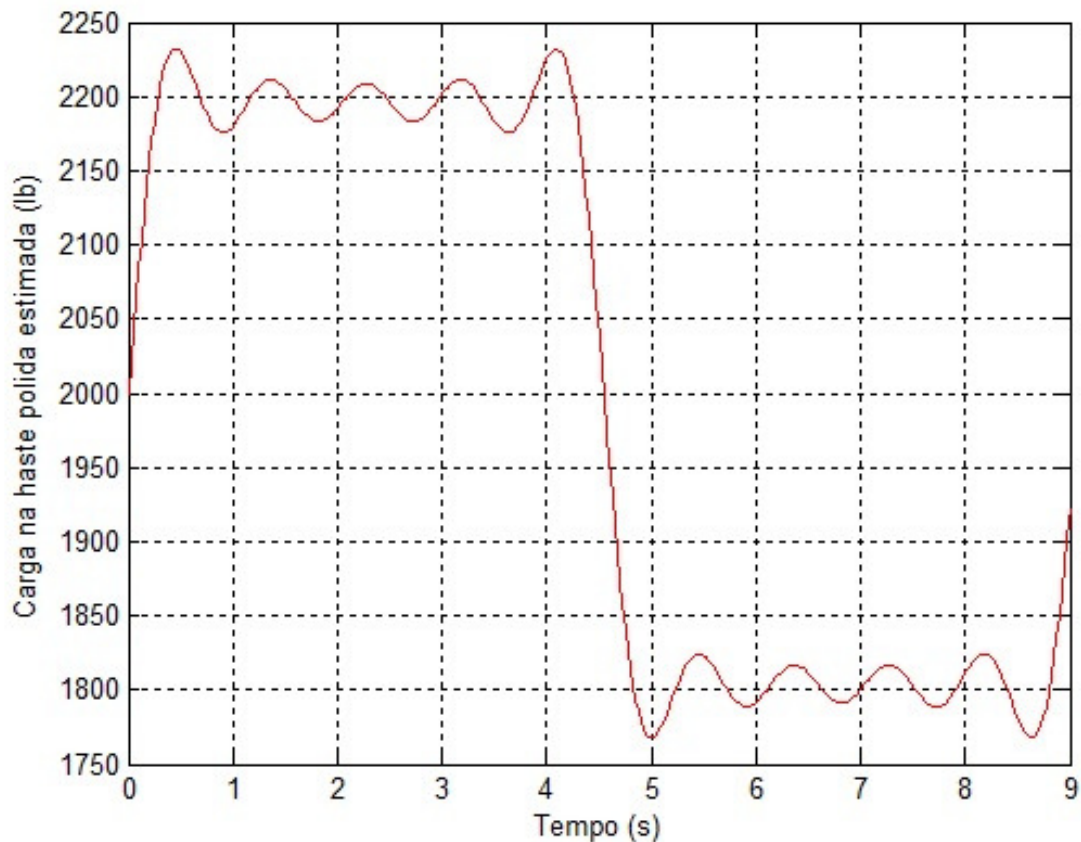
Fonte: própria autoria

aquisição de dados do LEA e outro estimado pelo algoritmo proposto. O intervalo de tempo utilizado na comparação dos comportamentos foi de 10 segundos, correspondente a um ciclo de bombeio; isso significa que a unidade de bombeio operava, no momento da coleta de dados, a uma velocidade média de bombeio de 6 ciclos por minuto.

O SCADA estava ajustado com uma taxa de amostragem de 1 kHz no momento dos testes. Os dados registrados foram transformados em matrizes compatíveis para uso no MATLAB. O comportamento da forma de onda que representou a carga na haste polida medida assemelhou-se a uma onda quadrada, conforme ilustrado na Figura 4.1. Este fato retratou o momento em que a bomba de fundo da Unidade de Bombeio elevava para a superfície certo volume de fluido. Dessa forma, durante o ciclo de bombeio, é possível verificar que houve variação na carga na haste polida de 1800 lbs a 2200 lbs, ou seja, durante um ciclo de bombeio, a unidade bombeou 400 lbs (pouco mais de 180 kg).

As curvas de carga na haste polida indicaram instantes de transição, oscilando entre valores mínimos e máximos, e apresentaram momentos de estabilização em determina-

Figura 4.2: Carga na Haste Polida Estimada em Destaque.



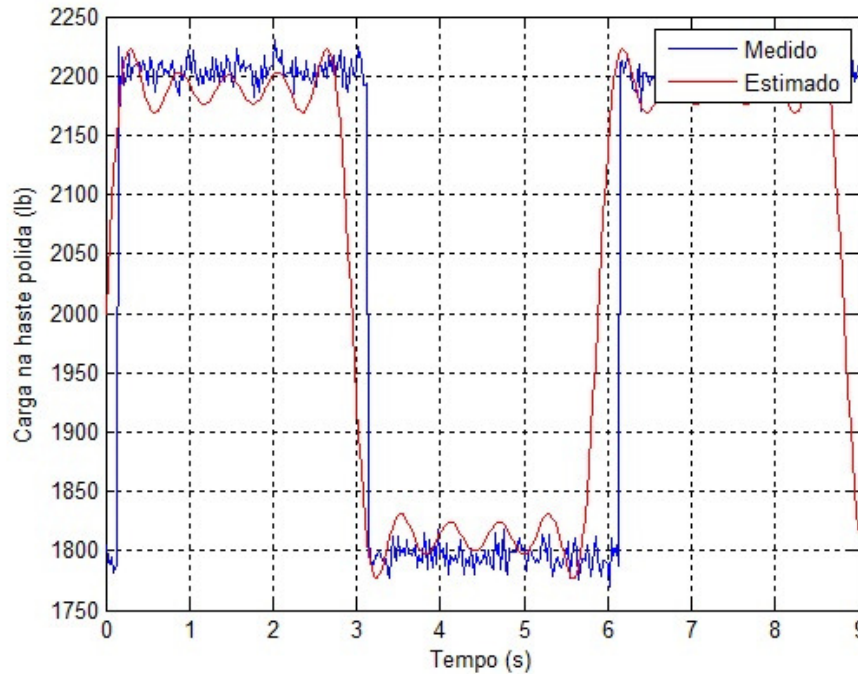
Fonte: própria autoria

dos pontos do gráfico. Embora geralmente semelhantes, observaram-se divergências em algumas regiões dos gráficos. Essas divergências são resultantes de indeterminações matemáticas no algoritmo do modelo computacional, devido aos instantes de inversão de movimento da cabeça do cavalo da UB. Durante os instantes de estabilização, a curva da carga na haste polida estimada exibiu oscilações. Essas oscilações podem estar associadas às aproximações realizadas no modelo matemático, especialmente no que se refere à inércia das partes girantes e articuladas da unidade de bombeio.

O comportamento da carga na haste polida é destacado na Figura 4.2. Em condição de vazio, ou seja, sem o bombeio de fluido, a carga mínima suportada pela haste polida foi de 1800 lbs (aproximadamente 800 kg). Durante o ciclo de bombeio, o valor máximo de carga alcançado na haste polida foi de 2200 lbs (cerca de 998 kg). Considerando que, durante o bombeio, a carga em vazio é somada ao peso do volume do fluido bombeado, a diferença entre o máximo e o mínimo representa a carga na haste polida.

O modelo de inferência da carga na haste polida foi testado com dados de outro

Figura 4.3: Comparação entre A Carga na Haste Polida Medida no SCADA e Estimada pelo Modelo.



Fonte: própria autoria

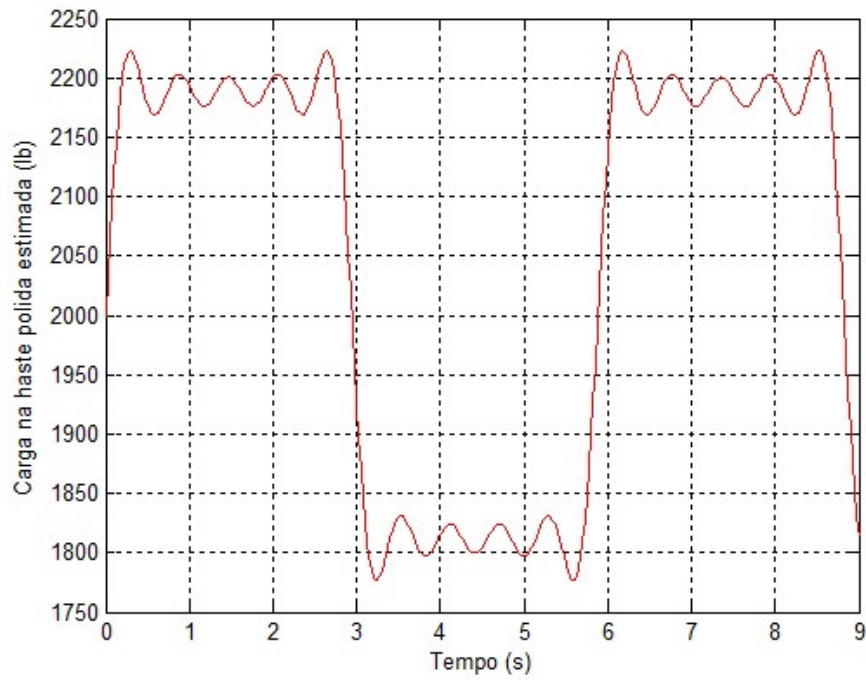
período de operação da Unidade de Bombeio do LEA. Na Figura 4.3, é apresentado um traçado comparativo entre a carga medida e a carga estimada pelo modelo. Nesse momento específico de coleta de dados, a estação operava com uma taxa média de 10 ciclos por minuto, completando um ciclo a cada 6 segundos.

Apesar de o peso do fluido deslocado se manter em torno de 180 kg, o valor máximo da carga indicado pelo traçado estimado ficou abaixo do valor medido, conforme mostra a Figura 4.4. O máximo de carga estimada foi inferior a 2200 lbs. No entanto, ao observar as Figuras 4.3 e 4.4, é possível perceber a semelhança entre o comportamento medido e estimado pelo modelo.

Dando continuidade à avaliação dos resultados obtidos, utilizou-se um novo conjunto de dados adquiridos no SCADA do LEA. Esses dados forneceram informações detalhadas sobre as condições de bombeio, incluindo a carga na haste polida, velocidade do ciclo de bombeio, tempo médio do ciclo de bombeio, entre outros. As Figuras 4.5 e 4.6 ilustram os resultados desse conjunto de dados.

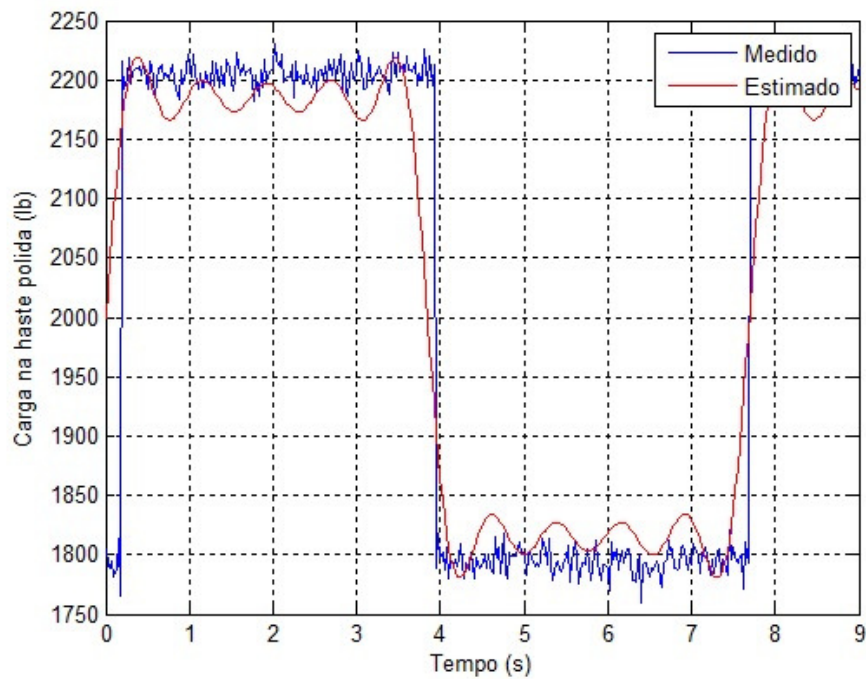
A Figura 4.5 apresenta uma comparação entre o traçado da curva da carga na haste

Figura 4.4: Carga na Haste Polida Estimada com Taxa de 10 Ciclos por Minuto.



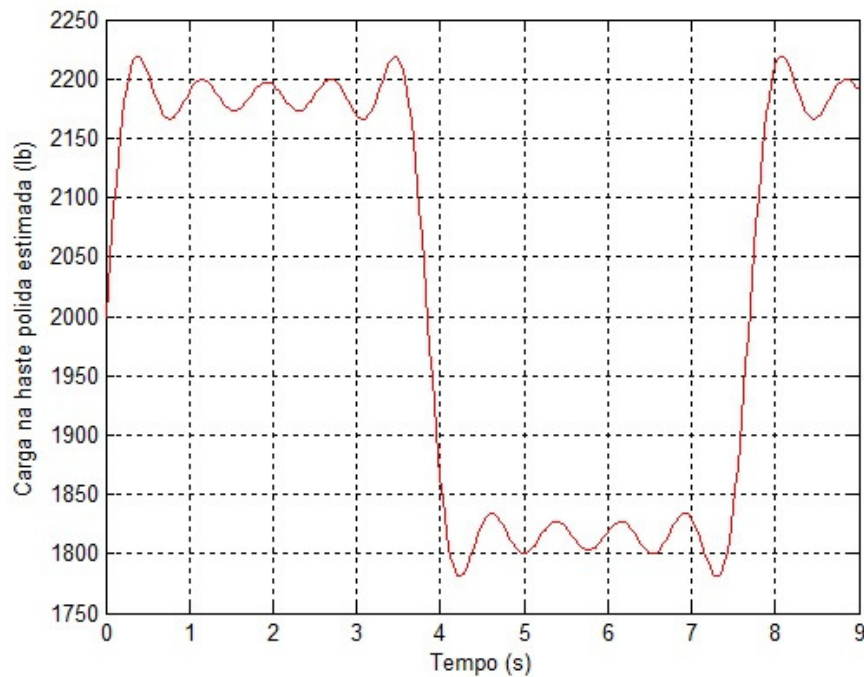
Fonte: própria autoria

Figura 4.5: Resultado da comparação da carga na haste polida medida e estimada - novo conjunto de dados do SCADA.



Fonte: própria autoria

Figura 4.6: Detalhes da Carga na Haste Polida Estimada - Novo Conjunto de Dados.



Fonte: própria autoria

polida estimada e a medida pelo sistema SCADA. Nota-se que a Unidade de Bombeio operava a uma taxa média de pouco mais de 7 ciclos de bombeio por minuto, concluindo um ciclo a cada aproximadamente 8 segundos. As curvas medidas pelo SCADA e estimada pelo algoritmo proposto apresentaram semelhanças, aproximando-se do formato de uma onda quadrada. No entanto, observam-se divergências nos valores mínimo e máximo registrados no gráfico (1800lbs e 2200lbs, respectivamente), bem como nos instantes de transição.

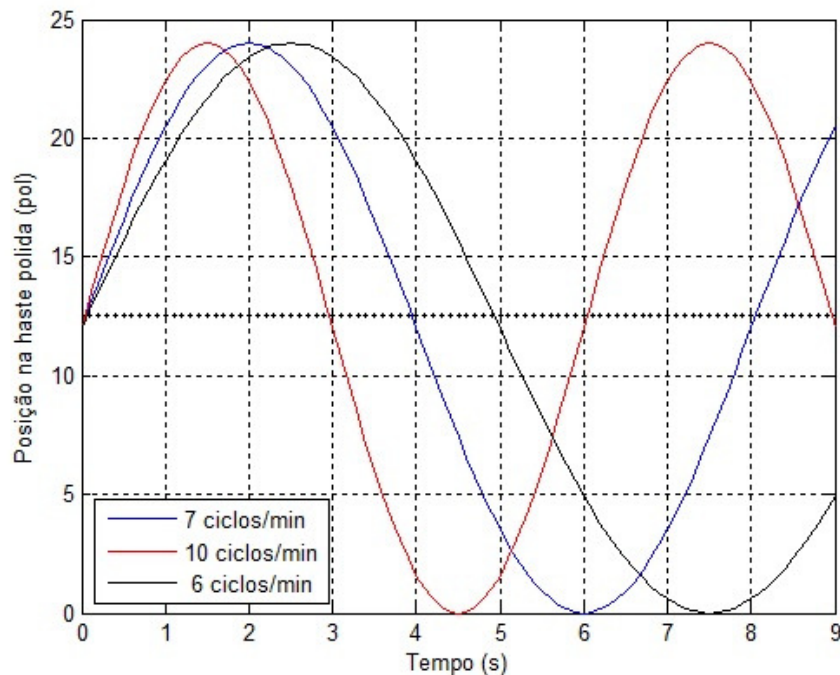
A Figura 4.6 destaca o traçado da carga na haste polida estimada pelo algoritmo. Observa-se que o período de um ciclo foi de 8 segundos, com o valor máximo da carga estimada igual a 2200 lbs, e o valor mínimo estimado com o valor de 1800 lbs.

Para a carga na haste polida, nota-se que tanto a amplitude quanto o período podem variar com o passar do tempo, manipulando a quantidade de ciclos por minuto¹. Quanto à posição da haste polida, observa-se que a amplitude é aproximadamente constante, variando apenas o período do sinal, conforme pode ser verificado na Figura 4.7.

As avaliações realizadas indicaram que a carga na haste polida pode variar em amplitude e período mediante a alteração da quantidade de ciclos de bombeio. No entanto,

¹Optou-se por apresentar apenas um ciclo de bombeio para possibilitar uma visualização clara dos sinais

Figura 4.7: Posição da Haste Polida em Ciclos Distintos de Bombeio.



Fonte: própria autoria

a posição da haste polida mantém a amplitude aproximadamente constante, variando apenas o período. O modelo proposto para a estimação da carga da haste polida conseguiu detectar os instantes de transição do cavalo mecânico durante o ciclo de bombeio. No entanto, nesses instantes de transição, a presença de ruído chama atenção. É possível que, por meio de um estudo mais aprofundado, a aplicação de filtros no processamento do sinal possa amenizar o problema. Como este fato não caracteriza o objetivo principal da pesquisa, essa abordagem foi deixada para um momento posterior.

Um ponto adicional a ser observado é que todas as curvas estimadas (Figuras 4.1 a 4.6) exibem cinco picos em cada semiciclo. É perceptível a presença de ruído na curva medida, ao compará-la com a curva estimada, sugerindo uma tendência desta última em refletir a média dos valores nos momentos com maior concentração de ruído. No entanto, para uma compreensão mais completa desse fenômeno, é necessário realizar um estudo mais aprofundado.

Com o estimador empregado neste estudo, foram obtidas cartas dinamométricas de superfície no laboratório experimental de petróleo, as quais foram posteriormente comparadas com cartas de dinamômetro reais, como ilustrado nas Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11. Em todos os resultados, a faixa medida para as cargas máximas e mínimas na haste polida ficou entre 3.500 lbs a 450 lbs. Os valores médios para a carga na haste polida, tanto

estimados para o máximo quanto para o mínimo, são 3.200 lbs e 550 lbs, respectivamente.

Na Figura 4.8, os resultados são exibidos após a simulação do laboratório experimental (LEA) projetado para replicar a operação típica de um poço de petróleo. Os valores máximos medidos e estimados para as cargas na haste polida são aproximadamente 3.280 lbs e 3.250 lbs, respectivamente. Em relação aos valores mínimos medidos e estimados para as cargas na haste polida, estes são 450 lbs e 550 lbs, respectivamente. Na análise estatística, um total de 3.600 pontos de dados é empregado. O valor médio é 1.915,20 lbs, com uma variância de 20,52 lbs. A porcentagem relativa de erro nos valores medidos é de 0,92%, enquanto na estimativa de valor, é 2,22%. A diferença de 1,3% entre os erros relativos percentuais medidos e estimados sugere resultados promissores para esta condição específica do poço de petróleo em estudo.

Na Figura 4.9, o sistema experimental é configurado para simular o impacto da presença de gás no poço. Os erros relativos, tanto medidos quanto estimados, para os valores máximo e mínimo são de 1,54% e 4,08%, respectivamente. Isso se deve às medições e estimativas das cargas máximas na haste polida, que são de aproximadamente 3.250 lbs e 3.300 lbs. Na análise estatística, 3.600 pontos de dados são empregados. O valor médio para as cargas na haste polida é de 1.825,72 lbs, com uma variância de 10,15 lbs. As cargas mínimas medidas e estimadas na haste polida são de 490 lbs e 470 lbs, respectivamente. Embora o estimador produza resultados satisfatórios para este estado, é essencial reconhecer a diferença mínima entre os resultados em condições normais de trabalho e o estado afetado por gás. Investigações adicionais sobre o funcionamento da unidade de bombeamento neste estado são recomendadas.

Na Figura 4.10, o sistema experimental é configurado para simular o vazamento da válvula de passeio. As cargas medidas e estimadas para a haste polida atingem valores máximos de aproximadamente 3.400 lbs e 3.380 lbs, enquanto as cargas mínimas medidas e estimadas para a haste polida são de 500 lbs e 470 lbs, respectivamente. Para a análise estatística, é empregado um conjunto de dados composto por 3600 pontos. A média das cargas na haste polida é de 1.895,87 lbs, com uma variância de 9,72 lbs. Os erros relativos para os valores medidos e estimados são de 0,59% e 6%, respectivamente. A diferença entre os erros relativos percentuais medidos e estimados é da ordem de 5,5%. Isso indica um grau relevante de precisão nos resultados.

A Figura 4.11 exibe os resultados do experimento laboratório configurado para simular fornecimento insuficiente de fluido. As cargas medidas e estimadas máximas da haste polida são de 3.400 lbs e 3.250 lbs, respectivamente, enquanto o mínimo medido e estimado para as cargas da haste polida são de 500 lbs e 470 lbs, respectivamente. Para a análise estatística, é empregado um conjunto de dados de 3600 pontos. O valor médio para cargas da haste polida é 1.935,59 lbs, com uma variância de 13,12 lbs. Os erros

relativos para os valores medidos e estimados são de 4,41% e 6%, respectivamente. A diferença entre os erros relativos percentuais medidos e estimados está na ordem de 1,59%. Isso demonstra um nível significativo de precisão nos resultados em comparação com a simulação de vazamento da válvula de passeio.

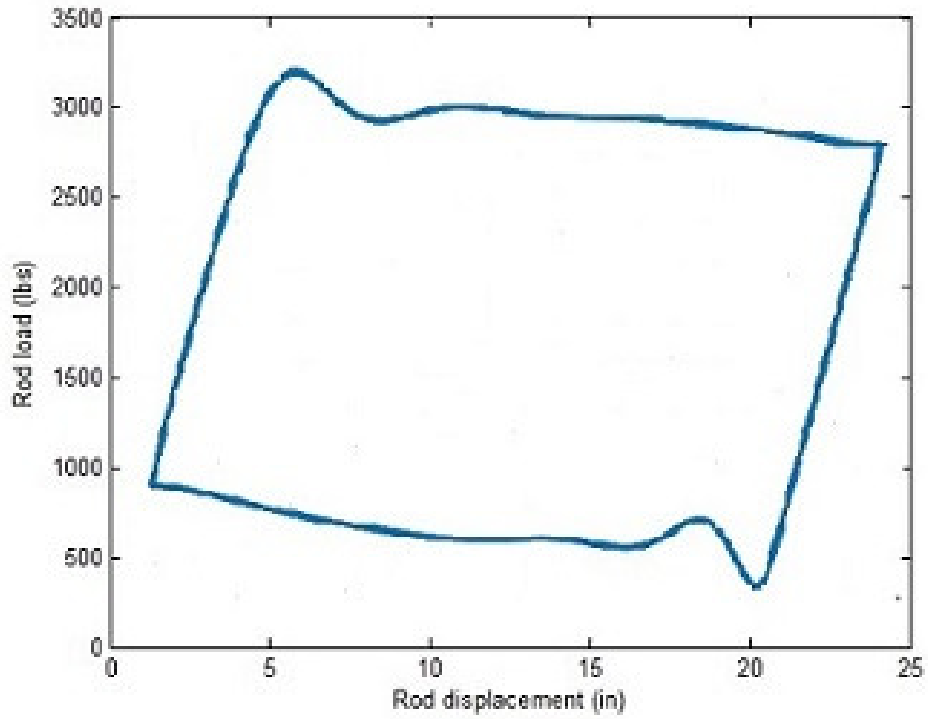
Com base em uma análise abrangente dos valores obtidos a partir do estimador proposto, conforme apresentado nas Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11, os resultados demonstram uma tendência de alinhamento com as medições realizadas. Observou-se uma pequena diferença entre os resultados das simulações da operação do LEA no estado normal de bombeamento e no estado que simula o poço afetado por gás. Embora o estimador tenha demonstrado habilidade para diagnosticar ambas as condições de operação, conforme evidenciado pelos resultados obtidos, destaca-se a necessidade de estudos mais aprofundados para uma investigação mais detalhada, possivelmente indicando uma nova linha de pesquisa.

4.2 Comparando o estimador proposto com o proposto por Li et al. (2019).

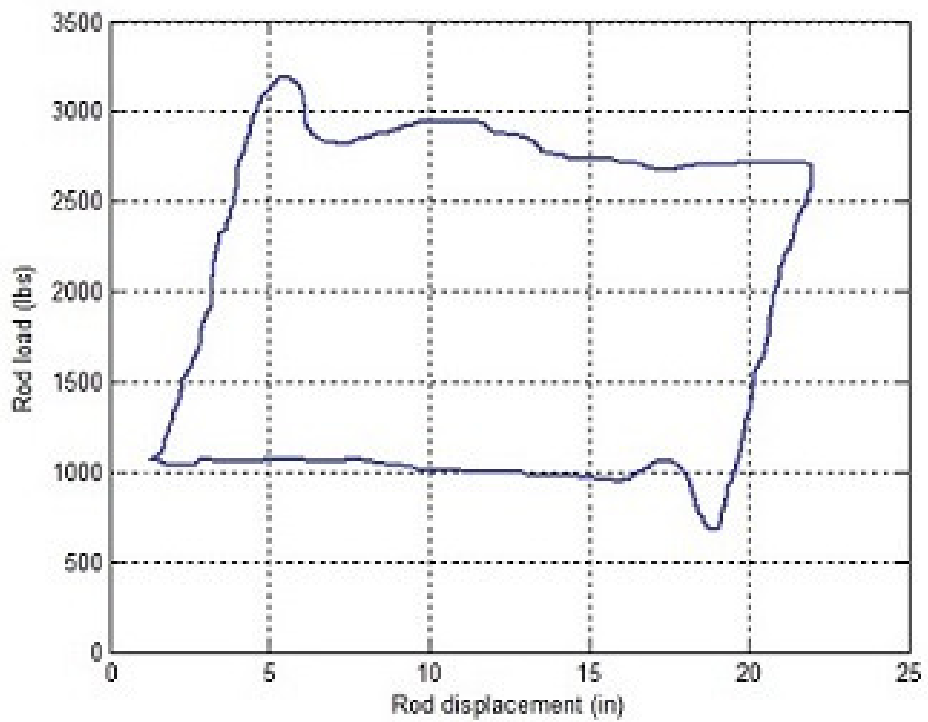
Li et al. (2019) apresentou um estimador com dois parâmetros de entrada, especificamente a tensão e a corrente elétrica do motor. A velocidade e o torque foram então estimados com base no modelo tipo T do circuito elétrico equivalente do motor de indução. Utilizando essas entradas elétricas, juntamente com detalhes sobre a configuração mecânica da unidade de bombeamento, eles conseguiram gerar a carta dinamométrica de superfície. A proposta básica foi estabelecer uma relação entre os dados do terminal de acionamento do motor e a carga e posição da haste polida. As correntes e tensões instantâneas do motor foram continuamente medidas para obter o torque elétrico instantâneo e a velocidade do motor de acionamento CA ao longo do tempo.

Dado que as unidades de bombeamento por hastes operam ciclicamente, é possível determinar o deslocamento angular da manivela da bomba em qualquer momento através da integração da velocidade do motor. Ao monitorar as variações do torque do motor em relação ao ângulo da manivela, em conjunto com os parâmetros geométricos da unidade de bombeamento por hastes, é possível calcular a carga F_r e a posição S_r haste polida para produzir a carta dinamométrica de superfície. O diagrama de blocos da estratégia proposta por Li et al. (2019) de estimativa é apresentado na Figura 4.12. Nele, podem ser identificadas as variáveis de entrada e saída do Observador do motor e do Estimador de Carga na haste polida, bem como o método de cálculo da velocidade e do ângulo da manivela. Além disso, a inferência da posição da haste polida para a composição da carta dinamométrica de superfície também é descrita.

Figura 4.8: Operando sob Condições Normais



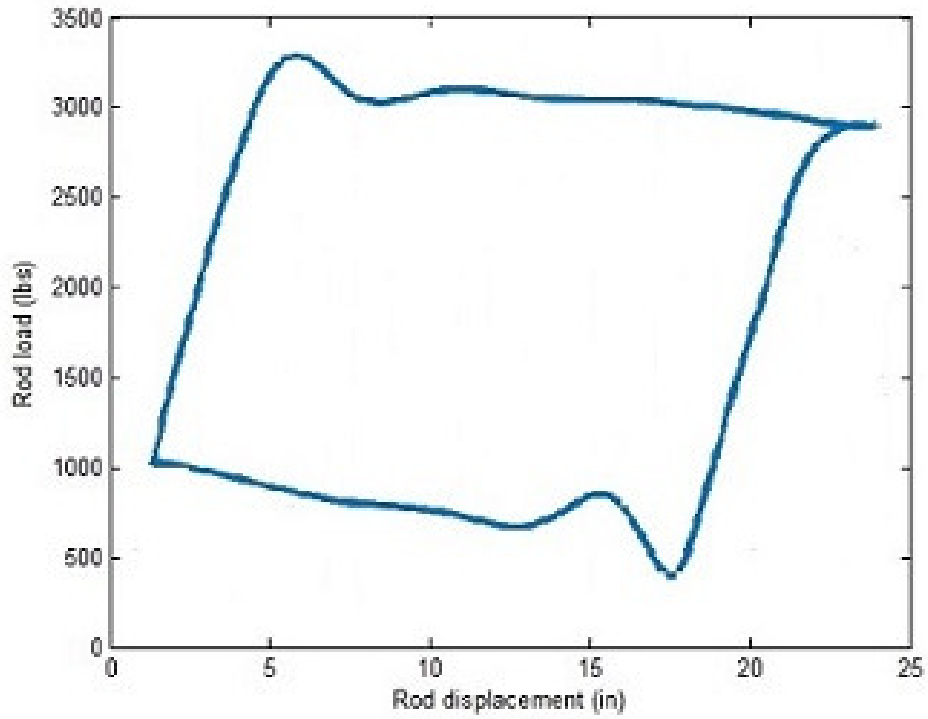
(a) Carta Dinamométrica Real



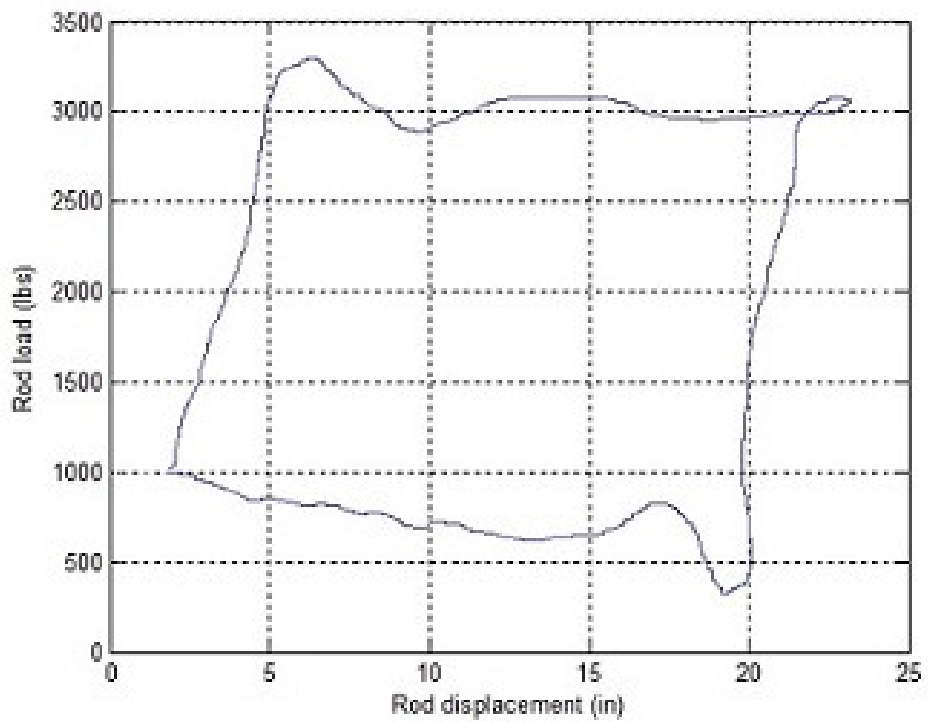
(b) Carta Dinamométrica Estimada.

Fonte: própria autoria

Figura 4.9: Presença de Gás no Poço



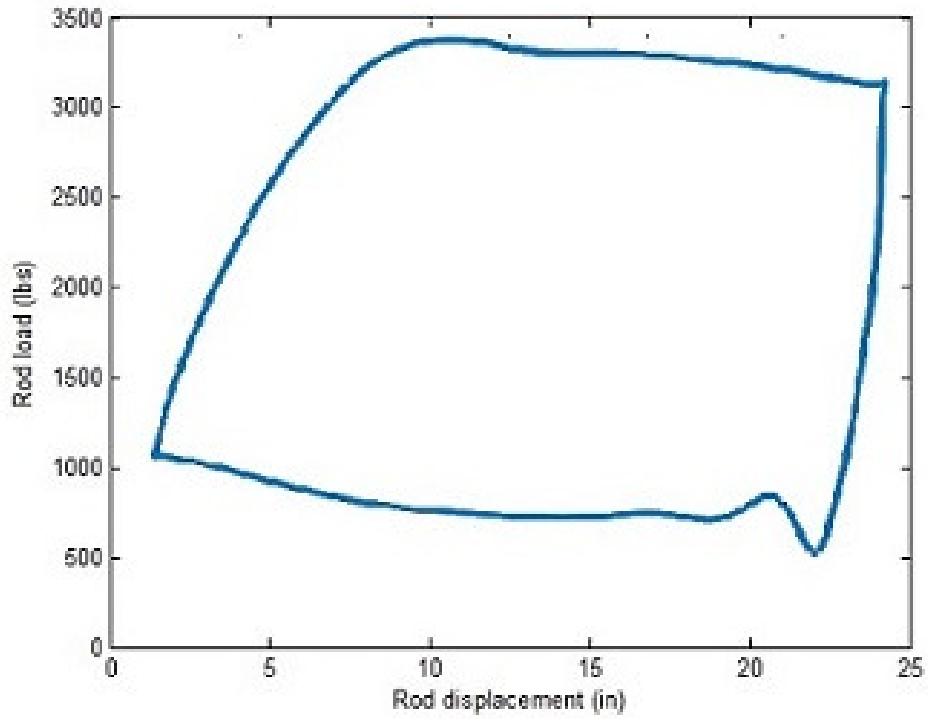
(a)Carta Dinamométrica Real



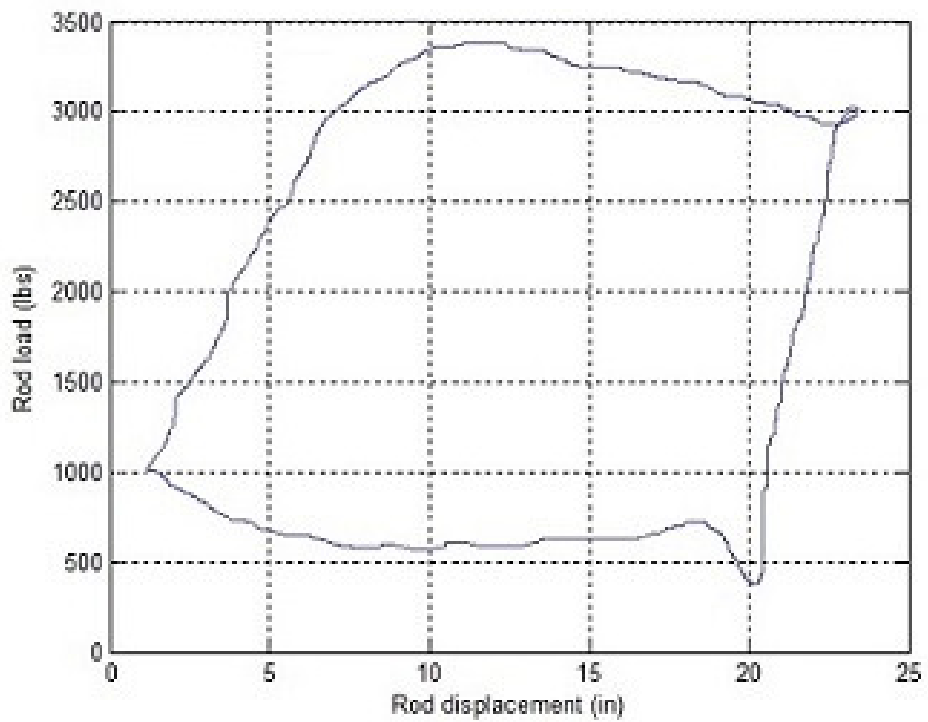
(b)Carta Dinamométrica Estimada.

Fonte: própria autoria

Figura 4.10: Vazamento na Válvula de Passeio



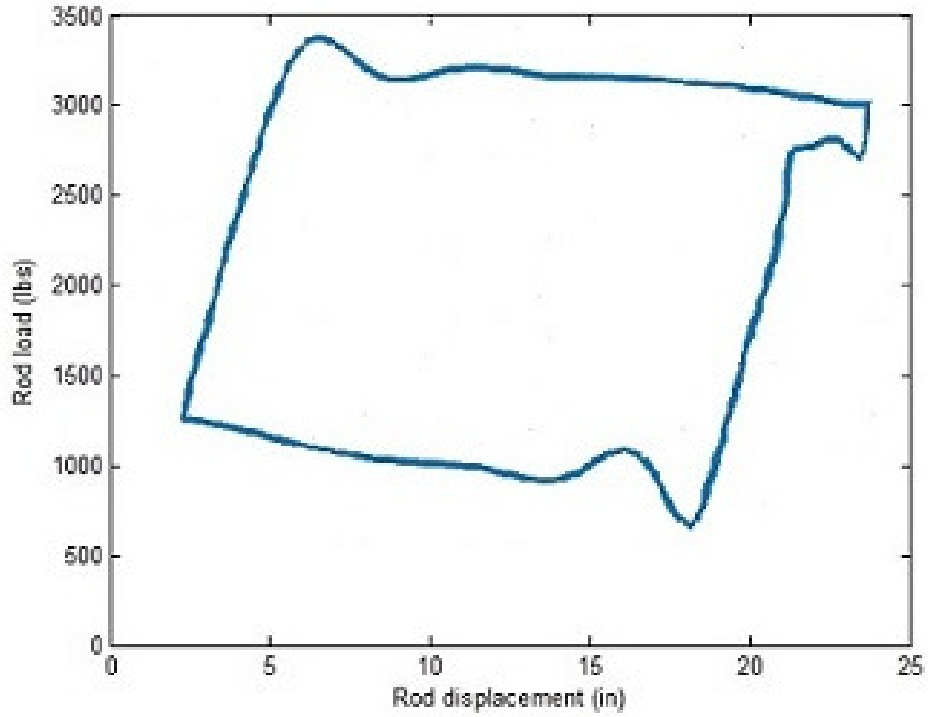
(a)Carta Dinamométrica Real



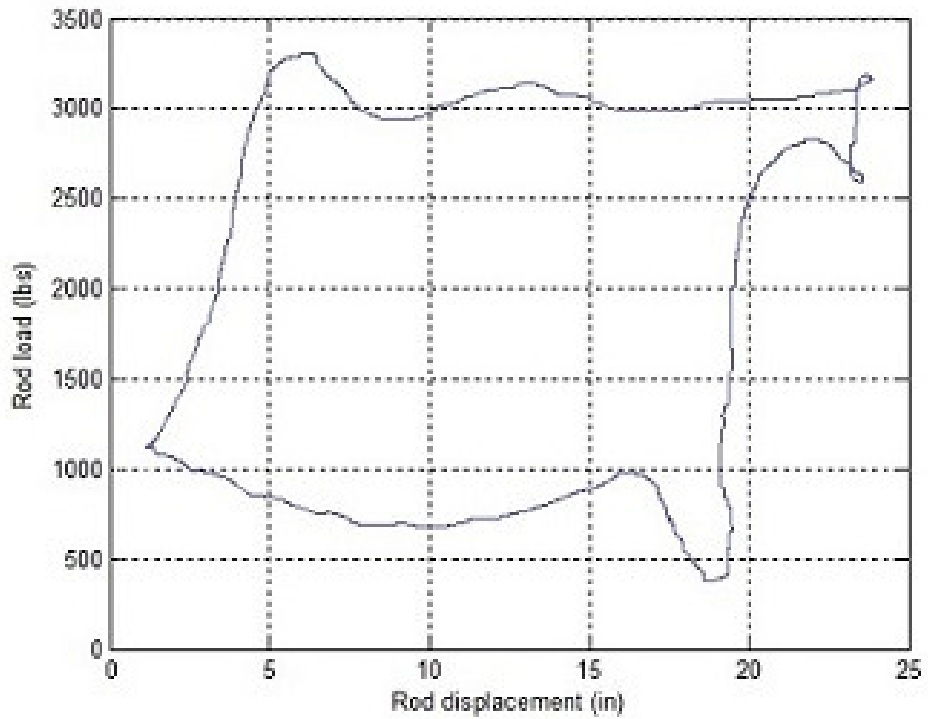
(b)Carta Dinamométrica Estimada.

Fonte: própria autoria

Figura 4.11: Suprimento de Fluido Insuficiente



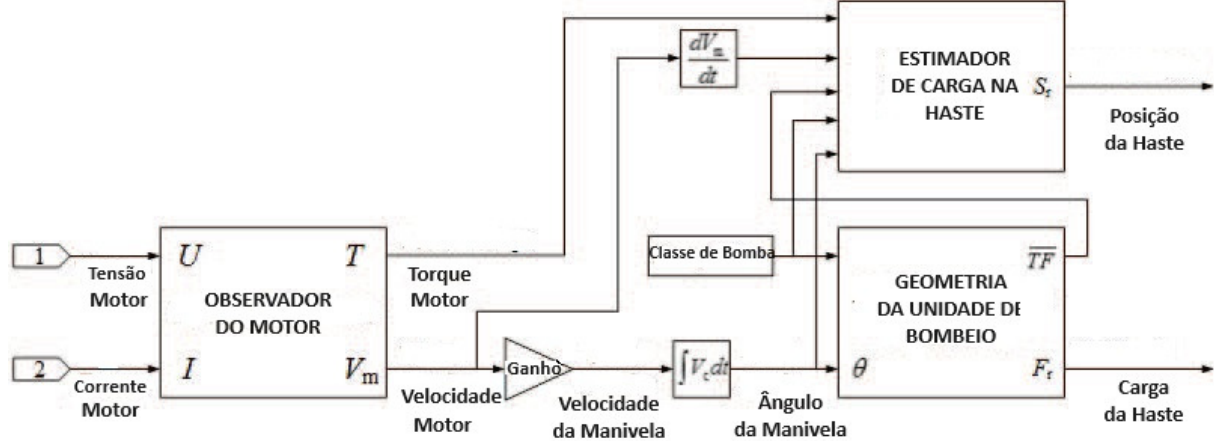
(a)Carta Dinamométrica Real



(b)Carta Dinamométrica Estimada.

Fonte: própria autoria

Figura 4.12: Estratégia para estimador de carga e posição da haste polida.



Fonte: (Li et al., 2019)

A validação da aplicação proposta por Li et al. (2019) foi implementada em diversos poços de petróleo. Um sistema de monitoramento inteligente mediu diretamente as características elétricas do barramento de acionamento do motor de indução. Foi instalado um sensor sem fio na cabeça do cavalo mecânico para medir a carta do dinamômetro de superfície, demonstrando assim a eficácia e precisão do estimador proposto por eles. As informações elétricas de entrada e a carta do dinamômetro de superfície foram medidas no campo de petróleo e comparadas com os resultados do estimador.

Na abordagem aqui proposta, este cenário foi modificado incorporando parâmetros de entrada adicionais. Além da tensão e da corrente, introduziu-se o escorregamento e a velocidade medida diretamente do motor. O algoritmo desenvolvido foi projetado especificamente para estimar o torque produzido pelo motor. Quando combinado com dados relativos à estrutura mecânica da unidade de bombeamento, esse algoritmo permitiu a geração da carta dinâmométrica de superfície.

As Figuras 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16 apresentam comparações quantitativas entre os resultados obtidos pelo método proposto neste trabalho e àquele apresentado por Li et al. (2019) para estimar a carta dinâmométrica. Em todos os casos, observa-se que o método aqui descrito, embora não tenha utilizado uma aquisição de dados em tempo real, exibe uma maior aproximação às curvas reais quando comparado com as curvas resultantes do método proposto por (Li et al., 2019).

Na Figura 4.13, ao testar ambos os métodos no laboratório experimental simulando a operação normal, a carga máxima estimada na haste polida é de aproximadamente 3.380 lbs, enquanto a carga mínima estimada na haste polida foi de 450. Realizando uma

análise estatística com 3600 pontos de dados, comparou-se a curva obtida pelo método proposto por Li et al. (2019) com a curva real correspondente (ver Figura 4.13-a). Para o método de Li et al. (2019), o valor médio é de 1.979,52 lbs, a variância é de 78,23 lbs e o erro relativo entre os valores medidos e estimados foi de 2,72%. Em contraste, ao aplicar o método proposto neste trabalho, o valor médio é de 1915 lbs, a variância é de 20,52 lbs e o erro relativo médio para os valores estimados foi de 2,22%. Isso representa um aumento de 0,5% na precisão dos resultados.

Na Figura 4.14, a carga máxima estimada na haste polida é de aproximadamente 3.300 lbs, enquanto a carga mínima estimada é de cerca de 470 lbs. Na análise estatística com 3600 pontos de dados, foi comparada a curva obtida pelo método proposto por Li et al. (2019) com a curva real correspondente (ver Figura 4.14-a). Para o método de Li et al. (2019), o valor médio é de 1875,32 lbs, a variância é de 50,72 lbs e o erro relativo médio entre os valores medidos e estimados é de 7,92%. No entanto, ao aplicar o método proposto neste trabalho, o valor médio é de 1825,72 lbs, a variância é de 10,15 lbs e o erro relativo médio para os valores estimados é de 4,08%. Para esta condição específica de operação da unidade de bombeamento, estudos adicionais são necessários, pois os erros relativos são mais significativos quando comparados com outras condições operacionais que foram investigadas.

Na Figura 4.15, o valor máximo estimado da carga na haste polida é de aproximadamente 3.380 lbs, enquanto a estimativa para o valor mínimo da carga na haste polida é cerca de 470 lbs. Na análise estatística, que envolveu 3.600 pontos de dados, foi realizada uma comparação entre a curva obtida pelo método proposto por Li et al. (2019) e a respectiva curva real (ver Figura 4.15-a). Para o método de Li et al. (2019), o valor médio foi de 1.773,82 lbs, a variância foi de 35,09 lbs, e o erro relativo entre os valores medidos e estimados foi de 3,22%. Por outro lado, quando o método sugerido neste trabalho foi aplicado, o valor médio foi de 1.895,87 lbs, a variância foi de 9,72 lbs, e o erro relativo médio para os valores estimados foi de 1,62%.

Na Figura 4.16, o valor máximo estimado da carga na haste polida é de aproximadamente 3.250 lbs, enquanto o valor mínimo da carga na haste polida é de cerca de 470 lbs. Na análise estatística, que envolveu 3.600 pontos de dados, foi realizada análise comparativa entre a curva gerada pelo método proposto por Li et al. (2019) e a curva real correspondente (ver Figura 4.16-a). Utilizando o método de Li et al. (2019), obteve-se um valor médio de 1895,72 lbs, uma variância de 39,53 lbs e um erro relativo médio entre os valores medidos e estimados de 4,84%. Por outro lado, ao aplicar o método proposto neste trabalho, alcançou-se um valor médio de 1935,59 lbs, uma variância de 13,12 lbs e um erro relativo médio para os valores estimados de 2,61%.

A Tabela 4.1 resume a comparação entre os dois métodos em estudo. Os resultados

Tabela 4.1: Tabela Comparativa dos Métodos.

Condição de Simulação	Erro relativo médio do método de referência (%)	Erro relativo médio Método Proposto(%)
Operação Normal	2,72	2,22
Presença de Gás	7,92	4,08
Vazamento na válvula de passeio	3,22	1,62
Suprimento insuficiente de fluido	4,84	2,61

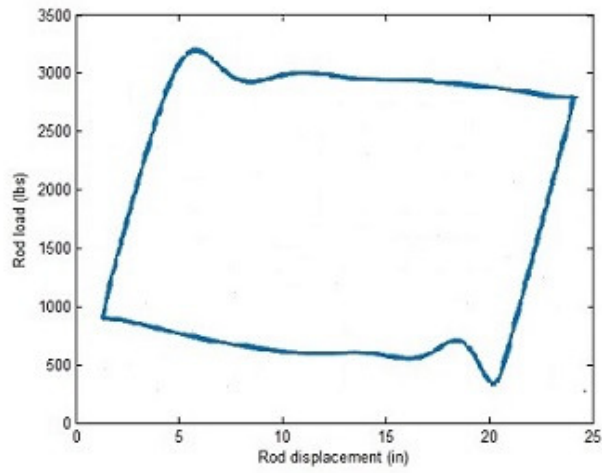
dos testes, que compararam os métodos sob condições de vazamento na válvula de passagem e suprimento insuficiente de fluido, indicam melhorias nos resultados. No entanto, ainda há espaço para aprimoramentos adicionais no refinamento dos contornos das cartas dinamométricas estimadas pelo método proposto neste trabalho. Além disso, a otimização das medidas relacionadas à dispersão, valor médio e erro relativo pode ser alcançada por meio de uma análise mais abrangente e melhorias no algoritmo desenvolvido. O erro relativo representou um parâmetro útil na comparação de resultados, mas não é necessariamente o único ou o melhor para todas as situações. No contexto em estudo, que busca a comparação entre dois métodos distintos com base na acurácia, o erro relativo sugere uma visão mais equilibrada da precisão dos resultados do que simplesmente considerar os valores absolutos.

O deslocamento da haste polida é um parâmetro relevante na determinação da carta dinamométrica. No entanto, não foi realizada nenhuma análise estatística com esse parâmetro na comparação dos resultados dos métodos sob condições de vazamento na válvula de passagem, suprimento insuficiente de fluido, presença de gás no poço ou operação normal. Isso se deve à ausência de variações significativas em magnitude que justificassem tal estudo para as condições investigadas.

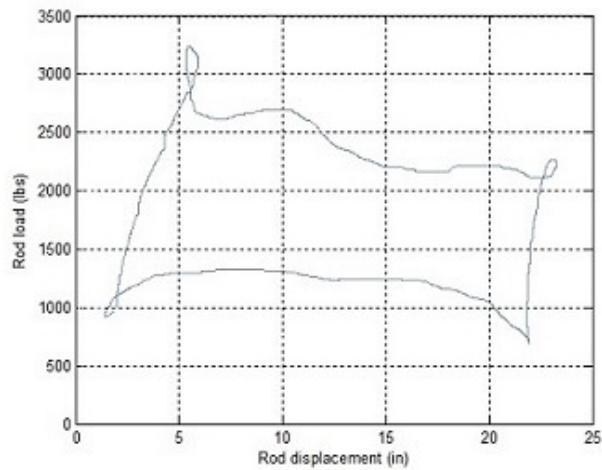
4.3 *Discussão dos Resultados*

As curvas de carga na haste polida em função do tempo (Figuras 4.1 a 4.6) indicaram instantes de transição, oscilando entre valores mínimos e máximos, e apresentaram momentos de estabilização em determinados pontos do gráfico. Embora geralmente semelhantes, observaram-se divergências em algumas regiões dos gráficos (ver Figuras 4.1, 4.3 e 4.5). Durante os instantes de estabilização, a curva da carga na haste polida estimada exibiu oscilações. Essas oscilações podem estar associadas às aproximações realizadas no modelo matemático, especialmente no que se refere à inércia das partes girantes e articuladas da unidade de bombeio.

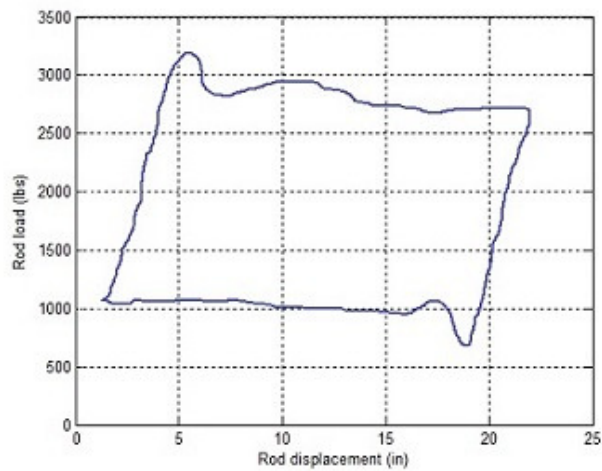
Figura 4.13: Operando sob Condições Normais



(a) Carta dinamométrica real



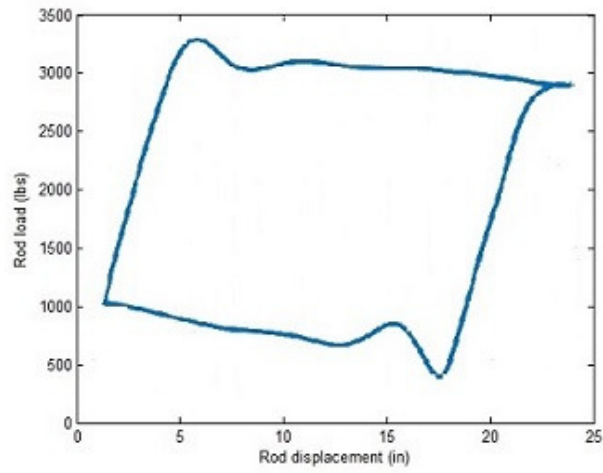
(b) Carta dinamométrica estimada com o método proposto por (Li et al., 2019).



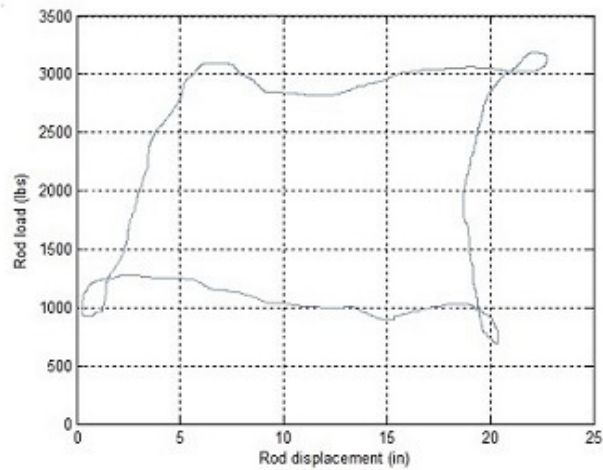
(c) Carta dinamométrica estimada com nosso método

Fonte: própria autoria

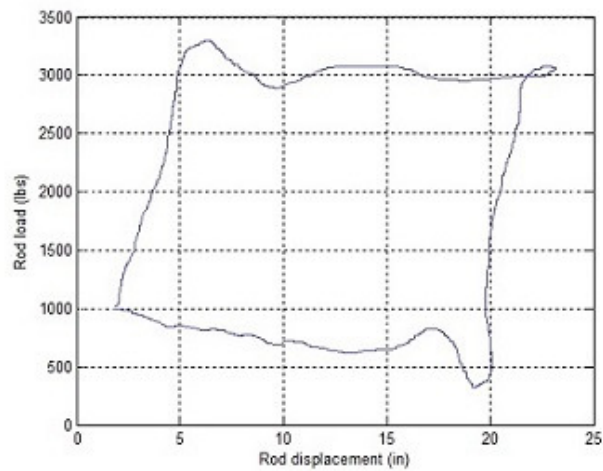
Figura 4.14: Presença de Gás no Poço



(a) Carta dinamométrica real



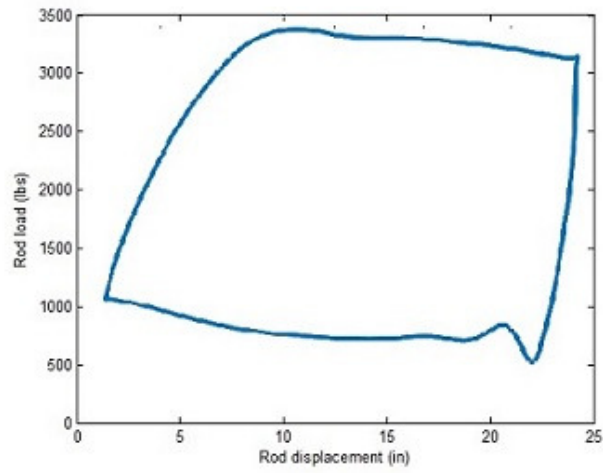
(b) Carta dinamométrica estimada com o método proposto por (Li et al., 2019).



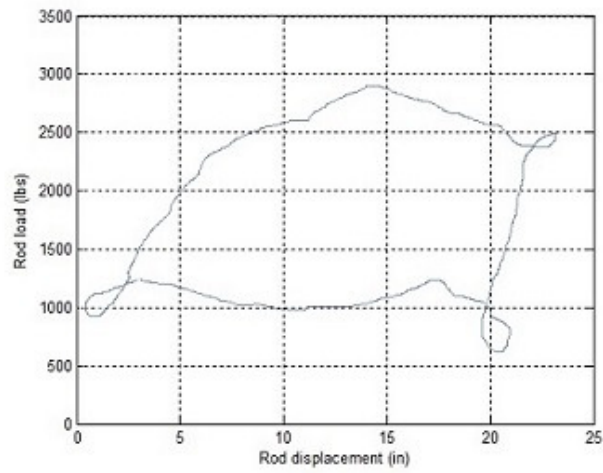
(c) Carta dinamométrica estimada com nosso método

Fonte: própria autoria

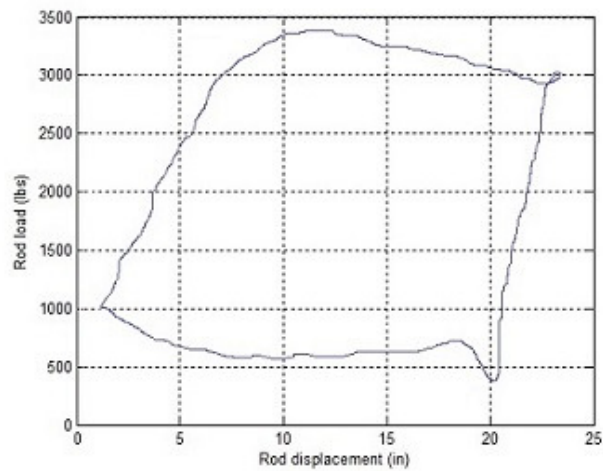
Figura 4.15: Vazamento na Válvula de Passeio



(a) Carta dinamométrica real



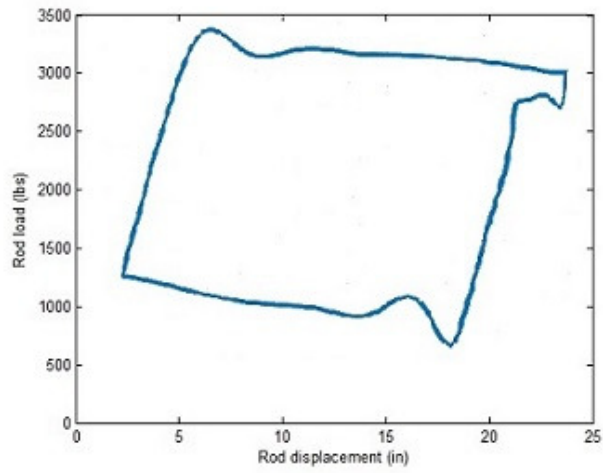
(b) Carta dinamométrica estimada com o método proposto por (Li et al., 2019).



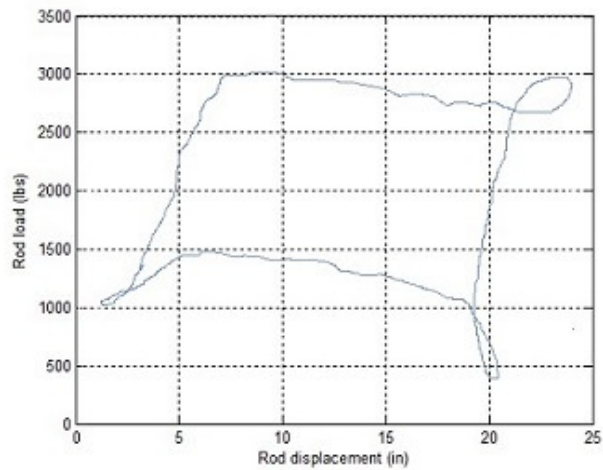
(c) Carta dinamométrica estimada com nosso método

Fonte: própria autoria

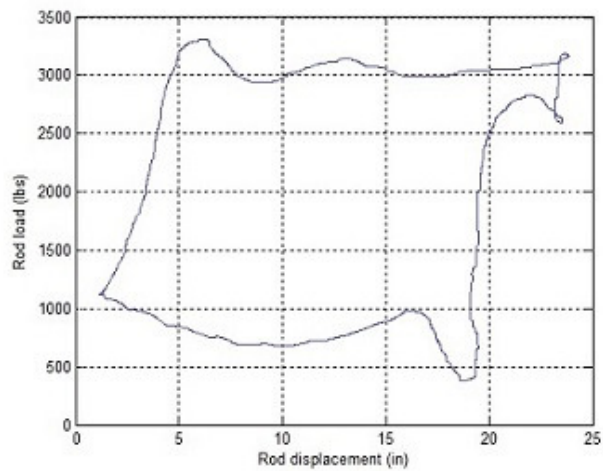
Figura 4.16: Suprimento de Fluido Insuficiente



(a) Carta dinamométrica real



(b) Carta dinamométrica estimada com o método proposto por (Li et al., 2019).



(c) Carta dinamométrica estimada com nosso método

Fonte: própria autoria

O comportamento da carga na haste polida é destacado na Figura 4.2. Em condição de vazio, ou seja, sem o bombeio de fluido, a carga mínima suportada pela haste polida foi de 1800 lbs (aproximadamente 800 kg). Durante o ciclo de bombeio, o valor máximo de carga alcançado na haste polida foi de 2200 lbs (cerca de 998 kg). Considerando que, durante o bombeio, a carga em vazio é somada ao peso do volume do fluido bombeado, é possível deduzir que a diferença entre o máximo e o mínimo representa a carga na haste polida.

As avaliações realizadas em diferentes ciclos de bombeio indicaram que a carga na haste polida pode variar em amplitude e período com a alteração da quantidade de ciclos por unidade de tempo. No entanto, a posição da haste polida manteve a amplitude aproximadamente constante, variando apenas o período. O modelo proposto para a estimação da carga da haste polida conseguiu detectar os instantes de transição do cavalo mecânico durante o ciclo de bombeio. No entanto, nesses instantes de transição, a presença de ruído chamou atenção. É possível que, por meio de um estudo mais aprofundado, a aplicação de filtros no processamento do sinal possa amenizar o problema. Como este fato não caracteriza o objetivo principal da pesquisa, essa abordagem foi deixada para um momento posterior.

Com base nos valores obtidos a partir do estimador proposto, conforme apresentado nas Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11, em linhas gerais, os resultados demonstram uma tendência de alinhamento com as medições realizadas. Observou-se uma pequena diferença entre os resultados das simulações da operação do LEA no estado normal de bombeamento e no estado que simula o poço afetado por gás. Embora o estimador tenha demonstrado habilidade para diagnosticar ambas as condições de operação, conforme evidenciado pelos resultados obtidos, destaca-se a necessidade de estudos mais aprofundados para uma investigação mais detalhada dessa possível não conformidade

As Figuras 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16 apresentam comparações entre a metodologia apresentada neste documento e aquela proposta por Li et al. (2019) para estimar a carta dinâmométrica. Em todos os casos estudados, observou-se que o método aqui proposto exibiu uma maior aproximação às curvas reais quando comparado com as curvas resultantes do método proposto por (Li et al., 2019). É provável que a incorporação do escorregamento e a medição direta da velocidade do motor, além da tensão e da corrente, como parâmetros de entrada ao estimador, tenham contribuído para melhorias na precisão dos resultados obtidos. No entanto, há espaço para melhorias no algoritmo desenvolvido e otimização das medidas dos parâmetros.

Em termos de implicações práticas, o estudo realizado sugere uma aplicação potencial do método como uma alternativa na monitoração do funcionamento da unidade de bombeio por hastes, servindo como uma opção para a identificação e prevenção de

falhas em unidades de produção. Além disso, ao substituir a instrumentação normalmente utilizada na cabeça do cavalo mecânico, o método desenvolvido se apresenta como uma alternativa economicamente mais viável, contribuindo de forma equivalente para a operação eficiente e a manutenção preditiva em sistemas de bombeamento por hastes.

4.4 *Comentários Conclusivos*

Neste capítulo, foram apresentadas análises dos resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta. Os dados incluem a estimação da carga na haste polida, o comportamento da posição da haste polida em diferentes ciclos de bombeio e a inferência da carta dinamométrica. Essas análises foram apresentadas e discutidas utilizando figuras e dados estatísticos. Ao final do capítulo, a metodologia proposta foi comparada com uma abordagem similar recentemente publicada, e uma tabela resumo fornece uma análise de desempenho das metodologias estudadas.

Considerações finais

Neste documento foi apresentado uma metodologia para a estimação da carta dinâmométrica de superfície em estações de bombeamento por hastes. Essa abordagem baseia-se na análise de informações presentes no barramento do drive de acionamento do motor de indução trifásico. A pesquisa envolveu a simulação do comportamento de sistemas de bombeamento por hastes em quatro cenários distintos, realizada no laboratório LEA da UFBA. Utilizando os resultados das medições no barramento do motor, foi alimentado um estimador de parâmetros funcionais desenvolvido neste trabalho. O estimador proposto combina um modelo de circuito equivalente de motores de indução tipo T com um modelo da unidade de bombeamento por hastes. Esse método permite a obtenção da carta dinâmométrica de superfície por meio da medição do barramento terminal do motor CA.

A inovação fundamental desta abordagem reside na ampliação das variáveis de entrada do estimador, incorporando a medição direta da velocidade do motor. Embora essa expansão exija medições adicionais no barramento de acionamento do motor, esses ajustes resultaram em melhorias quantitativas na precisão dos resultados. Mesmo após conduzir testes em quatro cenários operacionais distintos da unidade de bombeamento, é crucial destacar a importância da investigação do sistema de bombeio quando simula o estado operacional afetado pela presença de gases. Adicionalmente, é imperativo validar a eficácia do método proposto por meio de testes em situações do mundo real, preferencialmente em um poço operacional. Esses testes reais permitirão a aquisição em tempo real dos parâmetros do motor de CA, proporcionando uma avaliação mais precisa da metodologia.

Apesar dessa necessidade, as conclusões gerais das análises estatísticas destacam o desempenho do método proposto. As simulações realizadas, juntamente com a comparação com metodologias similares disponíveis na literatura, evidenciam que a abordagem adotada possui potencial para contribuir significativamente para o monitoramento de sistemas de bombeamento por hastes, melhorando o diagnóstico de suas condições operacionais.

5.1 Contribuições da Metodologia Desenvolvida

Como contribuições, este trabalho apresentou:

- (I) Uma metodologia inovadora que pode ser utilizada como alternativa na monitoração do funcionamento da unidade de bombeio por hastes;
- (II) Inovação ao ajustar a abordagem de um estimador de parâmetros que associa grandezas elétricas existentes no barramento do drive de acionamento do motor de indução e a estrutura mecânica da estação de bombeamento, permitindo a inferência da carga dinamométrica com maior precisão;
- (III) Uma alternativa para identificação e prevenção de falhas em unidade de produção de bombeio por hastes.

5.2 Perspectivas para Trabalhos Futuros

São sugeridas como atividades futuras de pesquisa:

- (I) Observou-se uma pequena diferença entre os resultados das simulações da operação do LEA no estado normal de bombeamento e no estado simulado do poço afetado por gás. Investigar mais detalhadamente o estimador proposto nestes diferentes estados operacionais pode ser um trabalho relevante, com o objetivo de compreender as semelhanças observadas nos resultados e identificar possíveis melhorias no estimador;
- (II) As curvas de carga na haste polida em função do tempo, embora semelhantes, apresentam divergências em algumas regiões dos gráficos (ver Figuras 4.1, 4.3 e 4.5). Essas divergências são decorrente da indeterminação matemática, que ocorre no algoritmo que define o modelo computacional do estimador, nos instantes de inversão de movimento do cavalo mecânico da UB. Logo, estudar esses instantes de inversão do movimento do cavalo mecânico para minimizar ou eliminar a indeterminação matemática causada no algoritmo, pode ser um ponto interessante para investigação;
- (III) Apesar do estimador proposto apresentar resultados quantitativos, relativamente melhores quando comparados com os resultados do estimados de Li et al. (2019), estudos de validação em poços reais precisam ser desenvolvidos, assim como ocorreu com o estimador de referência. Dessa forma, validar a eficácia do método proposto por meio de testes em poços operacionais, pode garantir a aplicabilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Referências Bibliográficas

- Aldini, Fabiana Mazzini; Azevedo, F. d. R. (2020). Análise técnica sobre os principais tipos de remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos de petróleo. <http://hdl.handle.net/123456789/3562>. 1.1
- Bahbahani, B., Attia, A., Heshmat, R. J. K., and Mohamed, A. (2016). Sucker rod pump production optimization via intelligent real time surveillance in joint operations - wafra field illustrated through case examples. In *The Abu Dhabi International Petroleum Exhibition Conference*, Abu Dhabi, UAE. 3
- Bai, Y. B. and Bai, Q. (2016). *Sistemas Marítimos de Produção de Petróleo: processos, tecnologias e equipamento offshore*. Elsevier Editora Ltda, Rio de Janeiro - RJ. 2.1.2
- Barreto Filho, M. A. (2003). *Bombeio Mecânico em Poços de Petróleo*. 1.2, 3.1, 3.3
- Barros, Y. B., Sousa, L. A., Leite, M., Rodrigues, M. L., Sousa, M. G., and Araújo, P. J. (2013). Aplicação do bombeio mecânico com hastes na elevação do petróleo. *Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT*, 1(3):25–40. 2.3, 2.4
- de Souza Neto, D. G. (2013). Obtenção da carta dinamométrica de superfície a partir da curva torque x tempo no motor de indução da unidade de bombeio mecânico. Trabalho final de graduação., Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia. 1.2
- Enikeeva, E. R. and Alaeva, N. N. (2023). Analysis of operation and ways to improve the efficiency of the pumping unit. In *2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, pages 1–5. 3.1
- Fitzgerald, A. E., Junior, C. K., and Umans, S. (2006). *Máquinas Elétricas com introdução à eletrônica de potência*. Bookman, Porto Alegre - Brasil. 3.1
- Gauto, M. (2016). *Petróleo e gás - princípios de exploração, produção e refino*. Bookman Companhia Editora Ltda, Porto Alegre - RS. 2.1.4, 2.2
- Gibbs, S. G. (1975a). Computing gearbox torque and motor loading for beam pumping units with consideration of inertia effects. *SPE Production Engineering*, pages 1153–1159. 2.6, 2.6.3
- Gibbs, S. G. (1975b). Computing gearbox torque and motor loading for beam pumping units with consideration of inertia effects. *Journal of Petroleum Technology*, 27(09):1153–1159. 3.1
- Gray, H. E. (1963). *Drilling and production practice*, chapter Kinematics of oil-well pumping units. OnePetro, New York, USA. 2.5, 2.5

- Guo, B., Lyons, W. C., and Ghalambor, A. (2007). Petroleum production engineering - a computer-assisted approach. In *Elsevier Science Technology Books*. 2.5
- Hernández, A. (2016). *Fundamentals of gas lift engineering - well design and troubleshooting*. Gulf Professional Publishing. 2.1.1, 2.1
- Kosow, I. L. (1982). *Máquinas Elétricas e transformadores*. Editora Globo, Porto Alegre - Brasil. 3.1, 3.6
- Li, X., Gao, X., Yuan, C., Hou, Y., and Chen, X. (2019). Practical parameter estimator for dynamometer card of rod pumping systems by measuring terminal data of drive motor. In *Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, pages 4074–4077, Nanchang, China. IEEE. (document), 1.2, 3, 3.1, 3.1, 3.7, 3.12, 4.2, 4.2, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.3, 5.2
- Lima, F. S. (2014). *Detecção e Classificação de Modos de Operação do Bombeio Mecânico por Cartas Dinamométricas*. Tese de doutorado em engenharia elétrica e de computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. 3.1, 3.2
- Lima, F. S., Guedes, L. A., and Silva, D. R. (2009). Detecção de falhas no sistema de bombeio mecânico utilizando descritores de fourier e ferramentas estatísticas. In *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, Brasília, DF. 1.1
- Oliveira, R. C. (2010). Elevação artificial de petróleo - bombeio mecânico por haste (bmh). 2.6, 2.7
- Porciúncula, T. F. C., Pereira, R. L. O., Lima, F. S., Silva, D. R. C. S., and Guedes, L. A. (2014). Reconhecimento de modos de operação em sistemas de bombeio mecânico via descritores de fourier e pca. In *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*, volume 1, pages 2521–2528, Belo Horizonte, MG. 3.1
- Rizzo Filho, H. S. (2011). A otimização de gás lift na produção de petróleo: Avaliação da curva de performance do poço. Dissertação de mestrado em planejamento energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 1.1, 2.1
- Santos, O. S. and Santana, A. P. S. C. (2011). Aplicação do bombeio centrífugo submerso na elevação do petróleo. *Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas*, 13(14):23–34. 2.2
- Sen, P. C. (2013). *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. John Wiley & Sons, Ontario - Canada. 3.1
- Silva, W. L. (2014). *Utilização de Métodos Não Invasivos para Determinação de Velocidade, Escorregamento e Torque em Motores de Indução Trifásicos com Aplicação em Unidades de Bombeio Mecânico de Petróleo*. Doutorado em engenharia elétrica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA. 1.2, 2.8, 3.1

- Silvino, I. M. C., Argolo, L. A., Silva, P. L., and Fonseca, L. P. (2016). Geometria da bomba de cavidades progressivas. *Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT*, 3(2):151–162. 2.1.3, 2.3
- Sun, W., Gao, W., Zhang, W., and Ren, T. (2023). Study on working condition prediction of suck rod pumping system based on long short-term memory network. In *2023 5th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing (ICMSP)*, pages 1–4. 1.2
- Svinos, J. G. (1983). Exact kinematic analysis of pumping units. In *58th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE*, San Francisco, USA. 2.5, 2.5, 2.6
- Takács, G. (2015). *Sucker-Rod Pumping Handbook: Production Engineering Fundamentals and Long-Stroke Rod Pumping*, volume 1. CPennWell Corporation, Tulsa Oklahoma, USA. 2.1, 2.4, 2.6, 2.6.3, 3, 3.1
- Teclé, S. I. and Ziuzhev, A. (2019). A review on sucker rod pump monitoring and diagnostic system. In *IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research Practice (PEAMI)*, pages 85–88. IEEE. 3.1
- Torgaeva, D. S., Shalyapina, N. A., and Sukhorukov, M. P. (2019). Simulation of load on a polished rod of sucker rod pump for oil production. In *International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences(SIBIRCON)*, pages 0504 – 0508. 3.1
- Wang, K., Gong, G., Shen, R., Wang, A., Yao, Z., Mao, W., and Lu, H. (2019). Novel physical network algorithm for indirect measurement of polished rod load of beam-pumping unit. *The Journal of Engineering*, 10:7287–792. 3.1
- Xiao, Y., Ma, R., Tian, H., Cheng, X., Xu, Q., and Yu, X. (2023). Oil-net: A learning-based framework for working conditions diagnosis of oil well through dynamometer cards identification. *IEEE Sensors Journal*, 23(13):14406–14417. 1.2
- Zuo, J., Wu, Y., Wang, Z., and Dong, S. (2022). A novel hybrid method for indirect measurement dynamometer card using measured motor power in sucker rod pumping system. *IEEE Sensors Journal*, 22(14):13971–13980. 1.2, 3.1, 3.1

Apêndice A

Algoritmo principal para Inferência da Carga na haste Polida

```

%===== Início =====

%----- Preâmbulo -----

close all force          % Força fechar todas as janelas
clc                      % Limpa todos os comando
clear all                % Limpa tudo
rand('seed',1);         % Garante repetibilidade dos resultados
randn('seed',1);        % Garante repetibilidade dos resultados

global N V p w medidas  % Definição das variáveis globais

%-----Entrada de dados Elétricos -----
%Arquivo das medições de campo
load('TempoCorrenteEscorregamentoVelocidade.mat');

% Dados Estação de bombeio
load('CargaHasteCampoSCADA.mat');
faixa=[91:451]'; % faixa de valores de regime permanente
Im=d_corrente(faixa)'; % Valores de Corrente medida em campo
s=(d_escorregaemnto(faixa)')/100; % valores de escorregamento
N=size(s,1); % determinando tamanho dos vetores
V=220;        % tensão eficaz da fonte de alimentação
f=60;         % frequência em hz
p=4;          % número de pólos

w=(p/60)*d_rotacao(faixa)'; % velocidade angular em rpm
medidas=[s Im];% vetor com escorregamento e corrente medidos
%-----

%===== Processamento dos dados =====

```

```

nvars=6; % número de variáveis do circ. equivalente por fase

lb = zeros(nvars,1); % limite mínimo p/ as variáveis
ub = [ 7, 4.5, 3, 7, 130, 0.001]'; % limite máximo p/ as variáveis

% ----- Início algoritmo -----

Rr=x(1); % nomeando resistência do rotor
Xr=x(2); % nomeando reatância do rotor
Xs=x(3); % nomeando reatância estator
Rs=x(4); % nomeando resistência do estator
Xm=x(5); % nomeando reatância de magnetização
Rfe=x(6); % nomeando resistência do entreferro
%

Rr1= 1.09; % resistência do rotor medida
Xr2= 0.0064; % reatância do rotor medida
Xs1= 0.0069; % reatância estator medida
Rs= 1.115; % resistência do estator medida
Xm= 0.0204; % reatância de magnetização
Rfe=0.962; % resistência do entreferro medida
%
msg = ['Rr='num2str(Rr)', Xr='num2str(Xr)', Xs='num2str(Xs)',
Rs=' num2str(Rs)', Xm =' num2str(Xm)', Rfe='num2str(Rfe)'];

disp(msg) % apresenta a resposta do algoritmo na janela de comandos

%----- Cálculo Torque estimado pelo algoritmo -----

for i=1:N,
    A=Xs*(Rfe*Rr/Xm/s(i)-Xr)+Rs*(Rr/s(i)+Rfe*(1+Xr/Xm))+Rfe*Rr/s(i);
    B=Xs*(Rr/s(i)+Rfe*(1+Xr/Xm))-Rs*(Rfe*Rr/s(i)/Xm-Xr)+Rfe*Xr;
    C=Rr/s(i)+Rfe*(1+Xr/Xm);
    D=Rfe*Rr/s(i)/Xm-Xr;
    Ie(i,1)=V*sqrt((C*C+D*D)/(A*A+B*B));
    Te(i,1)=3*V*V*(p/w(i))*(Rfe*Rfe*Rr/s(i))/(A*A+B*B);
end

%-----

```

```

% =====Entrada de dados da estação de bombeio =====

%----Dimensões das partes girantes da unidade de bombeio -----

%A=1.37; C=1.39; P=0.41; R=0.4; I=1.37; K=2.1; G=0.89; H=0.833;
A=1.37; C=1.39; P=.41; R=.4; I=1.37; K=2.1; G=.89; H=.833;

%----- Ângulos da Cinemática do bombeio -----

phi=asind(1/K);
psib = acosd((C^2+K^2-(P+R)^2)/(2*C*K));
psit = acosd((C^2+K^2-(P-R)^2)/(2*C*K));
teta = [1:N];
beta =angle( acosd((P^2+C^2-K^2-R^2+2*K*R*cosd(phi-teta))/(2*C*P)));

J= sqrt(R^2+K^2-2*K*R*cosd(teta-phi)); % parâmetro associado ao movimento
%-----

for i= 1:N
psiub = asind(P*sind(beta(i))/J(i)) - asind(P*sind(teta(i)-phi)/J(i));
Sub=A*(psib-psiub);
%alfa = beta + psiub-(teta(i) - phi);
dJdteta=K*R*sind(teta(i)-phi)/J(i);
y=(C^2 + J(i)^2 -P^2)/(2*C*J(i));
dydteta=(J(i)^2 + P^2 -C^2)/(2*C*J(i)^2)*dJdteta;
dxdteta=(-1/sqrt(1-y^2))*dydteta;
z=R*sind(teta(i)-phi)/J(i);
dzdteta= R*[J(i)*cosd(teta(i)-phi)-sind(teta(i)-phi)*dJdteta]/J(i)^2;
drodteta=(1/sqrt(1-z^2))*dzdteta;

%primeira derivada de S em relação a teta
dSdteta(1,i)=-A*(dxdteta-drodteta)/100;
d2Jdteta2 = dzdteta;
d2ydteta2 =((C^2-P^2)/(C*J(i)^3))*((dJdteta)^2)
+ ((J(i)^2 + P^2 - C^2)/(2*C*J(i)^2))*d2Jdteta2;
d2xdteta2 = -[[ (1-y^2)^0.5]*d2ydteta2 + [y*(1-y^2)^1.5]*(dydteta)^2];
d2zdteta2 = -R*([J(i)*sind(teta(i)-phi)+cosd(teta(i)-phi)*dJdteta]/J(i)^2)
-R*([(cosd(teta(i)-phi))*dJdteta + sind(teta(i)-phi)*d2Jdteta2]*J(i)

```

```

-2*sind(teta(i)-phi)*dJdteta^2)/J(i)^3;
d2rodteta2 = [(1-z^2)^0.5]*d2zdteta2 + z*[(1-z^2)^1.5]*dzdteta^2;

%segunda derivada de S em relação a teta
d2Sdteta2(1,i) = A*[d2xdteta2-d2rodteta2];

%===== Cálculo da Posição da haste polida considerando MHS =====
%
Sd=(P/J(i))*(cosd(teta(i))/sqrt(1-(P*sind(teta(i)-phi)/J(i)))));
H(1,i)=70*abs((Sub(1,1))/100);
Hd(1,i)=abs(Sd(1,1)/100);
end
%
%=====Cálculo da Carga na Haste polida =====

alfa = beta + psiub-(teta - phi); % ângulo auxiliar
FT = (R*A*sind(alfa))/(C*sind(beta)); % fator de torque
rredutor = 289; %raio do redutor em metros
rmotor = 22.75; %raio do motor em metros
sigma =300; % fator de redução
FTab=abs(FT);
%-----
Tmec = (Te*rredutor)/(sigma*rmotor); % torque eletromecânico estimado
Mm = 2.3; %torque da manivela sem os contrapesos
mcp = 2; % massa de cada contra-peso
xcp = 1.5; % distância de contra-peso até o eixo de saída do redutor
nc = 4; %número de contra-pesos
Qsu = 100; % desbalanceio estrutural
M=20;% momento
CTE=20; relações das polias e engrenagens;
tal= 10; % ângulo de fase
I2= 5000; % momento de inércia relativo as partes girantes
I3= 4000; % + momento de inércia realtivo as partes articuladas

%carga na haste polida com o torque estimado pelo G.A.

Qpr=20*(((CTE*Tmec' + M*sin((deg2rad(teta)' - deg2rad(tal)))))/FT) +Qsu)
-((I3/A^2)*dSdteta) - (I2/FT))'.*diff(w2) - (I3/A^2)*[w.^2].*d2Sdteta2';
-----

```

```

% ===== Gráficos =====
figure(1)
plot(time,Qpr,'b',time, acc+dc,'r'),grid on
legend('Medido','Estimado', 'Location','NorthEast')
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Carga na haste polida (lb)')

%-----
figure(2)
plot(time,H,'r'), grid on
xlabel('Tempo(s)')
ylabel('Posição da haste polida (pol)')

%-----
figure(3)
plot( H,Qpr,'k'), grid on
title('Carta dinamométrica de Superfície')
xlabel('Curso da haste polida em pol')
ylabel('Carga na haste polida em lbf')

```

Apêndice B

Subrotina do Algoritmo Principal para Inferência da Carga na Haste Polida

```

function f1 = lzcoss_fnc(x)

global N V p w medidas
%
s=medidas(:,1); % Escorregamento medido
Im=medidas(:,2); % Corrente medida

%----- Variáveis Estimadas-----
Rr=x(1);
Xr=x(2);
Xs=x(3);
Rs=x(4);
Xm=x(5);
Rfe=x(6);
%-----
for i=1:N,

    A=Xs*(Rfe*Rr/Xm/s(i)-Xr)+Rs*(Rr/s(i)+Rfe*(1+Xr/Xm))+Rfe*Rr/s(i);
    B=Xs*(Rr/s(i)+Rfe*(1+Xr/Xm))-Rs*(Rfe*Rr/s(i)/Xm-Xr)+Rfe*Xr;
    C=Rr/s(i)+Rfe*(1+Xr/Xm);
    D=Rfe*Rr/s(i)/Xm-Xr;
    Ic(i,1)=V*sqrt((C*C+D*D)/(A*A+B*B)); % Corrente estimada

end

f1 = sum((Im-Ic).^2); % Cálculo do erro

```

Estimação da carta dinamométrica de superfície a partir de medições do sistema de acionamento do motor elétrico e do modelo mecânico do sistema de bombeio por hastes.

Lázaro Edmilson Brito Silva

Salvador

2024.