



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

CONTAMINAÇÃO SÓLIDA NO SISTEMA DE CONTROLE DO BOP:
METODOLOGIA DE TESTES E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA
ESTIMATIVA DE CONFIABILIDADE

Pedro Silva Petindá

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Juliana Braga Rodrigues Loureiro

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Departamento de Engenharia Mecânica

DEM/POLI/UFRJ



CONTAMINAÇÃO SÓLIDA NO SISTEMA DE CONTROLE DO BOP:
METODOLOGIA DE TESTES E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA
ESTIMATIVA DE CONFIABILIDADE

Pedro Silva Petindá

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovada por:

Prof. Juliana Braga Rodrigues Loureiro, D.Sc.

Prof. Átila Pantaleão Silva Freire, Ph.D.

Prof. Luca Moriconi, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO DE 2020

Petindá, Pedro Silva

Contaminação Sólida no Sistema de Controle do BOP: Metodologia de Testes e Análise de Sensibilidade para Estimativa de Confiabilidade/ Pedro Silva Petindá. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2020.

XII, 51 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Juliana Braga Rodrigues Loureiro

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Mecânica, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 48 – 49.

1. Análise de Sensibilidade. 2. Confiabilidade. 3. Reguladora de Pressão. 4. BOP. 5. Contaminação. I. Braga Rodrigues Loureiro, Juliana. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Curso de Engenharia Mecânica. III. Contaminação Sólida no Sistema de Controle do BOP: Metodologia de Testes e Análise de Sensibilidade para Estimativa de Confiabilidade.

*Aos meus pais, sem vocês nada
disso seria possível.*

Agradecimentos

Aos meus pais, Cláudio e Laura, por todo o apoio, carinho e confiança que sempre me foi dado.

À minha orientadora, Professora Juliana Loureiro, pela direção e apoio durante o projeto.

À equipe do NIDF, em especial a todos os envolvidos no projeto do BOP, por todo o suporte e paciência.

Aos meus amigos do curso de Engenharia Mecânica, que juntos nos ajudamos e vencemos essa etapa.

À Clara, minha melhor amiga e parceira, por todo o carinho e por sempre acreditar no meu potencial.

Aos meus amigos do CEFET, pelos momentos de descontração que renovavam minha energia e que levarei para a vida toda.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico

CONTAMINAÇÃO SÓLIDA NO SISTEMA DE CONTROLE DO BOP:
METODOLOGIA DE TESTES E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA
ESTIMATIVA DE CONFIABILIDADE

Pedro Silva Petindá

Fevereiro/2020

Orientador: Juliana Braga Rodrigues Loureiro

Programa: Engenharia Mecânica

Durante o processo de perfuração de poços de petróleo é necessário o emprego de equipamentos capazes de proteger as vidas humanas e o meio ambiente em caso de acidentes. O Blowout Preventer, pelo seu papel crítico, necessita de estudos que identifiquem modos de falha e seus efeitos a fim de garantir a confiabilidade. Neste trabalho são discutidos os efeitos que a contaminação por partículas sólidas causa no sistema de controle do BOP e avalia os principais modelos matemáticos para previsão de vida. Também é descrito o aparato experimental, o procedimento de teste de contaminação e propostas de sistema de monitoramento contínuo dos equipamentos.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Mechanical Engineer

BOP CONTROL SYSTEM SOLID CONTAMINATION: METHODOLOGY AND SENSITIVITY ANALYSIS

Pedro Silva Petindá

February/2020

Advisor: Juliana Braga Rodrigues Loureiro

Department: Mechanical Engineering

During the oil well drilling process, it is necessary to apply equipment capable of protecting human lives and the environment, in case of accidents. The Blowout Preventer, due to its critical role, needs studies that identify failure modes and their effects in order to guarantee its reliability. This work discusses the effects that contamination by solid particles causes in the BOP control system and assesses the main mathematical models for predicting life. It also describes the experimental apparatus, the contamination test procedure and proposals for a continuous monitoring system.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	4
3 <i>Blowout Preventer</i>	8
3.1 Visão Geral	8
3.2 Gavetas e Anulares	11
3.3 Sistema de Controle	12
3.4 <i>Manual Koomey Regulators</i>	13
4 Contaminação Sólida em Ambiente <i>Offshore</i>	16
5 Bancada Experimental	19
5.1 Visão Geral	19
5.1.1 Válvula de Teste	21
5.1.2 <i>Choke Valve</i>	22
5.1.3 Bomba	23
5.1.4 Tanques	24
5.1.5 Contador de Partículas	25
5.2 Comissionamento e Segurança	25
5.3 Areia de Teste	26
5.4 Fluido Hidráulico	28

6	Modelos Matemáticos de Análise de Falha	30
6.1	Conceitos de Confiabilidade	30
6.2	Modelos Probabilísticos	31
6.2.1	Distribuição Exponencial	32
6.2.2	Distribuição Normal	32
6.2.3	Distribuição Weibull	33
6.3	Modelo de Sensibilidade	34
6.3.1	Modelo de Bensch [1]	35
6.3.2	Modelo de Tessmann[2]	36
7	Resultados e Propostas	38
7.1	Metodologia de ensaio de injeção de partículas sólidas	38
7.2	Análise de Sensibilidade	40
7.3	Proposta de Sistema de Monitoramento Contínuo	45
8	Conclusão e Trabalhos Futuros	47
	Referências Bibliográficas	48
A	FMEA para Contaminação Sólida	50

Lista de Figuras

2.1	Representação do estresse por etapas. Fonte: NELSON [3]	5
2.2	Falhas no BOP por sistema. Fonte: HOLAND [4]	5
3.1	Imagem de um BOP e suas divisões. Adaptado de [5].	9
3.2	Esquemático BOP.	10
3.3	Desenho de gaveta [A] Cega, [B] Tubo, [c] Variável e [D] Cisalhante. Adaptado de [6].	11
3.4	Desenho de um Anular. Adaptado de [6].	12
3.5	Esquemático simplificado do sistema de controle.	13
3.6	Vista lateral de um Pod e localização de componentes. Fonte: Nati- onal Oilwell Varco.	14
3.7	Desenho em corte de uma MKR. Fonte: National Oilwell Varco	15
4.1	Representação do bloqueio do movimento do pistão.	16
4.2	Representação do efeito erosivo de particulados.	17
5.1	Fotografia do skid montado.	20
5.2	Esquemático do sistema.	20
5.3	Fotografia MKR de teste.	21
5.4	Fotografia MKR com dados construtivos.	21
5.5	Fotografia da Choke.	22
5.6	Bomba original do projeto. Não adequada ao teste.	23
5.7	Bomba especificada para o teste de contaminação.	24
5.8	Foto do tanque a ser instalado.	24
5.9	Imagem ilustrativa do contador adquirido. Fonte: PAMAS.	25

5.10	Quantidade de partículas em cada faixa de tamanho para cada nível de contaminação segundo a norma NAS. Fonte: Parker.	27
5.11	A2 Fine Test Dust adquirida para o teste.	28
5.12	Barril contendo fluido para realização do teste.	29
7.1	Fluxograma do teste de pressão.	39
7.2	Fluxograma do teste de vazão.	41
7.3	Esquemático do sensor de pressão e vazão.	46

Lista de Tabelas

5.1	Processo de comissionamento da montagem da bancada. Adaptado de [15]	26
5.2	Material disponível para o teste.	27
7.1	Valores de Sensibilidade de Tessmann e Bensch para os dados de Zhao [7].	42
7.2	Comparação dos tempos de vida útil calculados por Bensch e Tessmann.	44

Capítulo 1

Introdução

A perfuração de poços *offshore* é considerada uma das etapas mais perigosas e instáveis dentro da cadeia produtiva do petróleo. A necessidade de perfurar um poço de até 12km de profundidade, sob um alto gradiente de pressão, com esforços dinâmicos atuando sobre a embarcação e tendo uma lâmina d'água que pode chegar a 3,600m é suficiente para ilustrar o quão extrema é esta operação. Tendo em vista a complexidade operacional e os riscos associados, desenvolvem-se continuamente equipamentos e sistemas de controle e monitoramento para auxiliar nesta tarefa, ajudando a mitigar os riscos inerentes ao processo. Contudo, enquanto novas tecnologias continuam a ser desenvolvidas pela indústria, um equipamento de segurança, o BOP – *Blowout Preventer* – mantém seu princípio básico de funcionamento. Criado em 1922 e patenteado em 1926, o BOP consiste em um massivo arranjo de válvulas que tem por objetivo selar o poço em caso de um fluxo descontrolado de fluidos oriundos da formação. Hoje, o BOP continua sendo continuamente aprimorado pelos principais fabricantes, grandes petrolíferas e pela maioria das *drilling contractors* (empresas especializadas que prestam o serviço de perfuração) sendo comum encontrarmos no mercado unidades que suportam até 15,000 psi de pressão. Este equipamento é um dos mais complexos sistemas eletromecânicos presente nas sondas de perfuração.

Este fluxo descontrolado, denominado *blowout*, possui um alto poder catastrófico, haja vista a dificuldade de retomar o controle do poço após o evento. Por esta razão, o BOP é a última barreira física entre o reservatório explorado e a sonda de perfuração, sendo crucial que seu sistema seja a todo momento monitorado e

certificado, garantindo a menor exposição possível à vida.

Além dos riscos à vida humana, uma falha deste equipamento durante um *blowout* significará um incalculável dano ao meio ambiente, afetando diretamente toda a vida marinha da região. Há ainda o prejuízo econômico, tanto das companhias envolvidas no acidente, quanto da população local que eventualmente seja afetada pelo desastre. Por exemplo, o derramamento de óleo poderá trazer redução no turismo na região afetada e redução ou eventual paralisação na atividade pesqueira local. Um caso recente e mundialmente famoso, o *blowout* ocorrido a bordo da *Deepwater Horizon* fez com que 11 trabalhadores perdessem suas vidas e mais de 3 milhões de barris de óleo tenham se espalhado no Golfo do México.

Sabendo-se que o BOP é, portanto, crucial para evitar que os fluidos da formação cheguem à superfície de maneira descontrolada, é necessário garantir que este equipamento esteja operante a todo momento, sem risco de falhar no momento do acidente. Isso pressupõe que o BOP seja um equipamento confiável, capaz de atuar sob qualquer condição a qual esteja inserido. A confiabilidade do BOP é, portanto, um parâmetro crucial para o aumento da segurança durante a atividade de perfuração.

Dentre as possíveis falhas que podem ocorrer neste equipamento está o mal funcionamento das válvulas de atuação das gavetas. Ao longo deste trabalho será descrito o funcionamento do BOP de forma a deixar claro o papel de cada componente, dando destaque para as válvulas reguladoras de pressão manual (conhecidas no mercado como *Manual Koomey Regulator* ou MKR), responsáveis por regular a pressão de superfície do fluido hidráulico até uma pressão intermediária. Uma falha nestas válvulas significa um fornecimento deficiente de fluido para o acionamento do BOP.

Dentre as causas de falha das MKR's está a presença de contaminantes sólidos de diferentes procedências, que podem afetar a operação da mesma. Por esta razão, está sendo construída uma bancada experimental no Laboratório de Tecnologia em Engenharia de Poços (LTEP) do Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos (NIDF), com o intuito de simular a operação da MKR em condições similares às aquelas encontradas em campo e com a presença de contaminantes com variadas granulometrias sendo inseridos no sistema. A metodologia do teste é conhecida por Teste de Vida Acelerado, que tem por objetivo acelerar a ocorrência da falha do equipamento

ao prolongarmos a quantidade de ciclos de operação. O objetivo do experimento é identificar variações na pressão e vazão de saída das válvulas: se a MKR não operar da maneira esperada, há alto risco de aumento no tempo de acionamento de uma função ou até mesmo queda da pressão necessária para o fechamento (ou abertura) das gavetas do BOP.

Destaca-se que este trabalho é apenas uma parte de um projeto em parceria com a Petrobras cujo objetivo é estudar os principais modos de falha do sistema de controle do BOP. A contaminação sólida será o primeiro modo estudado em uma bancada inicial. Os demais modos de falha (a saber: efeito do golpe de aríete, vibração e pressão de trabalho) serão estudados futuramente pela equipe do NIDF em uma bancada que contemplará não só a MKR como outras válvulas envolvidas na atuação do BOP.

Na literatura não existem estudos que quantifiquem e analisem as falhas do sistema de controle do BOP. Por esta razão, a motivação deste trabalho é a de identificar e propor maneiras de se avaliar a confiabilidade destes equipamentos através de abordagens matemáticas, com o objetivo final de otimizar a manutenção dos componentes e prever possíveis falhas críticas durante a operação, através da identificação precoce de sinais de desgaste. Além disso, estão entre os objetivos do trabalho:

- (i) Propor uma metodologia de realização do ensaio de injeção de partículas sólidas;
- (ii) Propor uma metodologia de análise da sensibilidade das MKR's por contaminação sólida;
- (iii) propor um sistema de monitoramento contínuo da pressão e da vazão no sistema para prever a falha das válvulas MKR.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Segundo EBELING [8], "A confiabilidade de um determinado item pode ser definida como sua capacidade de realizar uma função requerida durante um determinado período de tempo, submetido a um determinado meio, em condições de projeto".

Contudo, nem sempre a reprodução das condições de projeto em laboratório é suficiente para resultarem em falhas observáveis. A partir daí foi desenvolvido o conceito de Teste de Vida Acelerado, para estimular uma falha de certo componente em menor tempo, sob condições severas de operação. Além de permitir a observação das falhas, esta vertente da Engenharia da Confiabilidade permite avaliar a correlação da falha a um determinado estresse. A Engenharia da Confiabilidade trabalha com modelos probabilísticos para buscar melhores geometrias, sistemas ou condições de operação que entreguem um produto mais seguro.

Existem diferentes abordagens de testes de vida acelerados. NELSON [3] em seu texto afirma que o primeiro passo é definir a metodologia de teste, descrevendo as principais maneiras de se estressar o objeto de teste de forma a estimular uma falha em menor tempo. Dentre as maneiras apresentadas, o Estresse em Etapas (step-stress) é o que caracteriza o teste de contaminantes sólidos. Uma faixa cada vez maior de diâmetros de partículas devem ser inseridos no sistema até que a falha se manifeste. Esta metodologia será abordada no capítulo 7.

Por se tratar de um equipamento de valor altíssimo e de operação complexa, não existe na literatura análises experimentais dos métodos de falhas de BOPs, são encontrados somente relatórios de campo com o total de falhas por sistemas, sem atribuir causa ou destrinchar equipamentos envolvidos. Dentre os estudos dis-

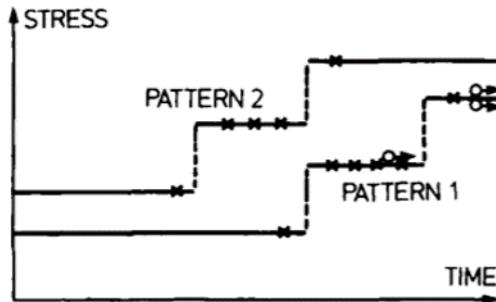


Figura 2.1: Representação do estresse por etapas. Fonte: NELSON [3]

poníveis, um de grande destaque é o relatório realizado por HOLAND [4] que contou com dados históricos de poços perfurados no Golfo do México entre 1997 e 1998.

Em seu trabalho, Holand compilou um total de 117 falhas que culminaram em 3637,5 horas de tempo perdido. Estas falhas foram divididas por sistemas e o Sistema de Controle Multiplex foi o que detinha o maior número de falhas, conforme mostra o gráfico a seguir. Dada a complexidade do Sistema de Controle e o número de variáveis envolvidas, Holand dividiu estas falhas em subcategorias onde o sistema Multiplex é o que detém a maioria das falhas. Embora tais relatórios não caracterizem ou investiguem a fundo as causas, esses dados são muito pertinentes para que se reconheça os sistemas mais suscetíveis a falhas, dando as diretrizes que devem ser seguidas pela indústria no estudo da confiabilidade dos BOPs.

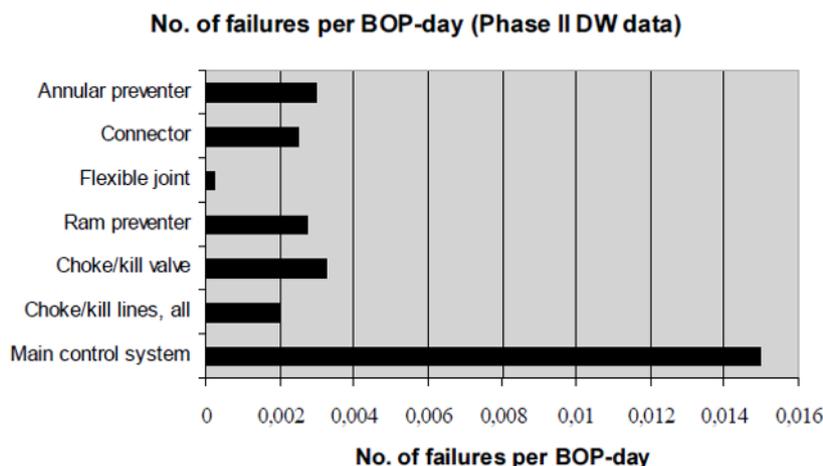


Figura 2.2: Falhas no BOP por sistema. Fonte: HOLAND [4]

Um relatório feito pela ABS (*American Bureau of Shipping*) [2] obteve dados de duas empresas fabricantes de BOP e três *drilling contractors* durante operações

no Golfo do México em 2007. Os resultados deste relatório em especial podem ser extrapolados para a condição vista nas bacias brasileiras, dada a alta similaridade com as operações aqui conduzidas atualmente. Assim como no Golfo, os BOPs aqui utilizados são de maioria do tipo MUX (multiplex) e a ABS relata que cerca de 57% das falhas observadas são derivadas deste sistema. Mais especificamente, 16% das falhas do sistema de controle foram associadas a “SPM e manifoldes”.

LINDLEY [9] afirma que o acúmulo de particulados metálicos oriundos dos tanques de armazenamento de fluido são problemas comuns na indústria. Portanto, é importante que seja estudado o efeito que tais contaminações causam na resposta da MKR. Em seu trabalho, Lindley também afirma que a indústria não tem o aumento da confiabilidade como um objetivo. Em um estudo para investigar os efeitos erosivos que a contaminação sólida produz em equipamentos e mecanismos mecânicos, NORVELLE [10] relata a importância do estudo do efeito da contaminação por partículas sólidas e a redução da confiabilidade de sistemas hidráulicos, discutindo os tipos de contaminação e seus efeitos. O artigo comenta que os testes em laboratório são representativos do caso real e os equipamentos que possuíam maiores tolerâncias à contaminação obtiveram maior tempo de vida útil. Ou seja, cada equipamento possui uma “resistência” à contaminação (função do design, da manutenção e da exposição de cada equipamento) e que melhores designs e práticas de uso garantirão maiores resistências e eventual tempo de vida do componente.

Norvelle também introduz o conceito de sensibilidade do contaminante “ ω ”. Este parâmetro foi obtido após uma bateria de testes com bombas hidráulicas submetidas à trabalhos com fluidos contaminados de particulados sólidos (variando de 0 a 80 μ m em diâmetro) que causaram redução da vazão em 70% ou mais.

Em termos de metodologia, BENSCH [1] e TESSMANN [2] realizaram baterias de testes em bombas centrífugas e volumétricas. O conceito utilizado foi o Teste de Vida Acelerado, o qual expõe o equipamento a condições críticas de operação de maneira progressiva. Desta forma, os autores injetaram particulados sólidos em faixas de granulometria cada vez maiores, iniciando entre 0 e 5 μ m e terminando com 0 e 80 μ m, sempre sob a mesma concentração de 300mg/litro de contaminantes. Foram consideradas falhas nas bombas o momento no qual a vazão de saída fosse 30% menor do que a vazão identificada antes da injeção (mesmo critério de Norvelle).

Ambos os trabalhos desenvolveram um modelo de sensibilidade para quantificar o tempo de falha requerido, dependendo da vazão inicial e da faixa de tamanho dos contaminantes. Neste trabalho este modelo será explorado e uma abordagem voltada para a válvula reguladora de pressão do BOP será apresentada.

Bensch e Tessmann também são os responsáveis pelos dois modelos de previsão de vida útil de equipamentos hidráulicos baseados na degradação da vazão. Seus modelos serão aqui apresentados e aplicados em dados experimentais de outros autores a fim de identificar a melhor abordagem a ser implementada nos dados experimentais da bancada do NIDF.

Capítulo 3

Blowout Preventer

O objetivo deste trabalho gira em torno da caracterização da MKR e da sua resposta à contaminação sólida. A seguir, o sistema de controle do BOP será apresentado com o intuito de demonstrar a operação da MKR e sua importância para o processo de selagem do poço, em caso de *blowout*.

3.1 Visão Geral

O BOP é utilizado em diferentes situações para controle de poço e, neste trabalho, será dada ênfase aos BOPs utilizados na exploração de petróleo nas bacias hidrográficas brasileiras. Este equipamento deverá ser corretamente dimensionado para a ocasião a qual ele operará. Dentre os parâmetros a serem escolhidos estão, por exemplo, a pressão máxima de trabalho (que pode chegar a 15.000 psi), os tipos de preventores (que podem ser do tipo gaveta ou anular), suas quantidades e arranjos. O BOP é a união entre duas partes principais denominadas *stack* e LMRP. O *stack* é a associação em série de preventores e onde a selagem do poço ocorre de fato enquanto que o LMRP (sigla para *Lower Marine Riser Package*), é onde boa parte dos componentes eletro-hidráulicos estão embarcados, divididos entre dois pods. Particularmente, a MKR está localizada nos *pods* do LMRP.

Antes de entrar no mérito do funcionamento do BOP, é necessário conhecer o princípio básico de perfuração *offshore*. De forma resumida, uma coluna de *risers* posiciona o BOP sobre a cabeça do poço previamente preparada. A broca de perfuração passa por dentro da coluna de *riser* e do BOP, estando conectada à uma

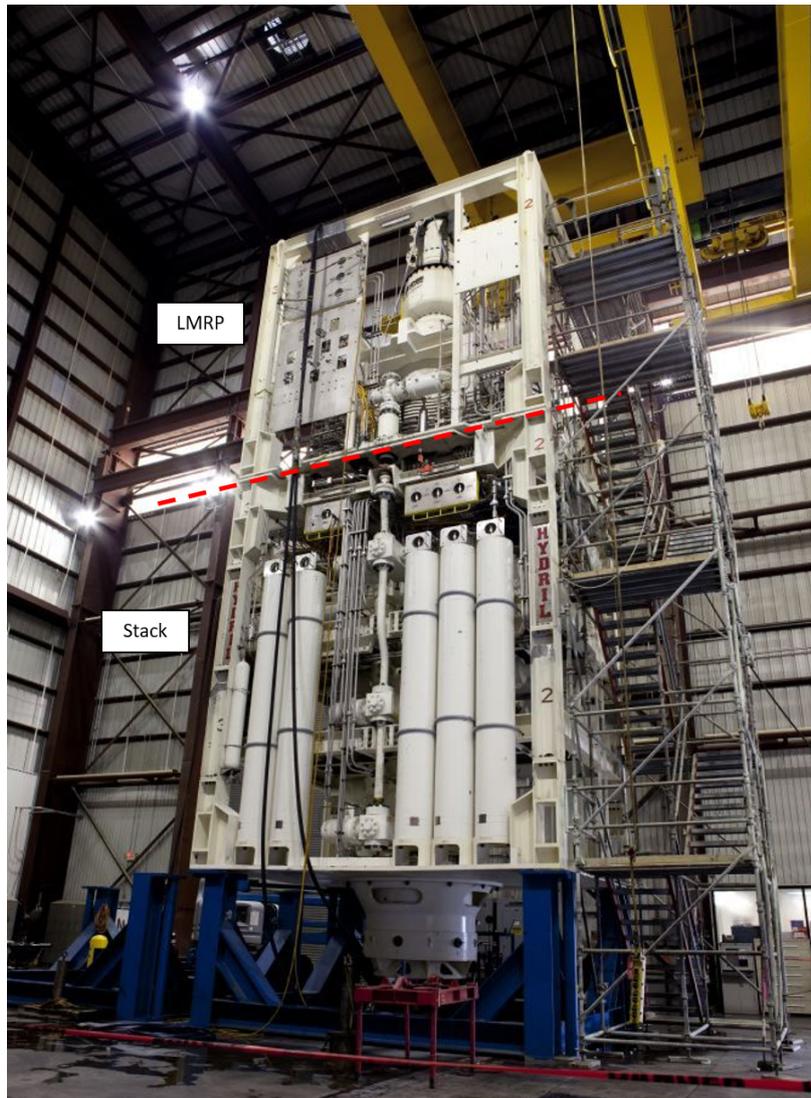


Figura 3.1: Imagem de um BOP e suas divisões. Adaptado de [5].

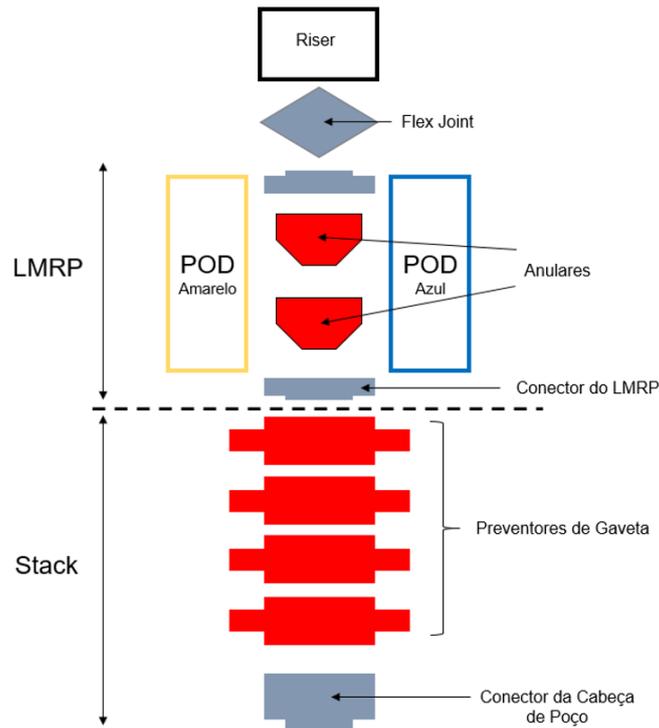


Figura 3.2: Esquemático BOP.

coluna de *drill pipes*. Existem, então, duas zonas de interesse: a região no interior dos *drill pipes* e a região anular compreendida entre o *drill pipe* e o *riser*.

A função do BOP é selar o poço em caso de influxo descontrolado de fluidos oriundos da formação. Cada tipo de preventor será acionado conforme o cenário da emergência. Por exemplo, no caso de um descontrole do poço durante a perfuração, os anulares impedem a passagem de fluido da formação para a sonda, mas permitindo que esta bombeie água ou lama pelo *drill pipe* a fim de equalizar a pressão. Existem ainda fases do poço na qual a coluna de *drill pipe* não está no interior do BOP, neste caso, as gavetas do tipo cegas são acionadas, fechando toda a passagem.

Independentemente do tipo de preventor, fluido hidráulico à alta pressão é necessário para o funcionamento dos mesmos. A pressão geralmente exigida para atuar estes mecanismos variam de 3.000 a 1.500 psi e, dado que o fluido é armazenado a cerca de 5.000 psi na superfície, uma válvula reguladora como a MKR torna-se imprescindível.

3.2 Gavetas e Anulares

Os principais mecanismos de fechamento do poço são os chamados preventores. Eles podem ser divididos em duas categorias principais: as gavetas (ou *rams*) e os anulares (*annulars*). Cada um deles possui um mecanismo de funcionamento distinto. As gavetas podem ser do tipo cega (*blind*), tubo (*pipe*) ou cisalhantes (*textitshear*). A primeira é responsável por bloquear totalmente a ligação entre poço e superfície quando não há tubulação presente (i.e. coluna de *drill pipes* fora do BOP). As gavetas de tubo possuem formato tal que englobe a coluna de perfuração. Como esta coluna pode ter diâmetros variados durante a operação, é comum a adoção de uma gaveta de tubos variável. As gavetas cisalhantes, por sua vez, são responsáveis por cortar o tubo no interior do BOP.

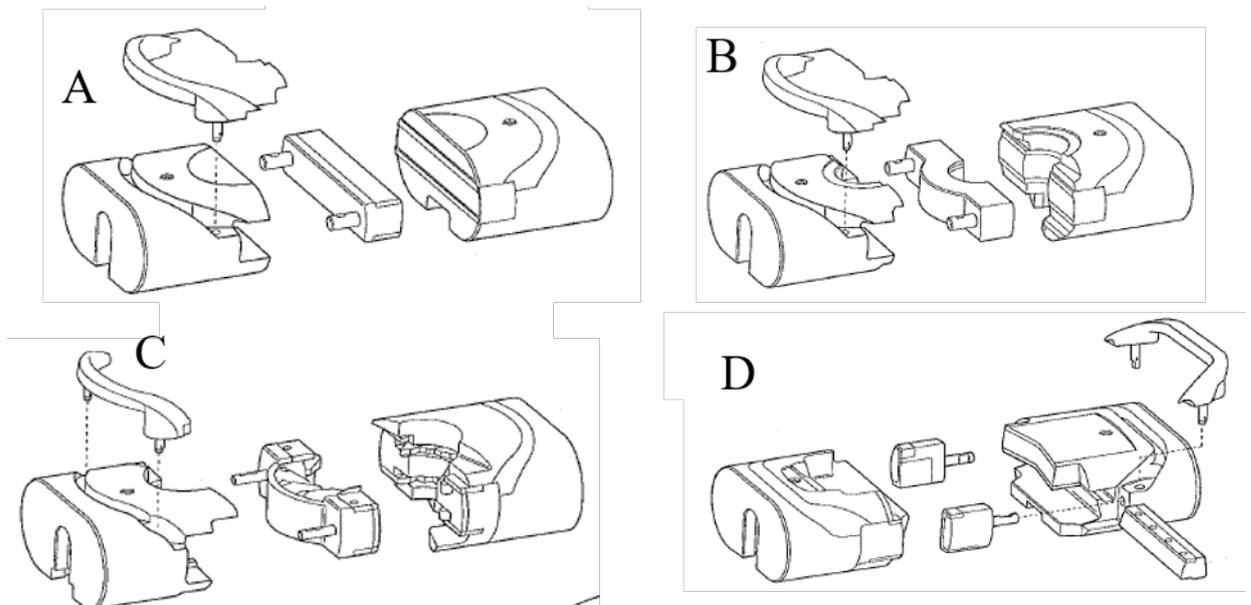


Figura 3.3: Desenho de gaveta [A] Cega, [B] Tubo, [c] Variável e [D] Cisalhante. Adaptado de [6].

Os anulares são os responsáveis por ocupar toda a área disponível, independentemente da presença ou não de tubos no interior do BOP. O elemento selante possui forma toroidal e é produzido a partir de um elastômero. Nas configurações mais atuais, é comum a adoção de 2 anulares no LMRP e 6 gavetas (geralmente divididas em 3 gavetas de tubo, 2 gavetas cisalhantes e uma cega).

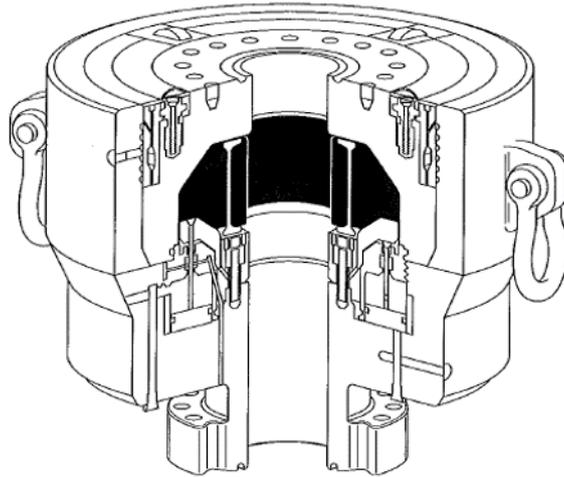


Figura 3.4: Desenho de um Anular. Adaptado de [6].

3.3 Sistema de Controle

O sistema de controle de um BOP é uma complexa rede de sinais elétricos e hidráulicos que tem por objetivo final direcionar o fluido hidráulico até o pistão responsável por realizar a função desejada.

Os BOPs modernos e comumente usados na exploração em águas profundas são geralmente do tipo MUX (multiplex). Este tipo de sistema é caracterizado pela presença dos dois *pods* no LMRP, identificados como azul e amarelo, responsáveis por abrigar as válvulas MKR, HKR, SPM dentre outras. A presença de dois *pods* garante redundância ao sistema, de forma que os dois nunca funcionam ao mesmo tempo. Em caso de falha em um, o segundo (até então inativo) é acionado para garantir que o comando dado na superfície seja executado. A operação de uma função do BOP (como, por exemplo, abrir ou fechar uma certa gaveta) inicia-se com o comando dado em um painel eletrônico localizado na cabine do sondador. O sinal é enviado até a CCU (Unidade Central de Controle), computador responsável em comandar as diferentes funções do BOP. A CCU processa o sinal e o envia ao Módulo Eletrônico Submarino (SEM) localizado em cada *pod*, que o reenvia à CCU. O sinal de retorno é então comparado com o sinal original e o circuito é fechado, energizando a válvula solenoide correspondente à função selecionada. Esta válvula, conhecida no mercado pela sigla CCSV (*Chamber Compensated Solenoid Valve*), também está no escopo de testes a serem realizados na bancada experimental. A sua função é atuar, com ar comprimido, uma válvula piloto que permitirá a passagem do fluido

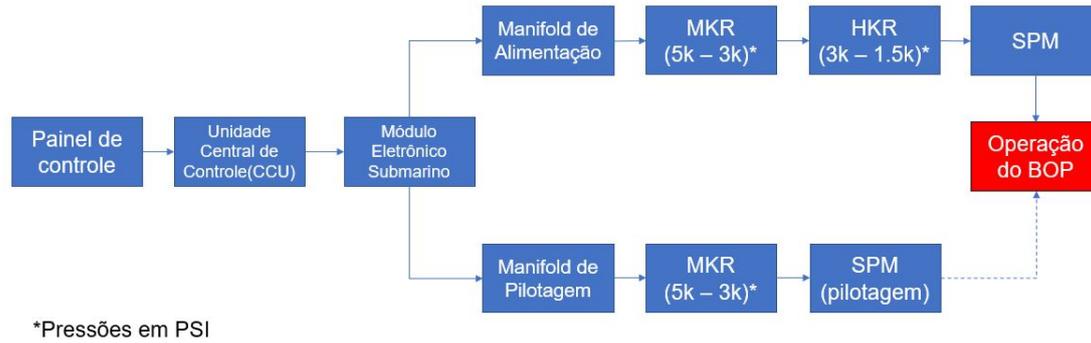


Figura 3.5: Esquemático simplificado do sistema de controle.

de pilotagem armazenado nos acumuladores de superfície, sendo conduzido a cerca de 3.000 psi até a válvula SPM cuja função é direcionar o fluido hidráulico que movimentará os preventores.

Já o fluido hidráulico responsável pela movimentação das gavetas deve ser regulado antes de chegar à SPM através de duas válvulas: a MKR e a HKR. A pressão é reduzida, geralmente, de 5.000 psi a 3.000 psi pela MKR e de 3.000 psi a 1.500 psi na HKR antes de chegar à SPM. Estando alimentada com fluido hidráulico e tendo acionado o fluido de pilotagem, a SPM pode operar.

Existem, para cada gaveta, ao menos duas SPMs responsáveis por uma operação específica. Deste modo, há uma SPM para a abertura e uma para o fechamento (*Open SPM* e *Close SPM*). No caso da abertura, por exemplo, a *Close SPM* é responsável por ventilar o fluido para o mar. Quando a gaveta for fechada, o mesmo mecanismo ocorrerá, com a diferença da *Close SPM* ser a válvula pilotada, levando fluido pressurizado à gaveta e tendo a *Open SPM* a função de ventilar o fluido.

3.4 *Manual Koomey Regulators*

As MKR's, embora sejam assim conhecidas na indústria, são formalmente conhecidas como Válvulas Manuais Reguladoras de Pressão. A origem da sigla MKR advém de uma das principais fabricantes de sistemas hidráulicos para BOP. Pela facilidade de representação, essas válvulas continuarão a ser assim denominadas, embora a válvula testada experimentalmente neste trabalho não seja da mesma fabricante.

Conforme explicitado, a MKR localiza-se no interior dos *pods*. Existem duas

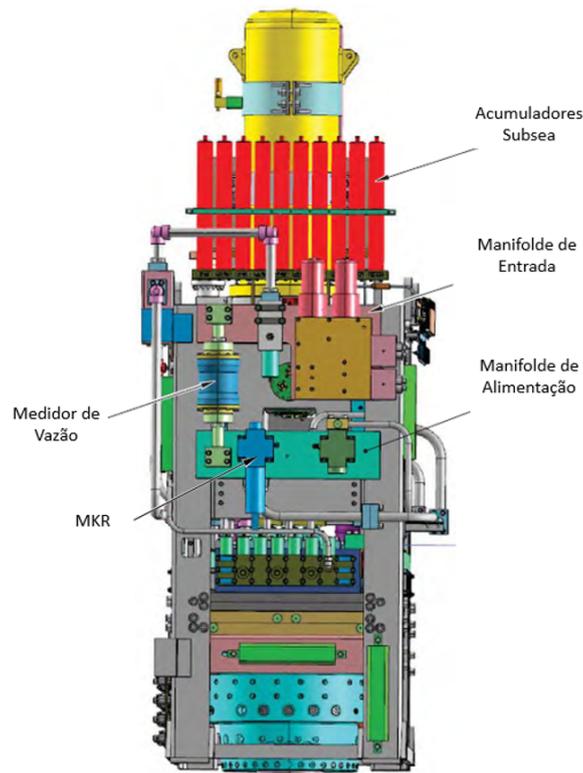


Figura 3.6: Vista lateral de um Pod e localização de componentes. Fonte: National Oilwell Varco.

MKR em cada *pod* sendo que cada uma atua em um circuito distinto. Uma destas válvulas trabalhará no fornecimento de fluido para a pilotagem de outras válvulas, como a SPM (montada no Manifolde de Pilotagem) enquanto outra fornece fluido hidráulico para a HKR (montada no Manifolde de Alimentação). A HKR se diferencia da MKR por poder ser atuada remotamente da superfície e por trabalhar com outro range de regulagem, conforme dito ao fim da seção 3.2. Independentemente da função na qual a MKR esteja envolvida, seu funcionamento se resume a regular o fluido a 5.000 psi oriundo dos acumuladores até uma pressão média de 3.000 psi.

Como a MKR é uma válvula operada manualmente, sua localização é tal que um operador possa regulá-la enquanto o BOP ainda está na superfície. No manifold de alimentação, localizado em uma das laterais do *pod*, a MKR é facilmente visualizada. Já o manifold de pilotagem encontra-se no lado diametralmente oposto ao manifold de alimentação, sendo a MKR também alcançável pelo operador. As válvulas HKR e SPMs, por não exigirem intervenção manual, localizam-se em unidades dentro de cada *pod*.

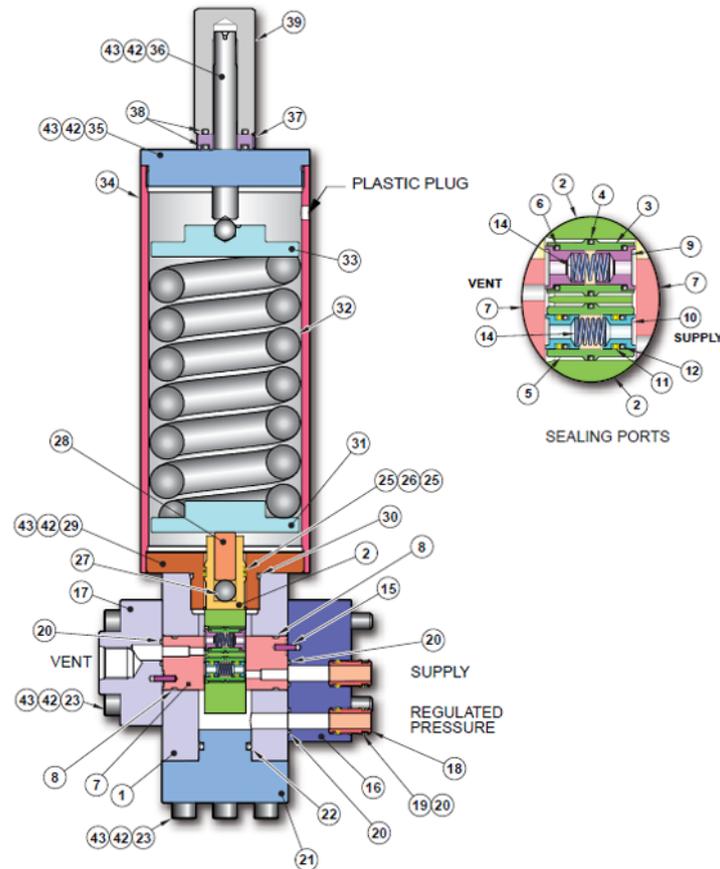


Figura 3.7: Desenho em corte de uma MKR. Fonte: National Oilwell Varco

A expectativa quanto ao ensaio com partículas sólidas e o seu efeito sobre a MKR é a exposição da caixa de selagem (item 2 da figura 3.6). O selo fica em contato direto com o fluido contaminado, estando exposto ao desgaste contínuo. A tendência é o aumento nas chances de vazamento e conseqüente perda de performance da válvula, não sendo capaz de manter o mesmo nível de vazão durante a vida útil. A conseqüência deste cenário é a redução na eficiência da distribuição de fluido, impedindo que a função do BOP seja executada dentro do limite de tempo previsto na API, na sua norma Std 53, que estipula um máximo de 45 segundos entre o acionamento na superfície e a execução. Quedas na pressão de fornecimento devido à erosão de componentes internos também são esperadas [11], tratando-se de uma falha menos comum porém com maior potencial catastrófico (falha total no processo de acionamento das gavetas do BOP).

Capítulo 4

Contaminação Sólida em Ambiente *Offshore*

Este capítulo tem por objetivo discutir os efeitos da contaminação de fluidos em ambientes *offshore*. Primeiro, serão descritos os efeitos que os contaminantes provocam em sistemas hidráulicos em geral, em seguida, serão explorados os métodos de contaminação a bordo.

O efeito da contaminação é particularmente fácil de ser visualizado em componentes que apresentem movimento relativo entre seus elementos internos. Uma bomba de deslocamento positivo por exemplo pode ter o curso do pistão obstruído pela presença de particulado, dependendo da dimensão do contaminante e do equipamento.

Pequenos espaços podem ser totalmente obstruídos. No caso da figura 4.1, a partícula exerce ainda um esforço cortante contra a parede, aumentando o poder de desgaste. O processo acaba por gerar mais partículas em menores diâmetros,

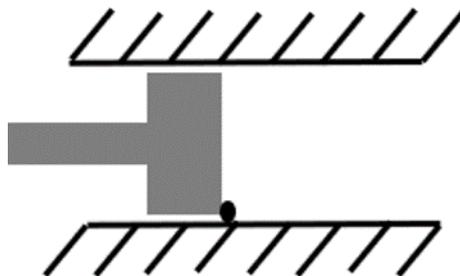


Figura 4.1: Representação do bloqueio do movimento do pistão.

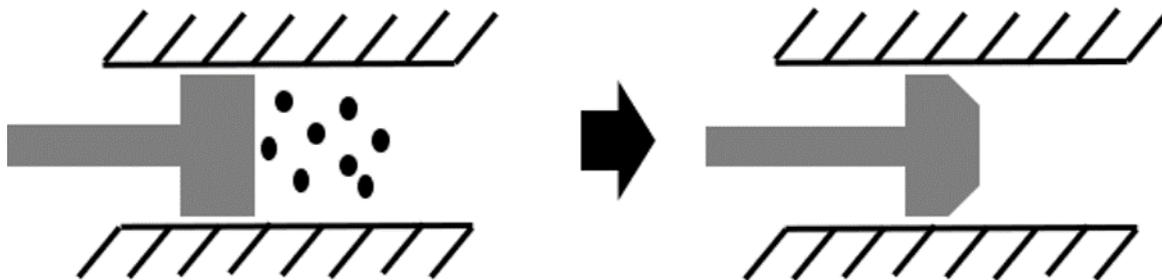


Figura 4.2: Representação do efeito erosivo de particulados.

capazes de adentrar espaços cada vez menores e degradando os componentes de maneira quase imperceptível durante o dia a dia operacional. Embora menores, estas partículas encontram-se em grandes concentrações podendo, no caso do pistão, erodir a cabeça do mesmo, permitindo também vazamentos internos que reduzem a eficiência global do sistema.

Assim como é preciso entender a ação dos contaminantes, é preciso mapear as principais formas de entrada dos mesmos no sistema. Em ambiente de plataforma é comum a ocorrência da chamada contaminação cruzada, usualmente caracterizada pelo uso de ferramentas ou mangueiras contaminadas após o uso em outros sistemas. Por esta razão, os boletins de manutenção emitidos pelos fabricantes das válvulas MKR devem sempre recomendar:

- A utilização de mangueiras ou dutos exclusivos para o sistema hidráulico do BOP;
- A manutenção das válvulas ser sempre realizada em *workshops onshore*, em laboratórios limpos e controlados;
- Limpeza (*flush*) com produtos específicos de toda a linha hidráulica após qualquer intervenção no sistema hidráulico do BOP;
- Manutenção periódica dos sistemas de filtragem. Estas medidas não evitarão a contaminação, porém são capazes de mitigar os riscos e garantir aumento no tempo de serviço da válvula.

Para a MKR, a presença de contaminantes afetará tanto a vazão quanto a pressão de saída. Esta expectativa é baseada nos resultados experimentais descritos na literatura para componentes hidráulicos dentre os quais bombas [1] e válvulas de alívio [11]. Contudo, conforme descrito na seção anterior, o maior grau de exposição

está na caixa de selagem, podendo gerar vazamentos internos e queda de vazão de maneira muito rápida. Esta falha é considerada a mais comum pelo fabricante e resulta em maiores tempos de operação do BOP.

Para melhor avaliar os modos de falha e seus riscos, uma FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) deve ser elaborada a fim de prever o funcionamento do sistema em cada evento. FMEA é processo elaborado por volta da década de 50 por engenheiros interessados no estudo da confiabilidade de equipamentos militares, consistindo na revisão de componentes, montagens e sistemas e as respectivas consequências das falhas dos mesmos. O processo é comumente realizado através da elaboração de uma tabela para a atribuição de critérios de risco, geralmente utilizando um sistema de notas para cada tipo de efeito e frequência. Muitos autores discutem as melhores práticas para a elaboração de uma FMEA existindo hoje uma vasta quantidade de abordagens, estando as diretrizes básicas do procedimento descritas no relatório do Departamento de Defesa dos Estados Unidos [12].

A análise FMEA para os principais modos de falha resultantes de contaminação sólida na MKR está exposta no Apêndice A.

Capítulo 5

Bancada Experimental

5.1 Visão Geral

A bancada de testes está em fase final de comissionamento e hoje opera somente com pressões não superiores a 30 bar (435 psi). O aparato localiza-se no prédio anexo ao NIDF, localizado no CT-2, na Cidade Universitária. Os principais componentes são:

- i. Válvula de Teste
- ii. *Choke Valve*
- iii. Bomba de alta pressão
- iv. Tanques
- v. Contador de partículas

A linha foi construída com aço inoxidável 316L de diâmetro 1” e apresenta pontos de uniões roscadas para facilitar uma eventual troca de válvulas e medidores. Uma foto da bancada e seu esquema hidráulico estão representados nas figuras 5.1 e 5.2.

O objetivo da bancada é estudar os modos de falha presentes no sistema de controle hidráulico do BOP, testando inicialmente a MKR e posteriormente as válvulas SPM e CCSV (modelo de válvula solenoide). Dentre os modos de falha estão, além do efeito do contaminante sólido, o efeito da vibração mecânica, do aumento de pressão externa de trabalho e do golpe aríete na tubulação.



Figura 5.1: Fotografia do skid montado.

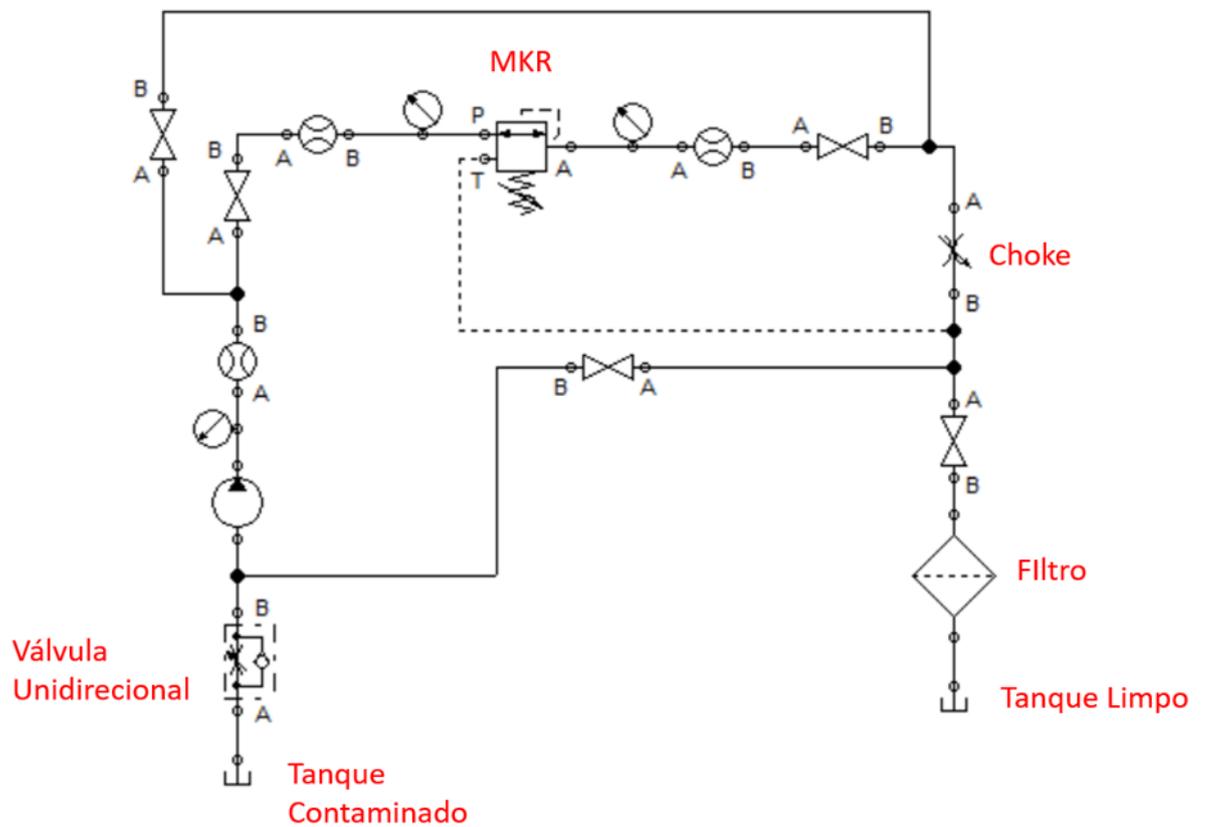


Figura 5.2: Esquemático do sistema.

5.1.1 Válvula de Teste

A válvula de teste que hoje se encontra instalada é a MKR de 1", fabricada pela *Gilmore*. Suas fotos e dados construtivos podem ser vistos nas figuras 5.3 e 5.4.

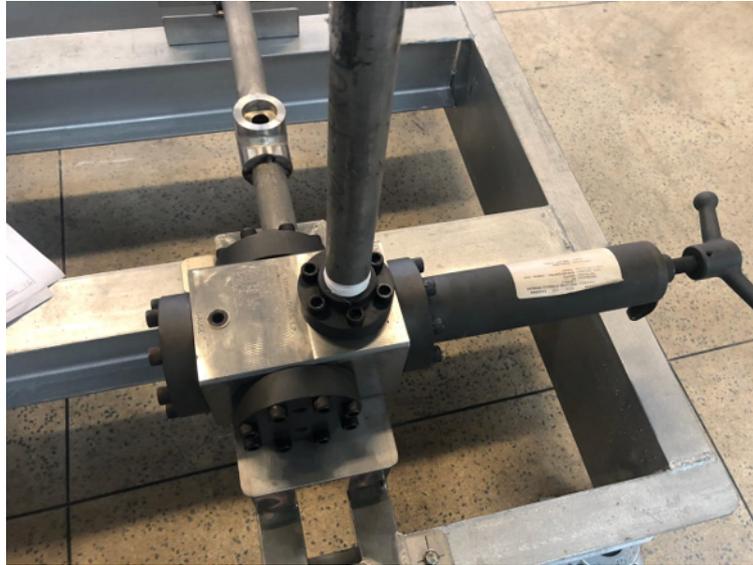


Figura 5.3: Fotografia MKR de teste.

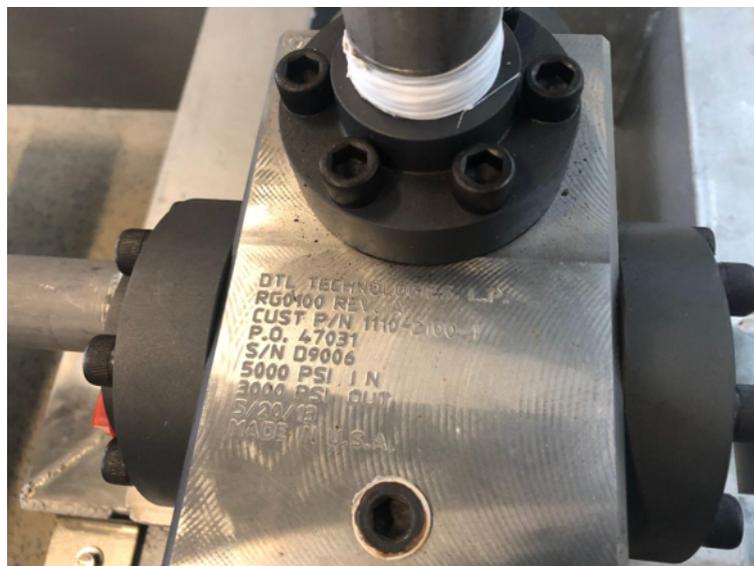


Figura 5.4: Fotografia MKR com dados construtivos.

Esta válvula, conforme indicado em seu corpo e explicitado na Seção 3.2, trabalha na condição de regulagem de 5.000 psi para 3.000 psi. Destaca-se que esta válvula possui uma regulagem manual que tem por objetivo compensar eventuais folgas que podem reduzir a perda de carga causada no interior da mesma. Esta regulagem é,

portanto, um ajuste fino e é acionada quando a equipe responsável pelo controle de poço quando é identificado aumento no tempo de operação. Por estar localizada no LMRP, a regulagem só é feita quando o BOP está na superfície, já que um ROV não é capaz de operar esta válvula. O *skid* montado também foi dimensionado para recebimento da SPM e da CCSV. Tais válvulas serão testadas ao término da bateria de testes com a MKR.

5.1.2 Choke Valve

A válvula de estrangulamento (“*Choke*”) está localizada à jusante da MKR e tem por finalidade simular as funções do BOP através de uma perda de carga. A válvula ajusta a vazão e causa uma queda de pressão controlada na linha.

Sua aplicação é comum na produção de petróleo para reduzir a pressão oriunda do reservatório e manter constante a vazão de produção. O *choke* utilizado nesta bancada é do tipo ajustável com pressão de trabalho de 5000psi, orifício máximo de 3/4” (19,05mm) e fabricado pela *Oilequip*.

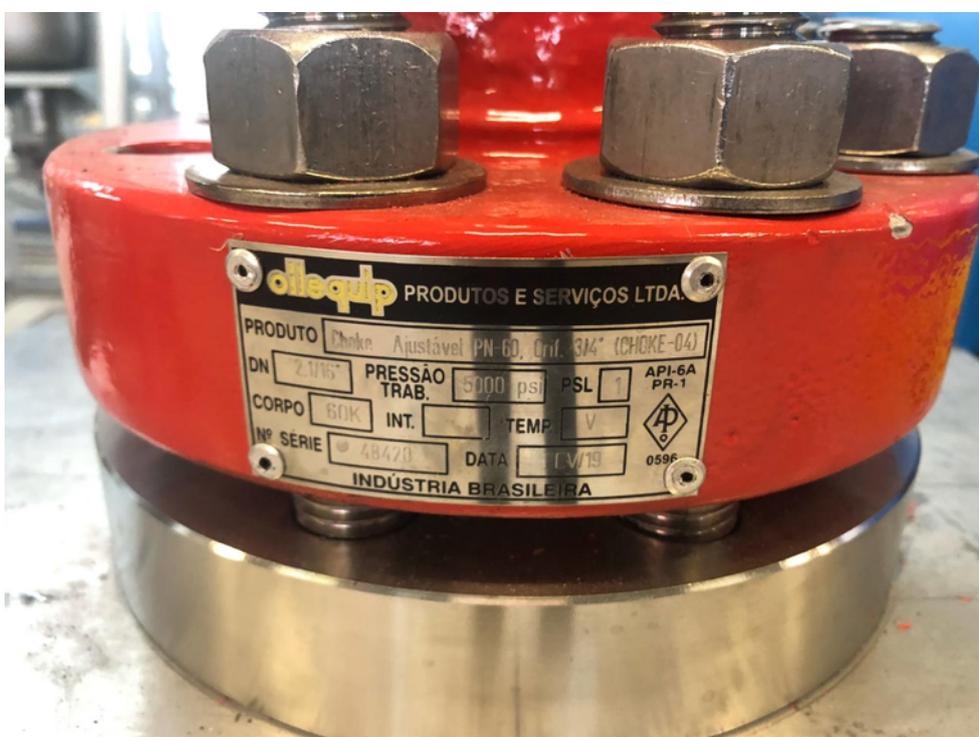


Figura 5.5: Fotografia da Choke.

5.1.3 Bomba

A bomba responsável por pressurizar o fluido contaminado está em processo de compra. A mesma foi especificada para trabalhar exclusivamente no teste com partículas. O projeto possui originalmente uma bomba triplex dedicada da marca *Hammelmann* na qual a utilização neste teste fora vetada pela equipe já que o fabricante não recomenda o uso de fluido com contaminação e a perda deste equipamento geraria um grande prejuízo financeiro. Neste sentido, optou-se pela compra de uma unidade aprovada para uso de fluidos de contaminação NAS 9 da marca *InterPump* T5015, montada em um *skid* móvel com painel para operação remota.



Figura 5.6: Bomba original do projeto. Não adequada ao teste.

A T5015 é capaz de fornecer fluido a 15 l/min compressão máxima de 7250 psi. A alimentação será dada por um motor WEG, trifásico, com potência de 20 cv e saída 220V.



Figura 5.7: Bomba especificada para o teste de contaminação.

5.1.4 Tanques

Dois tanques fabricados em chapas de polipropileno de 10mm de espessura e com capacidade para 5 m³ são utilizados como reservatórios de alimentação e descarga, denominados tanque sujo e limpo, respectivamente.



Figura 5.8: Foto do tanque a ser instalado.

5.1.5 Contador de Partículas

O medidor adquirido para a contagem de partículas sólidas e determinação da concentração foi o PAMAS SBSS WG. Tal equipamento possui 32 canais (sensores para identificação das partículas) e é capaz de identificar partículas de 4µm até 200µm de diâmetro. Por ser um medidor de bancada, o SBSS não é capaz de coletar amostras durante o ensaio (medidor offline). Seu uso estará restrito a validar o nível de contaminação antes e depois do teste.



Figura 5.9: Imagem ilustrativa do contador adquirido. Fonte: PAMAS.

5.2 Comissionamento e Segurança

Antes da operação com pressão de trabalho, um processo de comissionamento da bancada foi realizado assim que a montagem da linha foi concluída. Os primeiros testes contaram com pressão máxima na descarga da bomba de 30 bar (435 psi) e os pontos de vazamento foram marcados para posterior reparo.

No. Teste	Vazamentos
1	18
2	4
3	1
4	0

Tabela 5.1: Processo de comissionamento da montagem da bancada. Adaptado de [15]

Identificou-se que os vazamentos ocorreram apenas nas uniões roscadas. Para a solução do problema foi aplicado o trava-roscas *Loctite* e com tempo de cura de 48h. Por se tratar de uma operação a alta pressão, medidas de segurança estão em processo de implantação. Os principais pontos de melhoria identificados foram:

i. A bomba para uso de particulados deve ter operação totalmente remota, evitando a exposição dos operadores. A bomba *Hammelmann* hoje utilizada possui um painel de operação distante 7m da linha. Um painel semelhante está em processo de aquisição para a operação da bomba contaminada;

ii. O aparato de aquisição de dados deve estar longe o suficiente da zona de risco ou protegido fisicamente da mesma. Devido ao problema espacial e pelo fato da mesa de aquisição ser dividida por outros dois experimentos do laboratório, a solução proposta é a compra de painéis blindados e móveis;

iii. As soldas da tubulação devem ser devidamente inspecionadas pelo método de Raio X. Dentre os outros métodos disponíveis estavam o líquido penetrante e o ensaio com partículas magnéticas. O primeiro método não é recomendável por revelar apenas defeitos superficiais e o segundo não é aplicável para a tubulação em aço inoxidável 316L (material paramagnético).

5.3 Areia de Teste

Os fabricantes de válvulas e demais equipamentos hidráulicos do sistema de controle do BOP recomendam o uso de fluido com nível de contaminação máxima NAS 6. Esta escala, desenvolvida em 1964 para definir o nível de contaminação em componentes aeronáuticos, a escala estabelece as faixas de distribuição de partículas

Size range	5–15 μm	15–25 μm	25–50 μm	50–100 μm	>100 μm	
NAS classes (based on maximum contamination limits, particles per 100ml)	00	125	22	4	1	0
	0	250	44	8	2	0
	1	500	89	16	3	1
	2	1,000	178	32	6	1
	3	2,000	356	63	11	2
	4	4,000	712	126	22	4
	5	8,000	1,425	253	45	8
	6	16,000	2,850	506	90	16
	7	32,000	5,700	1,012	180	32
	8	64,000	11,400	2,025	360	64
	9	128,000	22,800	4,050	720	128
	10	256,000	45,600	8,100	1,440	256
	11	512,000	91,000	16,200	2,880	512
12	1,024,000	182,400	32,400	5,760	1,024	

Figura 5.10: Quantidade de partículas em cada faixa de tamanho para cada nível de contaminação segundo a norma NAS. Fonte: Parker.

conforme a figura 5.10. Para conduzir o ensaio com partículas sólidas foi adquirido junto à empresa *Powder Technology* uma mistura de areia para teste do tipo A2 *Fine Test Dust* que possui nível de contaminação ISO 12103-1 (equivalente ao NAS 9). A razão para a escolha deste nível é a concepção de realizar um teste de vida acelerado, desejando-se observar a falha em menores escalas de tempo. Além da mistura, também foi adquirido faixas individuais de contaminantes, de tamanho crescente de partícula, a fim de replicar os experimentos de Zhao [7]. O resumo da quantidade e da distribuição das partículas disponíveis para o teste é dada pela tabela 5.2.

Quantidade	Descrição	Peso
2	ISO 12103-1, A2 Fine Test Dust	3,5 kg
2	Nominal 0-5 μm Arizona Test Dust	500 g
2	Nominal 0-20 μm Arizona Test Dust	500 g
2	Nominal 0-40 μm Arizona Test Dust	500 g
2	Nominal 0-60 μm Arizona Test Dust	500 g
2	Nominal 0-80 μm Arizona Test Dust	500 g

Tabela 5.2: Material disponível para o teste.

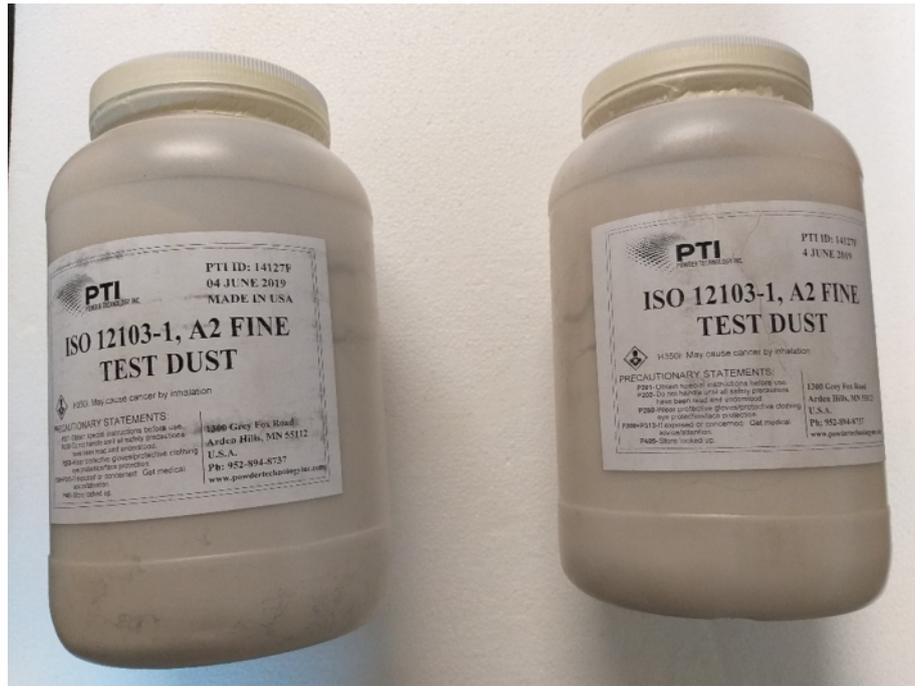


Figura 5.11: A2 Fine Test Dust adquirida para o teste.

5.4 Fluido Hidráulico

O fluido hidráulico *Stack Magic ECO-F v2* é fabricado pela *Houghton* e deve ser utilizado em concentrações entre 3 e 5% misturado à água potável desde que apresente no máximo 250ppm de CaCO_3 em sua composição. As características físico-químicas do fluido estão listadas a seguir:

- Cor: Rosa Fluorescente;
- Aparência: Transparente;
- Odor: Suave;
- Massa específica: 1,06;
- pH (3)
- Viscosidade Cinemática: 2,5 cSt (40°C); 4,6 cSt (20°C); 8,5 cSt (4°C); 17,0 cSt (-10°C);
- Temperatura de congelamento: -17,0 °C.



Figura 5.12: Barril contendo fluido para realização do teste.

Capítulo 6

Modelos Matemáticos de Análise de Falha

A grande maioria dos estudos de confiabilidade de sistemas e equipamentos utilizam modelos probabilísticos para representar seu comportamento ao longo do tempo, desde a sua instalação até a falha. Tais modelos estão consolidados na literatura e são base para qualquer estudo do gênero. Este capítulo foi baseado no disposto no livro ”*ReliaSoft’s Life Data Analysis Reference*” [13].

No caso do projeto do BOP, uma análise probabilística também será realizada com base nos dados extraídos, contudo, temos o intuito de avaliar o uso de uma análise de sensibilidade a fim de complementar – ou até mesmo substituir – a análise probabilística, por se tratar de uma visão mais simples, que dependa de poucos experimentos e que melhor representa a física por trás da operação da MKR. O uso desta abordagem trará benefícios e melhor representará este e demais testes a serem realizados na bancada.

6.1 Conceitos de Confiabilidade

Antes de iniciar o estudo da confiabilidade, é importante apresentar os conceitos matemáticos básicos envolvidos. Uma das funções mais importantes é a função densidade de probabilidade (fdp, ou pdf em inglês), que representa a probabilidade de um item falhar entre instantes de tempo t e $t + \Delta t$, aqui representado pela variável aleatória T (tempo no qual a falha ocorre). Matematicamente a fdp é

descrita pela equação 6.1.

$$P(t \leq T \leq t + \Delta t) = \int_t^{t+\Delta} f(x)dx \quad (6.1)$$

Já a função de distribuição acumulada (fda, ou cdf em inglês), representa a probabilidade da falha ocorrer em um instante $T \leq t$.

$$P(T \leq t) = \int_0^t f(x)dx \quad (6.2)$$

Define-se por Função Confiabilidade $R(t)$ como a probabilidade de um item não falhar antes de um determinado tempo t . Logo, a mesma pode ser derivada da distribuição acumulada, a qual podemos chamar de Função Não-Confiabilidade $Q(t)$.

$$P(T > t) = R(t) = 1 - Q(t) \quad (6.3)$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(x)dx \quad (6.4)$$

A taxa de falha λ define o numero de falhas observadas por unidade de medida (falhas por hora, falhas por ciclo, etc) e é definida como a razão da função densidade e a função confiabilidade, segundo a equação 6.5.

$$\lambda = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (6.5)$$

Finalmente, é apresentada a definição de Tempo Médio de Falha (MTTF) cuja equação é exposta abaixo:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (6.6)$$

6.2 Modelos Probabilísticos

Serão apresentados os modelos Exponencial, Normal e Weibull. Dependendo da natureza da falha observada, existirá certa distribuição que melhor representa o comportamento real. Neste sentido, é preciso analisar cada equipamento e cada modo de falha separadamente para a melhor escolha do modelo.

A desvantagem desta abordagem é a necessidade de uma grande quantidade de falhas geradas por experimento para que a amostra seja representativa. Por esta razão, a análise probabilística será implementada por último, contudo, é importante que o projeto já possua um modelo predeterminado de trabalho.

6.2.1 Distribuição Exponencial

Itens que possam sofrer falhas a uma razão constante podem ser modelados por uma distribuição exponencial. A função de distribuição de probabilidade é matematicamente representada pela equação 6.7.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (6.7)$$

Onde λ é uma taxa de falha constante (eventos por tempo). Por ser constante, esta distribuição apenas pode ser aplicada em modos de falha cuja unidade não degrade com o tempo. Já o Tempo Médio de Falha (MTTF) de um evento com distribuição exponencial é dado por:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (6.8)$$

E a equação da confiabilidade é:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (6.9)$$

A exponencial é comumente empregada, por exemplo, para identificar o tempo necessário para uma linha de montagem produzir uma peça defeituosa. A distribuição exponencial deve ser usada para o caso da MKR uma vez que a premissa de taxa de falha constante não é realística. A tendência é que haja desgaste acumulado e que varie com o tempo de exposição.

6.2.2 Distribuição Normal

A função de Densidade de Probabilidade é descrita por:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (6.10)$$

Onde σ é a média para os tempos de falha (ou seja, a própria MTTF) e μ é o desvio padrão. Esta distribuição não possui uma função confiabilidade visto que a equação encontrada não possui solução fechada. Ainda assim, é muito aplicada na análise de sistemas e componentes mecânicos simples. A distribuição normal também não será adotada visto que a mesma não apresenta variável que represente a relação entre o tempo de falha e o nível de contaminação (que pode ser avaliado como a “carga” do teste).

6.2.3 Distribuição Weibull

A Distribuição Weibull é um modelo mais complexo aqui apresentado para análise de dados de vida de componentes. Esta distribuição é dada pela equação:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (6.11)$$

Sendo β o parâmetro de forma, η o parâmetro de escala e γ o parâmetro de localidade, que identifica um período da vida do componente na qual a falha não pode ocorrer. Neste trabalho adotaremos γ sempre nulo visto que não há evidências suficientes para se assumir que a MKR apenas seja passível de falha após certo tempo de operação com contaminação.

Adotando $\gamma = 0$ tem-se:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (6.12)$$

Que é a forma de Weibull para 2 parâmetros.

A função Confiabilidade é dada por:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (6.13)$$

Com MTTF dado por:

$$MTTF = \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (6.14)$$

$$\Gamma(n) = \int_0^\infty e^{-x} x^{n-1} dx \quad (6.15)$$

O *American Petroleum Institute* (API) e a ASME publicaram relatório recomendando o uso desta distribuição na análise no tempo de vida de válvulas aliviadoras [8]. Muitos outros autores sugerem o uso do modelo Weibull para estudo da confiabilidade de componentes hidráulicos em geral. Em particular, o parâmetro β relaciona a taxa de falha com o tempo. Equipamentos com β maior que a unidade são aqueles que se deterioram com maior facilidade com em escalas de tempo maiores, característica essa típica de equipamentos com falha por desgaste e erosão. Mais ainda, é interessante notar que β pode ser avaliado como uma medida de resistência do equipamento para certa exposição, logo, é possível correlacionar tal constante com a sensibilidade de equipamentos à contaminação sólida.

6.3 Modelo de Sensibilidade

Existem na literatura diferentes formas de abordar a sensibilidade de sistemas hidráulicos a contaminantes sólidos. Todos os modelos, contudo, foram desenvolvidos baseados na premissa de que, para cada tamanho de partícula que a bomba era exposta, ocorre um dano finito que afetará a vazão e/ou pressão de bombas, válvulas ou demais componentes utilizados na indústria.

A taxa na qual a vazão degrada-se no tempo dQ/dt depende da sensibilidade do componente S_i dada uma taxa de injeção de partículas com diâmetro i . Esta relação pode ser expressa pela equação 1:

$$\frac{dQ}{dt} = -S_i \left(\frac{dN_i}{dt} \right) \quad (6.16)$$

A partir desta análise, diferentes modelos foram propostos. Destaca-se, no entanto, que a sensibilidade é o único parâmetro atrelado às condições de projeto do elemento estudado e às suas condições de operação, tornando a análise extremamente versátil para aplicações em diversos equipamentos.

A seguir, os principais modelos serão apresentados e discutidos. Na seção 7, cada modelo será aplicado para uma base de dados de teste de contaminantes tanto de uma bomba hidráulica quanto uma válvula de alívio. Os resultados serão comparados a fim de determinar a melhor abordagem a ser usada nos dados obtidos pela bancada do NIDF.

6.3.1 Modelo de Bensch [1]

O modelo de Bensch foi o primeiro a considerar a física das partículas ao longo do sistema e a distinguir a condição de laboratório da condição real. No caso do teste, as partículas são inseridas de maneira discreta e não são “repostas” pelo sistema. No caso real, a tendência é que o nível de contaminação seja relativamente constante e, nesse caso, o real desgaste seria muito maior daquele quantificado em laboratório. Para contornar este problema, Bensch realizou uma série de experimentos no *Fluid Power Research Center* para avaliar o tempo médio de vida das partículas em um teste controlado. Os resultados foram compilados para bombas e válvulas em diferentes condições de operação e foi avaliado que, em média, as partículas sobrevivem um máximo de 9 minutos sendo esta grandeza representada pela letra τ . A concentração de contaminantes durante um teste de sensibilidade é dado então pela equação 6.17.

$$n = n_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6.17)$$

Onde n_0 é a concentração no início do teste. A sensibilidade de Bensch é considerada proporcional ao nível de concentração do contaminante. O autor considera, então, o parâmetro α como o coeficiente de desgaste do equipamento sendo um valor único e válido para qualquer equipamento exposto à contaminante sob uma determinada condição de operação e é representada pela expressão 6.18.

$$S = \alpha n \quad (6.18)$$

Combinando as equações 6.16, 6.17 e 6.18 e integrando obtém-se:

$$Q(t) = Q_0 e^{(-\alpha \tau n_0^2)(1 - e^{-\frac{2t}{\tau}})} \quad (6.19)$$

Onde Q_0 é a vazão inicial.

Já α deve ser calculado a partir dos dados obtidos experimentalmente pela equação 5:

$$\alpha = -\frac{2 \ln\left(\frac{Q_f}{Q_0}\right)}{n_0^2} \quad (6.20)$$

Onde Q_f é a vazão medida ao final de cada injeção de contaminante.

Finalmente, o modelo de Bensch elabora uma fórmula para a previsão da via útil do componente dadas as injeções de contaminantes:

$$T = -\frac{\ln \frac{Q_F}{Q_0}}{\sum_{i=1}^{i_{max}} \alpha_i n_i^2} \quad (6.21)$$

Sendo Q_F a vazão máxima permitida.

6.3.2 Modelo de Tessmann[2]

Já Tessman aborda a variação da vazão da seguinte maneira:

$$\frac{dQ}{dt} = -Q_0 S_i n_{0,i} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6.22)$$

Onde $n_{0,i}$ é a concentração de partículas em uma faixa i de tamanho e τ é a constante do tempo para destruição das partículas. Rearrmando a equação e integrando obtém-se:

$$\frac{dQ}{Q_0} = -S_i n_{0,i} e^{-\frac{t}{\tau}} dt \quad (6.23)$$

Rearrmando a equação 6.23 temos a expressão da sensibilidade em um range i de tamanho de partículas:

$$S_i = -\frac{1}{\tau n_{0,i}} \ln \frac{Q_f}{Q_0} \quad (6.24)$$

Para Tessmann, contudo, a aplicação da equação 6.24 não representa a real sensibilidade do componente, isto porque ocorre um acúmulo de dano aos elementos internos na medida em que o tamanho das partículas aumenta durante o teste. Desta forma, utiliza-se a equação 6.24 apenas para a primeira faixa de partículas (normalmente 0-5 μm) e para os tamanhos subsequentes, utiliza-se a forma expandida da equação de sensibilidade:

$$S_j = -\frac{1}{\tau n_{0,j}} \ln \left(\frac{Q_{f,j}}{Q_{0,j}} - \sum_{j=1}^{j_{max}} (e^{S_j n_{f,j}} - 1) \right) \quad (6.25)$$

Para $j = 2, 3, 4, \dots, j_{max}$.

Portanto, a equação 6.24 em conjunto com 6.25 descreve a sensibilidade de um componente para todo o espectro de tamanho de partículas no qual o mesmo esteja exposto.

Para avaliação do tempo de vida útil utiliza-se a equação:

$$T = -\frac{\ln \frac{Q_T}{Q_0}}{\sum_{j=1}^{j_{max}} S_j n_j} \quad (6.26)$$

Logo, observa-se que matematicamente as equações de previsão de vida de Bensch e Tessmann são semelhantes. Contudo, deve-se atentar à abordagem diferenciada no cálculo da sensibilidade e da concentração em cada modelo.

Capítulo 7

Resultados e Propostas

7.1 Metodologia de ensaio de injeção de partículas sólidas

A metodologia de ensaio proposta foi desenvolvida considerando os relatos de campo [1] [2]. Dada a geometria da válvula e a posição da caixa de selagem, é possível identificar tendência em variação na pressão de saída. Conseqüentemente, a vazão através da válvula também deverá oscilar, tendo em vista que os mecanismos de selagem internos estarão totalmente expostos ao contaminante. No caso particular da MKR, além dos elementos de vedação, é esperado desgaste acentuado na placa de assentamento do selo de alimentação (item 8, figura 3.6). Desgastes nesta placa podem ultrapassar a tolerância dimensional de projeto, permitindo escape de fluido e deficiência na regulagem da pressão.

Por esta razão, duas baterias de teste distintas devem ser projetadas para cobrir todo o envelope operacional do equipamento assim como bem definir o efeito que a injeção de contaminantes traz à operação. O primeiro teste deverá avaliar a variação da pressão de saída da válvula, dada uma vazão constante no sistema enquanto que o segundo teste deverá avaliar a queda de vazão, dada uma pressão constante. Para que a segunda etapa seja atingida, a válvula deverá ser operada manualmente quando necessário.

Teste 1 – Avaliação de Pressão

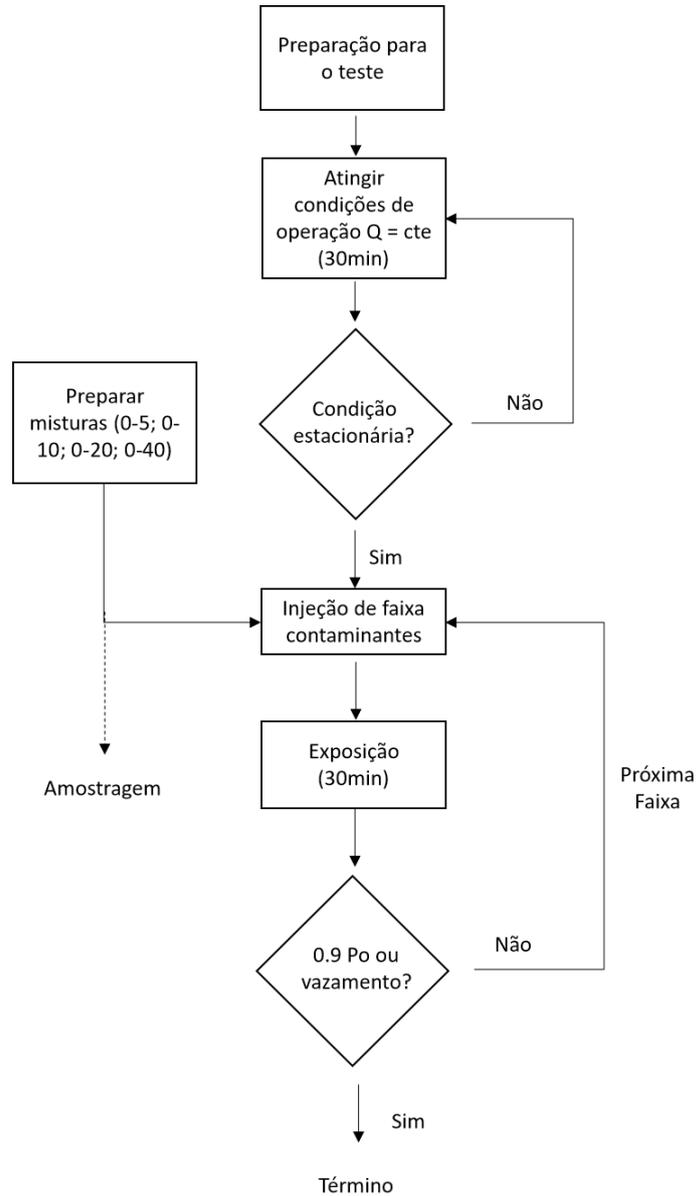


Figura 7.1: Fluxograma do teste de pressão.

O procedimento proposto inicia-se com o processo de verificação inicial das condições de teste. Dentre as verificações necessárias estão: checagem do alinhamento de válvulas, avaliação do nível do tanque e inspeção visual geral. O teste apenas deve ter início quando o sistema entrar em condição estacionária. Como o objetivo deste teste é a aferição da pressão, a vazão deverá ser mantida constante e igual a 15L/min. Estipula-se que o sistema deverá funcionar nestas condições por 30 minutos até se constatar uma condição estável.

O próximo passo é a adição da primeira faixa de contaminantes ($0 - 5 \mu\text{m}$) da Arizona Test Dust. Dada a quantidade limitada de areia de teste disponível, recomenda-se a utilização de 100g para 5m^3 de fluido, atingindo uma concentração de 20mg/L. O tempo de teste proposto seguirá o disposto em [11] e [10] sendo conduzido por 30 minutos, sendo avaliado a todo o tempo a variação da pressão da linha. Após a exposição, caso não seja constatado nem vazamentos nem queda de 90% da pressão de saída, o fluido de trabalho deverá ser filtrado antes da adição da próxima faixa de contaminantes ($0-10 \mu\text{m}$). O procedimento deve se repetir até a última faixa de contaminante ou caso seja constatada a falha, sempre mantendo a mesma concentração em volume. A figura 7.1 resume a proposta do Teste 1.

Teste 2 – Avaliação de Vazão

O segundo teste possui a mesma metodologia descrita no Teste 1, contudo, a variável fixa deverá ser a pressão de saída a fim de avaliar a variação de vazão pela válvula. Para que a pressão seja mantida constante, a MKR deverá ser operada localmente, ajustando a posição da mola interna. Para a vazão, a falha da MKR será considerada quando ocorrer redução de 70% da vazão inicial durante o teste ou quando for constatado vazamento.

7.2 Análise de Sensibilidade

A proposta de metodologia de análise probabilística é a adoção do modelo Weibull de distribuição de dados de vida, devido à sua ampla aplicação na Engenharia da Confiabilidade e a presença de um parâmetro que pode representar a tolerância à carga aplicada.

A primeira análise consistirá na abordagem probabilística através da distribuição de Weibull. A distribuição adotada será a de 2 parâmetros a qual gerará a curva de confiabilidade da válvula.

Quanto à análise de sensibilidade, é preciso identificar na literatura qual dos modelos é o mais adequado. Para isso, os modelos de Bensch e Tessmann foram comparados de acordo com os dados experimentais obtidos por ZHAO [12]. Neste

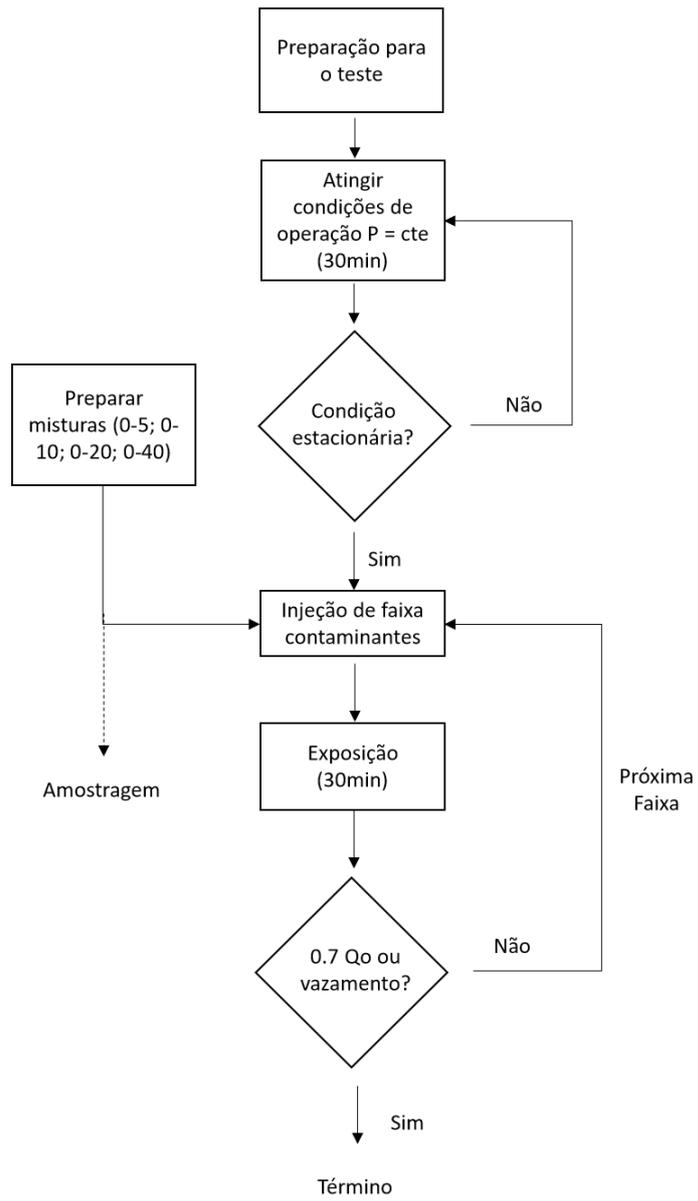


Figura 7.2: Fluxograma do teste de vazão.

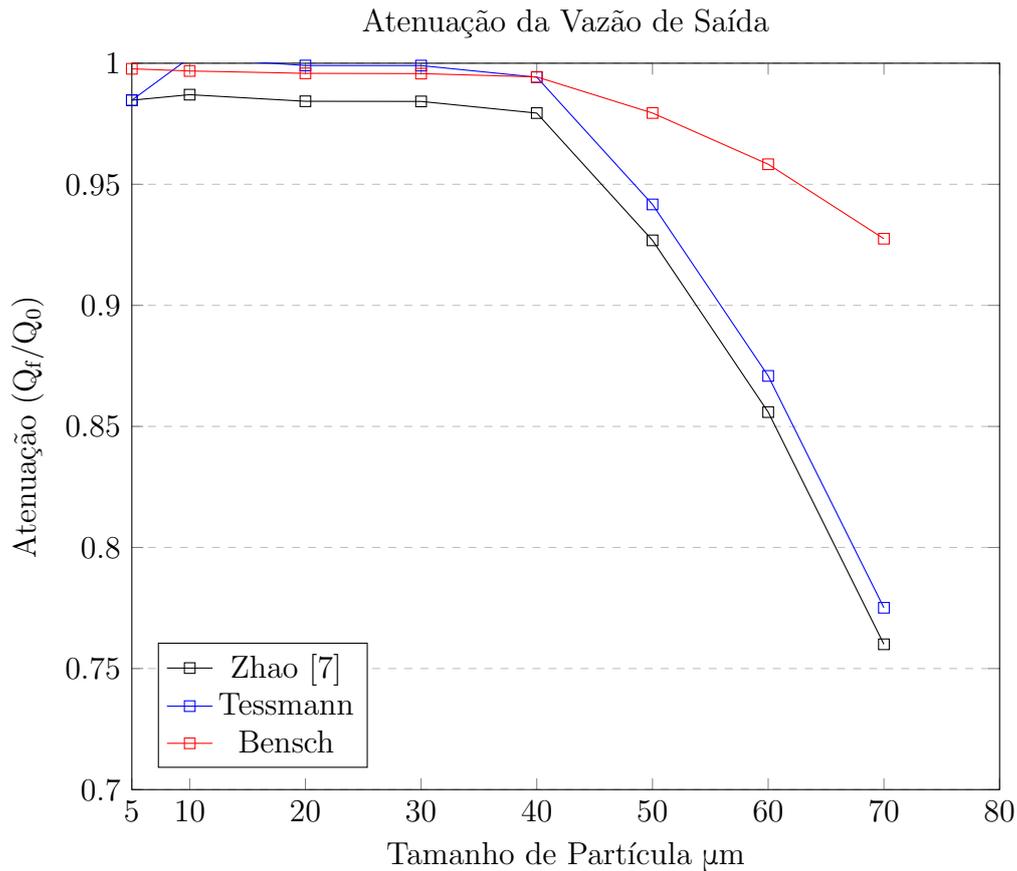
Range de Partículas (μm)	S (Tessmann)	α (Bensch)
0 – 5	4.94E-09	7.13E-17
0 – 10	-5.72E-10	6.06E-17
0 – 20	2.27E-10	7.34E-17
0 – 30	2.32E-10	7.37E-17
0 – 40	1.38E-09	9.64E-17
0 – 50	1.43E-08	3.52E-16
0 – 60	3.28E-08	7.21E-16
0 - 70	6.05E-08	1.27E-15

Tabela 7.1: Valores de Sensibilidade de Tessmann e Bensch para os dados de Zhao [7].

experimento, o objeto de teste foi uma bomba volumétrica trabalhando à pressão constante de 15MPa. A areia de teste utilizada foi a ACFTD (*Air Cleaner Fine Test Dust*) e a concentração entre injeções foi mantida constante e igual a 300mg/L.

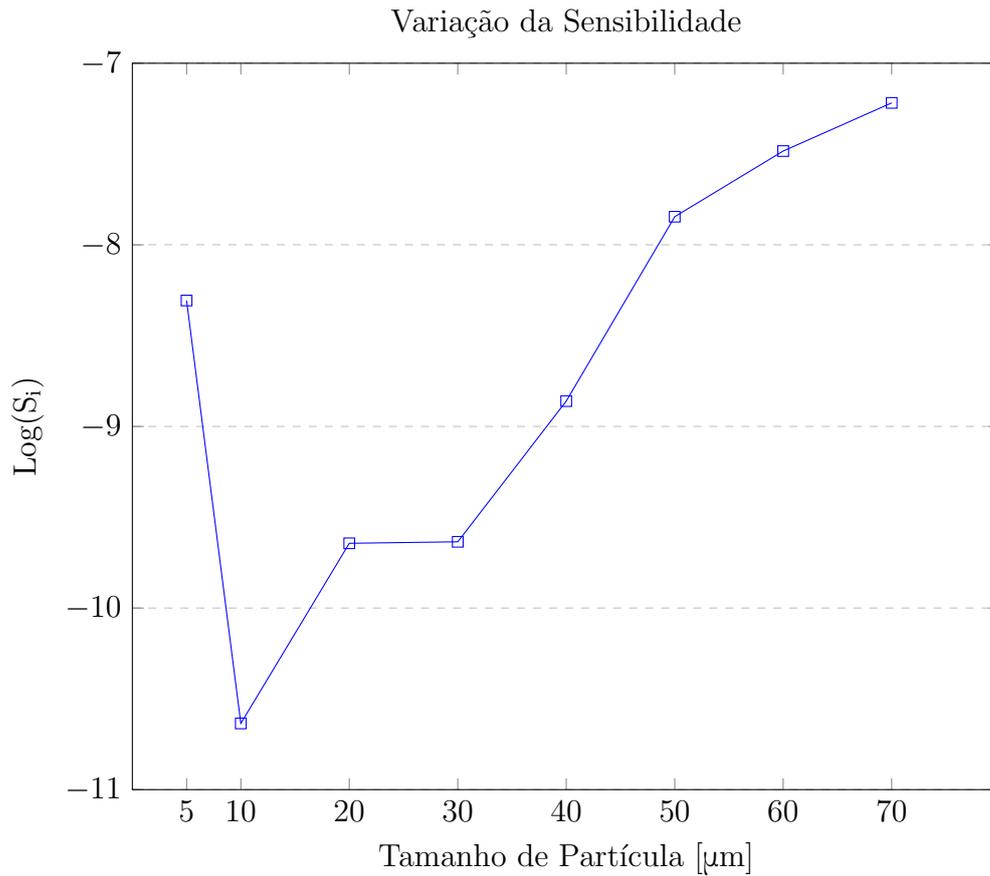
A tabela 7.1 resume os valores de sensibilidade da bomba testada por Zhao [7] à contaminação calculados por cada método, através das equações 6.20 e 6.25.

A partir dos valores de sensibilidade é possível calcular a variação de vazão esperada para a bomba em cada faixa de contaminante. O gráfico a seguir resume os valores de atenuação da vazão calculados segundo cada modelo e a comparação com a atenuação real observada nos experimentos de Zhao:



Observa-se que no modelo de Bensch a atenuação calculada foi menor do que a real enquanto que com Tessmann o resultado foi mais próximo. Isso pode ser explicado pela maneira na qual cada autor considerou a concentração de contaminante. Tessmann considera o efeito acumulado das partículas de injeções anteriores, enquanto que Bensch apenas computa o valor da concentração inicial no cálculo da sensibilidade.

Também é possível ilustrar a variação da sensibilidade da bomba para cada faixa de contaminantes, gerando um perfil de tolerância à tamanho de partículas. A análise do gráfico a seguir permite identificar o aumento da sensibilidade na medida em que maiores contaminantes são injetados. É interessante apontar que o componente é mais sensível à primeira injeção, mesmo de menor faixa de tamanho, do que injeções de até 50 µm. Logo, é possível inferir que o acúmulo de numerosas partículas de pequeno diâmetro tem maior poder de desgaste do que uma distribuição mais heterogênea. De fato, a área de contato partícula-válvula é superior para este caso.



Já a previsão da vida útil, que pode ser interpretada como o tempo médio para falha (MTTF), foi calculada pelos dois métodos. Os resultados foram resumidos na tabela 7.2:

Modelo	MTTF
Bensch	6.78h
Tessmann	3.49h
<i>Zhao [7]</i>	<i>4.1h</i>

Tabela 7.2: Comparação dos tempos de vida útil calculados por Bensch e Tessmann.

Portanto, o modelo de Tessmann não só prevê melhor a atenuação da vazão como também mais se aproxima do tempo de vida útil real experimentado pelo elemento de teste. Destaca-se ainda que o tempo calculado por Tessmann possui caráter mais conservador, característica importante no tratamento de previsão de falhas.

Neste sentido, com o aparato descrito no capítulo 5 e o procedimento da seção 7.1, as grandezas que deverão ser mensuradas no tempo em cada teste são, para cada faixa de contaminante:

- Vazão e pressão de entrada;
- Vazão e pressão de saída;
- Concentração de contaminantes [mg/L];
- Número de partículas para cada 100ml de fluido.

Com estes dados é possível obter a sensibilidade da válvula testada em cada faixa de contaminação, o tempo médio de falha e o perfil de tolerância da válvula.

7.3 Proposta de Sistema de Monitoramento Contínuo

Em campo, as MKRs não possuem dados de pressão ou vazão avaliados em tempo real. Desta maneira, a manutenção é dada por demanda ou por oportunidade, no período no qual o BOP está na superfície. Esta atitude pode representar uma perda de tempo e dinheiro haja vista que: (i) a manutenção à demanda representa tempo perdido à unidade e (ii) na manutenção por oportunidade muitas vezes os elementos de vedação e/ou a própria válvula continuam em boas condições de uso, sendo sua troca prematura.

O uso de um sistema de aquisição de dados para o profissional responsável pela manutenção do BOP forneceria a informação necessária para melhor planejar a troca do equipamento e seus elementos. O BOP já é sensoriado para controle da pressão do fluido hidráulico, uma atualização do software de aquisição e a adição de medidores de resposta rápida à jusante da MKR trariam maior confiabilidade e menor gasto com trocas desnecessárias ou, até mesmo, *downtime* da unidade. A proposta consiste, portanto, na adoção de um sistema de avaliação em tempo real do diferencial de pressão e vazão na MKR. Este sistema deve garantir que o supervisor dos equipamentos submarinos a bordo da unidade tenha ciência das variações destas grandezas no tempo.

Na MKR a ser testada na bancada experimental, a redução de 10% da pressão será considerada condição crítica de trabalho, visto que maiores reduções podem impedir o funcionamento de outros componentes do sistema. Assim sendo, o sistema de monitoramento deve indicar ao profissional responsável reduções de 2%, 5% e 8% antes de atingir o nível crítico. Uma inspeção da válvula é recomendada quando a

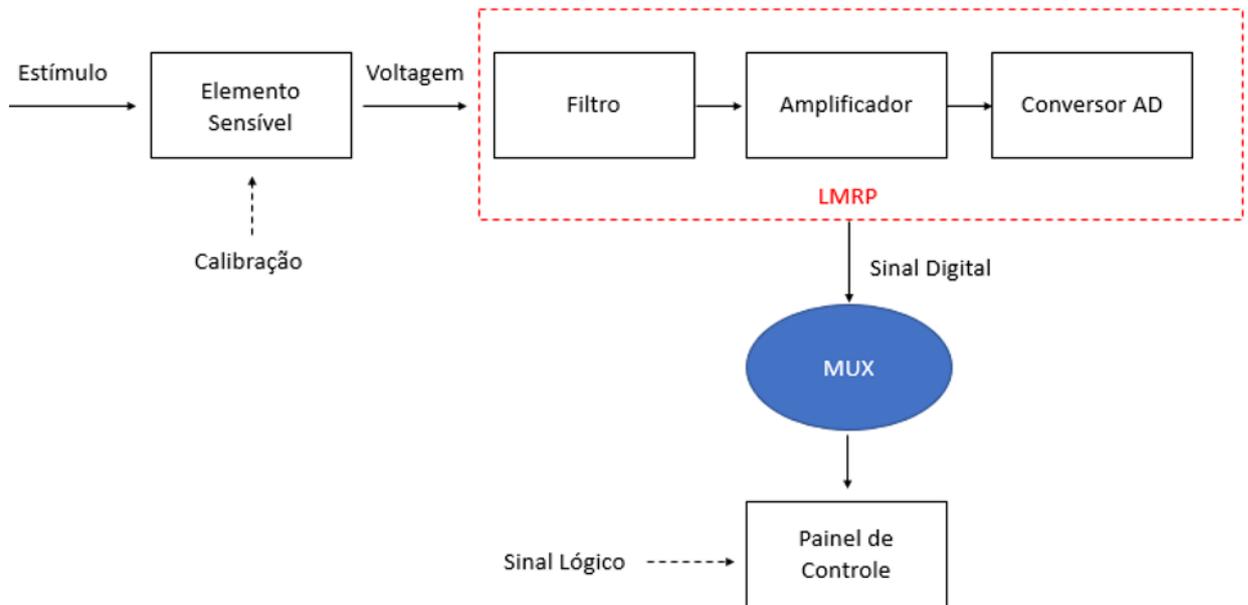


Figura 7.3: Esquemático do sensor de pressão e vazão.

pressão chegar a 95% do valor de projeto. O elemento sensível deve ter, para este propósito, uma resolução de 30psi em faixa de medida entre 0 e 4.000 psi.

Para a vazão, uma redução para 70% já se enquadra em um caso crítico. O sistema deve ser capaz de indicar reduções a partir de 5%. Como a vazão do sistema pode variar dependendo do modelo de BOP, não será aqui especificado a resolução e faixa de leitura.

O diagrama de blocos acima resume a proposta de monitoramento em tempo real. O elemento sensível presente no transdutor de pressão, após ser devidamente calibrado, deve ser capaz de enviar um sinal analógico para uma placa de aquisição a ser localizada junto aos demais itens eletrônicos do BOP. Após seu tratamento, o mesmo é convertido a sinal analógico para ser embutido ao sistema MUX e enviado à superfície.

Capítulo 8

Conclusão e Trabalhos Futuros

O conhecimento da confiabilidade de um equipamento, principalmente daqueles considerados críticos para a segurança, é fundamental para sempre garantir o funcionamento dentro das especificações de projeto. Para isso, a análise experimental e a análise de dados devem caminhar em conjunto, de forma a melhor acolher a física do problema.

Neste trabalho foram apresentadas as ferramentas utilizadas na Engenharia da Confiabilidade, os modelos de sensibilidade e a sua relação com o teste de contaminação sólida aplicada a uma válvula do sistema de controle do BOP. Junto a isso, foi desenvolvido um procedimento de teste baseado na literatura a ser aplicado na bancada experimental projetada e em fase final de comissionamento.

O próximo passo é concluir as adaptações de segurança da bancada para enfim aplicar as metodologias e análises aqui discutidas. Em especial, será interessante comparar os dados de atenuação de vazão com o calculado e identificar a variação da sensibilidade com o tamanho de partículas, assim como discutido no capítulo 7. A repetição dos testes com os mesmos modelos de válvula dará a base de dados necessária para também aplicar a distribuição Weibull de probabilidade, a fim de buscar uma correlação entre o parâmetro β e a sensibilidade.

Referências Bibliográficas

- [1] BENSCH, L. E., “Hydraulic Pump Contaminant Life Evaluation”, *Fluid Power Research Center - Oklahoma State University*, v. Stillwater, Oklahoma, 1978.
- [2] TESSMANN, R. K., H. I. T., “Hydraulic Pump Contaminant Wear, Hydraulic Failure Analysis: Fluids, Components and System Effects”, *ASTM STP 1339*, v. West Conshohocken, PA, 2001.
- [3] NELSON, W. B., “Accelerated Testing - Statistical Models, Test Plans and Data Analysis”, *Wiley Interscience*, 1990.
- [4] HOLLAND, P., “Reliability of Subsea BOP Systems for Deepwater Application, Phase II DW”, 1999.
- [5] “<https://br.pinterest.com/pin/172122016978273524/?lp=true>”, *Acessado em 12/12/2019*.
- [6] IADC, “Drilling Manual”, *11th Edition*, International Association of Drilling Contractors, 2000.
- [7] ZHAO, D., “The Contamination, Wear and Control of Piston Pump”, *Beijing: Coal industry publishing house*, 1993.
- [8] EBELING, C., “An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering”, *McGraw-Hill*, 1997.
- [9] LINDLEY, R., “Blowout Preventer Control System Reliability Primarily Focused on Subplate Mounted (SPM) Valves”, 2016.
- [10] NORVELLE, F. D., “Contamination Control – The Key to Reliability in Fluid Power Systems”, 1982.

- [11] FITCH, E. C., “Valve Contaminant Sensitivity - Section III, MERAD-COM/OSU Hydraulic System Reliability Program”, *Annual Report*, v. Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma, 1978.
- [12] USDOD, “Procedures For Performing A Failure Mode, Effects And Critically Analysis”, *Mil-Std-1629a24*, U.S. Department of Defense, 1980.
- [13] RELIASOFT, “Life Data Analysis Reference”, *ReliaSoft Corporation - Worldwide Headquarters*, Tucson, Arizona 85710-6703.
- [14] ABS, “Blowout Preventer (BOP) Failure Event and Maintenance, Inspection and Test (MIT) Data Analysis Final Report”, 2013.
- [15] ASME, “Inspection Planning Using Risk-Based Methods”, *PCC-3-2007*, 2007.
- [16] FIGLIOLA, R. S., “Theory and Design for Mechanical Measurements”, *John Wiley and Sons - 5th Ed.*

Apêndice A

FMEA para Contaminação Sólida

Uma breve análise dos modos de falha relacionados à presença de contaminantes foi desenvolvido para mapear os possíveis efeitos a serem observados nos experimentos. Os critérios de frequência e criticidade foram divididos em "Baixo", "Médio" e "Alto".

Componente	Item Avaliado	Função	Modos de Falhas	Causas	Efeitos da Falha		Método de Detecção de Falha	Mitigação	Frequência	Criticidade
					Efeitos Locais	Efeitos Globais				
Reguladora MKR 1''	Selo Hidráulico (Supply)	Vedação	Desgaste da mola	Contaminação do fluido / Má instalação do selo	Queda na vazão através da válvula e vazamentos	Aumento no tempo de operação do BOP	Monitoramento contínuo da vazão e nível de contaminação do fluido	Controle de Filtragem / Procedimento de Instalação	Alta	Média
	Selo Hidráulico (Regulated)	Vedação	Desgaste da mola	Contaminação do fluido / Má instalação do selo	Queda na vazão através da válvula e vazamentos	Aumento no tempo de operação do BOP	Monitoramento contínuo da vazão e nível de contaminação do fluido	Controle de Filtragem / Procedimento de Instalação	Alta	Média
	O Ring do pistão	Vedação	Rompimento	Contaminação do fluido / Má instalação	Queda na vazão através da válvula e vazamentos	Aumento no tempo de operação do BOP	Monitoramento contínuo da vazão e nível de contaminação do fluido	Controle de Filtragem / Procedimento de Instalação	Alta	Média
	Caixa de Selagem	Vedação e Regulagem da saída	Desgaste / Remoção de Material	Contaminação do fluido / Má instalação	Queda na pressão regulada	Não acionamento das funções do BOP	Monitoramento contínuo da pressão de saída e nível de contaminação do fluido	Controle de Filtragem	Baixa	Alta
	Placa de Assentamento (Seal Plate)	Apoiar deslocamento do selo	Desgaste / Remoção de Material	Contaminação do fluido	Queda na pressão regulada	Não acionamento das funções do BOP	Monitoramento contínuo da pressão de saída e nível de contaminação do fluido	Controle de Filtragem	Baixa	Alta